

**М.А. Амелина
С.А. Амелин**

**Программа
схемотехнического
моделирования
Micro-Cap.
Версии 9, 10**

2012

Амелина М.А., Амелин С.А.

Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. – Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. – 617 с., ил.

Рассмотрена методика моделирования электронных устройств с использованием программы Micro-Cap v.9.x, v.10.x фирмы Spectrum Software (www.spectrum-soft.com). Представлен краткий экскурс, демонстрирующий основные возможности программы, приведены примеры моделирования различных классов электронных устройств, затем дана подробная справочная информация по использованию Micro-Cap.

Изложены практические рекомендации, существенно упрощающие процесс получения работоспособных моделей сложных электронных схем. Описаны параметры моделей компонентов и способы создания моделей на основе справочных параметров. Подробно изложены особенности моделей цифровых компонентов. Рассмотрен порядок синтеза пассивных и активных фильтров. Описание возможностей программы сопровождается большим числом примеров, иллюстрирующих построение схем моделирования, способы задания электронных компонентов, проведение различных видов анализа и обработку полученных результатов.

Для преподавателей, студентов и аспирантов учебных заведений высшего профессионального образования по направлениям «Электроника и микроэлектроника», специалистов, занимающихся разработкой и исследованием электронных устройств, а также подготовленных радиолюбителей.

Учебное пособие

Амелина Марина Аркадьевна, **Амелин** Сергей Александрович

ПРОГРАММА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MICRO-CAP.
ВЕРСИИ 9, 10

Электронное издание

Формат 70x100/16

© М.А. Амелина, С.А. Амелин, 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Программа схемотехнического анализа Micro-Cap пользуется достаточно большой популярностью. Это связано с тем, что она имеет удобный, дружелюбный интерфейс и предъявляет достаточно скромные требования к программно-аппаратным средствам персонального компьютера. Однако предоставляемые при этом возможности достаточно велики. Micro-Cap позволяет анализировать аналоговые, цифровые и смешанные (аналого-цифровые) устройства, а также осуществлять синтез пассивных и активных фильтров. Опытные пользователи могут в нестандартной ситуации создавать собственные макромоделли, облегчающие имитационное моделирование без потери существенной информации о поведении системы.

В книге дано подробное описание двух версий Micro-Cap, что позволяет использовать ее как при работе с версией 9, так и с версией 10.

Авторы более 15 лет используют программы этого семейства (начиная с Micro-Cap II) для проведения научных исследований в области силовой электроники, а также в процессе обучения студентов Смоленского филиала Московского энергетического института. За это время накоплен достаточно большой практический опыт и выявлены характерные особенности этой программы, многие из которых отражены в этой книге.

Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap может представлять интерес для широкого круга людей, занимающихся электроникой или изучающих ее. В первую очередь Micro-Cap можно рекомендовать студентам электротехнических и радиотехнических специальностей, а также радиолюбителям и инженерам-разработчикам. Правда, для последних существенным недостатком Micro-Cap можно считать отсутствие встроенных средств трассировки печатных плат, для этих целей придется использовать программы сторонних производителей.

Программа Micro-Cap интенсивно используется при изучении курсов «Компьютерный анализ и синтез электронных устройств» и «Математическое моделирование в электронике», изучаемых на кафедре «Электроника и микропроцессорная техника» Смоленского филиала МЭИ при подготовке специалистов по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника». Студенты активно используют эту программу при выполнении выпускных работ, дипломных и курсовых проектов. Кроме того, использование Micro-Cap позволяет студентам глубже осваивать некоторые аспекты таких курсов, как «Электронные цепи и микросхемотехника», «Магнитные элементы электронных устройств», «Электронные промышленные устройства» и т.п.

Помимо описания программ Micro-Cap версий 9 и 10, в книге приведены примеры моделирования основных типов электронных устройств, а также изложены приемы, позволяющие проводить моделирование сложных электронных схем с достаточной для инженерной практики точностью.

Все рассматриваемые в книге примеры моделирования доступны в виде исходных файлов на сайте <http://www.microcap-model.narod.ru> (архивный файл *book-mc.rar*). Там же выложены дополнительные библиотеки компонентов и их изображений, а также справочные и учебные материалы по моделированию и электронике.

ВВЕДЕНИЕ

Micro-Cap — это универсальная программа схемотехнического анализа, предназначенная для решения широкого круга задач. Характерной особенностью этой программы, впрочем, как и всего семейства Micro-Cap [1–4], является наличие удобного и дружелюбного графического интерфейса, что делает его особенно привлекательным для непрофессиональной аудитории. Несмотря на достаточно скромные требования к программно-аппаратным средствам ПК (процессор не ниже Pentium II, ОС Windows 95/98/ME или Windows NT4/2000/XP, память не менее 64 Мб, монитор не хуже SVGA), его возможности достаточно велики. С его помощью можно анализировать не только аналоговые, но и цифровые схемы. Возможно также смешанное моделирование аналого-цифровых электронных устройств, а также синтез фильтров.

Начать работать в Micro-Cap можно даже без глубокого освоения программы. Достаточно ознакомиться со встроенным демонстрационным роликом и посмотреть базовые примеры (их в комплекте около 300). Опытные пользователи, используя обширную библиотеку компонентов и собственные макромодели, могут анализировать сложные электронные системы. Грамотное использование упрощенных допущений позволяет проводить расчеты режимов работы сложных устройств с достаточно высокой степенью точности.

Micro-Cap 9, 10 отличаются от младших представителей своего семейства более совершенными моделями электронных компонентов и алгоритмами расчетов. По возможностям схемотехнического моделирования он находится на одном уровне с интегрированными пакетами ORCAD и PCAD2002 — достаточно сложными в освоении средствами анализа и проектирования электронных устройств, подразумевающими в первую очередь профессиональное использование. Полная совместимость со SPICE-моделями и SPICE-схемами в сочетании с развитыми возможностями конвертирования позволяет использовать в Micro-Cap все разработки и модели, предназначенные для этих пакетов, а полученные навыки моделирования позволят в случае необходимости быстро освоить профессиональные пакеты моделирования.

Micro-Cap 9, 10 предоставляют обширные возможности для анализа силовых преобразовательных устройств. Программа имеет настройки, включение которых оптимизирует алгоритмы для расчета силовых схем, библиотека компонентов содержит большое число обобщенных ШИМ-контроллеров и непрерывных моделей основных типов преобразователей напряжения для анализа устойчивости стабилизированных источников питания на их основе.

Перечисленные достоинства делают программу Micro-Cap весьма привлекательной для моделирования электронных устройств средней степени сложности. Удобство в работе, нетребовательность к ресурсам компьютера и возможность анализировать электронные устройства с достаточно большим количеством компонентов позволяют успешно использовать ее как радиолюбителям и студентам, так и инженерам-разработчикам. Кроме того, программы семейства Micro-Cap активно используются в научно-исследовательской деятельности.

Программа Micro-Cap была разработана в 1982 году фирмой Spectrum Software. Первой версии программы авторам увидеть не довелось, а вот Micro-Cap II уже начиная с 1989 года использовался при обучении студентов

Смоленского филиала МЭИ. За это время авторами накоплен достаточно большой опыт работы с различными версиями этой программы. По нашему твердому убеждению, несколько пренебрежительное отношение к этой программе в среде инженеров-разработчиков электронной техники абсолютно неоправданно. Micro-Cap давно уже вышел из «детского» возраста. Более того, по возможностям моделирования и обработки результатов он уже давно ничем не уступает, а даже превосходит аналогичные программы.

Первые версии Micro-Cap, действительно, были достаточно примитивными и малопригодными для решения реальных инженерных задач схемотехнического проектирования. Они позволяли рассчитывать лишь простые аналоговые схемы. Для расчета цифровых устройств использовалась другая программа той же фирмы – MicroLogic (позднее она была интегрирована в Micro-Cap). Но даже этого вполне хватало для обучения студентов основам электроники.

Более поздние версии программы позволяли решать уже достаточно сложные задачи. С каждой версией росла функциональность, совершенствовались модели и расчетные алгоритмы. На данный момент можно с уверенностью утверждать, что Micro-Cap позволяет проводить моделирование на том же качественном уровне, что и классическая программа схемотехнического моделирования — PSPICE. Более того, Micro-Cap полностью совместим с ней на уровне моделей и подсхем, что позволяет использовать при расчетах обширные SPICE-библиотеки, предлагаемые разработчиками электронных компонентов.

Особо хочется отметить интерфейс программы. Разработчики очень серьезно подходят к этому вопросу, начиная с младших версий. Достаточно сказать, что еще до повсеместного распространения Windows, версия Micro-Cap IV, выпущенная в 1992 году, уже имела очень удобный оконный графический интерфейс, который был совсем не характерен для программ того времени. Этот интерфейс позволял под DOS получать практически все удобства, которые имеют в настоящее время пользователи Windows.

В последующих версиях также много внимания уделялась повышению удобства использования программы. По мнению авторов книги, интерфейс Micro-Cap настолько интуитивно понятен, что позволяет человеку, имеющему базовые навыки работы с персональным компьютером, начать использование этой программы, даже не читая руководство. Разработчиками найден компромисс между простотой и функциональностью. В нем нет имитации «измерительных приборов», загромождающих Workbench [5]. При расчете не открывается большое число окон со сложными взаимосвязями между ними, как в DESIGNLAB [6]. Не зря его очень любят студенты — простенькую схему им в большинстве случаев удастся промоделировать в Micro-Cap и без прочтения громоздких руководств. А если учесть, что даже в демонстрационной версии Micro-Cap приведены примеры моделирования практически всех типов электронных устройств (как аналоговых, так и цифровых), то это существенно упрощает освоение программы и изучение приемов моделирования. Достаточно открыть пример и провести свой расчет «по образу и подобию». А полная версия содержит уже столько примеров, что изучение только тех схем, которые содержатся в библиотеке Micro-Cap, в состоянии заметно рас-

ширить знания, полученные в рамках базовых ВУЗовских курсов электроники и схемотехники.

Кроме того, в Micro-Cap имеется функция демонстрации основных возможностей программы, наглядно представляющая основные приемы работы с ней. На сайте разработчиков (<http://www.spectrum-soft.com>) доступно подробное описание в формате PDF (на английском языке), составленное очень просто и понятно. Для его изучения даже особого знания языка не требуется, поскольку все поясняется примерами и иллюстрациями. Поэтому Micro-Cap можно рекомендовать как одну из лучших программ для обучения основам электроники. Особенно, если учесть, что разработчики Micro-Cap бесплатно предлагают к свободному использованию демонстрационную версию программы. Она обладает практически всеми качественными возможностями полнофункциональной, а ограничения носят по большей части количественный характер (демонстрационная версия позволяет моделировать схемы, число компонентов в которых не превышает 50, расчеты ряда схем проходят несколько медленнее, чем в полнофункциональной версии, ограничена библиотека компонентов, нет встроенной программы подготовки собственных моделей и некоторых других дополнительных функций). Для процесса обучения эти ограничения не являются особо существенными. Достаточно сказать, что с использованием демонстрационной версии программы Micro-Cap IV авторами книги были проведены необходимые расчеты динамических процессов в преобразователях напряжения со сложной топологией силовой части, а также выполнено моделирование замкнутых систем стабилизации напряжения с использованием этих преобразователей, которые в дальнейшем стали основой диссертационных работ. Таким образом, даже демонстрационная версия программы может быть использована для серьезных научных исследований, не говоря уже об учебных задачах.

Использование программы Micro-Cap позволяет не только изучать работу электронных схем, но и приобретать навыки наладки электронных устройств. Основные приемы получения рабочей модели ничем не отличаются от методик введения в рабочий режим реальных электронных устройств. Именно эти свойства и позволяют рекомендовать его в первую очередь студентам и радиолюбителям. Как отметил один из радиолюбителей, использующих Micro-Cap, основная проблема при работе с ним — начинает ржаветь паяльник...

Важным плюсом можно считать и то, что в настоящее время в сети Internet можно найти достаточно большие библиотеки отечественных и зарубежных электронных компонентов. В частности, библиотеки компонентов, используемых в примерах этой книги, размещены авторами на сайте <http://www.microcap-model.narod.ru/>

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АЛУ** — арифметическо-логическое устройство
АЧХ — амплитудно-частотная характеристика
АЦП — аналого-цифровой преобразователь
ВАХ — вольтамперные характеристики
ВУЗ — высшее учебное заведение
ВЧ — высокие частоты
ГЛИН — генератор линейно изменяющегося напряжения
ДНФ — дизъюнктивно нормальная форма записи логических выражений (логическая сумма логических произведений)
ЕСКД — единая система конструкторской документации
ИИВЭП — импульсный источник вторичного электропитания
ИМС — интегральная микросхема
ИС — интегральная микросхема
ИТУН — источник тока, управляемый напряжением
КМОП — комплиментарная логика на структуре металл-окисел-полупроводник
КНФ — конъюнктивно нормальная форма записи логических выражений (логическое произведение логических сумм)
КПД — коэффициент полезного действия
ЛАЧХ — амплитудно-частотная характеристика с логарифмическим масштабом по 2-м осям: оси частот и оси амплитуд
МДП — структура метал-диэлектрик-полупроводник
МОП — структура метал-окисел-полупроводник
НЧ — низкие частоты
ООС — отрицательная обратная связь
ОС — операционная система
ОУ — операционный усилитель
ПЗУ — постоянное запоминающее устройство
ПИД — пропорционально интегрирующее дифференцирующее звено
ПЛМ — программируемая логическая матрица
СГС — система единиц измерения, которая широко использовалась до принятия международной системы единиц (СИ) и продолжает использоваться в физике и астрономии
СИ — международная система единиц измерений
ТТЛ — транзисторно-транзисторная логика
УГО — условное графическое обозначение
ФВЧ — фильтр верхних частот
ФК — фазовый корректор
ФНЧ — фильтр нижних частот
ФПЗ — фильтр полосно-заграждающий
ФПП — фильтр полосно-пропускающий
ФЧХ — фазочастотная характеристика
ЦАП — цифроаналоговый преобразователь
ШИМ — широтно-импульсный модулятор
ЭДС — электродвижущая сила
ЭСЛ — эмиттерно-связанная логика

3D — трехмерный
AC — переменный ток
AVG — среднее значение
BJT — биполярный транзистор (Bipolar Junction Transistor)
BW — ширина полосы частот сигнала
CM — Current Mode, управление относительной длительностью проводящего состояния силового ключа в ИИВЭП с местной обратной связью по току силового ключа
GaAsFET — полевой транзистор с управляющим p-n переходом на основе арсенида галлия
DC — постоянный ток
DFF — синхронный D-триггер, переключающийся по фронту синхроимпульса
DLTCH — синхронный D-триггер, управляемый уровнем синхроимпульса (защёлка)
FFT — быстрое преобразование Фурье
IBIS — спецификация буфера ввода-вывода (*Input output Buffer Information Specification*)
IFT — обратное преобразование Фурье
IGBT — биполярные транзисторы с изолированным затвором
IMD — коэффициент интермодуляционных искажений
JFET — полевой транзистор с управляющим p-n переходом (Junction Field Effect Transistor)
JKFF — JK-триггер, переключающийся по срезу синхроимпульса
MC10 — Micro-Cap 10
MC9 — Micro-Cap 9
MFB — многопетлевая обратная связь
MOSFET — полевой транзистор со структурой металл-окисел-полупроводник (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)
MS — Microsoft
NTSC — один из стандартов телевизионного сигнала
OPAMP — операционный усилитель
PLA — программируемая логическая матрица
PID — пропорционально интегрирующее дифференцирующее звено
PSS (Periodic Steady State) — стационарный режим процесса с периодическими воздействиями
PWM — широтно-импульсный модулятор
RLC — звено второго порядка на основе соединения резистора, конденсатора и катушки индуктивности
RMS — среднеквадратичное значение
SMPS — импульсные источники питания
SNR — signal to noise ratio, отношение сигнал-шум
SPICE — язык моделирования электронных схем
SRFF — синхронный RS-триггер, управляемый уровнем синхроимпульса
UCE — напряжение коллектор-эмиттер
URL — Интернет-адрес
VM — Voltage Mode, управление относительной длительностью проводящего состояния силового ключа в ИИВЭП

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММАХ MICRO-CAP 9, 10

1.1. Возможности программ Micro-Cap 9, 10

1.1.1. Графические возможности

- Построение принципиальных и функциональных электрических схем при помощи встроенного графического редактора с использованием библиотеки условных графических обозначений (УГО) электронных компонентов.
- Создание для каждого компонента нескольких вариантов УГО.
- Выбор одного из вариантов УГО в соответствии с американскими, европейскими либо иными стандартами.
- Изменение УГО компонентов в соответствии с ГОСТ (по умолчанию используется американский стандарт).
- Создание собственных УГО с помощью встроенного редактора Shape Editor.
- Нанесение текстовых надписей на поле принципиальной схемы, в том числе и текстовых обозначений основных узлов (для удобства моделирования). Возможность включения/отключения отображения текстовых надписей на принципиальной схеме. Неприятная особенность – в версии MC9 (и всех более младших) нельзя использовать строчную букву «ю». Она вводится, но теряется при сохранении файла. Вместо нее приходится использовать прописную «Ю». Эта ошибка исправлена в версии MC10.
- Добавление к принципиальной схеме рамки и штампа с основными сведениями о схеме.
- Построение различных геометрических фигур (прямоугольников, кругов, линий), используемых для выделения законченных функциональных блоков схемы моделирования.
- Вставка и размещение на поле принципиальной схемы изображения со вспомогательной информацией из файла любого общепринятого графического формата.
- Размещение на поле принципиальной схемы (или в специальном текстовом окне) текстовых директив управления моделированием, задания параметров моделей, задания глобальных параметров моделирования.
- Отображение номеров узлов принципиальной схемы, присваиваемых графическим редактором при вводе схемы.
- Выбор показываемых атрибутов компонента электронной схемы (номинального значения, наименования выводов, позиционного обозначения, параметров и имени макромодели и пр.) путем установки/снятия флагов в окне задания параметров соответствующего компонента.
- Включение/отключение показа всех разрешенных текстовых атрибутов электронных компонентов схемы.
- Использование координатной сетки с различным шагом, показ которой можно включать/отключать.
- Использование «растягивающихся проводников», не нарушающих электрические соединения при перемещении компонентов принципиальной схемы.

- Масштабирование изображения принципиальной схемы на экране (увеличение, уменьшение).
- Поиск компонента на принципиальной схеме по заданному признаку.
- Навигация по схеме с помощью линеек прокрутки и протяжки правой клавиши мыши.
- Расстановка меток (флагов) на принципиальной схеме большого размера для быстрой навигации по схеме.
- Возможность показа точек выводов компонентов для выявления отсутствия соединения между ними.
- Возможность изменения цветовых и шрифтовых параметров отображения элементов схем отдельно по элементам или перед началом ввода для всей принципиальной схемы.
- Операции с выделенным блоком принципиальной схемы (копирование, отражение, размножение, и т.д.).
- Условный и безусловный запрет выделенного схемного блока для всех видов анализа. При запрете схемный блок отображается бледными линиями.
- Размещение схемы моделирования на нескольких листах (в нескольких окнах).

1.1.2. Моделирование

- Моделирование режимов работы электронных устройств, заданных с помощью принципиальных и функциональных схем.
- Анализ переходных процессов в схемах при подаче напряжения питания и (или) воздействий произвольной формы с построением графиков переменных состояния схемы и их функций:
 - зависящих от времени;
 - зависящих друг от друга;
 - разложенных в ряд Фурье по гармоническим составляющим.
- Анализ малосигнальных частотных характеристик схемы (линеаризованной в окрестности режима по постоянному току) при воздействии на нее одного или нескольких источников гармонического сигнала с постоянной амплитудой и меняющейся частотой. При этом возможен вывод следующих графиков:
 - зависимости комплексных значений переменных состояния (амплитуды, фазы, групповой задержки) от частоты в линейном, логарифмическом, полулогарифмическом (логарифмическом по оси X или по частоте и линейным по оси Y) масштабах;
 - зависимости составляющих комплексных величин переменных состояния друг от друга (например, построение годографа радиус-вектора переменной состояния при использовании в качестве переменной X — частотно-зависимой действительной части, в качестве переменной Y — частотно-зависимой мнимой части);
 - зависимости спектральных плотностей напряжений шума, приведенных к указанным входному и выходному узлам, от частоты.
- Анализ передаточных характеристик по постоянному току. Возможно проведение анализа при изменении двух входных переменных, что позволяет строить на графике семейства характеристик устройства (как, например,

семейство выходных характеристик биполярного транзистора IC(UCE) при различных значениях тока базы IB). При этом возможен вывод следующих графиков:

- зависимости выбранных переменных состояния от изменяемой входной переменной 1 (DCINPUT1);
- зависимости переменных состояния схемы друг от друга.
- Использование буфера графиков для трех основных режимов анализа, позволяющее воспроизвести в окне графиков проводимого вида анализа результаты предыдущих сеансов моделирования всех видов текущей схемы и других схем.
- Динамический анализ схемы по постоянному току с отображением на схеме (по выбору) напряжений, токов, мощностей, состояний полупроводниковых приборов при изменении с помощью движковых регуляторов (SLIDERS) величин источников ЭДС, тока, сопротивлений резисторов.
- Динамический малосигнальный анализ схемы по переменному току (линеаризованной в окрестности рабочей точки по постоянному току) с показом на схеме величин комплексных переменных состояния схемы при различных частотах (задаваемых списком) при изменении величин пассивных компонентов (резисторов, индуктивностей, конденсаторов) с помощью движковых регуляторов — SLIDERS.
- Динамический анализ переходных процессов в схеме с выводом в графическое окно всех заданных переменных в виде графиков во временной области при изменении с помощью движковых регуляторов (SLIDERS) или другим способом параметров схемы. При этом возможен режим с накоплением всех вариантов графиков или режим отображения последнего варианта.
- Расчет чувствительностей в режиме по постоянному току. В этом режиме рассчитываются чувствительности одной или нескольких выходных переменных к изменению одного или нескольких входных параметров (частные производные по входным параметрам). В качестве входных изменяемых параметров для этого вида анализа могут выступать все параметры моделей, величины пассивных компонентов, символьные параметры.
- Расчет малосигнальных передаточных функций в режиме по постоянному току. Рассчитывается отношение изменения выходного выражения к вызвавшему это изменение малому возмущению входного источника постоянного напряжения (тока). При этом автоматически рассчитываются входное (относительно клемм входного источника) и выходное (относительно узлов выходного напряжения) сопротивления схемы на постоянном токе.
- Расчет нелинейных искажений усилительных схем с использованием математического аппарата спектрального Фурье-анализа.
- Многовариантный анализ для 3-х основных режимов моделирования: переходных процессов, малосигнальных частотных характеристик и передаточных характеристик по постоянному току. При этом могут изменяться номиналы простых компонентов, величины параметров моделей компонентов, значения символьных переменных с линейным и логарифмическим шагом с возможностью выбора одновременного изменения до 20 параметров или организации до 20 вложенных циклов. Имеется возможность

автоматической подписи на выходных графиках каждого варианта анализа. При использовании многовариантного анализа актуально 3D-моделирование, вызываемое из меню используемого вида анализа. При этом по оси Z откладывается значение варьируемого параметра (или номера варианта при статистическом анализе Монте-Карло) и в пространстве строится поверхность, на которой лежат все кривые многовариантного анализа.

- Параметрическая оптимизация схемы для всех режимов анализа (кроме Sensitivity и Transfer function). Для трех основных режимов моделирования оптимизируемая функция выбирается из меню PERFORMANCE, включающего большой набор стандартных параметров графиков (типа длительность нарастания/спада, глобальный максимум/минимум и т.п.).
- Анализ Монте-Карло — многовариантный анализ при статистическом разбросе параметров компонентов в каждом из трех основных режимов моделирования. Внутри этого анализа возможен вывод гистограмм распределения заданной функции (например, длительности фронта, глобальных максимума и минимума) по интервалам значений.
- Использование графического постпроцессора PROBE при анализе переходных процессов, малосигнальном частотном анализе и анализе передаточных характеристик по постоянному току, которое позволяет выводить любые графики переменных состояния схемы без повторения расчета. Кроме того, пользователь получает дополнительные удобства для вывода графиков интересующих переменных состояния схемы, которые появляются в графическом окне после клика в соответствующем месте схемы.

1.1.3. Синтез аналоговых фильтров

- Синтез фильтров в соответствии с заданными параметрами: типа фильтра (ФНЧ, ФВЧ, полосно-пропускающего – ФПП, полосно-заграждающего – ФПЗ, фазового корректора – ФК), полиномиальной аппроксимации (Батерворта, Чебышева 1-го и 2-го рода, Бесселя, Кауэра), параметрами АЧХ (коэффициент передачи, пульсации, ослабление, полоса частот пропускания (задержания)).
- Синтез пассивных фильтров в виде последовательного соединения RLC звеньев.
- Синтез активных фильтров в виде последовательного соединения различных звеньев 2-го порядка на основе ОУ (Саллена-Ки, с многопетлевой обратной связью MFB, Тоу-Томаса, Флейшера-Тоу, Кервина-Хьюлсмана-Ньюкомба, Аккерберга-Мосберга, звена 2-го порядка с гиратором на ОУ).

1.1.4. Создание новых моделей компонентов

- Создание моделей диодов, биполярных и полевых транзисторов, операционных усилителей, магнитных сердечников на основе справочных или экспериментальных данных с помощью встроенного оптимизатора (функции MODEL).
- Оформление моделей в виде схем-макроопределений с обозначенными выводами и списком параметров, которым затем в редакторе компонентов

присваивается имя и УГО и тем самым добавляются новые компоненты, доступные для построения схем и моделирования.

1.1.5. Основные возможности обработки результатов анализа

- Панорамирование (протаскивание) активного окна графиков с помощью правой клавиши мыши.
- Вывод на экран части графика, заключенного в прямоугольную рамку, обозначенную протяжкой левой клавиши мыши (лупа координат).
- Нанесение на график значений координат X,Y выбранной точки выбранного графика активного графического окна.
- Нанесение расстояния по горизонтали между двумя выбранными точками графика.
- Нанесение расстояния по вертикали между двумя выбранными точками графика.
- Нанесение на график текстовых надписей в относительных (относительно графика выходной переменной) и абсолютных координатах.
- Использование динамической размерной линии (Performance Tag), показывающей заданный параметр графика для всех вариантов многовариантного анализа.
- Управление координатной сеткой построенных графиков.
- Управление параметрами графических окон (цвет, толщина и тип линий координатной сетки и графиков, цвет, тип и размер шрифтов для текстовой информации, цвет окна, цвет заднего фона и т.п.).
- Возможность нанесения на графики специальных значков для их идентификации в режиме черно-белой печати.
- Возможность изображения на графиках расчетных точек жирными точками.
- Команды меню электронной лупы:
 - автоматическое масштабирование графиков активного графического окна;
 - возврат к исходному масштабу (установленному при окончании расчета);
 - разметка отдельных графиков многовариантного анализа;
 - задание параметров анимации, позволяющих замедлять вывод графиков на экран;
 - задание различных способов нормирования графиков;
 - режим связанных курсоров — синхронное перемещение курсоров по всем графическим окнам;
 - перемещение левого и (или) правого курсора в точки(y) с заданными свойствами, выбранными с помощью функции Performance (функции типа длительность нарастания (спада) вдоль различных осей, глобальный (локальный) максимум (минимум) и т.п.);
 - нанесение на график координат точек пересечения курсора с графиком, размерных горизонтальных и вертикальных линий;
 - переход к указанной реализации многовариантного анализа;
 - режим 2-х электронных курсоров для считывания координат двух выбранных левой и правой клавишей мыши точек графика активного графического окна. В этом режиме также доступны активизация

верхнего (нижнего) графика семейства графиков многовариантного анализа (Stepping); команды перемещения курсоров по локальным (глобальным) максимумам (минимумам), точкам перегиба, к наиболее высокой (низкой) точке семейства графиков многовариантного анализа (Stepping и Монте-Карло).

- Использование функций Performance для обработки результатов расчетов (определение максимального, минимального, среднего, среднеквадратичного значения, времени нарастания, периода и т.п.).
- Обработка результатов анализа переходных процессов с использованием математического аппарата спектрального Фурье-анализа.

1.2. Отличительные особенности Micro-Cap 9, 10 по сравнению с Micro-Cap 8

Схемный редактор Circuit Editor

- Включаемая/отключаемая панель компонентов с кнопкой поиска, повторяющая структуру меню и редактора компонентов, облегчает выбор компонента для использования его при построении схемы моделирования.
- Усовершенствована команда *PATH* меню *FILE*. Добавлен флажок «*Look in subfolders*», позволяющий искать рабочие данные программы во всех подкаталогах папок, прописанных в 3-х строках команды *PATH*. Так, например команда *File>Cleanup* при установленном флажке теперь очищает от ненужных вспомогательных файлов все папки, прописанные в диалоговом окне *PATH*, а также их подкаталоги.
- Возможность выбора стандарта прорисовки УГО компонента путем задания атрибута *SHAPEGROUP* в окне задания параметров компонента.
- Поиск указанного модельного параметра в окне задания атрибутов компонента. Удобен при большом количестве модельных параметров.
- Рисование шин (множества одиночных проводников) на принципиальной схеме.
- Возможность условного/безусловного запрета выделенного схемного блока для всех видов анализа. При запрете схемный блок рисуется бледными линиями.
- Новые команды управления текстом: (директивы *.IF*, *.ELSE*, *.ELIF* и *.ENDIF*), допускающие разрешение текстового блока по условию.
- Запрет/разрешение схемного текста (флажок «*Enable*» в окне *Grid Text*).
- Возможность проведения вспомогательных вычислений на поле принципиальной схемы с помощью установки в окне *Grid Text* флажка «*Formula delimiter*».
- Возможность определения собственных «горячих клавиш» для избранных команд: *OPTIONS>Preferences>Shortcuts*.
- Команда подбора комбинации (параллельно-последовательного соединения) пассивных компонентов с номиналами из стандартных рядов для произвольно заданных сопротивления, емкости, индуктивности.
- Показ краткой информации о компоненте при наведении на него курсора мыши.

- Команда растягивающихся соединений *Rubberbanding* теперь создает только ортогональные проводники.
- Команда копирования/вставки из буфера теперь может включать и информацию о моделях компонентов, входящих в блок: *OPTIONS>Preferences>Circuit>Copy/Paste Model Information*.
- Показ заголовков открытых схем и окон путем установки *Options>Window Tabs*.
- Выбор следующего объекта в группе перекрывающихся объектов *Ctrl+Tab*.
- Включение/выключение режима привязки к ближайшему узлу принципиальной схемы *Ctrl+Shift+N*.
- Генераторы цифровых сигналов типа STIM в окне задания параметров теперь имеют кнопки, вызывающие наиболее часто используемые последовательности.
- Пароль может быть установлен на группу файлов, задаваемую в диалоговом окне *Password*.
- Регистр схемного текста может изменяться командами *Ctrl+U* (верхний) и *Ctrl+L* (нижний).
- На схеме может быть организован показ последних мгновенных, средне-квадратичных, средних, амплитудных значений за последний интервал расчета при наведении на компонент или узел курсора мыши. Включение расчета указанных величин осуществляется на закладке *VIEW* окна *Properties* (вызываемого двойным кликом мыши на поле схемы).
- Усовершенствовано построение перечня элементов (bill of materials). Теперь пользователь имеет возможность сам задавать в деталях формат этого документа.
- Меню *HELP* имеет раздел *Sample Circuits*, позволяющий выбрать необходимый демонстрационный пример из каталога *DATA*.

Только для версии Micro-Cap 10

- Схемный текст теперь можно редактировать непосредственно в схемном окне, с помощью двойного клика мыши на нем при нажатой клавише *Alt*.
- На панель компонентов (Component Panel) добавлена новая закладка *Favorites*. В этом окне происходит отслеживание наиболее часто используемых компонентов и они сортируются в порядке наибольшей частоты использования (наверху списка — самые часто используемые компоненты).
- Сообщение об ошибке в математическом выражении теперь показывает место возникновения ошибки.
- Если после запуска какого-либо вида анализа установить указатель мыши на какой-либо компонент схемы, то появляется информационное окно, которое содержит информацию о компоненте: β транзистора, значение емкости, проводимости и многие другие параметры модели прибора.
- Команда поиска слова или последовательности символов в текстовой странице *EDIT>Find* одновременно отображает все фрагменты, найденные в тексте. К нужному фрагменту можно перейти с помощью панелей *Previous* и *Next* соответствующего диалогового окна поиска.

- Шрифтовые и численные параметры формата вывода узловых потенциалов, токов ветвей и мощностей компонентов управляются теперь с помощью диалогового окна свойств схемы (F10 или двойной клик мыши на поле схемы). Ранее эти параметры были общей установкой программы, применяемой ко всем схемам. Появилась закладка FORMAT (3-я по счету) в соответствующем диалоговом окне (Properties).
- Команда *Find* теперь позволяет производить поиск и замену любого атрибута компонента или схемного текста.
- Добавлена новая возможность в диалоговое окно *Change Attribute* (EDIT>Change>Attributes...) для одновременного изменения цвета и (или) шрифта текстовых атрибутов выделенных компонентов.
- Если в окне GLOBAL SETTINGS используются значения параметров, отличные от умолчательных, то они отображаются жирным шрифтом.
- Появилась новая команда *Align* (EDIT>Align), позволяющая выравнивать выбранные фрагменты схемного текста или текстовые атрибуты компонентов.
- Пользователи теперь могут создавать новые иконки для выбранных команд.
- Для блоков, разрешаемых по условию, добавлена опция показать/скрыть (Show/Hide) текст условного выражения. Также для текста условного выражения можно выбирать шрифт и цвет.
- Размер диалогового окна поиска компонента — *Find Component* (COMPONENT>Find Component) теперь можно изменять для обеспечения большего пространства для вывода списка найденных компонентов.
- Добавлена команда закрытия всех открытых файлов *Close All*.
- Команда «Сохранить файл» (File Save) теперь работает и при нахождении программы в режиме анализа.
- Теперь для каждой схемы могут проверяться (по выбору): путь по постоянному току на землю (The Path to Ground), наличие контуров из источников ЭДС (Voltage Loop) и наличие неподключенных узлов (Floating Nodes). Указанные опции введены в окно *Global Settings*. Соответственно изменен набор установок *Analysis* диалогового окна PREFERENCES.
- Убрано ограничение на длину описания таблицы для PWL-источника. Добавлена возможность чтения таблицы из файла.
- Добавлено диалоговое окно *Windows* для легкой активации, закрытия или сохранения открытых окон.
- В перечне используемых компонентов (Bill of Materials), компоненты могут быть сгруппированы (как в более ранних версиях) или не сгруппированы в зависимости от состояния нового флага *Group Parts* соответствующего окна.
- Программа теперь автоматически проверяет веб-сайт на наличие обновленной версии.
- Появилась опция автоматической очистки рабочих каталогов при выходе из программы (опции команды FILE>Cleanup).

Редактор компонентов *Component Editor*

- Команда *Remove File*, позволяющая выгрузить неиспользуемую библиотеку компонентов.
- Клик правой клавишей мыши на компоненте теперь открывает контекстное меню, позволяющее вставлять рядом новый компонент, а также удалять и копировать текущий компонент, вставлять компонент из буфера.
- Работает команда удаления используемой группы компонентов с выдачей предварительно предупреждающего сообщения.
- Усовершенствованное диалоговое окно перемещения компонентов между группами *Move Parts*. Теперь оно позволяет выбрать директорию-источник.
- Команда *Add Part Wizard* теперь запрашивает сначала имя модельного файла перед именем нового компонента, для исключения возможных конфликтов. При этом сканируется модельный файл и предлагается список возможных имен-кандидатов для нового компонента.
- Появились так называемые группы УГО — ***Shape Groups***, которые могут содержать УГО для ряда компонентов в соответствии с определенным стандартом рисования электронных схем. Группа для УГО конкретного компонента устанавливается в позиции *Shape*.
- Появилась новая команда *Import Part Wizard*, позволяющая включить новый компонент, имеющий определение в виде SPICE-подсхемы, в библиотеку компонентов.

Только для версии MC10

- В мастере импорта компонентов появилось окно предварительного просмотра, показывающее, как будет выглядеть компонент с выбранным УГО.
- Добавлена команда *Save*, позволяющая сохранить открытый библиотечный файл.
- Добавлена команда *Revert*, которая загружает последнюю сохраненную версию открытого библиотечного файла.

Анализ переходных процессов (*Transient Analysis*), малосигнальный анализ (*AC Analysis*), анализ по постоянному току (*DC Analysis*), анализ нелинейных искажений (*Distortion*)

- Буфер графиков (*Waveform Buffer*) позволяет сохранять выбранные графики для последующего вызова в другом сеансе анализа.
- Всем основным режимам анализа теперь присущи динамические свойства: после редактирования в одновременно открытом окне схемного редактора, графики автоматически перестраиваются. Также для любого параметра схемы может быть выведен движковый регулятор (*Slider*) для более удобного управления динамическим режимом.
- Введен выбор алгоритмов расчета рабочей точки на постоянном токе (*Operating Point Methods*), позволяющий получить результаты для проблемных в смысле сходимости схем.
- Окна вывода результатов анализа теперь имеют закладки (*Window Tabs*), позволяющие быстро выбрать окна анализа Монте-Карло, трехмерных графиков, функций *performance*, численного вывода, и графиков выбранного вида анализа.

- Опция накопления графиков *Accumulate Plots* позволяет накапливать графике в окне анализа при проведении любого редактирования схемы в одновременно открытом схемном окне. Команда очистки накопленных графиков *Clear Accumulate Plots* очищает графическое окно от лишних графиков, построенных в результате предыдущих сеансов редактирования.
- Введены графические страницы (Plot Pages), позволяющие увеличивать число графических окон выше 9 и группировать графики по страницам.
- К использованию кнопки расширения текста (Expand) добавлена возможность масштабирования (увеличения) текста для лучшего восприятия.

Только для версии Micro-Cap 10:

- Используется распараллеливание процессов, возможное на ПК с многоядерным процессором. MC10 распараллеливает процессы на различные ядра одного процессора (CPU) для ускорения получения общего результата, когда необходимо одновременно выполнять несколько независимых анализов. Это наиболее выгодно, когда производится вариация температуры или других параметров (stepping), при статистическом анализе Monte Carlo, при анализе коэффициентов нелинейных и интермодуляционных искажений.
- Добавлена опция PSS — быстрого нахождения стационарного режима в цепях с периодически изменяемыми параметрами в режимах анализа переходных процессов и нелинейных искажений.
- Анализ нелинейных искажений подразделяется на 2 вида анализа:
 - *HARMONIC DISTORTION* — анализ нелинейных искажений, подобный анализу DISTORTION в MC9. В рамках этого вида анализа теперь возможно выводить графики зависимостей коэффициента гармоник (и некоторых связанных с ним величин) от амплитуды и частоты входного сигнала без использования функций PERFORMANCE.
 - *INTERMODULATION DISTORTION* — анализ интермодуляционных искажений по одной из трех заложенных методик: SMPTE, CCIF, DIN. После проведения анализа возможен вывод графиков зависимостей интермодуляционных составляющих IM2 — второго порядка, IM3 — третьего порядка, H1 — первой гармоники от амплитуды сигналов без дополнительного использования функций PERFORMANCE.
- Добавлены опции вывода и сохранения графиков: *Save and Plot* (сохранить и нарисовать), *Save and Don't Plot* (сохранить но не рисовать), *Don't Save or Plot* (не сохранять и не рисовать).
- Введена новая текстовая страница *Error Page*, в которой перечисляются все ошибки обнаруженные программой при запуске анализа. Это особенно удобно при возникновении ошибок, не прерывающих процесс симуляции.
- Правый клик мыши в графах спецификации вывода Page (страница) или P (график) открывает список возможных опций вывода и сохранения для графиков страницы или графического окна соответственно:
 - Sort — сортировать графики
 - Enable All — сохранять и прорисовывать все графики
 - Hide All — сохранять, но не прорисовывать все графики
 - Disable All — не сохранять и не прорисовывать все графики

- Клик правой кнопкой мыши на имени выбранного графика в режиме анализа теперь открывает список разнообразных команд, относящихся к нему.
- Если цифровой узел в схеме соединяется с аналоговым в точке N, то задание в спецификации вывода D(N) приведет к построению графика цифрового сигнала, а задание V(N) приведет к построению графика аналогового сигнала.
- В редакторе начальных условий появилась команда задания числового формата.
- Выражения для вывода на график теперь могут использовать величины разных вариантов анализа, например задание в поле *Expressions* выражения V(1)@1-V(1)@2 приведет к построению разности потенциалов в 1-ом узле между первым и вторым вариантами многовариантного анализа.
- Величины, на которые указывают курсоры в курсорном режиме вывода, могут быть использованы в формульном режиме текста на поле графиков. Например, формульный текст "[1/(cursorrx-cursorlx)]" вычислит частоту колебания, если X-переменная это время t.
- При выводе на схему среднеквадратических значений (RMS) в последней точке расчета мощность компонента теперь вычисляется по формуле $P=RMS(V)*RMS(I)$.
- Изменен встроенный масштаб TMAX, [TMIN] по оси абсцисс для режима TRANSIENT на TMAX, [TSTART]. Анализ всегда начинается с нулевого момента времени T=0, но точки данных до момента времени TSTART не выводятся на график и не сохраняются.
- В режиме малосигнального частотного анализа AC полная мощность рассчитывается по формуле $P=V*Conjugate(I)$.
- Изменена умолчательная установка графы *Frequency Range* окна *AC analysis Limits*. Метод изменения частоты F по умолчанию теперь логарифмический Log при количестве точек (Number of Points), равном 1001.
- Сопротивления резисторов могут выступать в качестве изменяемых переменных (Variable 1, Variable 2) при проведении DC-анализа.

**Режимы анализа при динамически изменяемых параметрах схемы:
анализ по постоянному току (Dynamic DC Analysis), малосигнальный
анализ по переменному току (Dynamic AC Analysis)**

- Стало доступным окно численного вывода *Numeric Output* (F5).
- Движковые регуляторы (Sliders) могут быть связаны с любыми параметрами схемы, которые могут шагать при многовариантном анализе *Stepping*.
- Доступен выбор алгоритмов расчета рабочей точки на постоянном токе (Operating Point Methods), позволяющий получить результаты анализа для проблемных в смысле сходимости схем.
- Появилась возможность проведения оптимизации.

Статистический анализ Monte Carlo

- Усовершенствована команда *Load MC File*. Диалоговое окно, открывающееся после выполнения этой команды позволяет выбрать конкретную реализацию случайного процесса (при котором активизировался *Report* — случай отказа при многовариантном анализе) для загрузки.

- Показ измерений, выполненных с помощью функций *Performance*. При выборе в окне гистограмм числовых данных функции *Performance*, это измерение и соответствующая кривая показываются в графическом окне (если включен режим *Cursor Mode*).
- Добавлено диалоговое окно установки допусков параметров компонентов *Tolerance*, доступное как из окна схемного редактора так и из окна *Monte Carlo Options*.
- В MC10 на вершине гистограммного столбика теперь можно выводить как процентное значение, так и количество попаданий.

Параметрическая оптимизация

Только для версии Micro-Cap 10

- 3 новых метода поиска оптимума — метод Левенберга-Марквардта, Хука-Дживса, дифференциальной эволюции. Они же присутствуют в оптимизаторе программы MODEL.
- В окно задания параметров оптимизации введена новая команда импорта графика из файла.
- Добавлена опция минимизации диалогового окна для лучшей видимости оптимизируемого графика

Режим вывода графиков и масштабирования графиков

- Буфер графиков (*Waveform Buffer*) позволяет сохранять необходимые графики и воспроизводить их в другом сеансе анализа этой же или другой схемы.
- Динамические размерные линии для функций *Performance* (*Performance Tag*) могут быть использованы для измерения параметров графиков при каждом запуске анализа (в том числе и при проведении многовариантных анализов *Stepping* и *Monte Carlo*).
- Введена новая команда *Envelope*, позволяющая очерчивать полосу разброса выбранного графика при проведении многовариантного анализа.
- Введена новая команда *Auto Scale Visible Region*, позволяющая устанавливать автомасштаб по оси Y для видимой области графика. Видимая область устанавливается протяжкой левой клавиши мыши.
- Введен индивидуальный числовой формат тэгов (табло с числовыми данными). Теперь числовой формат вывода каждого табло может быть установлен отдельно.
- Новый формат прорисовки графика «Data Point Only» (только рассчитанные точки, без соединяющих их линий), выбираемый на закладке *Colors Fonts and Lines* диалогового окна ***Properties*** (двойной клик на поле графика или ***F10***).
- Расширена команда *Save Curve* диалогового окна ***Properties***. Эта команда теперь позволяет сохранить кривую в CSV формате, для более удобного экспорта таблицы данных в MS Excel (см. рис. 6.1, в).

Только для версии Micro-Cap 10

- Команда *Save Curve* диалогового окна *Properties* позволяет сохранить кривую в формате звукового цифрового WAV-файла. Имеется также возможность его прослушивания.
- Связанность курсоров графиков и их привязка к реализации многовариантного анализа теперь устанавливаются для каждого схемного файла, а не одновременно для всех схем.
- В меню *Scope* введена новая команда *Copy Cursor Values to Clipboard* — копирование числовых значений из курсорного табло в буфер обмена.
- В окне свойств графика *Properties* добавлены панели управления форматом числовых данных на размерных линиях и в результатах вычислений с помощью формульного текста.

Графический постпроцессор PROBE

- Теперь в этом режиме возможно редактирование схемы.
- Левый клик мыши на УГО макромодели (подсхемы) приводит к раскрытию макроопределения на поле схем, далее возможно построение графиков для внутренних узлов. Это относится к любому уровню вложенности макроопределений.
- Теперь в этом режиме доступны окна Performance, FFT, 3D.
- Переключение показа напряжений/токов теперь осуществляется комбинацией клавиш *Ctrl+Spacebar* (Ctrl+клавиша пробела). В режиме *Save All* последовательное нажатие указанной комбинации приводит к перечислению всех возможных величин для вывода на график с соответствующим изменением вида маркера.

Пошаговое изменение параметров (STEPPING)

- Активные закладки диалогового окна *Stepping* теперь помечаются «галочками».
- Закладки с варьируемыми параметрами теперь сортируются по возрастанию.
- В MC10 панель *Stepping* окна задания параметров анализа обозначается жирным шрифтом при установке в соответствующем окне вариации хотя бы одного параметра.

Функции Performance

- Введены динамические размерные линии для Performance-функций, изменяющие показания при каждом новом запуске анализа, а также при выборе в режиме *Cursor Mode* любого варианта многовариантного анализа *Stepping* или статистического анализа Монте Карло.
- К функциям Performance добавлены нахождение среднеквадратичного (RMS) и среднего (AVG) значений.
- В MC10 добавлена новая функция *Gain_Margin*, вычисляющая запас по амплитуде в частотном анализе.
- В MC10 в режиме анализа функции PERFORMANCE могут использоваться в формульном тексте.

Модели компонентов

- Многополюсник (N-Port) можно задавать теперь также T- и A-параметрами.
- Введена модель Хефнера IGBT-транзистора.
- Введены новые модели фирмы Philips для биполярных и МОП-транзисторов.
- Модели пассивных компонентов (R, L, C) теперь включают паразитные параметры.
- Для пользовательского источника добавлен атрибут ENABLE_EXPR, истинное значение которого разрешает выдачу сигнала, а ложное — запрещает.
- В библиотеку введены IBIS-компоненты для входных и выходных буферов, существенно облегчающие процесс создания IBIS-моделей.
- В MC10 IBIS-модель расширена для работы с буферами с открытым стоком и истоком.

Библиотеки (LIBRARIES)

- В редакторе компонентов теперь доступна панель компонентов (Component Panel), повторяющая иерархическую структуру меню и библиотеки компонентов. С ее помощью легче находить нужный компонент для постановки в принципиальную схему.
- Компоненты теперь имеют атрибут группы УГО (Shape Group), что позволяет выбирать УГО в соответствии с используемым стандартом.
- Компоненты теперь имеют URL-ссылку, позволяющую быстро получить доступ к технической документации на них через Internet или локальный диск. Ссылочная операция записывается в строке *Link* редактора компонентов, по умолчанию производится поиск справочного листка в Internet.

Функции и выражения (EXPRESSIONS)

- $V(A)$ теперь может использоваться как выражение для вывода состояния цифрового узла A, наряду с обычным $D(A)$.
- Добавлена функция Ламберта для комплексной переменной $W(z)$.
- Добавлены полиномиальная функция Лежандра степени n: $PN(n, x)$.
- Переменная номера варианта в анализе Монте Карло (CASE) теперь доступна пользователю.
- В AC анализе теперь можно использовать комплексный импеданс и проводимость, т.е. выражения вида $Z(D1)$, $Z(C1)$, $Z(L1)$, и $Z(R1)$.
- Функции спектрального анализа HARM и FFTS теперь имеют необязательный параметр BW (ширина полосы частот сигнала), который может быть задан и выражением.
- Переменные-массивы теперь могут быть многомерными, а их элементы могут быть и комплексными величинами.
- Добавлены экспоненциальные операторы с линейным ограничением EXPL и EXPLP.
- Символьные переменные, определенные директивой `.define` теперь могут использоваться в полях оформления вывода графиков: *X range*, *Y range* (масштабы по осям абсцисс и ординат), *Maximum Time Step* (Максималь-

ный шаг по времени); в окне FFT при указании границ диапазона (*Upper Time Limit* и *Lower Time Limit*).

- В полях *Y Expression* окна *Analysis Limits* можно задавать выражения для построения однотипных графиков в виде шаблона.
- В MC10 добавлены следующие новые функции: вычисления нормированных гармоник HARMN; нахождения целых частей INT, NINT; функции статистического распределения AGAUSS, GAUSS, UNIF, AUNIF.

Директивы (Command Statements)

- Директивы .SPICE и .ENDSPICE позволяют включить схемный фрагмент в виде SPICE-текста, определенный в текстовой области, в текущую схему.
- Серия условных операторов (.IF, .ELSE, .ELIF, и .ENDIF) делает возможным включение SPICE-текста (управляющие команды, модельные директивы, список соединений) по условию.
- Усовершенствована командная директива .WARNING. Добавлена возможность указания глобальных имен. Например, R@, относится к любому резистору в текущей схеме, позиционное обозначение которого начинается с R. Кроме того добавлено цветное оформление компонентов и узлов, участвующих в вызове предупреждающего сообщения.

Синтез фильтров (Filter Design)

- При синтезе пассивных фильтров теперь можно использовать эллиптический фильтр (фильтр Кауэра).

Анализ Фурье (Fourier analysis)

- Окно FFT теперь доступно и из режима анализа с использованием графического постпроцессора PROBE.
- Список функций, графики которых могут быть получены в окне FFT, в версии MC10 расширен. Добавлены функции HARMN, dB(HARMN), THD, IHD.
- В установки закладки FFT окна свойств графика версии MC10 добавлена частота первой гармоники *Frequency Step*.

2. КРАТКИЙ ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ЭКСКУРС

2.1. Основные возможности Micro-Cap

Основные возможности Micro-Cap можно сформулировать весьма кратко: программа позволяет анализировать электрические режимы работы устройства по заданной принципиальной схеме, а также производить синтез схем активных и пассивных фильтров с заданными характеристиками.

Micro-Cap может анализировать режимы работы аналоговых, цифровых и смешанных (аналого-цифровых) устройств. В цифровых схемах возможно использование микросхем малой и средней степени интеграции (включая ЦАП, АЦП и ПЛМ). Работу схем, содержащих микропроцессоры (микроконтроллеры) и ПЗУ Micro-Cap анализировать не может. Не может он также осуществлять трассировку печатных плат, анализировать надежность и проводить расчет тепловых режимов (хотя мощность, выделяемую компонентами, рассчитать может).

Для аналоговых схем Micro-Cap рассчитывает узловые потенциалы, токи ветвей, мощности, рассеиваемые компонентами, магнитные характеристики сердечника, а также указывает состояния полупроводниковых приборов (отсечка, насыщение, линейный режим). Возможно моделирование неэлектрических воздействий (например, при наличии в схеме фотодиода), но для этого необходимо использовать специальные приемы, фактически заменяя неэлектрические воздействия электрическими.

Программа может строить АЧХ и ФЧХ, а также графики сложных зависимостей (например, амплитуды пульсаций на выходе стабилизатора напряжения от емкости фильтра). Можно также выполнить гармонический анализ сигналов, провести расчет нелинейных и интермодуляционных искажений. Micro-Cap позволяет проводить обычные математические вычисления по формулам, заданным в текстовом окне.

При моделировании схемы возможен многовариантный и статистический анализ. Это дает возможность посмотреть, как будет себя вести схема при всех допустимых отклонениях параметров компонентов от номинальных значений, а также выявить наличие аварийных режимов при каком-либо сочетании отклонений параметров.

Для цифровых схем программа рассчитывает цифровые состояния в узлах схемы и временные задержки.

Результаты расчетов, как правило, выводятся в виде графиков в одном или нескольких графических окнах. Кроме того, можно организовать вывод расчетных точек в специальный файл (файл числового вывода). Значения потенциалов узлов и токи компонентов могут быть выведены непосредственно на схему.

Поскольку Micro-Cap содержит графический редактор, то его можно использовать для рисования принципиальных схем. Программа также позволяет создавать и редактировать условные графические обозначения компонентов. Кроме того, раздел *Model* позволяет вычислять параметры моделей полупроводниковых приборов и магнитных сердечников по справочным характеристикам.

2.2. Идеология работы с программой Micro-Cap

В этой главе будут рассмотрены основные сведения о работе с Micro-Cap на примере версии 9. В MC10 отличия очень незначительные. Помимо изложенных здесь сведений для знакомства с программой можно использовать демонстрационный блок, входящий в состав Micro-Cap, который позволяет посмотреть основные возможности этой программы и приемы работы с ней. Запускается он командой меню *Help>Demos>General Demo*.

2.2.1. Терминология

Параметрами электрической схемы будем называть токи, напряжения, мощности и другие электрические характеристики, определяющие электрические режимы работы схемы. В подавляющем большинстве случаев Micro-Cap как раз и рассчитывает эти параметры по заданной принципиальной схеме.

Параметрами сигнала будем называть характеристики этого сигнала (частоту, период, длительность импульса, фазу, амплитуду и т.п.) Как правило, эти параметры Micro-Cap в явном виде не вычисляет. Он лишь строит графики изменения электрических величин от времени или других переменных. Но на основе анализа графиков всегда можно вычислить параметры электрических сигналов (для этого в Micro-Cap имеются специальные средства — функции *Performance*).

В Micro-Cap параметры сигнала, как правило, являются входными параметрами. Эти параметры задаются для источников сигнала, которые моделируют электрические воздействия на компоненты схемы.

Параметрами компонента схемы будем называть параметры его модели (в том числе и номинальные значения R, L или C для пассивных компонентов).

Атрибутами компонента схемы называются его позиционные обозначение на схеме, имя модели и другую сопутствующую компоненту информацию.

2.2.2. Порядок анализа электронных устройств при помощи Micro-Cap

Для проведения любого расчета при помощи программы Micro-Cap необходимо сначала в окне графического редактора нарисовать электрическую схему устройства, предусмотреть цепи питания, нагрузочные цепи и источники сигналов (если они нужны). В схеме автоматически будут расставлены номера узлов и позиционные обозначения компонентов. После этого необходимо запустить какой-либо вид анализа. При этом откроется окно для задания параметров анализа и параметров вывода графиков (в большинстве видов анализа). В этом окне задаются узлы, сигналы в которых необходимо вывести на графики, масштабы графиков, время расчета или диапазон частот, а также другие параметры. Подробно задание параметров для каждого вида анализа будет рассмотрено в соответствующем разделе книги.

После этого командой *Run* запускается анализ и программа строит графики заданных параметров электрической схемы либо выводит на схему узловые потенциалы и токи компонентов (в режиме динамического анализа по постоянному току). Использование каких-либо виртуальных измерительных приборов не предусмотрено. Все, что нужно выводить на графики — задается в окне параметров анализа (например, для анализа переходных процессов это окно называется *Transient Analysis Limits*).

2.2.3. Создание схемы для моделирования

При запуске программы открывается главное окно **Main**, в котором сразу можно приступить к рисованию схемы (рис. 2.1). При построении схемы выбор компонентов осуществляется через пункт меню **COMPONENT**. Ряд часто используемых компонентов вынесен на главную (верхнюю) панель. Этот набор можно менять по своему усмотрению. Помимо этого в Micro-Cap 9, 10 есть отдельная панель компонентов, по умолчанию расположенная в левой части экрана. Эта панель значительно повышает удобство выбора необходимых компонентов (в более ранних версиях ее нет). Панель компонентов включается/отключается командой меню **OPTIONS>Panel**.

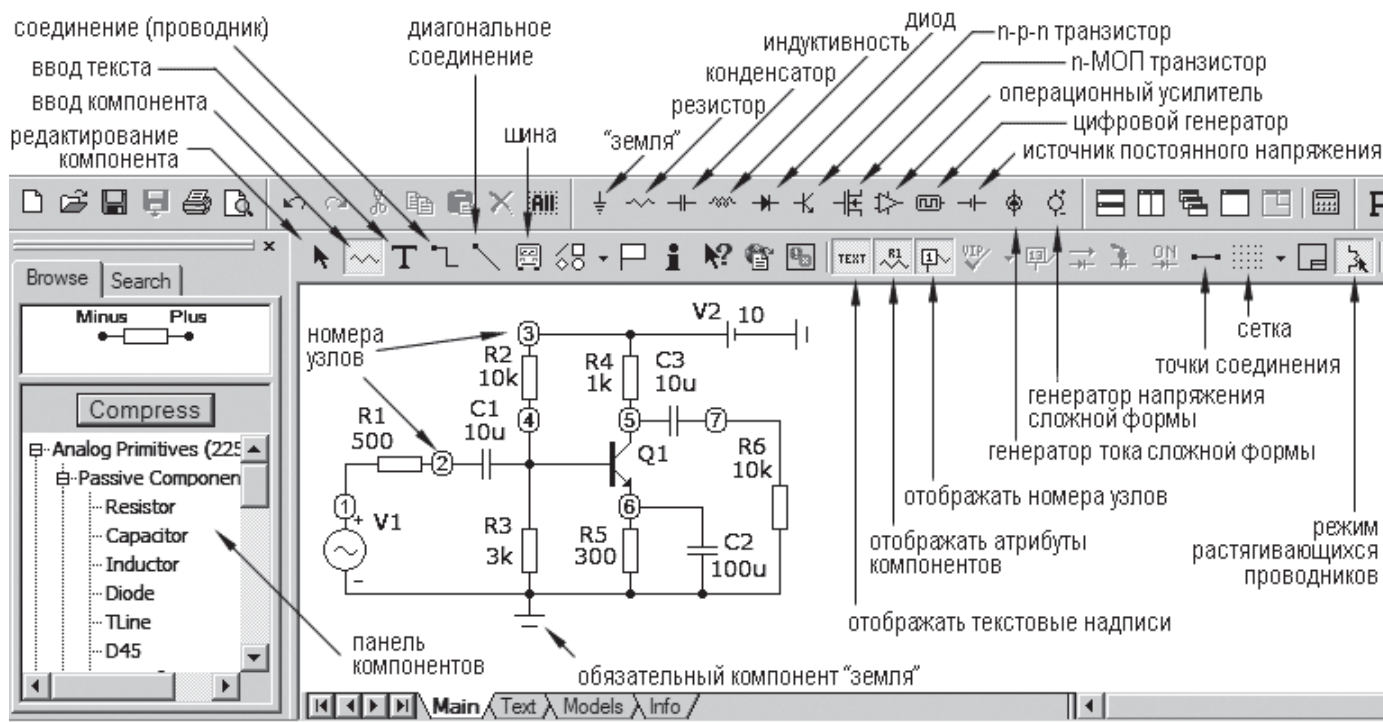


Рис. 2.1. Назначение элементов главного окна

Micro-Cap позволяет новичку начать моделирование электронных устройств даже без глубокого изучения особенностей этой программы. Интерфейс MC9, MC10 является стандартным для программ ОС Windows. Поэтому назначение стандартных пиктограмм (открытие документа, копирование и т.п.) в экскурсе не рассматриваем.

Все команды можно вызвать через меню. Наиболее часто используемые — выведены на панели в виде ярлычков (пиктограмм). Кроме того, многие команды можно вызывать горячими клавишами.

При добавлении каждого компонента в схему необходимо задать его атрибуты: позиционное обозначение (осуществляется автоматически, но можно впоследствии поменять), номинальное значение и (или) модель. Для задания этих параметров открывается специальное окно (рис. 2.2). Для всех компонентов Micro-Cap эти окна имеют примерно одинаковую структуру. Для большинства пассивных компонентов модель указывать не обязательно (хотя, возможно и такое). Если указана модель, то активными становятся поля с ее параметрами в нижней части окна (на рис. 2.2 не показаны).

Особенность Micro-Cap 9, 10 в отличие от более ранних версий — возможность задания паразитных параметров пассивных компонентов. Напри-

мер, для резистора можно задать не только сопротивление, но также емкость и индуктивность (CP и LS). Эти параметры задаются в модели резистора. Если модель не указана, паразитные емкость и индуктивность считаются равными нулю и не учитываются при моделировании.

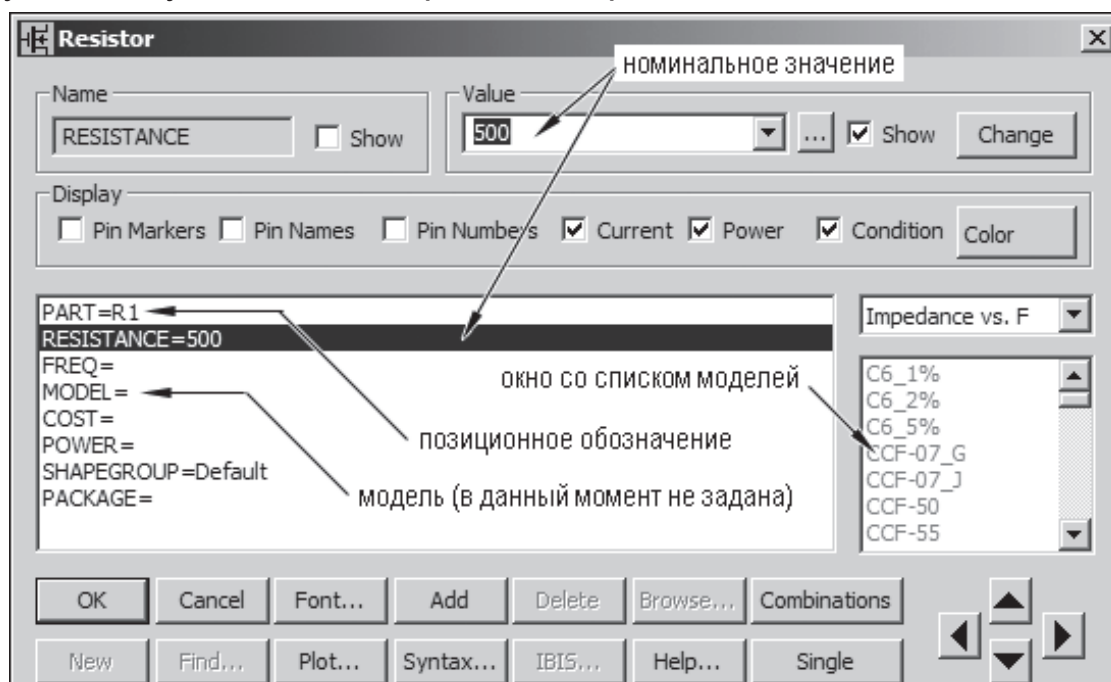


Рис. 2.2. Окно задания параметров резистора.

В простейшем случае для резистора достаточно задать его сопротивление (100=100 Ом, 2.3K=2.3E3=2,3 кОм). Следует обратить внимание, что целая часть отделяется от дробной точкой, а не запятой. Остальные необязательные параметры будут рассмотрены позже в соответствующем разделе книги.

Ввод номинальных значений компонентов осуществляется в системе СИ, за исключением катушки с магнитным (нелинейным) сердечником. Значения параметров задаются в обычной (2600), либо в показательной форме (2.6E3). Возможно использование буквенных обозначений множителей (5K). В Micro-Cap используется 9 таких буквенных обозначений (см. табл. 2.1):

Таблица 2.1. Буквенные обозначения множителей для численных значений

10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^3	10^6	10^9	10^{12}
фемпто	пико	нано	микро	милли	кило	мега	гига	тера
F (f)	P (p)	N (n)	U (u)	M (m)	K (k)	MEG (meg)	G (g)	T (t)

Следует обратить внимание, что в Micro-Cap большая буква М означает не «мега» (как принято в ЕСКД), а «милли». Обозначение «микро» буквой u обусловлено наибольшим сходством ее начертания с греческой буквой μ , которая используется в западных стандартах для обозначения множителя 10^{-6} .

Для всех активных и некоторых пассивных компонентов обязательно нужно задавать модель. Модель выбирается из списка в правой части окна. Если на этапе построения схемы непонятно, какую модель нужно использовать или нужной модели нет в списке, можно использовать обобщенную модель для данного типа компонента — \$Generic (она, как правило, первая в списке). В дальнейшем ее можно будет заменить на любую другую.

Например, если в схеме используется отечественный диод КД103, которого, естественно, нет в списке компонентов, то вместо него можно использовать диод \$Generic. Такая замена дает удовлетворительные результаты в подавляющем большинстве случаев. Если же подобная замена не устраивает (например, необходимо учесть специфические характеристики прибора), тогда нужно искать точную модель. SPICE-модели большинства зарубежных компонентов (или их ближайших аналогов) можно найти, воспользовавшись поисковыми Интернет-системами. Добавить найденную модель в библиотеку Micro-Cap проблем не представляет (этот вопрос подробно рассмотрен в соответствующем разделе книги).

Для отечественных компонентов целесообразно искать модель зарубежного аналога, поскольку отечественные производители SPICE-модели своей продукции не публикуют. Но, повторим, точные модели целесообразно искать на втором этапе расчета, если не удовлетворили результаты расчета со стандартными моделями, либо нужна высокая точность результатов.

Micro-Cap позволяет включить/выключить отображение узлов на схеме (также как и любого из атрибутов компонента). Для удобства дальнейшего задания выражений вывода графиков, отображение номеров узлов целесообразно включить (что и сделано по умолчанию). Кроме того, возможно включение координатной сетки и точек подсоединения компонентов (см. рис. 2.1).

Узлы и позиционные обозначения компонентов автоматически нумеруются по мере добавления их в схему. Но есть возможность упорядочить нумерацию (справа налево или сверху вниз) командой *EDIT>Change>Rename components*.

Компоненты схемы соединяются между собой проводниками. Проводники могут быть ортогональными или произвольными (диагональными). Если проводник проходит через вывод компонента (красную точку), то он считается присоединенным к компоненту (рис. 2.3).

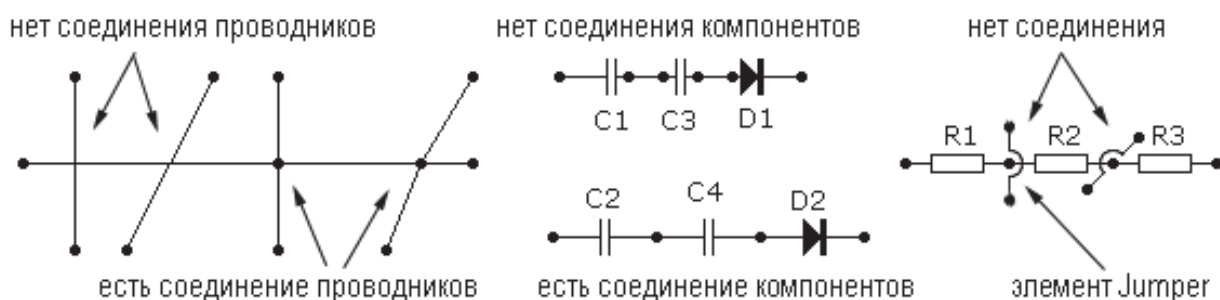


Рис. 2.3. Примеры соединения проводников и компонентов схемы

Пересекающиеся проводники могут соединяться в точке пересечения (появится красная точка соединения), а могут не соединяться. Если провести один проводник, а потом его пересечь другим — электрического соединения не будет. Для организации соединения нужно довести проводник до точки пересечения с другим проводником, щелкнуть левой клавишей мыши, и только потом продолжить проводник дальше.

Если проводник все-таки проходит через точку вывода компонента, а соединяться с ним не должен, то необходимо использовать специальный элемент — Jumper (перемычку) (рис. 2.3). Вызывается этот компонент, как и все,

которые не вынесены на главную панель, через пункт меню *COMPONENT* (*COMPONENT>Analog Primitives>Connectors*) или левую панель компонентов.

При присоединении одного компонента к другому следует обращать внимание, что точки выводов компонентов должны совпадать. Иначе между ними не будет электрического соединения. Проверить правильность соединения можно по номерам узлов. На всем протяжении проводника и на всех точках выводов компонентов номер узла должен стоять только в одном месте.

При редактировании схемы иногда возникает необходимость перемещения отдельных компонентов или участков схемы. Для этого на верхней панели выбирается инструмент «редактирование компонента» (стрелочка). При редактировании нажатие левой клавишей мыши — выбор компонента, двойное нажатие — редактирование его параметров и атрибутов. Выбранный компонент можно перемещать, удерживая нажатой левую клавишу мыши, или вращать, нажимая правую клавишу при нажатой левой. Кроме того, при нажатой левой клавише мыши можно выделить блок с компонентами и соединениями, а потом переместить его в другое место (так же, как и отдельно выделенный компонент).

Интересные возможности предоставляет опция «растягивающиеся соединения». Если включить эту опцию, то при перемещении компонента за ним будут тянуться проводники с сохранением электрического соединения (рис. 2.4.). Проводники при этом сохраняют ортогональность. Режим «растягивающиеся соединения» (растягивающиеся проводники) можно использовать не только при перемещении отдельных компонентов схемы, но и выделенных блоков. Этот режим удобен при редактировании схемы.

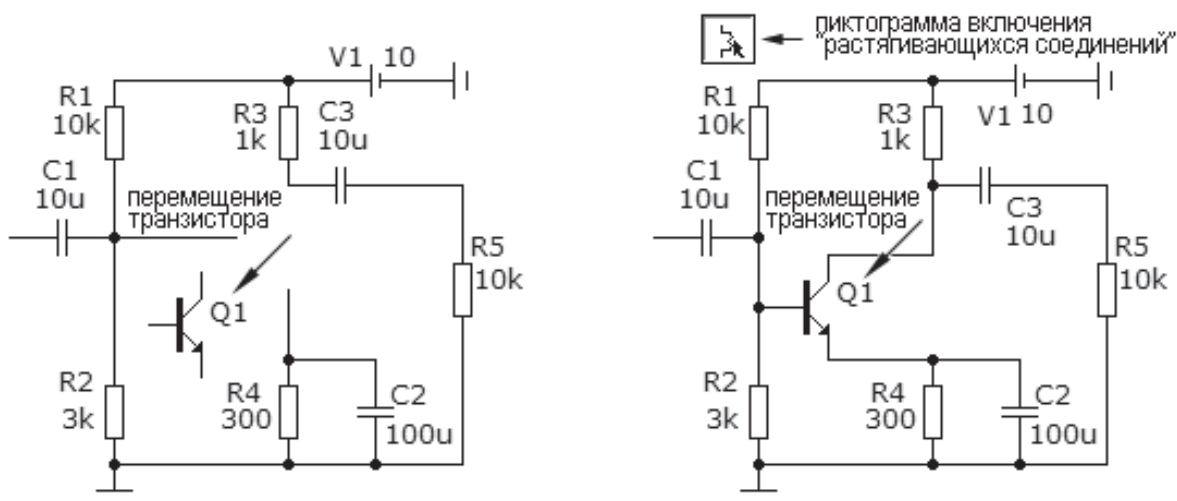


Рис. 2.4. Результаты перемещения компонента с отключенной и включенной опцией «растягивающиеся соединения»

По окончании построения схемы необходимо запустить требуемую разновидность анализа и задать, что нужно выводить на графики или схему. После этого будут построены заданные кривые зависимостей или выведены числовые значения непосредственно на схему.

В схемный файл при сохранении записываются только таблица соединений компонентов, ссылки на модели и УГО компонентов, а также установки для проведения анализа и вывода графиков. Сами модели и их изображения в файл не записываются. Если в схеме используются компоненты, модели которых отсутствуют в стандартной библиотеке Micro-Cap, такая схема на

другом компьютере может не работать. Если планируется передача файла для использования на другом компьютере, то перед сохранением необходимо выполнить «локализацию» командой меню *Edit>Localize Models*. При этом все используемые в схеме модели, макромодели и подсхемы загрузятся в окна схемы и при сохранении будут записаны в схемный файл вместе со схемой.

2.2.4. Особенности построения схем для моделирования

При построении схемы моделируемого устройства необходимо выполнить ряд требований, иначе, при попытке выполнить анализ, программа выдаст предупреждающее сообщение и потребует скорректировать схему.

Главное требование — один из узлов схемы должен быть присоединен к «земле» (рис. 2.5). «Земля» — специальный компонент Micro-Cap. Узел, соединенный с землей, всегда будет иметь нулевой потенциал, а от него будут отсчитываться потенциалы остальных. Из этого вытекает следующее требование — все остальные узлы схемы должны иметь электрическую (гальваническую) связь с узлом, присоединенным к «земле». Если схема имеет две гальванически несвязанные цепи (например, цепи, присоединенные к первичной и вторичной обмоткам трансформатора), то «землю» целесообразно присоединить как к первичной, так и к вторичной стороне, либо соединить первичную и вторичную часть резистором. При этом снижается вероятность возникновения вычислительных ошибок. Пренебрежение гальванической развязкой при моделировании в этом случае вполне допустимо, поскольку это никак не влияет на режимы работы моделируемого устройства.

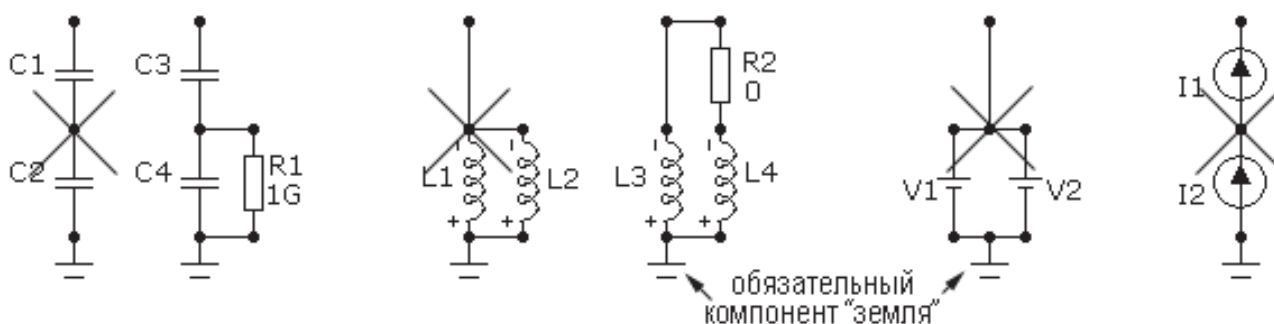


Рис. 2.5. Некоторые особенности построения схемы для моделирования

Из требования гальванической связи каждого узла с «землей» вытекает невозможность последовательного включения конденсаторов без принятия дополнительных мер. Узел в точке соединения двух конденсаторов гальванически не связан с землей (отделен от нее диэлектриками конденсаторов). Поэтому такой узел необходимо соединить с землей фиктивным резистором (резистором большого сопротивления, не оказывающим влияние на режимы работы схемы). То же самое касается соединения нескольких конденсаторов в одной точке (емкостных звезд).

Индуктивности, наоборот, нельзя соединять параллельно. В этом случае необходимо введение дополнительных фиктивных резисторов бесконечно малого сопротивления последовательно с индуктивностями. То же самое касается индуктивных треугольников и индуктивных контуров (нескольких последовательно подключенных индуктивностей, замкнутых в кольцо).

Такие же требования, как и к индуктивностям, предъявляются к источникам напряжения — их нельзя соединять параллельно (даже если их напряже-

ния равны) и замыкать в кольцо без подключения дополнительных элементов. Источники тока, наоборот, нельзя подключать последовательно (даже если их ток одинаков).

Указанные выше ограничения связаны с особенностями математического аппарата, который используется при расчетах режимов электронных схем. Эти требования достаточно несложные и не вносят никаких ограничений на возможность моделирования реальных устройств, вызывая лишь необходимость в отдельных случаях немного усложнять схему моделирования по сравнению с прототипом.

2.2.5. Основные виды анализа электронных схем

Для аналоговых схем в Micro-Cap возможны следующие виды анализа:

Transient Analysis

Transient Analysis — анализ переходных процессов (анализ схемы во временной области при воздействии сигналов любой формы и амплитуды). Это наиболее распространенный вид анализа. В ходе его выполнения анализируется изменение основных электрических параметров схемы (токов, напряжений и т.п.) под воздействием каких-либо электрических воздействий в течение заданного промежутка времени.

Как правило, для проведения этого вида анализа к принципиальной схеме устройства должен быть подключен источник сигнала (управляющего воздействия). Частным случаем расчета переходных процессов можно считать процесс включения устройства, когда внешним воздействием является подача напряжения питания. Выходными графиками для этого вида анализа, как правило, являются зависимости токов и напряжений схемы от времени, однако возможен вывод зависимости какого-либо параметра схемы от другого параметра схемы или параметра компонента. Например, можно вывести зависимость магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H — петлю гистерезиса магнитного материала. Расчет всегда начинается с нулевого момента времени, однако начало графика может быть как с нулевого, так и с любого другого момента времени.

Анализ переходных процессов является основным режимом анализа для различных генераторов и преобразователей сигналов, линейных и импульсных источников питания и др. аналоговых устройств. Для цифровых устройств какой-либо другой вид анализа, кроме анализа переходных процессов, практической ценности не имеет (хотя возможен).

AC Analysis

AC Analysis — малосигнальный частотный анализ (анализ в частотной области эквивалентной линеаризованной схемы замещения для малых сигналов). Этот вид анализа позволяет построить зависимость параметров электрической схемы от частоты при малых возмущениях в окрестности рабочей точки — амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и фазочастотные характеристики (ФЧХ). Кроме того, можно построить зависимость комплексного коэффициента усиления от частоты (диаграмму Боде). Чаще всего используется при анализе работы фильтров, усилителей, а также при анализе устойчивости систем с обратной связью.

При проведении этого анализа считается, что величина возмущения очень мала и нелинейность характеристик при таких малых возмущениях еще не проявляется. Поэтому для проведения этого анализа схема предварительно условно линеаризуется (пользователь этого не видит). Нелинейные модели компонентов автоматически заменяются линейными моделями, параметры которых рассчитываются программой в зависимости от начального положения рабочей точки (режима по постоянному току). В результате получается линейная малосигнальная схема замещения всего устройства. Эта модель – «внутренняя», ни в какие окна она не выводится.

При линеаризации используется ряд допущений:

- источники постоянного напряжения заменяются закороткой (резистором с нулевым сопротивлением), а источники постоянного тока заменяются разрывом (резистором с бесконечным сопротивлением);
- источники сигналов заменяются их малосигнальными моделями с фиксированной амплитудой сигнала;
- полупроводниковые приборы заменяются их малосигнальными моделями;
- нелинейные компоненты заменяются их малосигнальными моделями в окрестности рабочей точки;
- пассивные компоненты заменяются их комплексными сопротивлениями;
- цифровые компоненты считаются разомкнутой цепью.

При проведении частотного анализа в схеме обязательно должен присутствовать один источник с ненулевой комплексной амплитудой.

DC Analysis

DC Analysis — анализ передаточных функций эквивалентной схемы замещения для постоянных составляющих токов и напряжений. Используется в основном для построения вольтамперных характеристик полупроводниковых и электронных приборов. В этом режиме к входам цепи подключаются один или два независимых источника постоянного напряжения или тока. В качестве выходного сигнала может рассматриваться разность узловых потенциалов или ток через ветвь, в которую включен резистор. При выполнении расчета программа автоматически создает схему замещения — закорачивает индуктивности, исключает из схемы конденсаторы, а затем рассчитывает режим по постоянному току при нескольких значениях входных сигналов. Например, при подключении одного источника постоянного напряжения можно построить график передаточной функции усилителя или вольтамперную характеристику диода, а при подключении двух источников — семейство статических выходных характеристик транзистора.

Dynamic DC Analysis

Dynamic DC Analysis — динамический анализ эквивалентной схемы замещения для постоянных составляющих токов и напряжений. При выполнении этого вида анализа напряжения в узлах схемы, токи компонентов и состояния полупроводниковых приборов (ON, OFF, SAT, LIN, и т.д.) выводятся непосредственно на схему устройства. Никаких графиков для этого режима не строится, поскольку не производится расчета каких-либо зависимостей. При модификации схемы программа сразу же рассчитывает результат изме-

нений. Используется для расчета рабочей точки усилителей, анализа режима работы стабилизаторов напряжения или тока и т.п.

В этом режиме производится расчет установившегося режима работы схемы. Программа вычисляет, какие величины токов и напряжений установятся в схеме, когда все переходные процессы закончатся (т.е. в момент времени, стремящейся к бесконечности). При этом принципиальная схема устройства условно подвергается определенной модификации: удаляются все реактивные компоненты. Конденсаторы заменяются разрывом (резисторами с бесконечным сопротивлением), индуктивности закорачиваются (заменяются резисторами с нулевым сопротивлением), а источники переменных сигналов заменяются постоянными величинами (постоянными составляющими этих сигналов, либо иными величинами, заданными непосредственно в модели источника сигнала).

В этом режиме менять значения пассивных компонентов и значения источников постоянного тока или напряжения можно не только непосредственных их заданием в соответствующем окне, но и нажатием стрелок на клавиатуре ($\uparrow$ или $\downarrow$) при выбранном компоненте. При этом номинальное значение выбранного компонента (выделяется на схеме цветом) меняется в большую или меньшую сторону с заданным шагом (например, на 10% при каждом нажатии). Таким способом можно оценить влияние тех или иных компонентов на работу схемы или подобрать необходимый режим. Кроме того, в этом режиме можно включить движки (слайдеры) для всех пассивных компонентов и перемещая их при помощи мыши также менять номинальные значения. В восьмой версии можно было включить слайдеры только сразу для всех пассивных компонентов. В девятой это можно сделать для любых выбранных пассивных компонентов и не только в этом режиме, но и при проведении других видов анализа.

В этом режиме также возможно подключение к схеме виртуальных измерительных приборов (амперметра или вольтметра), а также анимированных компонентов (различных светодиодных индикаторов, двигателя и т.п.).

Dynamic AC Analysis

Dynamic AC Analysis — динамический анализ малосигнальных передаточных функций в частотной области (динамический анализ передаточных функций эквивалентной линеаризованной схемы замещения для малых сигналов). Позволяет проводить расчет малосигнальных передаточных функций при ряде значений частот и изменении параметров схемы. Внешне анализ аналогичен динамическому анализу по постоянному току, но при его выполнении при изменении значений компонентов схемы (R , L , C , Battery) в ее узлах динамически отображаются малосигнальные коэффициенты передачи по напряжению в размах (или децибелах) по отношению к входному узлу (узлу, к которому подключен источник сигнала). Также для динамического отображения малосигнальных характеристик может быть задан ряд частот и ряд температур.

Sensitivity Analysis

Sensitivity Analysis — анализ чувствительности эквивалентной схемы замещения для постоянных составляющих токов и напряжений к изменению

параметров компонентов. Позволяет оценить влияние того или иного параметра компонента схемы на стационарный (установившийся) режим работы устройства.

Transfer Function Analysis

Transfer Function Analysis — анализ малосигнальных передаточных функций эквивалентной схемы замещения для постоянных составляющих токов и напряжений.

Этот тип анализа позволяет рассчитать малосигнальную передаточную функцию для указанного выходного выражения по отношению к указанному входному источнику. В зависимости от вида входного источника и выходного выражения производится расчет следующих малосигнальных параметров: коэффициент передачи по напряжению, коэффициент передачи по току, передаточную проводимость и передаточное сопротивление. При проведении данного вида анализа автоматически рассчитываются также малосигнальные входные и выходные сопротивления для постоянных составляющих токов и напряжений.

Для измерения передаточных функций программа дает очень малое приращение величине напряжения (тока) входного источника (или тестового источника) и измеряет вызванное этим возмущением изменение выходного выражения.

Distortion Analysis (MC9), Harmonic Distortion (MC10)

Distortion Analysis и *Harmonic Distortion* — расчет нелинейных искажений с использованием аппарата спектрального Фурье анализа. Представляет собой разновидность анализа переходных процессов. При этом виде анализа к входам схемы обязательно должен быть подключен источник синусоидального напряжения (тока). При этом если схема не является абсолютно линейной, на выходе появятся сигналы с частотами, кратными частоте входного синусоидального сигнала. В результате выходной сигнал обогатится высшими гармониками. Это и есть проявление нелинейных искажений, вносимых схемой в передаваемый сигнал. Выделение гармоник сигнала и дальнейшая их обработка (в частности, расчет нелинейных искажений) осуществляется при помощи функций спектрального анализа (IHD, THD и HARM). При помощи этих функций возможно также организовать анализ интермодуляционных искажений, но для этого еще потребуется использование функций *Performance* (информация о них будет изложена в соответствующем разделе книги).

Версия MC10 в рамках этого вида анализа позволяет рассчитать также отношение сигнал-шум усилителя (SNR).

Intermodulation Distortion (MC10)

Анализ *Intermodulation Distortion* позволяет рассчитать интермодуляционные искажения усилителя по одной из 3-х методик: SMPTE, CCIF, DIN.

2.2.6. Дополнительные виды анализа электронных схем

Stepping

В каждом из перечисленных выше основных видов анализа возможна организация серии расчетов при изменении одного или нескольких параметров

компонентов. Этот режим анализа называется *Stepping*. Окно задания параметров степинга вызывается из основного окна параметров анализа. Там задаются минимальные и максимальные значения изменяемого параметра, шаг изменения и закон, по которому осуществляется изменения параметра (линейный, логарифмический или заданный списком).

Monte Carlo

Monte Carlo — это вид анализа, в ходе которого проводится серии вычислений для статистической обработки полученных результатов. При этом параметры компонентов схемы меняются по случайному закону в пределах заданного допуска. Таким образом исследуется влияние разброса параметров, который всегда существует у реальных компонентов, на характеристики схемы. Кроме этого анализ Монте-Карло предназначен для обнаружения сочетаний параметров компонентов схемы, при которых характеристики схемы выходят за заданные пределы. Все такие комбинация параметров записываются в файл числового вывода и в дальнейшем могут быть подробно проанализированы.

Поскольку при анализе Монте-Карло необходимо производить очень много вариантов расчетов с разными комбинациями параметров, он занимает весьма продолжительное время.

Анализ Фурье

Этот вид анализа основан на использовании аппарата быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transform — FFT). Он предназначен для исследования гармонического состава сигналов (данных), полученных в ходе анализа переходных процессов или частотного анализа. Анализ Фурье осуществляется вызовом специальных функций обработки сигналов (FFT-функций) либо в окно *Transient Analysis Limits*, либо в окно *FFT Windows* после выполнения соответствующей команды (все эти действия проводятся в рамках анализа переходных процессов *Transient*). В перечисленных окнах можно выбирать функции быстрого преобразования Фурье из имеющегося набора и на их основе создавать достаточно сложные выражения для вычислений. В частности, совместное использование анализа Фурье и функций *Performance* позволяют организовать расчет нелинейных и интермодуляционных искажений усилителей, а также строить графики их зависимостей от каких-либо параметров.

Закладка *FFT* диалогового окна *Plot Properties* задает параметры спектрального анализа.

Функции Performance

Это не самостоятельный вид анализа, а набор дополнительных возможностей для обработки результатов, полученных в ходе одного из основных видов анализа. Функций *Performance* позволяют по графику зависимости вычислить некоторые характеристики этой зависимости. С их помощью можно измерять такие характеристики как, время нарастания и спада импульса, длительность импульса, частоту, период и многое другое.

Кроме того, использование функций *Performance* при обработке результатов серий расчетов позволяет строить опосредованные зависимости. На-

пример, при помощи этих функций можно построить график зависимости длительности фронта импульса от сопротивления резистора в цепи базы транзисторного ключа или зависимость амплитуды пульсаций на выходе фильтра выпрямителя от емкости этого фильтра.

Функции Performance задаются командой *Performance Windows* меню соответствующего анализа или *Go to Performance* меню *SCOPE* во время проведения одного из основных видов анализа.

2.2.7. Вывод результатов расчетов

В Micro-Cap основным способом отображения результатов моделирования является вывод графиков в отдельном окне (хотя возможна организация вывода данных в файл в цифровом виде). Подключение каких-либо виртуальных измерительных приборов к схеме не предусмотрено. Вместо этого в установках анализа необходимо задать параметры или выражения, значения которых необходимо вывести на график.

В младших версиях Micro-Cap для изменения принципиальной схемы или номинальных значений ее компонентов необходимо было завершать анализ, а после коррекции схемы потом запускать его заново. В Micro-Cap 9, 10 из режима анализа выходить не обязательно, достаточно перейти в окно схемы. После внесения изменений автоматически выполняется новый расчет и на графиках появляются обновленные данные.

Кроме того, непосредственно на схему могут быть выведены значения узловых потенциалов, токов компонентов и рассеиваемой мощности. Все эти величины могут быть выведены для последней точки расчета, средние за время расчета, либо среднеквадратичные за время расчета.

В принципе, подключение виртуальных измерительных приборов (амперметра и вольтметра) все-таки возможно, однако, это лишь вспомогательная функция, которую целесообразно использовать разве что для анализа режимов по постоянному току. Все-таки основной способ вывода данных в Micro-Cap — это вывод графиков в отдельном окне. Поэтому можно считать, что в наличии имеется лишь один основной измерительный прибор — виртуальный осциллограф-характериограф. И все выводы делаются, как правило, на основании полученных графических данных. Для более удобного использования Micro-Cap предоставляет ряд стандартных возможностей для автоматизированного анализа полученных графиков. В частности, можно получить значения периода или частоты периодического сигнала, длительности импульса, длительности фронта или среза, найти максимальное, минимальное, среднее или среднеквадратичное значение за время расчета и многое другое. Все это выполняется при помощи функций *Performance*.

2.2.8. Особенности моделирования схем с отечественными компонентами

Очень часто начинающие задают вопрос: «Где взять модели отечественных компонентов?». Ответ прост — их нет. Точнее, не существует официальных библиотек моделей отечественных компонентов, при использовании которых была бы гарантирована адекватность полученных результатов. Поэтому к библиотекам моделей отечественных компонентов, распространяемых в сети Интернет, нужно относиться с осторожностью.

Дело в том, что адекватные SPICE-модели компонентов могут создать только сами разработчики этих компонентов, поскольку для этого требуется большое число параметров, которых нет ни в одном из справочников. Однако SPICE-моделей отечественных компонентов, созданных разработчиками, практически не существует. Все, что встречается в сети Интернет — это разработки ВУЗов, созданные для учебных целей, либо собственные разработки пользователей SPICE-совместимых программ моделирования для решения каких-то своих конкретных задач. Очень сомневаемся, что эти модели в полном объеме тестировались на адекватность прототипам. Часть моделей — это фактически модели зарубежных аналогов отечественных компонентов, у которых заменено лишь имя модели. Ясно, что по параметрам российские компоненты все-таки отличаются от их зарубежных аналогов, но все равно это можно считать одним из лучших вариантов.

Также не стоит забывать, что в процессе всех этих переделок и доработок есть вероятность чисто технических ошибок. Тексты моделей никак не защищены, поменять параметры модели может любой желающий, кто и сколько раз корректировал модель — проследить невозможно. В результате гарантировать адекватность моделей, созданных коллективным творчеством сотен пользователей SPICE-совместимых программ и растажигованных посредством сети Интернет, принципиально невозможно. Ведь даже в фирменных моделях, размещенных на сайтах известных компаний-разработчиков, нередко встречаются серьезные ошибки. А вероятность ошибок в самодельных библиотеках — в тысячи раз выше. Поэтому пользоваться такими библиотеками можно разве что для учебных целей. А для сколько-нибудь серьезного моделирования схем с отечественными компонентами все-таки целесообразнее использовать модели зарубежных аналогов. Вероятность непредсказуемых ошибок при этом минимальна, а точность расчетов — точно будет не хуже. Аналоги для того или иного отечественного компонента можно найти в справочниках или же через поисковые системы Интернет.

Еще один возможный вариант — использовать компонент из стандартной библиотеки, подходящий по назначению. Назначение компонента, как правило, указано в примечании к модели вместе с основными параметрами. Иногда компоненты в библиотеке заранее рассортированы по назначению. Например, транзисторы в Micro-Cap рассортированы по группам (усилительные, генераторные, высоковольтные и т.п.), а в примечаниях (поле Memo) указаны их предельные токи и напряжения. Эти примечания выводятся в информационной строке в нижней части экрана и при наведении мыши на компонент в схеме. Использование подобной замены чаще всего дает вполне адекватные результаты.

Для иллюстрации вышесказанного можно посмотреть параметры транзистора KT815 из библиотеки, прилагавшейся к русифицированной версии Micro-Cap 8. Анализ этих параметров показывает, что это "пустышка" — базовая модель биполярного транзистора Micro-Cap с параметрами, принятыми по умолчанию. Это модель не имеет ничего общего с реальными параметрами транзистора KT815. В текстовом режиме параметры этой модели даже не отображаются. А вот с его аналогом (по справочнику) BD135 — все нормально.

Модель транзистора КТ315В в этой библиотеке также неадекватна. Во-первых, модель неполная, а во-вторых, коэффициент передачи тока в модели равен трем, что явно не соответствует действительности. Видимо, кто-то менял параметры модели под свои нужды, а потом она попала в библиотеку и ее вместе с ошибочно заданными параметрами уже несколько лет распространяют через Интернет...

В общем, использование заведомо самодельных моделей — это потеря. Может, повезет, а может, и нет. Лучше не рисковать.

2.2.9. Моделирование неэлектрических воздействий

В Micro-Cap из неэлектрических воздействий в явном виде возможен только учет температуры — в выражениях можно использовать параметр TEMP, а значение температуры, при которой проводится расчет, задается в параметрах анализа. Учет температурных зависимостей возможен во многих моделях компонентов. Однако точность учета влияния температуры сильно зависит от разработчика модели: включили ли они в ее состав блок, описывающий влияние температуры на параметры компонента или нет. Правда температурные зависимости можно задавать и самостоятельно, но для этого необходимо знать эти зависимости для реальных компонентов.

Моделирование остальных неэлектрических воздействий в явном виде невозможно и приходится применять некоторые условности.

Различного рода датчики (устройства преобразования неэлектрических воздействий в электрические) в принципе могут быть компонентами моделируемой схемы. Но для них предварительно создаются имитационные полностью электрические модели (с неким коэффициентом преобразования неэлектрической величины в электрическую), а входное воздействие в виде изменения неэлектрического параметра условно заменяется источником электрического сигнала. Такую же замену можно проводить и для моделирования температурного воздействия на отдельный компонент. Предположим, нужно провести анализ работы схемы, содержащей терморезистор с температурной зависимостью 30 Ом/град., температура которого меняется от 50 до 100 градусов. Такое температурное воздействие моделируется источником напряжения, меняющегося от 50 до 100В, а сам терморезистор моделируется нелинейным резистором, сопротивление которого с коэффициентом 30 Ом/В зависит от напряжения. Зависимости от управляющего воздействия могут быть линейными, нелинейными (заданные математическими функциями) или табличными. В последнем случае характеристика преобразования задается непосредственно по точкам графика и может быть сколь угодно сложной.

2.2.10. Особенности анализа цифровых схем

Для цифровых схем программа Micro-Cap рассчитывает цифровые состояния в узлах схемы и временные задержки распространения сигнала. Следует отметить, что модели цифровых компонентов корректно ведут себя только в штатном режиме работы. А в нештатном режиме (например, при подаче на цифровой вентиль аналогового сигнала) поведение модели может не совпадать с поведением реального цифрового компонента. Это связано с тем, что учет внутренней схемотехнической реализации реальных логических элементов очень условен и в большинстве случаев не отражает некоторых

особенностей реальных микросхем. Вследствие этого при моделировании устройств, использующих цифровые микросхемы для обработки аналоговых сигналов, могут получаться недостоверные результаты. Например, если реальный логический инвертор охватить обратной связью, то он будет работать как усилитель аналогового сигнала. При моделировании в Micro-Cap такого не произойдет, поскольку выходной сигнал вентиля описывается логической операцией и ничем другим, кроме как логическим нулем или логической единицей являться не может. Поэтому логический вентиль не может быть усилителем. Однако функцию порогового элемента цифровой вентиль выполнять может, поскольку его модель содержит на входе преобразователь аналогового сигнала в цифровой, который формирует логические уровни по достижении входным напряжением определенных порогов.

Эту особенность цифровых моделей следует помнить при анализе существенной части радиолюбительских схем. К примеру, в генераторе на инверторах, строго говоря, цифровые микросхемы используются в нештатном режиме. И не все такие генераторы удастся промоделировать в Micro-Cap.

2.2.11. Совместное использование цифровых и аналоговых компонентов

Как было сказано выше, цифровые компоненты в Micro-Cap оперируют только с цифровыми сигналами. Поэтому при создании смешанных схем в точке соединения аналогового и цифрового компонентов программа автоматически добавляет невидимую пользователю схему сопряжения. При этом от пользователя никаких дополнительных действий не требуется. Необходимо только помнить, что в точке сопряжения фактически присутствуют два узла – аналоговый и цифровой. Соответственно, напряжения в этих узлах можно вывести отдельно и они могут быть разными.

Для цифровой схемы даже обычный резистор будет являться чужеродным компонентом, требующим подключения схем сопряжения. Поэтому в цифровых схемах для задания логических уровней используются специальный тип компонента — цифровой (подтягивающий) резистор. Именно этот компонент подключается к выходу микросхем с открытым коллектором, а также используется для подачи уровня логического нуля или логической единицы на входы цифровых микросхем.

Подробно интерфейсные схемы сопряжения, добавляющиеся на стыке аналоговой и цифровой части моделируемой схемы, будут рассмотрены в главе 13.

2.3. Основные правила моделирования электронных устройств с использованием программ схемотехнического анализа

Характерной ошибкой при анализе электронных схем с использованием программ схемотехнического анализа (в частности Micro-Cap) является «лобовой» подход к моделированию. При этом принципиальная схема устройства (подчас достаточно сложного) механически переносится в редактор схем, затем лихорадочно ищутся модели компонентов или их аналоги (подобных вопросов полно в любом Internet-форуме по электронике). Но, к удивлению новичков, при попытке запустить анализ ничего похожего на ожидаемые ре-

жимы работы не получается. Или же появляется сообщение о какой-нибудь ошибке. Сразу же — разочарование. Ведь все компоненты и их номиналы скопированы с рабочей схемы (из книги, журнала и т.п.). А схема не работает. Часто попытки определить причину такого поведения программы схемотехнического анализа для новичка заканчиваются неудачей. После этого выносится вердикт — программа никуда не годна. И начинается поиск новой версии или другой, более «продвинутой» программы. Хотя на самом деле причина неудач банальна — незнание принципов работы систем схемотехнического анализа, алгоритмов расчета и используемых моделей компонентов. И, как следствие, непонимание ограничений, которые необходимо учитывать при моделировании электронных устройств.

Современные версии программы Micro-Cap позволяют моделировать достаточно сложные схемы. Это большой плюс для опытных пользователей, но ловушка для новичков. У них возникает желание сразу промоделировать электронное устройство именно в том виде, в каком оно изображено на принципиальной схеме. Но обычно это сделать «с ходу» можно только для достаточно простых схем. Поэтому перед началом моделирования необходимо сначала немного подумать и «отсечь лишнее». Ведь каждый компонент усложняет расчетную модель, увеличивает вероятность ошибки и затрудняет отладку схем. Да, именно отладку! Очень многие не придают значения тому, что проводят **имитационное** моделирование. И поведение расчетной модели имитирует поведение реальной схемы практически во всем. В том числе и в необходимости процесса настройки.

Общеизвестно, что сложная аналоговая схема даже после заведомо правильной сборки может не работать вообще или потребовать подстройки (проверки и подгонки режимов). А тот факт, что такой же настройки, подгонки и проверки требует расчетная модель, почему-то вызывает удивление.

Авторы книги используют программы семейства Micro-Cap достаточно давно (начиная с Micro-Cap II). Естественные ограничения и несовершенство младших версий позволили за эти годы наработать ряд приемов, которые позволяли выполнять достаточно сложные расчеты даже при скудных возможностях программы. Эти приемы актуальны и при использовании современных версий. Они намного упрощают освоение программ схемотехнического анализа и позволяют получить практические навыки работы с ними, а также экономят массу времени, которое начинающие пользователи тратят на борьбу с характерными ошибками. Кроме того, использование не только компьютера, но еще и собственной головы, позволяет лучше разобраться в принципах работы моделируемых электронных устройств.

Общие правила моделирования достаточно просты. Необходимо четко осознать, что моделирование электронных устройств с использованием пакетов программ схемотехнического анализа включает в себя несколько этапов:

- определение задач моделирования;
- анализ моделируемой схемы, разложение ее на функциональные узлы и выбор упрощающих допущений;
- построение модели анализируемого устройства с учетом упрощающих допущений;

- проведение расчета по построенной модели и анализ полученных результатов;
- максимально возможное приближение модели к схеме анализируемого устройства, получение окончательных результатов и их анализ.

Рассмотрим эти этапы подробнее.

Определение задачи моделирования

Моделирование электронного устройства подразумевает, что это устройство предварительно разработано и проведен расчет его компонентов инженерными средствами. Поэтому в задачи моделирования могут входить:

- Подтверждение правильности проведенных инженерных расчетов и проверка работоспособности устройства;
- Исследование чувствительности к разбросу параметров компонентов;
- Исследование нестационарных и аварийных режимов работы;
- Исследование температурной неустойчивости устройства;
- Подбор корректирующих цепей или их расчет по полученным предварительным результатам.

Анализ моделируемой схемы, разложение ее на функциональные узлы и выбор упрощающих допущений

Как уже отмечалось выше, существенная часть электронных устройств слишком сложна для непосредственного анализа. Кроме того, в сложной схеме трудно найти ошибку. Если в качестве модели использовать полную принципиальную схему, время расчета может стать неоправданно большим, либо такой расчет не удастся провести вовсе из-за расходимости процессов вычислений (появится сообщение «матрица сингулярна»).

Однако, анализ любой схемы показывает, что она состоит из основных и вспомогательных функциональных узлов. Вспомогательные узлы обеспечивают заданные режимы работы основных узлов и моделирование их работы нецелесообразно (по крайней мере, на первом этапе). К ним относятся цепи питания, источники тока и напряжения смещения, задающие генераторы и т.п. Как правило, все эти узлы целиком целесообразно заменить стандартными моделями Micro-Cap.

Наиболее характерные примеры упрощенных моделей:

- Источник питания — *battery*.
- Источник напряжения смещения (стабилитрон, прямосмещенный диод) — *battery*.
- Источник тока — *Isource*.
- Задающий генератор (прямоугольник, пила) — *pulse source*.
- Сеть промышленной частоты (220В, 50Гц) — *sine source*.
- Понижающий сетевой трансформатор — *sine source*.
- Варикап — *capacitor*.
- Компаратор, транзисторный ключ — *switch*.
- Операционный усилитель с ограничением — *function source*.

Кроме того, в схеме можно использовать идеализированные функциональные блоки (усилитель, интегратор, триггер Шмидта, таймер и т.п.), вы-

полненные в виде макромоделей. Набор таких макромоделей в Micro-Cap 9, 10 достаточно обширен и имеется возможность создавать свои макромодели.

Построение модели анализируемого устройства с учетом упрощающих допущений

Используя рассмотренные выше допущения, строится упрощенная модель анализируемого устройства. Распространенной ошибкой является построение сразу полной модели. Если моделируемое устройство достаточно сложное, то для построения работоспособной модели целесообразно пользоваться методом поблочной настройки, используемым для наладки реальных электронных устройств. Суть его состоит в том, что сначала добиваются работоспособности отдельных узлов и лишь потом объединяют их вместе. Например, при анализе усилителя мощности целесообразно сначала промоделировать входной каскад на ОУ (не забыв соответствующим образом замкнуть обратную связь), затем подсоединить выходные каскады, подобрать напряжение смещения этих каскадов и лишь затем завести общую обратную связь и добавить цепи термостабилизации, коррекции и защиты по току. Пренебрежение этим правилом иногда сильно затрудняет получение работоспособной модели.

Кроме того, не стоит забывать, что поиск моделей конкретных компонентов (например, точной модели какого-нибудь транзистора, используемого в реальной схеме) во многих случаях нецелесообразен. Достаточно обобщенной модели \$Generic или ближайшей по параметрам модели, имеющейся в библиотеке Micro-Cap (если, конечно, целью моделирования не является исследование поведения конкретного транзистора в данной схеме).

Кроме того, имеющуюся модель можно подредактировать для приведения в соответствие со справочными параметрами для нужного транзистора.

Однако при использовании упрощенных (обобщенных) моделей не следует забывать про их особенности. К примеру, отсутствие насыщения у простейшей модели операционного усилителя (модель Level 1) приведет к неработоспособности ряда схем, в которых используется именно этот режим работы компонента.

Проведение расчета по построенной модели и анализ полученных результатов

После получения упрощенной модели проводятся расчеты в соответствии с задачами моделирования. На этом этапе анализ полученных результатов проводится для того, чтобы проверить правомерность принятых упрощающих допущений и, если нужно, провести усложнение модели. На этом же этапе проводится точный подбор цепей смещения и коррекции, а также статистический анализ и определение чувствительности к параметрам компонентов.

Максимально возможное приближение модели к схеме анализируемого устройства, получение окончательных результатов и их анализ

На этом этапе проводят окончательный расчет по скорректированной модели, получают все необходимые характеристики и на основе их анализа делают окончательные выводы.

2.4. Русификация Micro-Cap и выбор стандартов УГО

2.4.1. Использование русскоязычного интерфейса

Micro-Cap 9, 10 в отличие от предыдущих версий допускает переключение между несколькими языками интерфейса. Все интерфейсное оформление для каждого языка содержится в одном файле-библиотеке .dll. В штатной поставке Micro-Cap имеется одна библиотека (для англоязычного интерфейса) — MC9eng.dll (MC9demoeng.dll для демоверсии). Однако нет технических проблем по формированию локализованных библиотек интерфейсов, в том числе и для русского языка. Переключение между ними — штатная функция MC9, MC10.

Локализованные версии программ пользуются достаточно большой популярностью. Однако при несомненных удобствах у русского интерфейса есть один очень существенный недостаток — трудно (а иногда невозможно) пользоваться встроенной подсказкой (если она не локализована), фирменными руководствами и книгами, в которых используется оригинальный (англоязычный) интерфейс программы. Поэтому пользоваться версией с русским интерфейсом проще, а разбираться и изучать по ней возможности Micro-Cap — намного сложнее (за исключением самых простых и очевидных вещей).

Однако в Micro-Cap есть информационная строка (status bar). В ней появляется краткое описание того элемента программы, в котором в данный момент находится курсор. Еще более краткое описание появляется рядом с курсором при наведении на элемент интерфейса. Поэтому, если русифицировать информационную строку, то получается весьма интересный вариант — интерфейс и все команды останутся исходными (можно пользоваться описаниями), но в тоже время они фактически дублируются по русски в информационной строке. Такой вариант локализации может оказаться наиболее удобным для существенного числа пользователей: опытным не мешают русские названия (они привыкли к английским), а новичкам смысл команд ясен из информационной строки.

Однако и полностью русифицированный вариант тоже имеет право на жизнь. Он, скорее всего, будет востребован теми, кто не хочет (или кому не надо) разбираться в сложных возможностях Micro-Cap, а собирается использовать его для простых и очевидных расчетов. Поэтому авторы книги разработали два варианта русифицированного интерфейса для Micro-Cap 9. Скачать их можно с сайта <http://www.microcap-model.narod.ru> или с форума www.microcap.forum24.ru.

Выбор интерфейса осуществляется в разделе меню *Options>Preferences>International Settings*. Подробности установки библиотек локализации смотрите на сайте и в форуме по указанным ссылкам.

2.4.2. Использование разных стандартов УГО

По умолчанию в программе Micro-Cap 9, 10 установлен американский стандарт условных графических изображений (*Main*). Но возможна установка европейского стандарта (Euro) и других стандартов. Выбор стандарта, который будет использоваться в данной схеме, осуществляется в окне свойств

для новых схем (меню *OPTIONS> Default Properties For New Circuits*) (рис. 2.6).

При создании новых схем будет использоваться стандарт, который имеет наивысший приоритет (в данном случае *Main*). На ранее созданные схемы изменения распространяться не будут.

Кроме того, возможно не только полное переключение стандарта, но и изменение вариантов УГО внутри стандарта. Например, для американского стандарта *Main* возможно задать европейское начертание резистора. Сделать это можно через редактор компонентов, который запускается из главного меню командой *Windows>Component Editor* (рис. 2.7).

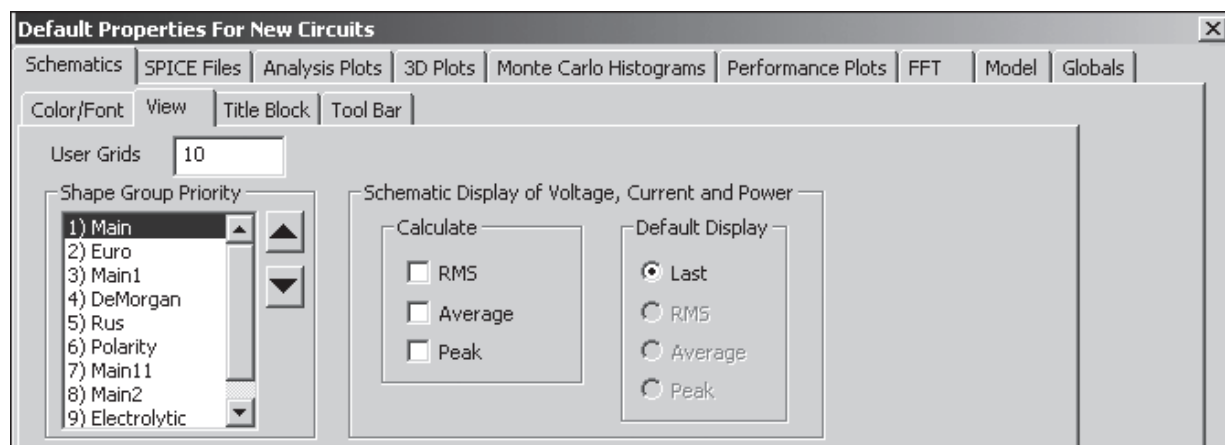


Рис. 2.6. Выбор стандартов УГО.

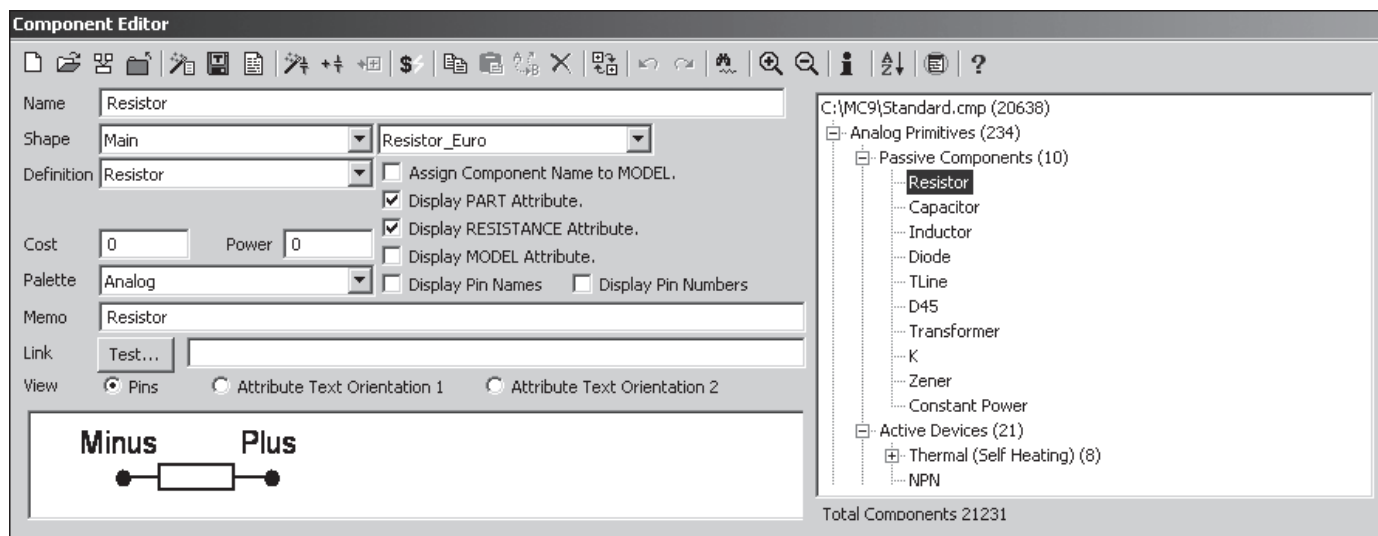


Рис. 2.7 Изменение УГО резистора в стандарте *Main*

По умолчанию в поле *Shape* установлен стандарт *Main*, а в нем УГО для резистора *Resistor*. Если УГО заменить на *Resistor_Euro*, то во всех ранее созданных и вновь создаваемых схемах начертания резисторов изменятся. Однако если этот схемный файл передать пользователю, у которого используются стандартные установки *Main*, то у него резисторы вернуться к исходному виду, принятому для американского стандарта.

2.5. Примеры построения и анализа электронных схем

2.5.1. Транзисторный каскад по схеме с общим эмиттером

Построение схемы моделирования

Предположим, необходимо исследовать работу транзисторного каскада. Для этого надо нарисовать в окне его схему. Пусть это будет усилительный каскад на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером. Эта схема очень простая и никаких упрощающих допущений не требуется.

Для ввода компонента в Micro-Cap существуют три способа: выбрать его на верхней панели (там имеются условные графические обозначения наиболее часто используемых компонентов), выбрать его в меню *Component* либо на левой панели компонентов. Наиболее удобно пользоваться верхней и левой панелями.

На левой панели компонентов в разделе *Active Devices* выбираем *NPN* (рис. 2.8). Появляется его условное графическое обозначение.

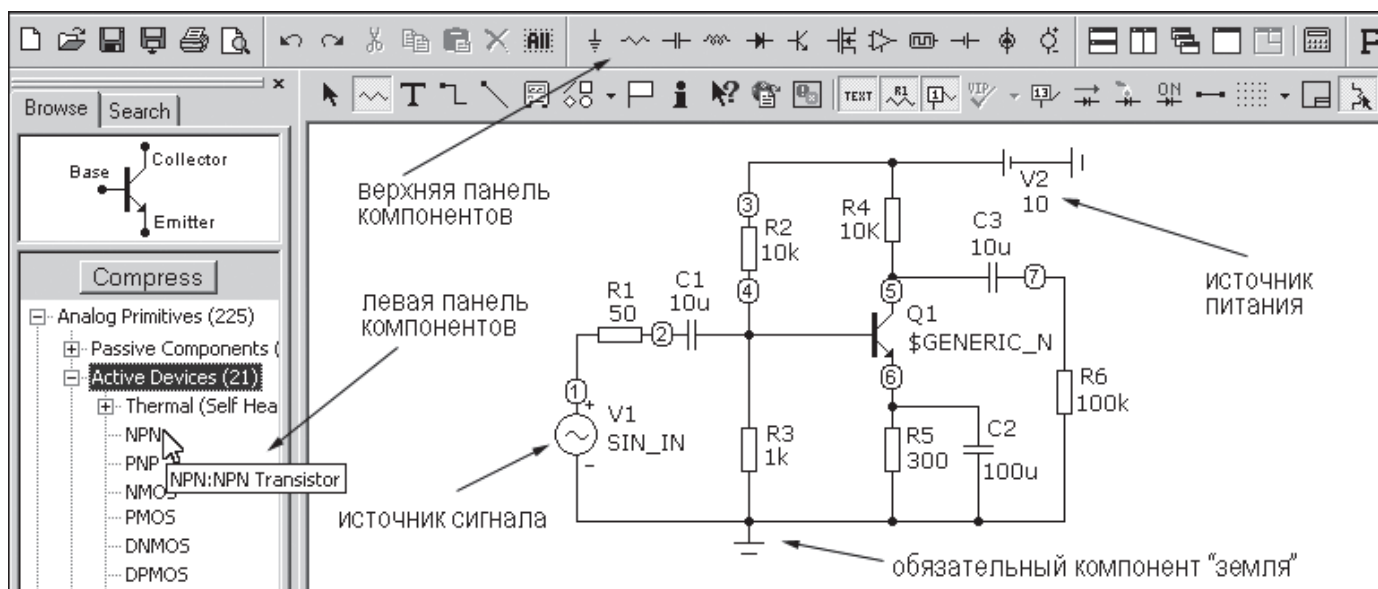


Рис. 2.8. Построение схемы транзисторного каскада

Помещаем транзистор в нужное место и нажимаем левую клавишу мыши. Появляется окно задания параметров транзистора. В правой его части – список стандартных моделей, имеющих в Micro-Cap 9, 10. Если нужного транзистора в списке нет, то можно выбрать обобщенную модель *\$GENERIC_N*. В дальнейшем ее можно будет заменить на любую другую. Компонентам автоматически присваиваются позиционные обозначения (в порядке добавления). Наш транзистор получил условное графическое обозначение Q1.

Затем на верхней панели нажимаем ярлычок резистора и начинаем добавлять эти компоненты в схему. Если нажать левую клавишу мыши, и, удерживая ее, нажимать правую, то компонент будет вращаться. После отпущения левой клавиши вызывается окно задания параметров. Для резистора достаточно задать его сопротивление. Стоит обратить внимание, что целая часть отделяется от дробной точкой, а не запятой. Множитель U (u) означает микро, M (m) – милли (см. табл. 2.1). Остальные необязательные параметры будут рассмотрены позже в соответствующем разделе книги. При построении

схемы желательно включить отображение текстовых надписей, позиционных обозначений компонентов и номеров узлов.

Пусть на каскад подается сигнал с источника синусоидального напряжения с частотой 100 кГц, амплитудой 40 мВ и внутренним сопротивлением 10 Ом. Эти значения необходимо ввести в окне задания параметров источника синусоидального сигнала (рис. 2.9). Сам источник можно выбрать на левой панели компонентов в разделе *Waveform Sources* (источники сигналов).

В окне задания параметров вводим $F=10\text{k}$, $A=0.025$, $R_S=10$. Остальные значения — нулевые. Для того, чтобы посмотреть график получившегося напряжения источника, нужно нажать кнопку *Plot*. Таким же образом можно посмотреть выходное напряжение (или ток) любого источника сигнала.

Схема моделирования обязательно должна содержать «землю» — специальный компонент, который подсоединяется к узлу, потенциал которого принимается за нулевой.

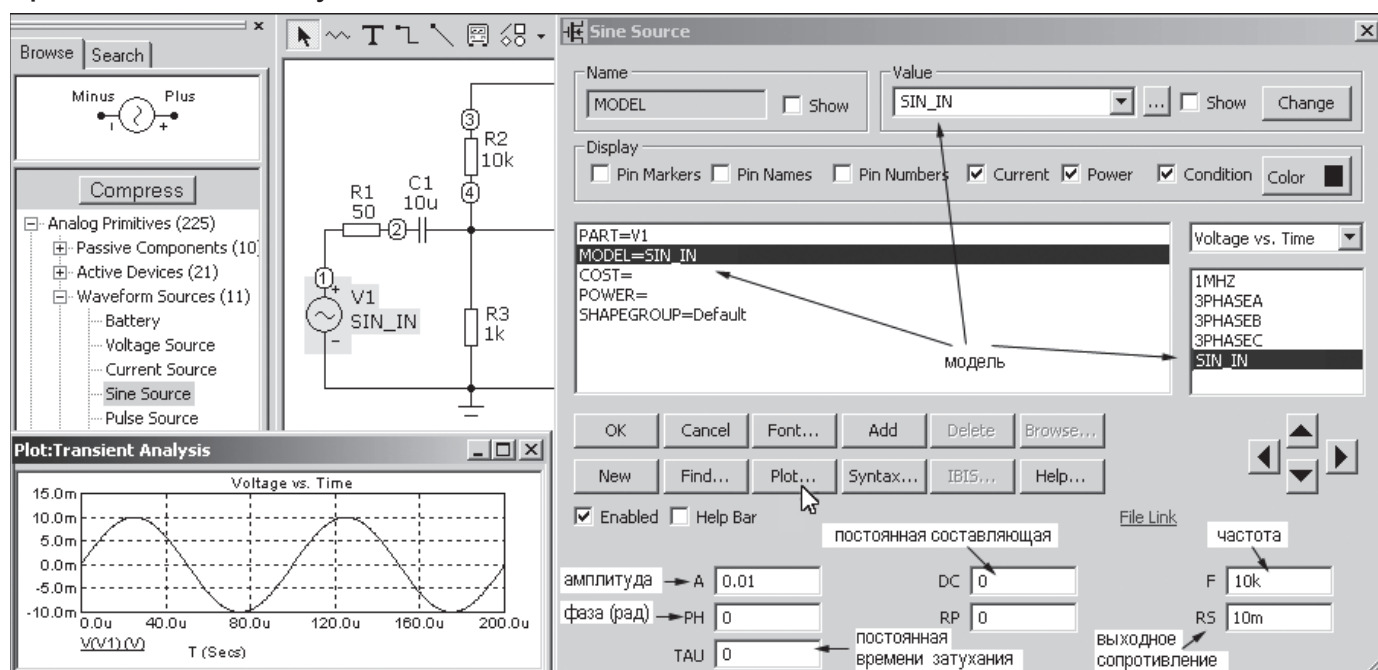


Рис. 2.9. Задание параметров источника сигнала

Анализ режимов работы транзисторного каскада

Для демонстрации возможностей Micro-Cap 9, 10 при отладке схем параметры каскада с общим эмиттером преднамеренно не рассчитаны точно, а просто взяты исходя из грубых прикидочных соотношений.

Для анализа переходных процессов выбираем в главном меню пункт *ANALYSIS>Transient*. Появляется окно задания параметров моделирования (рис. 2.10).

В нем нужно задать время расчета 300 μ (это — 300 мкс, три периода сигнала входного генератора). Кроме того, можно задать максимальный шаг анализа (например, 0.1 μ). По умолчанию этот параметр 0, максимальный шаг расчета выбирается автоматически, но при этом может возрасти погрешность расчетов и кривые могут стать ломаными. Установленный флаг *Operating Point* означает, что перед расчетом переходных процессов будет проведен расчет режима работы каскада по постоянному току. В частности, напряжения на конденсаторах примут установившиеся значения.

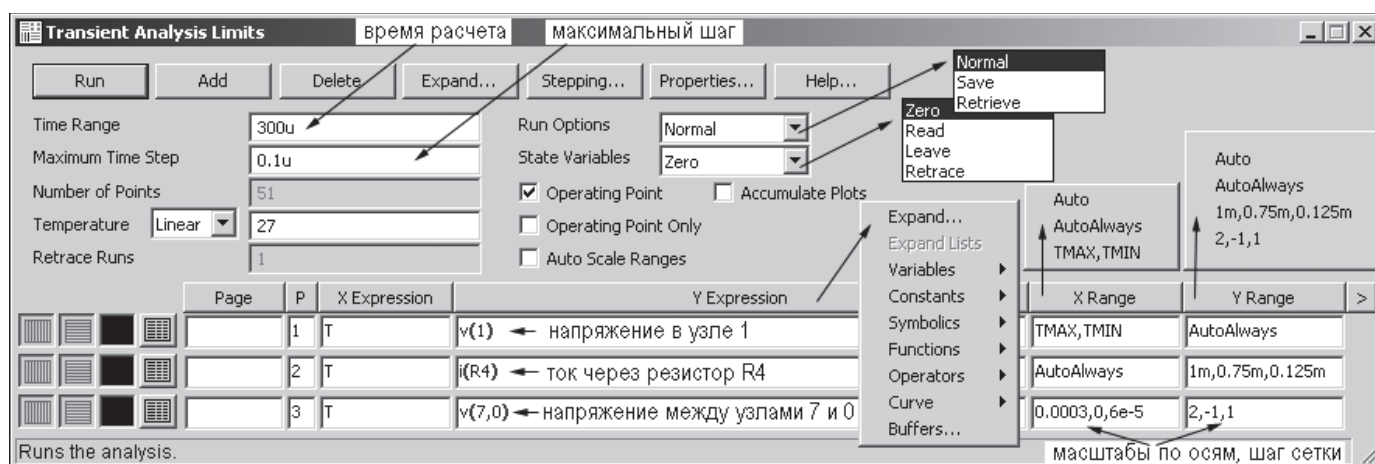


Рис. 2.10. Схема для моделирования и параметры источника сигнала.

Кроме того, надо задать параметры выводов графиков: номер графика; выражения, которые будут выводиться по осям X и Y; и масштаб. Для примера на первом графике по оси X — время, по оси Y — напряжение в узле 1 (на входе). Напряжение в узле задается выражением $V(1)$, масштаб по оси X выбирается автоматически (TMAX, TMIN), по оси Y — задан в явном виде (диапазон от -30 мВ до 30 мВ с шагом сетки 15 мВ).

Если нужно вывести напряжение между узлами, то эти узлы перечисляются в скобках. Так на третьем графике задано напряжение между узлами 7 и 0 («землей») — $V(7,0)$. Если нужно задать ток между узлами, то в поле *Y Expression* задается, к примеру, $I(1,3)$. Но при этом между узлами должна быть только одна ветвь (путь протекания тока). Если между узлами несколько ветвей, то нужно задавать токи компонентов. На втором графике задан вывод тока через резистор R4 — $I(R4)$.

Можно также выводить мощности, токи и напряжения полупроводниковых приборов и т.п. (более подробно — в соответствующем разделе описания). Для задания многих параметров можно щелкнуть правой клавишей мыши в поле раздела *Y Expression* и выбрать раздел открывающегося меню.

Такие же заготовки есть и для полей *X Range* и *Y Range*. Они позволяют быстро заполнять поля масштабов для новых графиков. Если выбрать значение *AutoAlways*, то масштаб для этого графика будет выбираться автоматически. Если поставить «галочку» в *Auto Scale Ranges*, то автоматически будет выбираться масштабы сразу для всех графиков по всем осям.

Команда *Run* запускает расчет и в окне появляются заданные графики. В качестве примера приведены графики входного и выходного напряжения, а также тока коллекторного резистора (рис. 2.11). Усилитель работает с большими искажениями, поскольку у каскада неправильно установлен режим по постоянному току. В режиме покоя напряжение на коллекторе транзистора должно приблизительно равняться половине напряжения питания.

В режиме анализа переходных процессов в дополнение к графикам можно вывести прямо на схему узловые потенциалы и состояния полупроводниковых приборов (рис. 2.12, а), а также токи через компоненты (рис. 2.12, б).

Следует отметить, что при проведении анализа переходных процессов на схему выводятся значения токов и напряжений в последней расчетной точке графиков (по умолчанию), а не режимы по постоянному току. Режимы по постоянному току можно получить только в анализе *DC* или *Dynamic DC*.

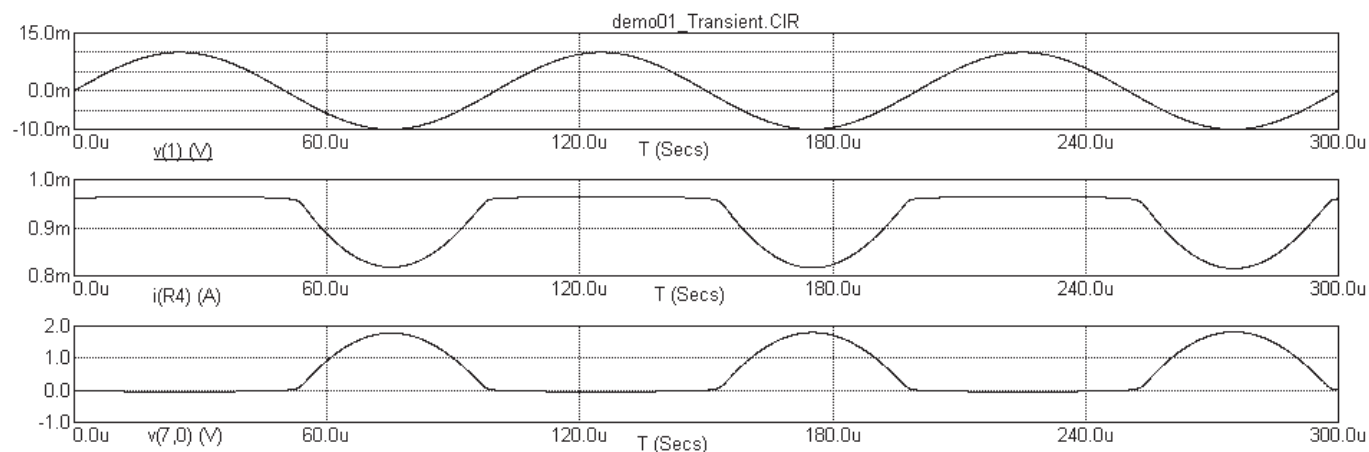


Рис. 2.11. Результаты выполнения анализа переходных процессов

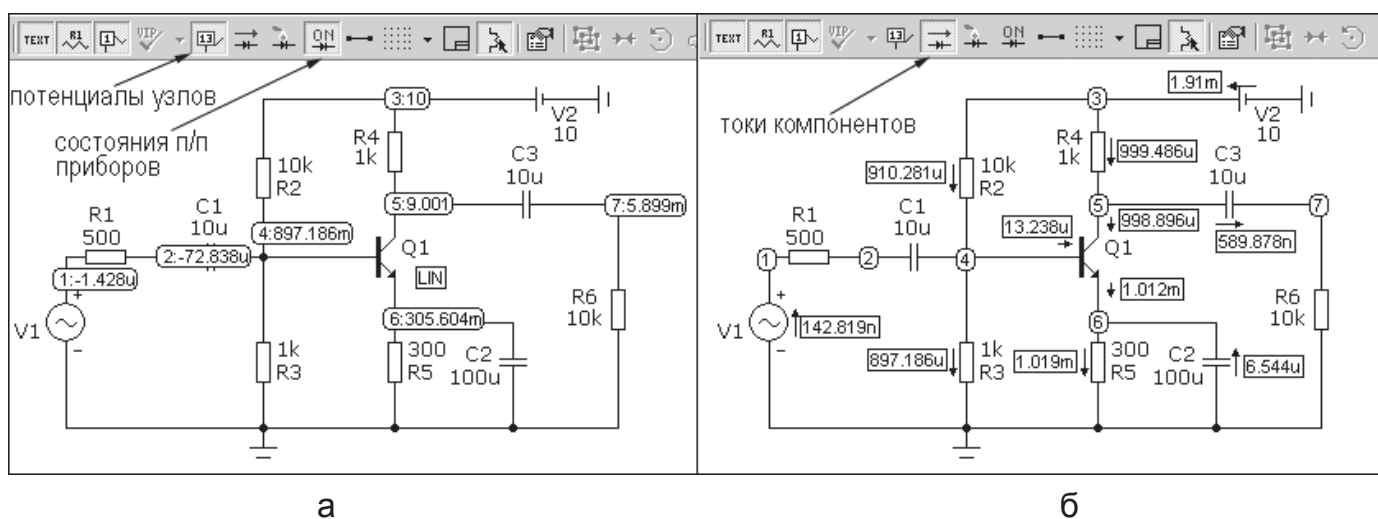


Рис. 2.12. Отображение узловых потенциалов и токов ветвей

Режим *Dynamic DC* (пункт меню *ANALYSIS*) — очень удобное средство для исследования режимов по постоянному току и настройки электронных схем. Во время этого анализа значения параметров компонентов можно менять, передвигая движки (как в переменном резисторе) и сразу видеть изменения токов и узловых потенциалов. Перед началом расчета появляется окно, в котором задается температура и минимальный шаг движков в процентах. После подтверждения *OK* можно менять параметры компонентов, сразу наблюдая изменения токов и узловых потенциалов.

В исходной схеме напряжение на коллекторе транзистора превышает примерно 0.5 вольта, т.е. он почти насыщен, поэтому искажения сигнала весьма велики. Его нужно вывести из насыщения, уменьшив ток покоя. Это можно сделать, меняя сопротивление *R3*. Плавно менять параметры компонента в этом режиме можно двумя способами:

- Выделить компонент, а потом стрелками $\downarrow \uparrow$ на дополнительной клавиатуре менять его параметры. Каждое нажатие на стрелку изменяет значение на 10%, но можно установить и другой шаг.
- Вывести на схемное окно слайдер (движок) для нужного компонента или компонентов. Для этого нужно выполнить команду *Dynamic DC>Slider>Add Slider*. В открывшемся окне выбирается компонент, для которого нужно

добавить слайдер, а также диапазон изменения параметра компонента и дискретность этого изменения. Таких слайдеров может быть несколько.

На рис. 2.13 слайдеры добавлены для резистора R3 (диапазон изменения сопротивления 500 Ом–1 кОм) и резистора R4 (диапазон изменения сопротивления 5 кОм–20 кОм).

Изменением сопротивления R3 установим коллекторное напряжение примерно 5В и повторим анализ переходных процессов. Синусоида стала почти симметричной, но все равно есть искажения из-за слишком большого размаха. Необходимо уменьшить коэффициент усиления каскада. Для этого снова можно перейти в режим *Dynamic DC*, уменьшить сопротивление R4, а затем изменением R3 вновь установить необходимое напряжение на коллекторе транзистора в режиме покоя. После этого усилительный каскад работает в нормальном режиме.

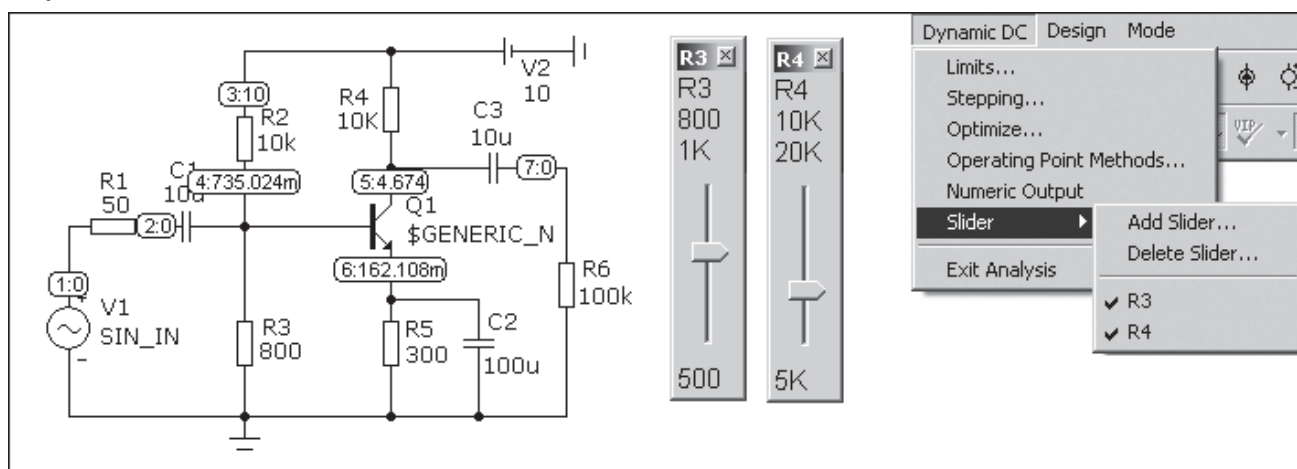


Рис. 2.13. Отладка каскада в Dynamic DC

Слайдеры на схему можно вывести и в остальных режимах анализа. Например, если вывести слайдер в режиме анализа переходных процессов *Transient*, то при перемещении движка слайдера сразу будут перестраиваться кривые на графиках. Если при этом включить режим накопления графиков (поставить «галочку» в графе *Accumulate Plots* в окне задания параметров анализа), то новые графики будут добавляться к ранее построенным в том же окне и можно проследить за происходящими изменениями (рис. 2.14).

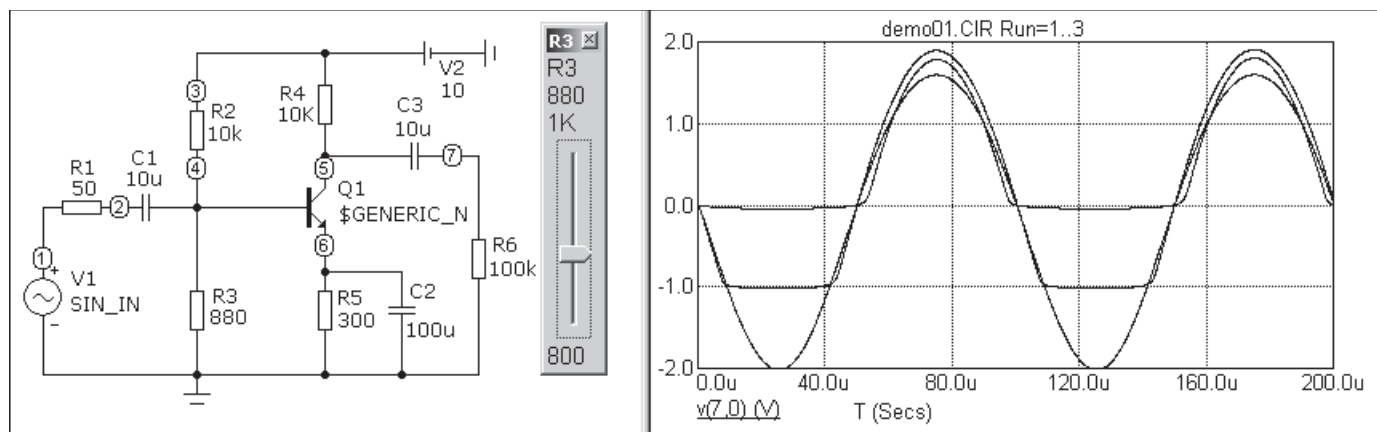


Рис. 2.14. Построение семейства графиков при изменении сопротивления резистора

В этом режиме на схему также можно вывести узловые потенциалы и токи компонентов, но это будут не значения для установившегося режима (как в

Dynamic DC), а значения в последней точке расчета переходных процессов. Однако вместо значений в последней точке можно вывести максимальные, средние или среднеквадратичные значения (Peak, Average, RMS). Для этого нужно установить расчет этих значений в свойствах схемы (вызываются щелчком левой клавиши мыши по полю схемы). Там в закладке *View* в разделе *Calculate* нужно установить галочки для RMS, Average и Peak, а в разделе *Default Display* — какие именно значения выводить по умолчанию.

После коррекции режима по постоянному току и проверки результатов в режиме анализа переходных процессов можно приступить к следующему этапу — построению частотной характеристики каскада. Для этого необходимо выполнить АС-анализ, запустив пункт меню *ANALYSIS>AC*. В этом примере частота меняется от 10 Гц до 100 МГц в логарифмическом масштабе. (рис. 2.15).

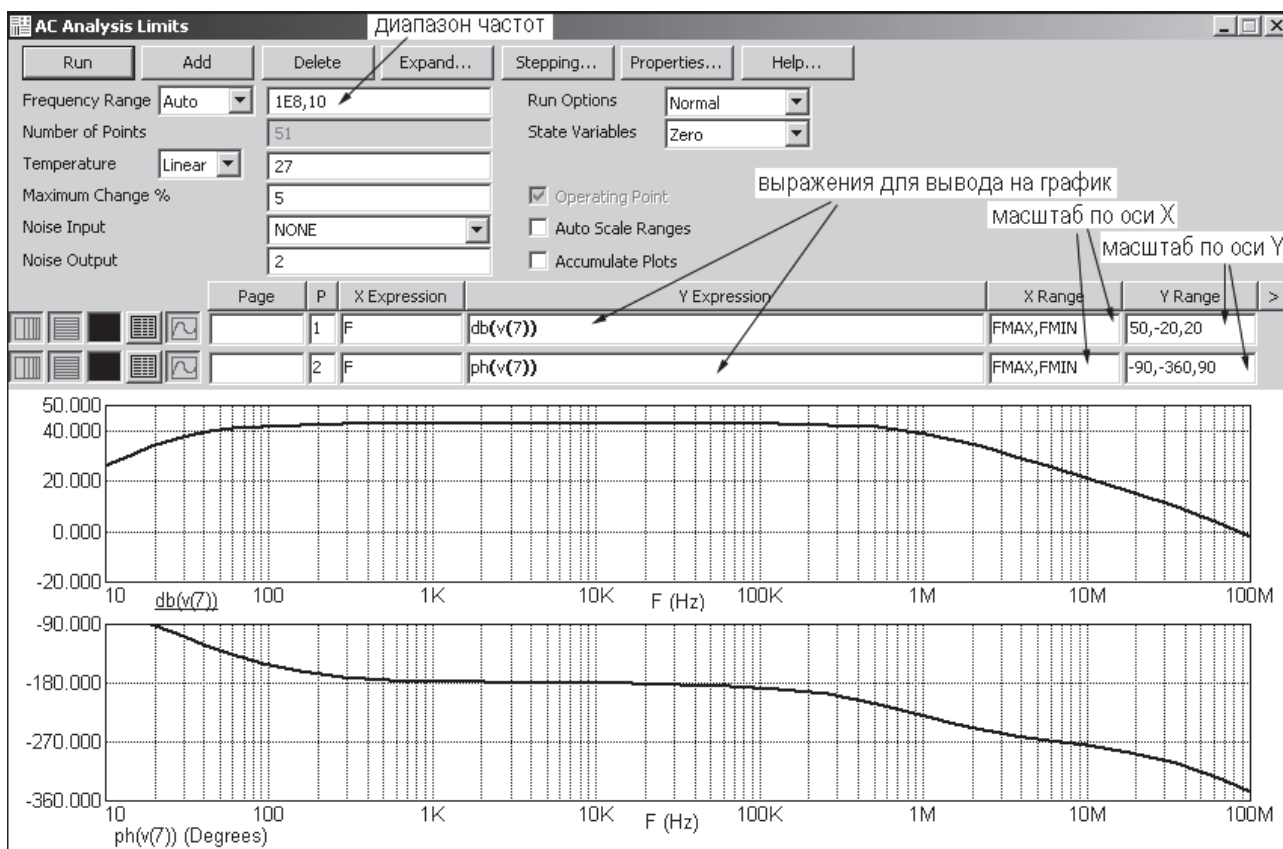


Рис. 2.15. Частотный анализ

На первом графике по оси Y — коэффициент усиления для выходного узла в децибелах (задается как $\text{db}(v(7))$). Диапазон вывода — от -20 до 40 дБ с шагом сетки 20 . На втором графике — фазочастотная характеристика в диапазоне от -90 до -360 град. с шагом сетки 90 градусов.

Схема-пример усилительного каскада *demo01.cir* находится в каталоге *Demo* архива примеров *Book-mc.rar*, который можно скачать с сайта www.microcap-model.narod.ru. Там же расположены остальные схемы примеров из этого раздела.

2.5.2. Получение семейства ВАХ биполярного транзистора при помощи Stepping

Micro-Cap может строить не только зависимости от времени, но и зависимость одного параметра от другого. Характерный пример таких зависимо-

стей — вольт-амперные характеристики транзистора (ВАХ). ВАХ биполярного транзистора — это семейство зависимостей тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер, полученное при разных значениях тока базы. Для построения таких характеристик в режиме анализа переходных процессов к базе транзистора нужно подключить источник тока, а к коллектору — генератор линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН) и выполнить серию расчетов (Stepping) с разными значениями тока базы. В качестве ГЛИН можно использовать источник напряжения Voltage Source (рис. 2.16). ГЛИН можно считать разновидностью источника импульсов Pulse, у которого передний фронт равен периоду ($TR=PER=10m$). Начальное значение (низкий уровень) $V1=0$, конечное значение (высокий уровень) $V2=5$.

Для проверки получившегося импульса можно нажать кнопку *Plot* и в открывшемся окне увидеть его график.

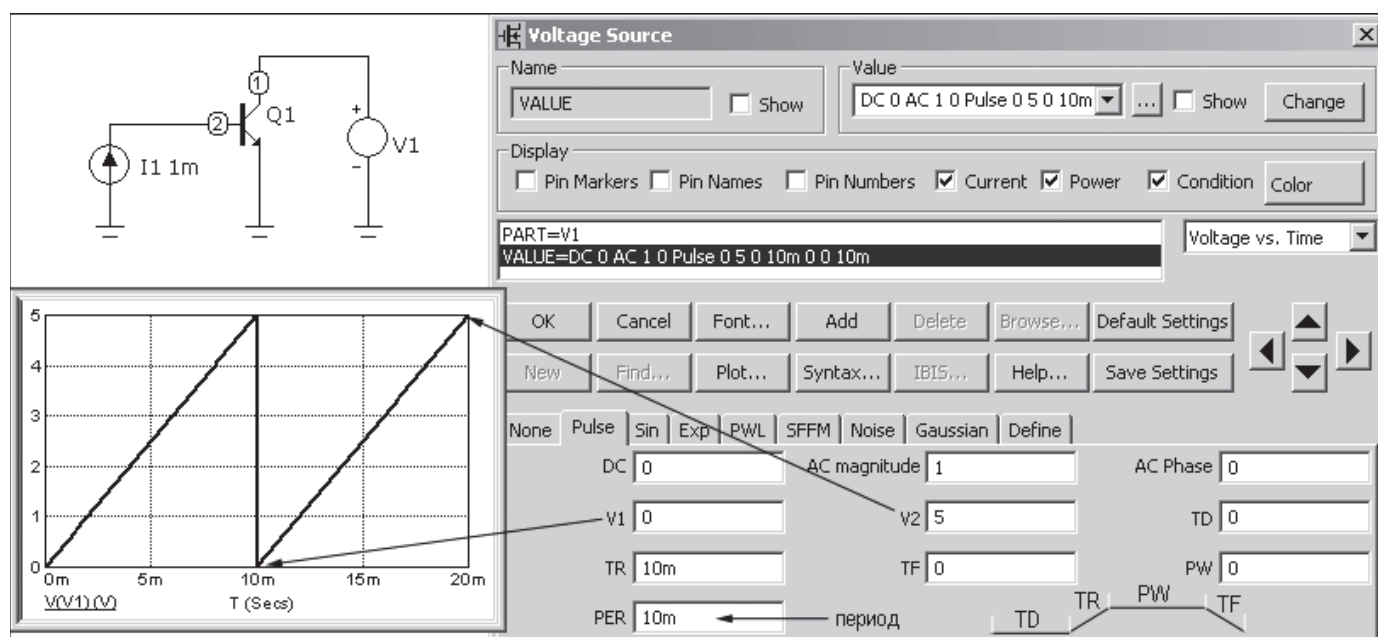


Рис. 2.16. Схема для получения ВАХ биполярного транзистора

Источник постоянного тока, подключенный к базе транзистора, должен менять свою величину в заданных пределах с заданным шагом (задается в окне *Stepping*). Для возможности запуска процесса моделирования ему надо задать какое-либо значение, например 1мА. В принципе, это значение в данном случае может быть любым, поскольку оно использоваться не будет, вместо него при вычислениях будут использованы параметры, заданные в окне *Stepping*.

Для вывода графика зависимости необходимо в окне *Transient Analysis Limits* один параметр задавать в поле *X Expression*, а другой в поле *Y Expression*. При построении ВАХ в поле оси X нужно ввести напряжение коллектор-эмиттер $V(1)$, а в поле оси Y — ток коллектора $IC(Q1)$ (рис. 2.17).

Следует обратить внимание, что Micro-Cap позволяет не только непосредственно вбивать значения в эти поля, но и выбирать возможные варианты из заготовок. Так, если щелкнуть правой клавишей мыши в поле, в которое надо ввести значение выражения для вывода на график, появится окно со стандартными заготовками. В нем можно выбрать необходимый нам ток коллектора транзистора Q1 (рис. 2.17).

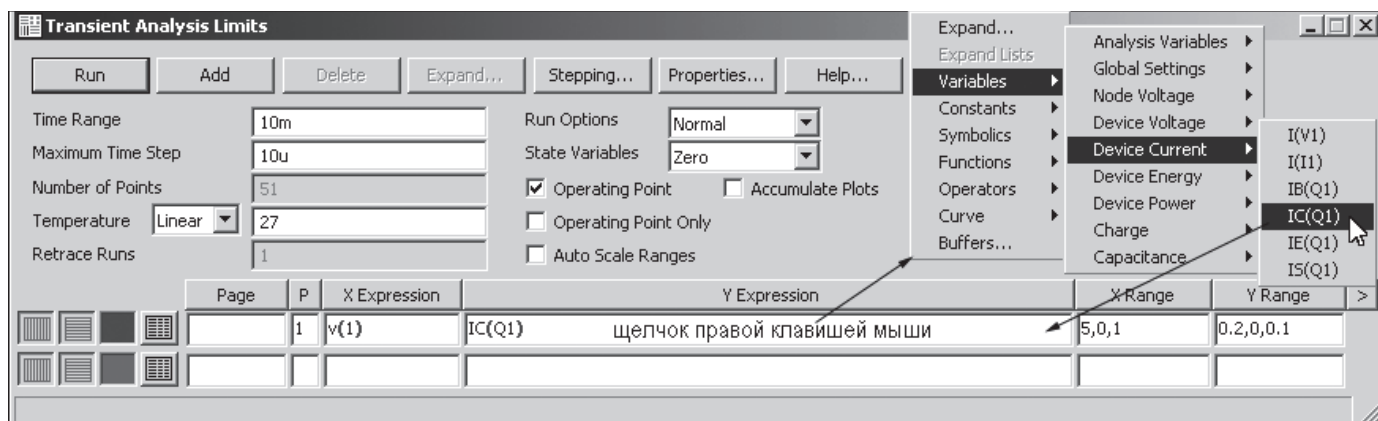


Рис. 2.17. Параметры анализа переходных процессов для вывода ВАХ

Время расчета *Time Range* должно совпадать с периодом ГЛИН (10 мс). Кроме того, желательно установить максимальное значение шага расчета *Maximum Time Step*. Без этого число расчетных точек будет невелико и графики будут не плавными, а состоящими из ломаных линий.

Если выполнить анализ переходных процессов с заданными выше параметрами, то будет построена только одна кривая зависимости ВАХ транзистора. Для получения семейства характеристик нужно выполнить многовариантный анализ *Stepping*, окно задания параметров которого вызывается одноименной кнопкой в параметрах анализа переходных процессов (рис. 2.18).

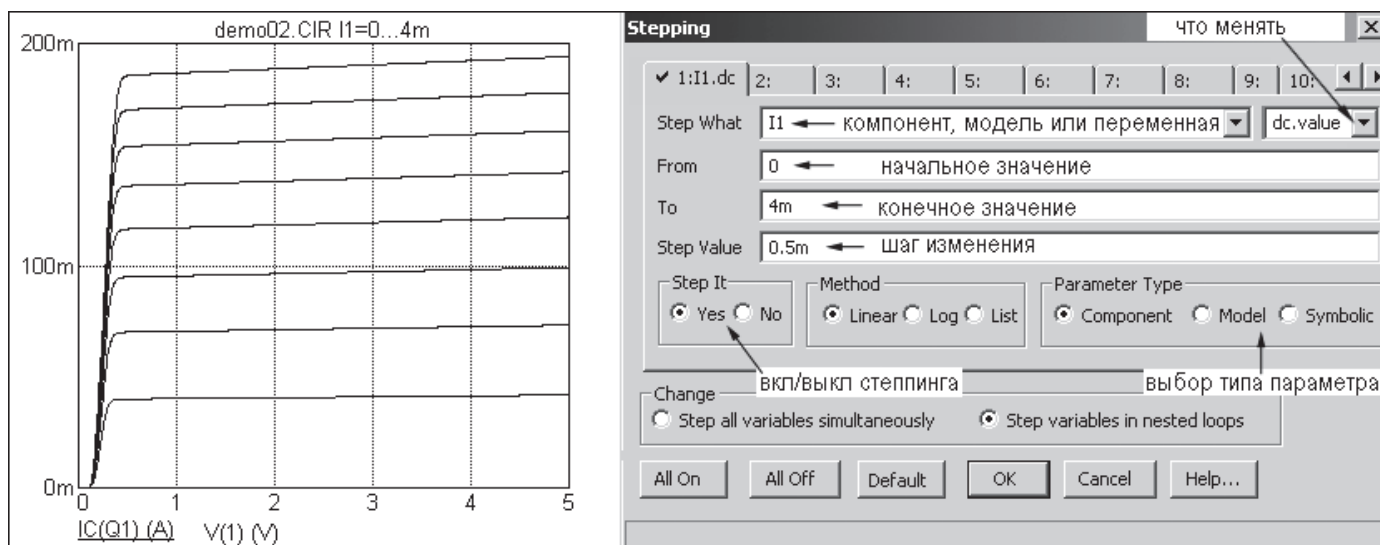


Рис. 2.18. Параметры стейпинга для получения ВАХ биполярного транзистора

По умолчанию тип параметра задан «Component». При таких установках можно менять с заданным шагом сопротивление резисторов, емкости конденсаторов, напряжения батарей и т.п.

Нам нужно менять величину тока источника I1. Поэтому при установленном типе параметра «Component», следует выбрать нужный компонент в списке слева. После этого в списке справа выбирается его изменяемый параметр (он один в данном случае) — DC.value. Затем задаются начальное и конечное значения тока и шаг его изменения (рис. 2.18).

Степинг по выбранному параметру можно отключить или включить в любой момент времени, переключая флажок *Step It*. Степинг можно задать сразу для нескольких параметров. Для каждого из них есть своя закладка в окне.

Схема-пример *demo02.cir* находится в каталоге *Demo* архива примеров.

2.5.3. Получение семейства ВАХ биполярного транзистора при помощи *DC Analysis*

В Micro-Cap можно построить ВАХ транзистора и более простым способом, нежели рассмотренный выше. Для этого нужно воспользоваться анализом режима по постоянному току *DC Analysis*. В этом случае к базе транзистора нужно подключить любой источник тока, а к коллектору — любой источник напряжения. Параметры этих источников расчете использоваться не будут. В частности, можно воспользоваться схемой рис. 2.16.

При выборе режима анализа DC появится окно задания параметров (рис. 2.19). В первой строке *Variable 1* — один из изменяемых в ходе анализа параметров, в строке *Variable 2* — второй изменяемый параметр.

В позиции *Range* для первого параметра задается диапазон изменения и максимально допустимый шаг, для второго — диапазон и шаг изменения параметра. Отдельно задавать степинг для такого варианта расчета ВАХ не требуется.

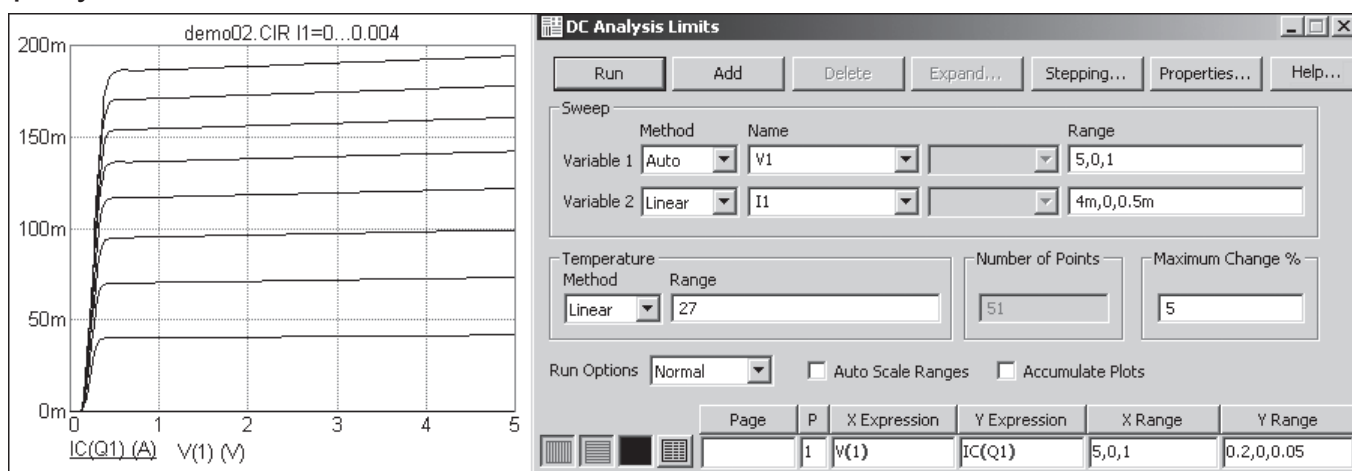


Рис. 2.19. ВАХ биполярного транзистора в *DC Analysis*

2.5.4. Использование функциональных блоков

В Micro-Cap возможно моделирование на только принципиальных схем, построенных на основе моделей реальных компонентов, но и моделирование идеализированных схем, построенных на основе функциональных блоков (рис. 2.20).

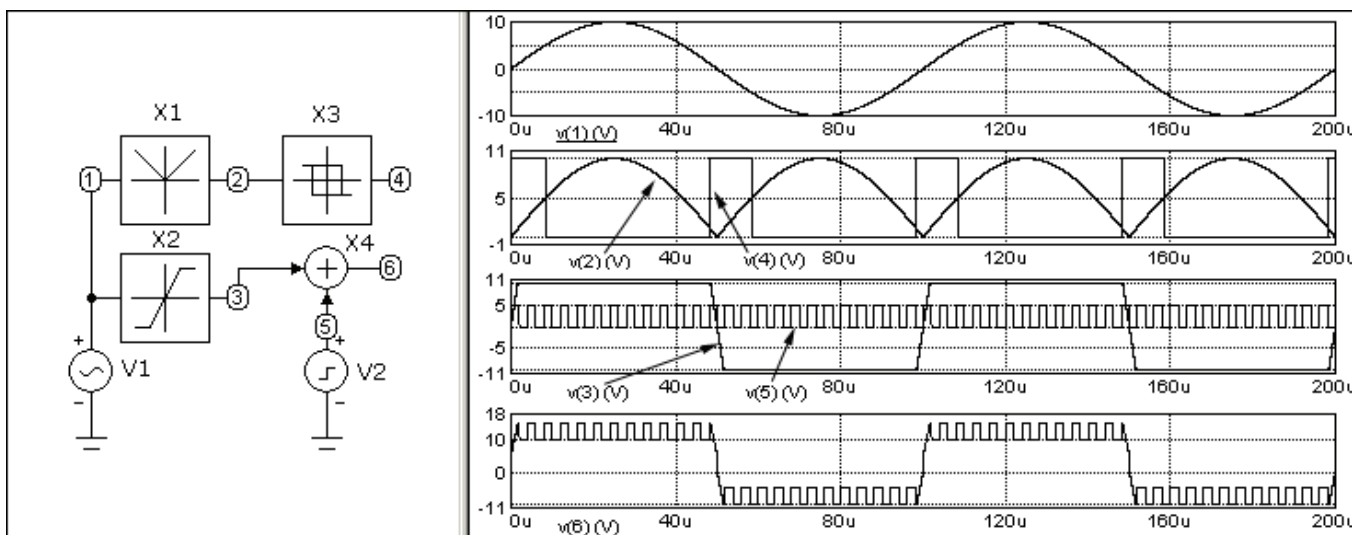


Рис. 2.20. Использование функциональных блоков для формирования сигналов

Эти функциональные блоки находятся в разделе *Macros* библиотеки аналоговых примитивов. В схему они добавляются точно также, как и остальные компоненты. По своей структуре функциональные блоки — это макроопределения. В принципе, имеется возможность их редактировать, менять внутреннюю структуру и параметры, создавать новые.

Стандартный набор функциональных блоков включает в себя практически все разновидности звеньев, используемых в теории автоматического управления (пропорциональное звено, интегрирующее звено, дифференцирующее звено, сумматор, умножитель и т.д.). Имеются в наличии и более сложные функциональные блоки: триггер Шмидта, амплитудный модулятор, пиковый детектор, ПИД-контроллер и т.п.

Схема-пример *demo04.cir* находится в каталоге *Demo* архива примеров *Book-mc.rar*.

2.5.5. Создание собственных макромоделей

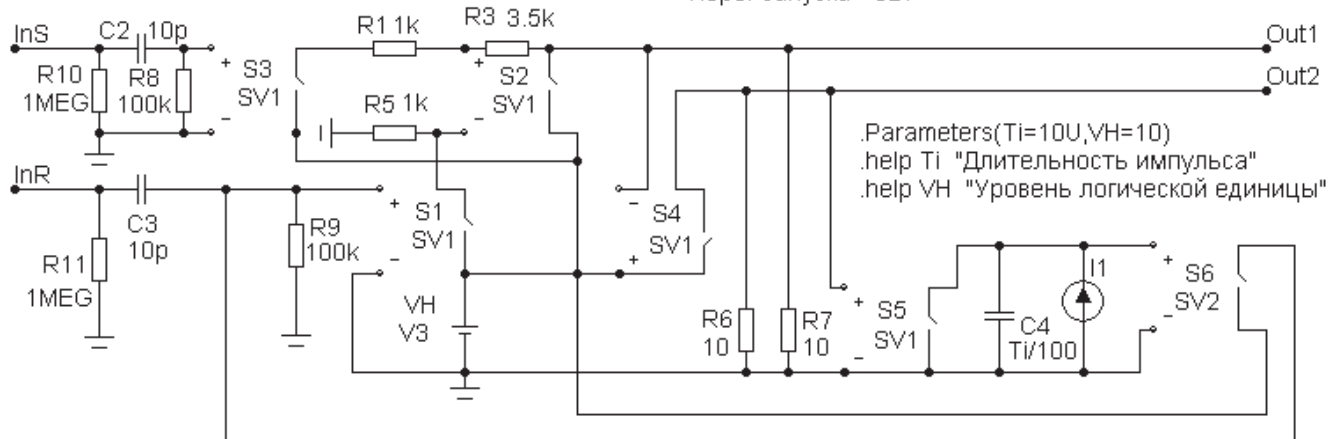
Micro-Cap позволяет достаточно просто оформлять созданные и отлаженные схемы в качестве макромоделей, которые потом могут являться составной частью каких-либо новых схем.

Доработка схемы для использования ее в качестве макромоделей

Для того чтобы превратить схему в макромодель, необходимо сначала присвоить имена входным и выходным выводам. Это делается в режиме ввода текста. Если введенное имя переместить к началу вывода, то оно «прилипнет» к нему, а на конце вывода появится жирная точка (точка соединения). В качестве примера приведена схема одновибратора с динамическими входами сброса и установки (рис. 2.21).

Макромодель одновибратора с динамическими входами
Разработчик Амелин С.А., январь 2008 г.

Длительность импульса задается параметром *Ti*.
Уровень лог "0" - 0V, уровень лог. "1" - VH.
Порог запуска - 3B.



.MODEL SV1 VSWITCH (RON=0.1 VOFF=3 VON=3.1)

.MODEL SV2 VSWITCH (VOFF=10 VON=10.01)

Рис. 2.21. Оформление схемы для использования в качестве макромоделей

Эта схема имеет вход запуска (ему присвоено имя *InS*), вход сброса (*InR*), прямой и инверсный выходы (*Out1* и *Out2* соответственно). Она состоит из RS-триггера, собранного на ключах *S1* и *S3* и времязадающей цепи, состоящей из источника тока *I1*, конденсатора *C4* и компаратора, собранного на ключе *S6*.

Импульс на входе InS устанавливает триггер в единичное состояние и конденсатор C4 начинает линейно заряжаться от источника постоянного тока. При достижении порогового напряжения срабатывает компаратор и триггер сбрасывается. Сбросить триггер можно также по входу InR. Уровень сигнала, формируемого одновибратором, определяется напряжением источника V3.

После присвоения имен выводов нужно задать параметры макромодели, которые можно будет менять извне. Для макромодели одновибратора такими параметрами будет длительность T_i и амплитуда V_H выходного импульса.

Изменяемые параметры макромодели задаются директивой `.parameters`. Кроме того, в ней задаются параметры макромодели, используемые по умолчанию: `.parameters (Ti=10U, VH=10)`. Кроме того, для удобства использования макромодели можно задать для изменяемых параметров директивы `.help`, в которых описано назначение параметров. Это описание будет появляться в окне задания параметров макромодели при ее использовании. Также желательно в поле схемы макромодели дать ее краткое описание (заголовок).

Завершается оформление макромодели сохранением ее с расширением `.mac` в каталог Library. Назовем макромодель одновибратора `RMM_D.mac`

Создание нового графического обозначения

Для того чтобы макромодель можно было использовать в качестве компонента в новых схемах, необходимо присвоить ей условное графическое обозначение. Для его создания используется встроенный редактор Shape Editor (рис. 2.22), запускаемый командой *Windows>Shape Editor*.

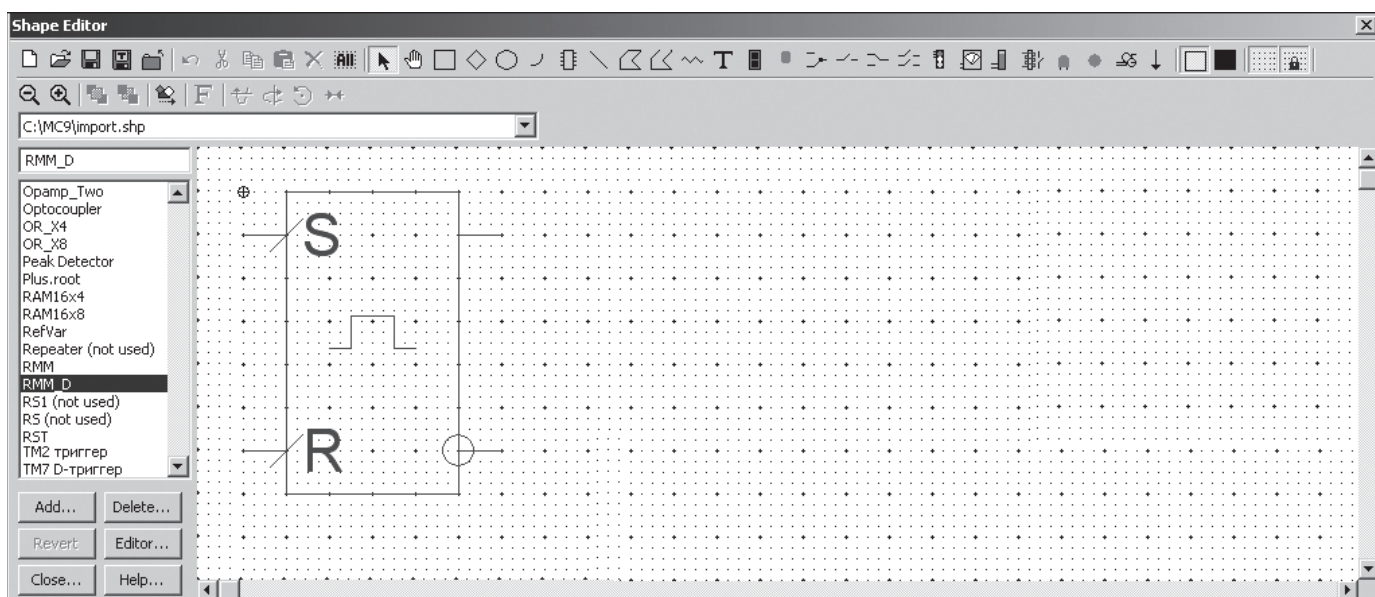


Рис. 2.22. Редактор условных графических обозначений

Для создания нового графического обозначения выполняется команда *Add* и задается имя для этого нового УГО. Зададим для УГО такое же имя, как и для макромодели — `RMM_D`. А потом нарисуем нужное нам изображение четырехвыводного компонента, используя стандартные примитивы редактора (линия, прямоугольник, окружность и т.д.) и нанесем необходимые текстовые элементы. При сохранении новое изображение будет помещено в файл `import.shp`, где хранятся все добавленные пользователем УГО. Можно создать и свой файл, где сохранить собственный набор изображений.

Создание нового компонента

Для создания нового компонента необходимо сопоставить УГО и модель. Это выполняется в редакторе компонентов *Component Editor* (рис. 2.23). Он запускается командой *Windows>Component Editor*. В открывшемся окне на правой панели нужно выбрать группу, где будет располагаться новый компонент. Компоненты, которых нет в базовой конфигурации Micro-Cap рекомендуется записывать в раздел *Import*. Можно также создать собственный раздел, например *Макромодели*. Раздел создается командой *New* и заданием имени (например, Макромодели) в строке вместо *New Group*. Полученный раздел можно перетащить мышью в любое другое место на правой панели. Выбрав это раздел нужно создать в нем новый компонент командой *Add Part*. После этого необходимо заполнить ряд полей для нового компонента. В поле *Name* пишем имя, которое ранее присвоили файлу модели (*RMM_D*).

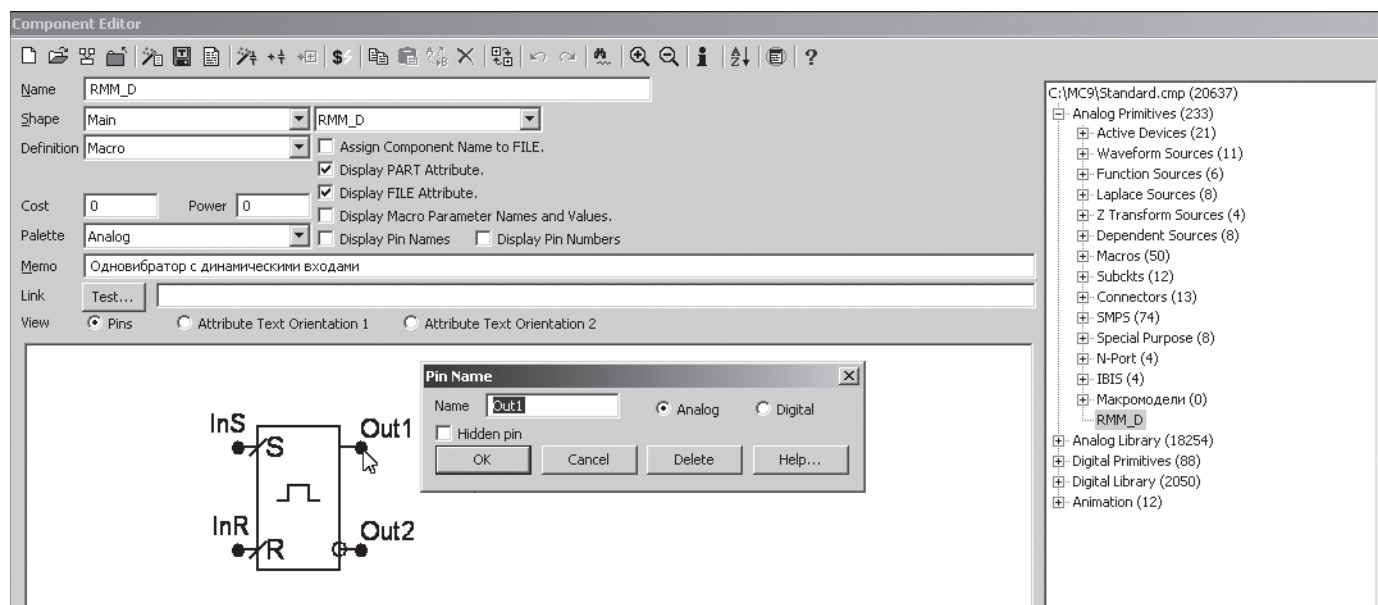


Рис. 2.23. Редактор компонентов

Затем в поле *Shape* значение первой ячейки *Main* оставляем без изменения, а во второй найдем предварительно созданное имя УГО. В нашем случае оно такое же, как и имя модели — *RMM_D*. Затем в поле *Definition* выбираем *Macro* (определяем, что используется макромодель). Остальные поля можно не менять, однако в поле *Memo* рекомендуется заполнить информацию о макромодели (ее назначение). Эта информация будет вызываться в строке подсказки при выборе компонента.

После выбора имени УГО оно появится в нижней части окна. К этому изображению необходимо добавить имена выводов. Эти имена вводятся в окне, которое возникает при щелчке левой клавишей мыши по выводу компонента. Их после закрытия окна *Pin Name* можно перемещать мышью. Для имен выводов используются те же текстовые обозначения, которыми были обозначены выводы в схемном файле макромодели (*InS*, *InR*, *Out*, *Out1*).

После этого нужно выйти из редактора с сохранением сделанных изменений. Новый компонент готов для использования.

Проверка работоспособности нового компонента

Новый компонент, построенный на основе макромодели, будет располагаться в той группе компонентов, куда его поместили при определении. Но его в любой момент можно перенести в другую группу, используя редактор компонентов. Выбрать его можно любым из стандартных способов (через левую панель компонентов, меню и т.п.). При вызове компонента появится окно задания параметров (рис. 2.24). В нем согласно подсказке, появляющейся в нижней строке, задаются необходимые параметры.

Для проверки можно задать длительность импульса 300 мс и активный высокий уровень 10В. После этого схема дополняется генераторами запускающих (V1) и сбрасывающих (V2) импульсов, которые подсоединяются к соответствующим входам одновибратора. Результаты моделирования (рис. 2.24) демонстрируют работу макромодели в соответствии с заданным алгоритмом.

Схема-пример *demo05.cir* находится в каталоге *Demo* архива примеров *Book-mc.rar*.

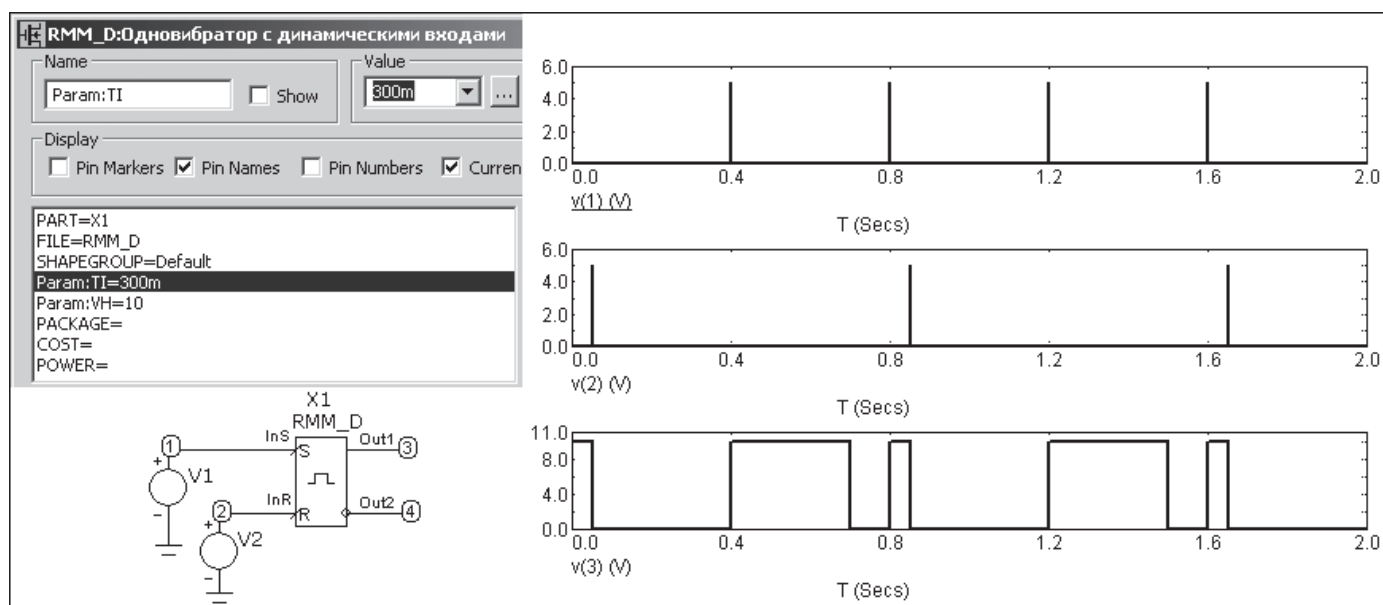


Рис. 2.24. Проверка работоспособности полученного одновибратора

2.5.6. Тиристорный регулятор мощности

Для знакомства с возможностями Micro-Cap при моделировании устройств преобразовательной техники рассмотрим сначала один из самых простых регуляторов — диммер (регулятор активной мощности цепи переменного тока). Схема такого устройства представлена на рис. 2.25.

В качестве сети используется источник синусоидального напряжения частотой 50 Гц. Силовой регулирующий элемент — тиристор X1, схема управления построена на однопереходном транзисторе. Регулирование мощности осуществляется изменением сопротивления резистора R_t . Для управления этим резистором выведен слайдер (движок, изменяющий сопротивление этого резистора). На рис. 2.25 представлены диаграммы токов нагрузки при разных положениях слайдера (разных сопротивлениях резистора R_t).

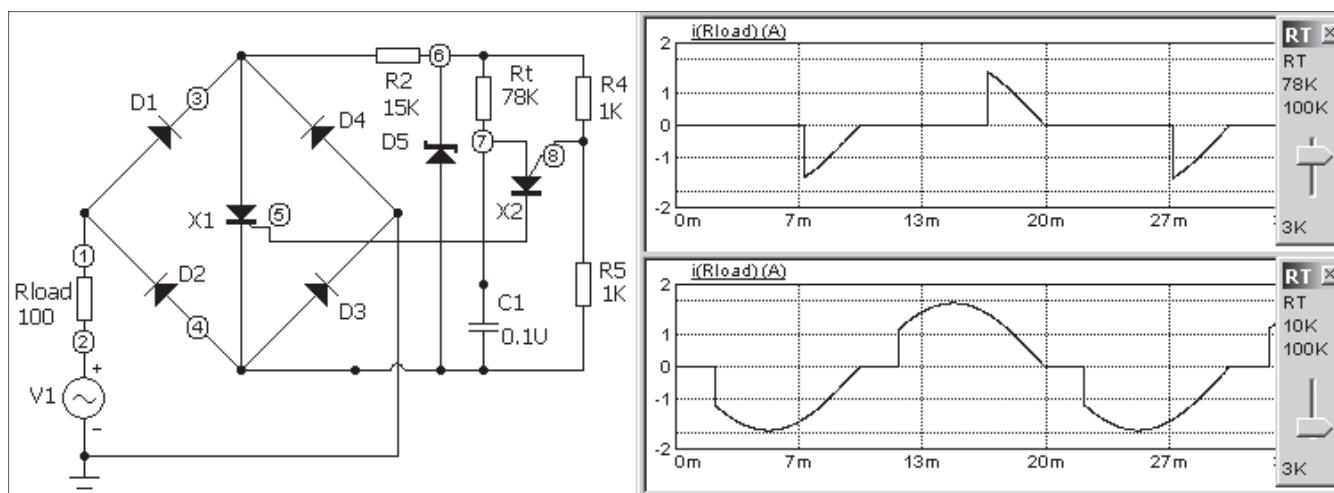


Рис. 2.25. Регулятор мощности с активной нагрузкой в цепи переменного тока

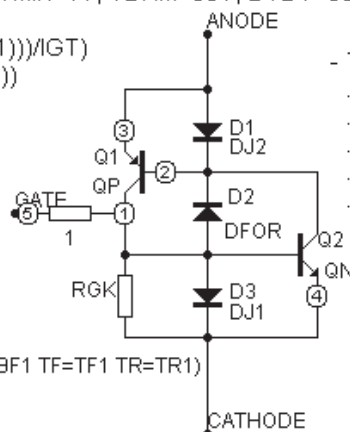
При построении схемы используются макромодели тиристора и однопереходного транзистора (SCR и PUT соответственно), которые находятся в разделе *Macros* библиотеки аналоговых примитивов. Посмотреть внутреннюю структуру этих макромоделей можно нажав на пиктограмму с буквой *i* на нижней панели инструментов, а потом щелкнув левой клавишей мыши по изображению компонента. Обе модели построены на основе двухтранзисторной схемы замещения (рис. 2.26, 2.27).

.PARAMETERS(IH=50MA, IGT=40MA, TON=1US, VTMIN=1V, VDRM=50V, DVDT=50MEG, TQ=20US, K1=1, K2=1)

```
.define RGK ((IGT/IH)>.36)*((.75+ (.541*(VTMIN-1)))/IGT)
+((IGT/IH)<=.36)*((.75+ (.541*(VTMIN-1)))/(.36*IH))
.define TF1 (BF1*BF2-1)*Trise/(1.8*BF1)
.define AF1 (.1+(IGT/(.9*IH)))
.define BF2 9
.define IS1 (POW(10,(-(VTMIN+.74)/.11)))
.define IS2 IS1
.define CJC2 IH*.21/K1*sqrt(TON/DVDT)
.define AFT ((AF1*(AF1>.5) AND (AF1<=.9)))
+.9*(AF1>.9))+(.5*(AF1<=.5)))
```

----- MODEL STATEMENTS -----

```
.model QP PNP (BF=BF1 IS=IS1 RE=RE1 CJE=CJE1 BR=BF1 TF=TF1 TR=TR1)
.model QN NPN (BF=BF2 IS=IS2 CJC=CJC2)
.model DJ1 D (IS=.001*IS1 BV=5)
.model DJ2 D (IS=.001*(IS1) BV=VDRM)
.model DFOR D (BV=VDRM)
```



- TRANSISTOR PARAMETERS -

```
.define RE1 1e-4
.define TR1 1.25*K2*TQ
.define BF1 (AFT)/(1-(AFT))
.define Trise 2*TON/3
.define CJE1 (CJC2)*.75
```

Рис. 2.26. Макромодель тиристора

.parameters(IH=50m,IGT=40m,TON=1u,VTMIN=1,VDRM=50,DVDT=1E8,TQ=30u,K1=1.0,K2=1.0)

```
.define TF1 (BF1*BF2-1)*Trise/(1.8*BF1)
.define AF1 .1+(IGT/(.9*IH))
.define BF2 9
.define IS1 (POW(10,(-(VTMIN+.74)/.11)))
.define IS2 IS1
.define CJC2 IH*.21/K1*sqrt(TON/DVDT)
.define RE1 1E-4
.define TR1 1.25*K2*TQ
.define BF1 (AFT)/(1-(AFT))
.define Trise 2*TON/3
.define CJE1 (CJC2)*.75
.define AFT ((AF1*(AF1<=.9))+(.9*(AF1>.9)))
```

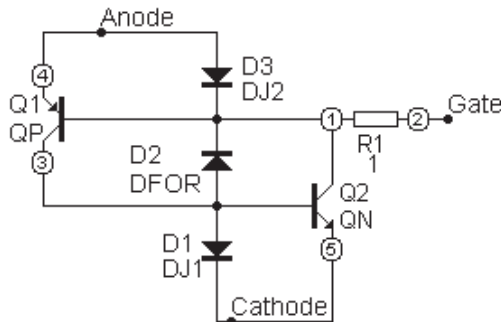


Рис. 2.27. Макромодель однопереходного транзистора

Схема-пример макромодели *demo06.cir* находится в каталоге *Demo* архива примеров *Book-mc.rar*.

2.5.7. Анализ процессов в двухтактном преобразователе напряжения

Импульсные преобразователи и стабилизаторы напряжения — достаточно сложный для моделирования класс электронных устройств. Это связано с тем, что помимо коммутационных процессов в полупроводниковых приборах с малыми постоянными времени, там присутствуют колебательные и апериодические процессы в силовом контуре, с постоянными времени на несколько порядков больше. Плюс цепи обратной связи и коррекции, которые необходимо проектировать исходя из законов теории автоматического управления. В состав стабилизаторов напряжения могут входить не только аналоговые, но и цифровые узлы. В этом случае необходимо применять смешанное моделирование.

Рассмотрим моделирование упрощенного варианта двухтактного преобразователя напряжения — без обратной связи и без ШИМ-модулятора. В качестве задающего генератора используются два импульсных генератора, а в качестве коммутирующих элементов — упрощенные ключи, управляемые напряжением. Моделирование этого устройства позволяет продемонстрировать пример задания параметров генераторов импульсов, ключей и трансформаторов (магнитосвязанных индуктивностей), а также некоторые приемы моделирования преобразовательных устройств.

Схема моделирования и формат задания параметров ключа, управляемого напряжением, представлены на рис. 2.28. Аналоговые ключи находятся в разделе *Components* главного меню. Ключ SW — это ключ с мгновенным переключением. Формат задания параметров — V,1,5,1m,1e-6. Этот ключ замкнут, если напряжение на управляющих выводах составляет от 1 до 5 В и разомкнут в остальных случаях. Сопротивление в замкнутом состоянии 1 МОм, в разомкнутом — 1 МОм. Кроме этого типа ключа в Micro-Cap имеются ключи с плавным переключением и ключи с гистерезисом. Формат их задания рассмотрен в соответствующем разделе книги.

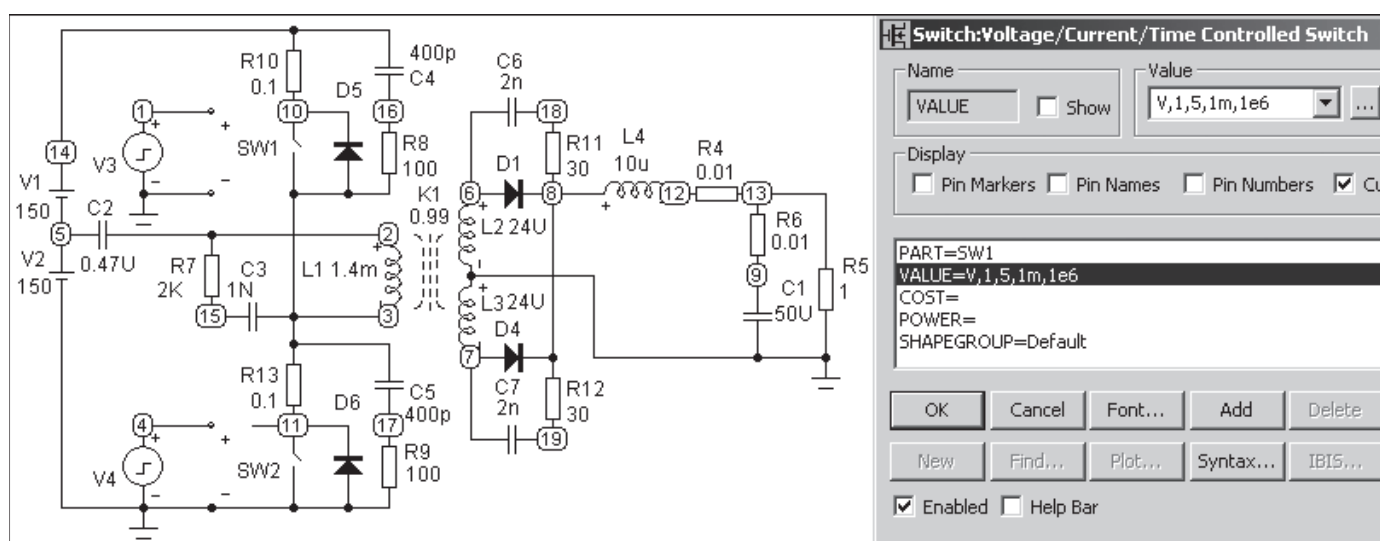


Рис. 2.28. Полумостовой преобразователь напряжения и параметры ключей

Рассматриваемая схема представляет собой упрощенный вариант силовой части источника питания компьютера. Она построена на базе полумостовой (HalfBridge) схемы. Вместо выпрямителя и входных последовательно соединенных конденсаторов используются два последовательно соединенных

источника напряжения по 150В каждый. Это упрощение не сказывается существенным образом на работе силовой части преобразователя. При необходимости этот узел можно добавить в схему моделирования позже. Выходное напряжение преобразователя — 12В при токе 12А (моделируется только один из каналов реального источника питания).

Задающие генераторы формируют управляющее напряжение, поочередно открывающее силовые ключи на заданный интервал времени. Формат задания параметров импульсных генераторов представлен на рис. 2.29.

На этом же рисунке представлены результаты выполнения команды *Plot* из меню окна параметров. Эта команда вызывает дополнительное окно, в котором графически отображается форма задаваемого импульса. Генераторы формируют импульсы амплитудой 3В, длительностью 5мкс с периодом следования 14мкс, сдвинутые друг относительно друга на половину периода. Длительность фронтов импульсов — 0,1мкс.

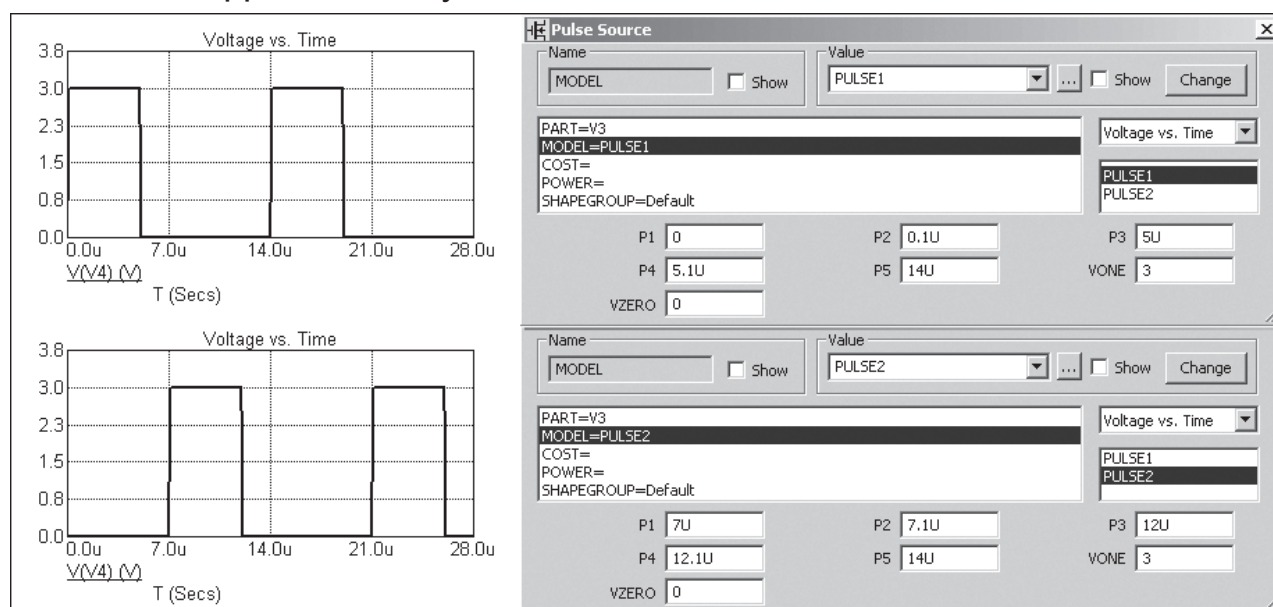


Рис. 2.29. Задание параметров импульсного генератора

Трансформатор моделируется тремя связанными между собой индуктивностями. Эти индуктивности сначала добавляются в схему как независимые катушки с соответствующими индуктивностями. А потом вводится сердечник (*K* в списке *Passive Components*), обозначенный на схеме K1. В параметрах сердечника указывается, какие индуктивности он связывает (перечисляются через пробел L1 L1 L2) и задается коэффициент связи (в примере — 0,99), определяющий индуктивность рассеяния обмоток трансформатора. В данной схеме используется линейный сердечник (рис. 2.30). Это опять-таки упрощающее допущение, не оказывающее существенного влияния на работу схемы, но существенно упрощающее расчеты.

Для задания нелинейного сердечника достаточно выбрать его модель в списке, приведенном в окне параметров сердечника. При этом параметры модели сердечника, расположенные в нижней части окна становятся активными и доступными для редактирования. Петлю гистерезиса выбранного материала можно посмотреть с помощью команды *Plot* в этом же окне (на рисунке не показана). Стоит обратить внимание, что по умолчанию в Micro-Cap индукция измеряется в Гауссах, а напряженность магнитного поля — в Эр-

стедах. Кроме того, после задания модели нелинейного сердечника значение Value для каждой магнитосвязанной индуктивности интерпретируются программой как число витков, а не величина индуктивности.

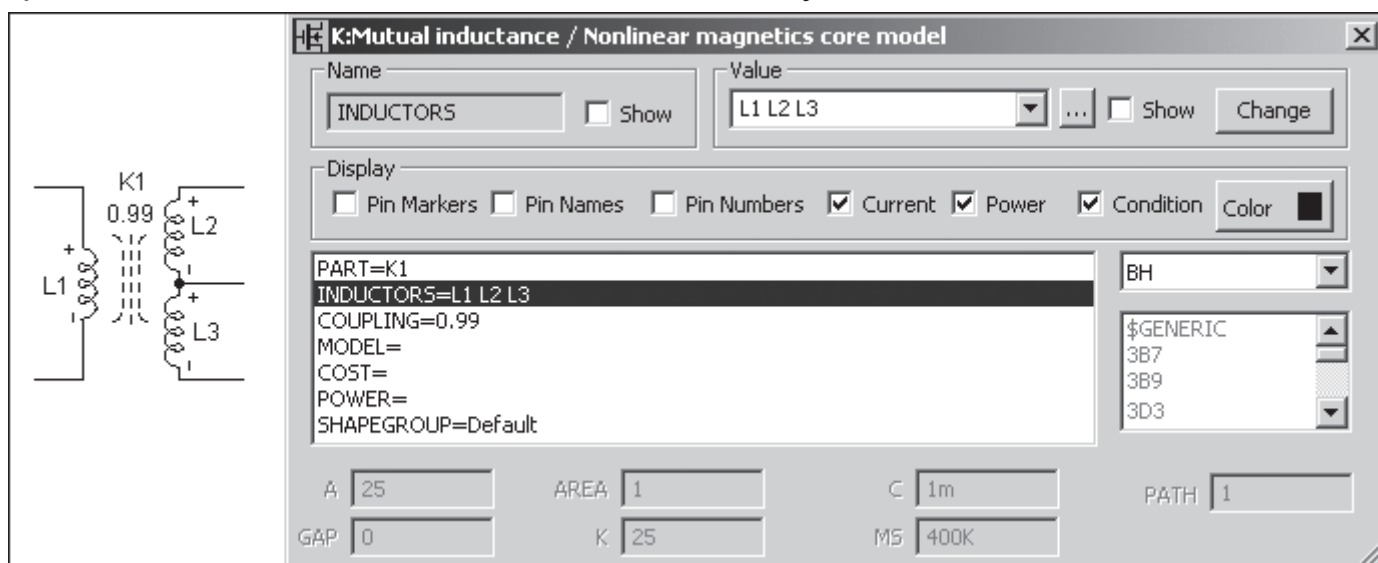


Рис. 2.30. Задание параметров трансформатора с линейным магнитным сердечником

При моделировании преобразовательных устройств типовая задача анализа — выход на режим при включении. Рассмотрим напряжение на нагрузке $V(13)$, ток дросселя выходного фильтра $I(L4)$ и ток первичной обмотки трансформатора $I(L1)$. На верхней диаграмме (рис. 2.31) — типичный колебательный процесс для выходного напряжения при наличии LC-фильтра. Токи имеют такую же огибающую.

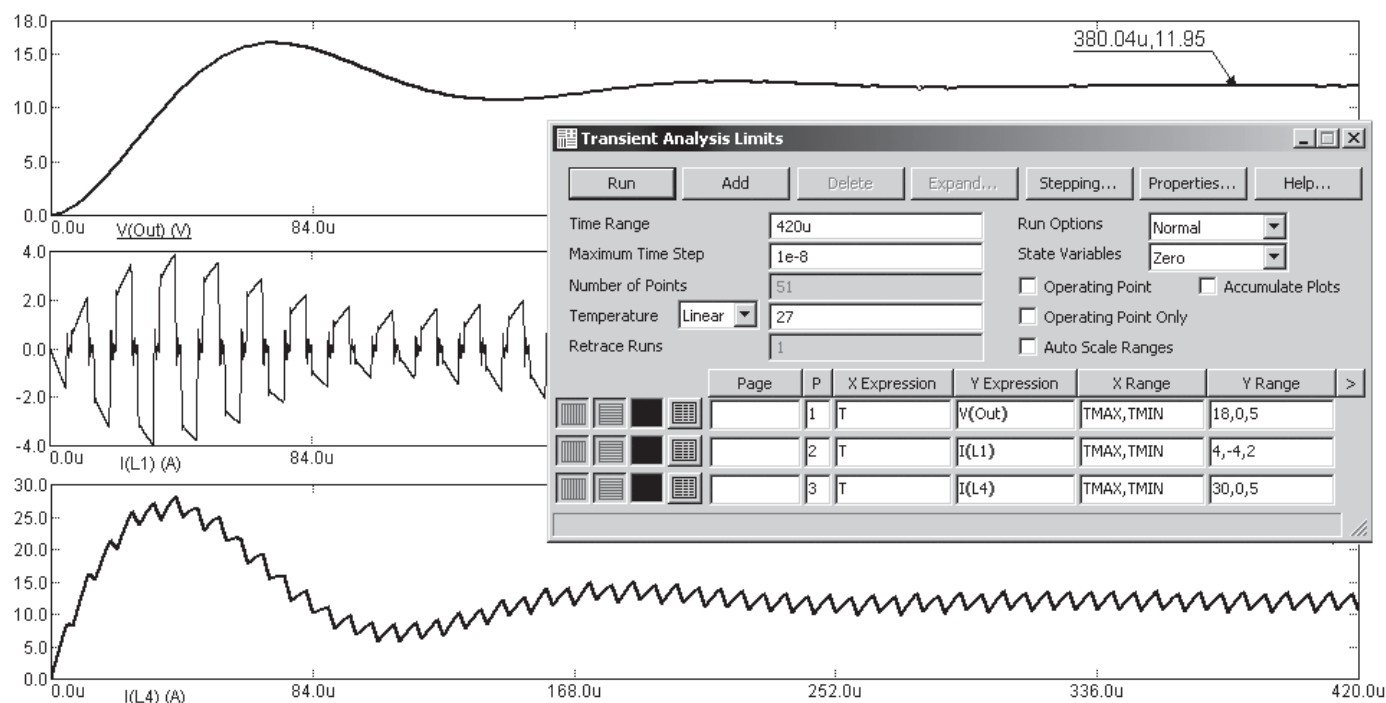


Рис. 2.31. Выход на режим при включении преобразователя

При моделировании преобразовательных устройств интерес представляют токи и напряжения ключевых компонентов в установившемся режиме. Micro-Cap предоставляет такую возможность, поскольку есть возможность запомнить результаты моделирования в конечной точке и использовать их в качестве начальных условий для продолжения моделирования. Т.е. можно

рассчитать поведение преобразователя в течение, к примеру, 500 периодов тактовой частоты (за это время медленные колебательные процессы в силовой части завершатся), а потом посмотреть в крупном масштабе еще 2-3 периода работы для анализа поведения ключей. Сохранить результаты моделирования переходных процессов можно через меню командой *Transient>State Variables Editor>Write*. При этом будет создан файл со значениями токов и напряжений схемы в конечной точке анализа. Для того, чтобы использовать эти результаты в качестве начальных условий необходимо в окне задания параметров моделирования Limits задать в поле *State Variables* (начальные условия) не *Zero* (нулевые, установлены по умолчанию), а *Read* (взятые из файла). На рис. 2.32 приведены несколько диаграмм, построенных при ненулевых начальных условиях.

На первом графике — ток и напряжение через диод D1. Следует обратить внимание, что масштаб по оси Y свой у каждого графика. Более подробно об этой возможности смотрите в соответствующем разделе книги. Знак «минус» при задании вывода напряжения на диоде ($-V(D1)$) «переворачивает» его в один квадрант с током, что удобно для анализа коммутационных процессов.

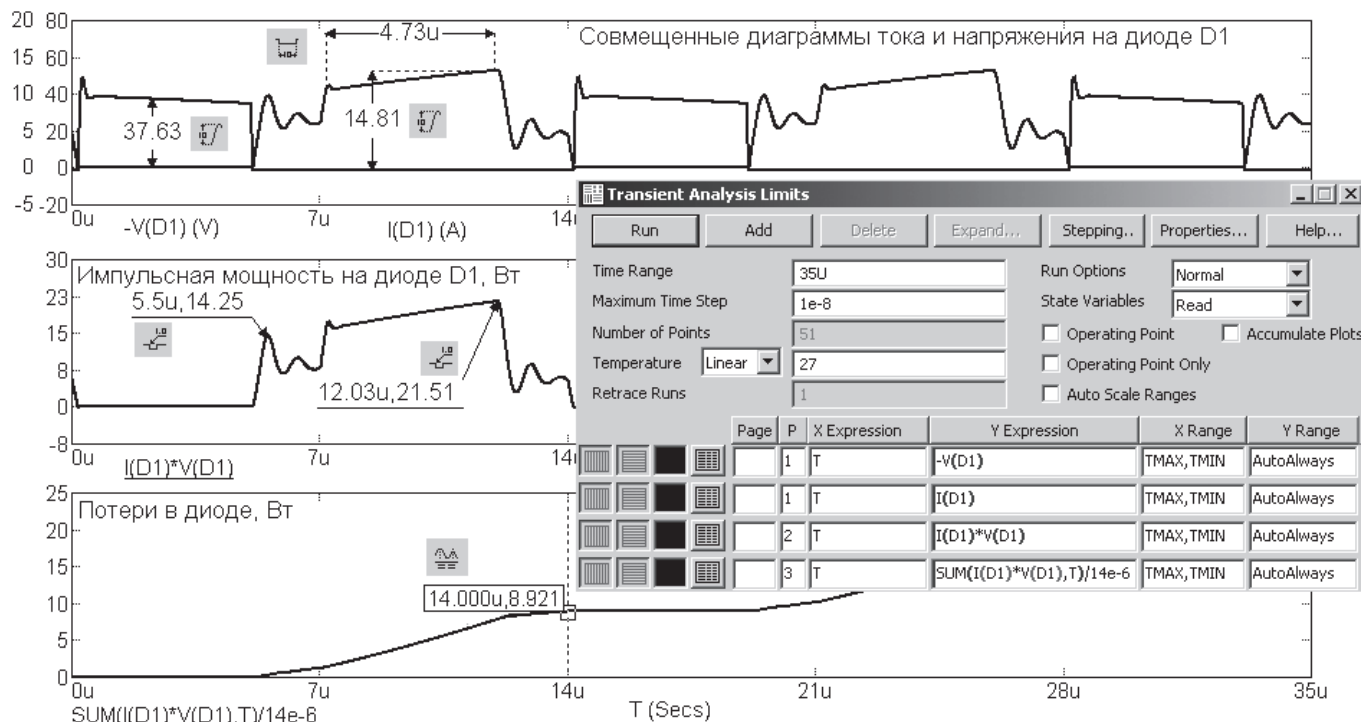


Рис. 2.32. Диаграммы процессов на диоде D1

На втором графике — импульсная мощность на диоде (произведение мгновенного значения тока на мгновенное значение напряжения. Чаще всего применяется при анализе коммутационных потерь. Также может служить для проверки надежности устройства (всегда ли полупроводниковый прибор находится в области безопасной работы или нет).

На третьем графике — проинтегрированное значение произведения тока на напряжение, отнесенное к периоду коммутации. Значение этой кривой в конце первого периода коммутации (14 мкс) соответствует мощности потерь в диоде (8,92 Вт). Более точно потери можно посчитать, взяв значение за несколько периодов и разделив на число периодов. Усредненная мощность по-

терь позволяет рассчитывать нагрев прибора, а также КПД устройства (если просуммировать потери во всех компонентах схемы).

Кроме того, на рис. 2.32 показаны дополнительные возможности обработки результатов расчетов, предоставляемые Micro-Cap 9, 10. На полученных диаграммах можно разместить текстовые надписи, посмотреть значения в заданной точке или между двумя точками по любой из осей. Эти возможности вызываются пиктограммами, расположенными в левой части верхней панели (на рисунке эти пиктограммы размещены рядом с выполняемыми ими функциями).

Схема-пример *demo07.cir* находится в каталоге *Demo* архива примеров.

2.5.8. Использование макромодели ШИМ-контроллера для моделирования импульсного стабилизатора напряжения

При анализе электронных схем Micro-Cap позволяет использовать функциональные блоки — подсхемы или макромодели. Они могут быть выполнены как в виде специально подготовленных схемных файлов формата Micro-Cap, так и в виде текстовых описаний на языке SPICE. В качестве примера использования подсхем проведем анализ работы импульсного стабилизатора напряжения на основе однотактного обратного преобразователя (импульсного источника питания). Импульсный источник питания представляет собой силовую часть (преобразователь постоянного напряжения), включенную в замкнутую систему стабилизации напряжения. В качестве ШИМ-контроллера и драйвера силового ключа используется подсхема X1. Схема импульсного стабилизатора на основе Flyback-конвертора (обратноходового преобразователя напряжения) приведена на рис. 2.33.

Передача энергии из первичной части во вторичную происходит через двухобмоточный дроссель (который называют также flyback-трансформатор). Этот дроссель состоит из катушек L11 и L22, связанных через сердечник K0. Этот двухобмоточный дроссель обеспечивает также функцию преобразования уровня напряжений и гальванической развязки [7–9]. VD1 — диод преобразователя, открывающийся при запираании силового ключа M1, выполненного на полевом транзисторе с изолированным затвором. Cf — конденсатор фильтра, RL — сопротивление нагрузки.

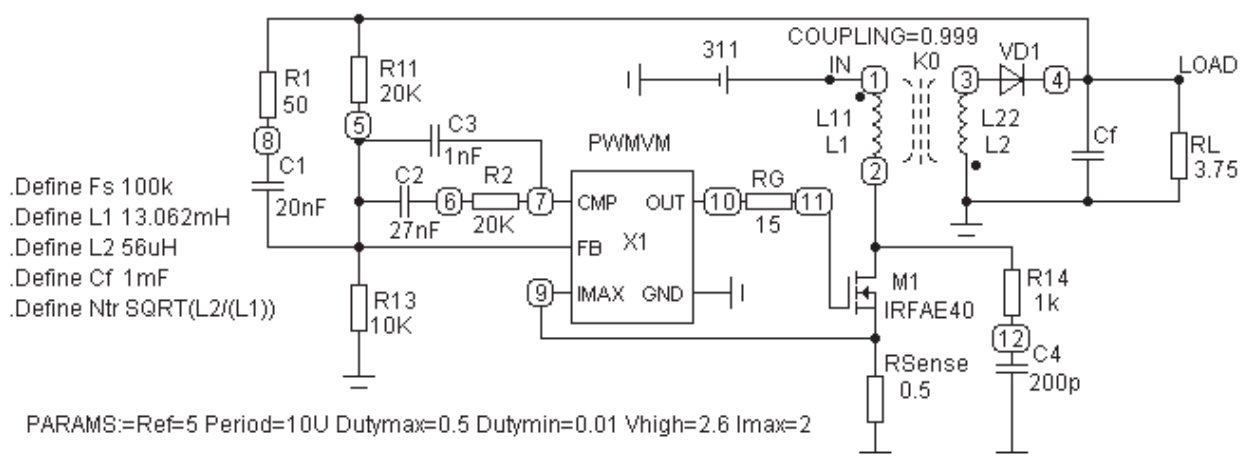


Рис. 2.33. Схема для моделирования импульсного стабилизатора напряжения

Подсхема X1 представляет собой ШИМ-контроллер для системы управления ИИВЭП на основе одноктактных преобразователей напряжения с управлением относительной длительностью проводящего состояния силового ключа (в англоязычной терминологии — Voltage Mode, VM). Подсхема ШИМ-контроллера PWMVM описана на языке SPICE, при клике мышью на ней в режиме , открывается окно с текстом описания подсхемы.

Ее выводы имеют следующее назначение:

- **FB** — вход сигнала отрицательной обратной связи, поступающего на инвертирующий вход внутреннего усилителя рассогласования ШИМ-контроллера. На этот вход заводится сигнал, пропорциональный выходному напряжению (в нашем примере — с делителя R11-R13).
- **СМР** — выход усилителя рассогласования, соединенный с инвертирующим входом ШИМ-компаратора. Между выводом СМР и FB, включается внешняя цепь отрицательной обратной связи усилителя рассогласования, выполняющая функции корректирующего звена. Внешнее корректирующее звено (на схеме совокупность RC цепей R1, C1, R11, C2, C3, R2) при подключении к усилителю рассогласования ШИМ-контроллера образует PID-регулятор, обеспечивающий устойчивость и необходимые динамические параметры стабилизатора.
- **OUT** — выход драйвера силового ключа ШИМ-контроллера, подключается к управляющему электроду (базе, затвору) силового транзистора одноктактного преобразователя.
- **IMAX** — вход защиты по току силового ключа. Сюда заводится сигнал с датчика тока силового ключа (в нашем примере — резистора Rsense). При превышении потенциалом на входе IMAX значения параметра подсхемы *I_{max}*, срабатывает внутренний защитный компаратор, сбрасывающий RS-триггер, управляющий драйвером силового ключа. Поступление открывающего напряжения на затвор силового транзистора прекращается.

Для получения пусковой характеристики стабилизатора напряжения необходимо выполнить анализ переходных процессов при нулевых начальных условиях *Zero* (рис. 2.34) без установки опции *Operating Point*. Зададим отображение в окне результатов диаграмм выходного напряжения *V(load)* и тока первичной обмотки двухобмоточного дросселя *I(L11)*.

Из этих графиков видно, что установившееся значение напряжения на нагрузке равно 15В. Отсутствие сильных колебательных процессов обеспечивается соответствующим выбором цепей коррекции (методику обеспечения устойчивости см. в [9–11]).

Внутреннее опорное напряжение ШИМ-контроллера является параметром макромодели и задается при установке ее в основную схему. В рассматриваемом примере опорное напряжение *Ref*=5В (см. параметры подсхемы X1 на рис. 2.33). В установившемся режиме напряжение, снимаемое с делителя R11-R13 должно быть равно опорному, поэтому для получения на выходе напряжения 15В коэффициент деления выбран равным трем.

Используемая цепь коррекции обеспечивает на постоянном токе очень большой коэффициент усиления, поэтому замкнутая система стабилизации

поддерживает среднее значение выходного напряжения на уровне 15В с высокой точностью [9, 10].

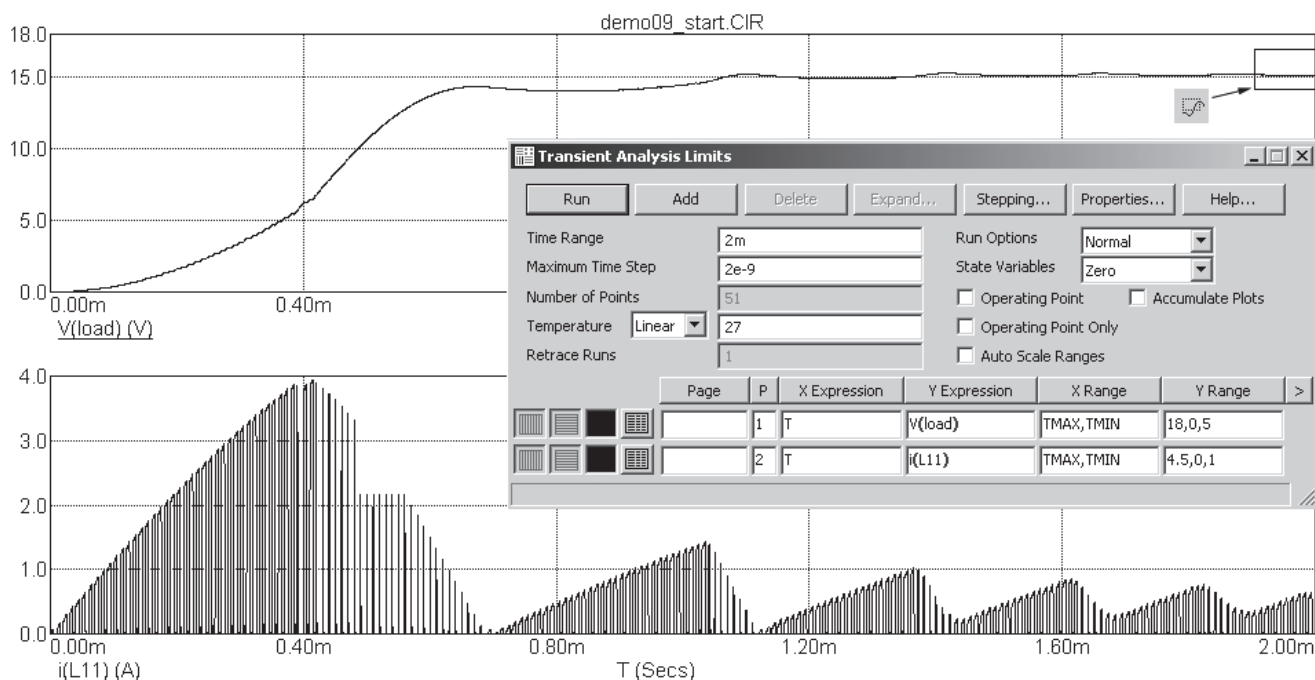


Рис. 2.34. Пусковая характеристика импульсного стабилизатора

Micro-Cap позволяет подробно рассмотреть отдельные участки диаграмм, полученных в результате анализа. Для этого используется лупа координат. Рассмотрим в увеличенном варианте напряжение на нагрузке и ток двухобмоточного дросселя. Для этого, не выходя из режима анализа, активи-

зируем режим *Scale Mode* (F7), и выделим протяжкой левой клавиши мыши, прямоугольные области на каждом из графиков. Результат выполнения команд данного режима (лупа координат) для трех графиков представлен на рис. 2.35. Теперь можно более подробно рассмотреть пульсации напряжения на выходе схемы и токов дросселя.

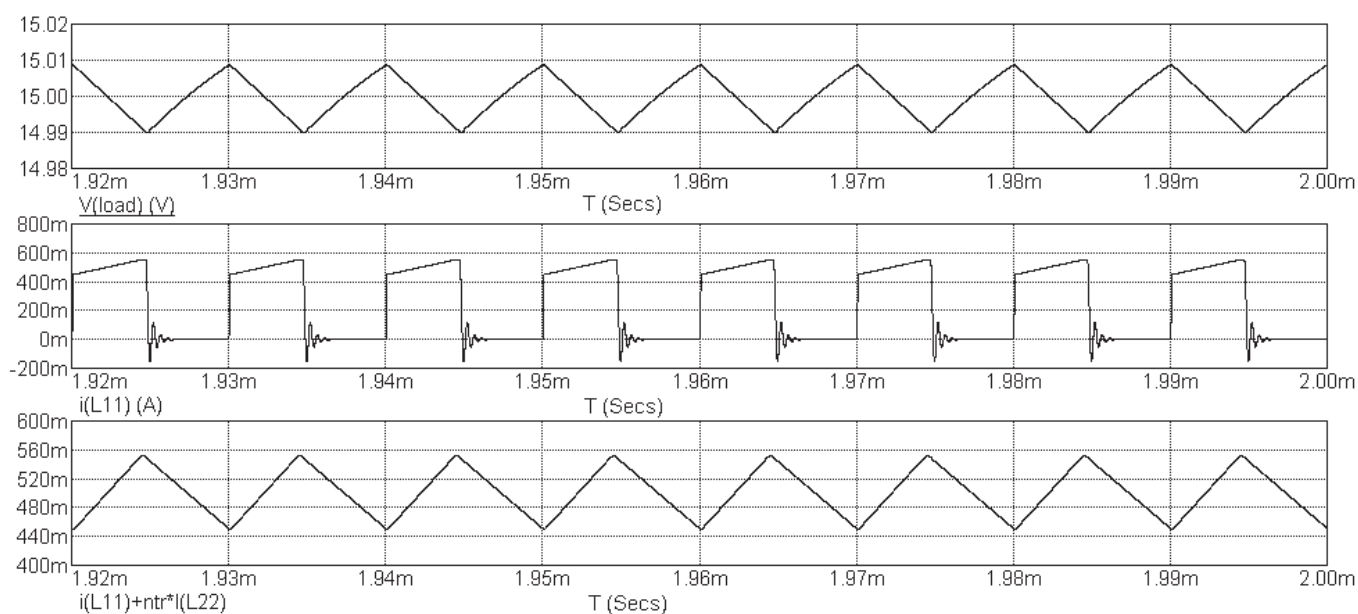


Рис. 2.35. Пульсации выходного напряжения и токов дросселя-трансформатора

На первом графике — выходное напряжение, на втором — ток первичной обмотки дросселя-трансформатора, а на третьем — приведенный ток дросселя-трансформатора, пересчитанного на первичную сторону $I(L11)+Ntr*I(L22)$.

Приведенный ток позволяет на одном графике анализировать как процессы накопления энергии (определяемые первичной обмоткой), так и передачи энергии в нагрузку (определяемые вторичной обмоткой). Физически такой ток ни в одном из компонентов схемы не протекает, но именно он определяет магнитный поток в сердечнике. Из графика видно, что дроссель-трансформатор работает в режиме непрерывного магнитного потока (приведенный ток не спадает до нуля).

Приведенный ток — эта удобная абстракция, позволяющая анализировать процессы в двухобмоточном дросселе так же, как и в обычном, однообмоточном. Аналогичные результаты можно получить, если задать вывод токов $I(L11)$ и $I(L22)$ на одной диаграмме, но с разными масштабами по оси Y. Тогда токи будут полностью соответствовать реальным процессам в преобразователе напряжения.

Для того, чтобы посмотреть диаграммы токов и напряжений преобразователя в установившемся режиме работы, необходимо провести расчет в течение времени, достаточного для завершения колебательных процессов выходного напряжения, а потом с помощью лупы координат посмотреть последние периоды расчета. Но можно поступить и по-другому: сохранить значения токов и напряжений схемы (переменные состояния) в установившемся режиме, а потом выполнить расчет 1-2 периодов коммутации, воспользовавшись сохраненными данными в качестве начальных условий.

Для сохранения переменных состояния необходимо по завершению расчета установившегося режима выполнить команду *Transient>State Variables Editor* () . Откроется окно редактора начальных условий. При нажатии кнопки *Write* создается файл начальных условий с именем, совпадающим с именем текущего схемного файла, но имеющим другое расширение.

При анализе стационарных режимов преобразовательных устройств наибольший интерес представляют токи и напряжения силовых ключей, а также выделяющиеся на них мощности. Поэтому именно эти параметры целесообразно вывести на графики.

Для того, чтобы ранее сохраненные переменные состояния для установившегося режима работы схемы были использованы в качестве начальных условий для нового расчета, в окне задания параметров анализа в списка *State Variables* необходимо выбрать *Read* (рис. 2.36). На этом же рисунке показаны форматы задания для вывода токов, напряжений и мощностей, а также внутренних напряжений макромодели ШИМ-контроллера.

Время анализа (Time Range) установлено немного больше двух периодов коммутации (21 мкс). В полях Y Expression вводятся выражения для вывода напряжения $VDS(M1)$, тока $I_d(M1)$, мощности $PD(M1)$ и энергии силового ключа M1; выходного напряжения драйвера $V(10)$ и напряжения на входах компаратора ШИМ-контроллера (подсхемы X1). Результаты моделирования представлены на рис. 2.37.

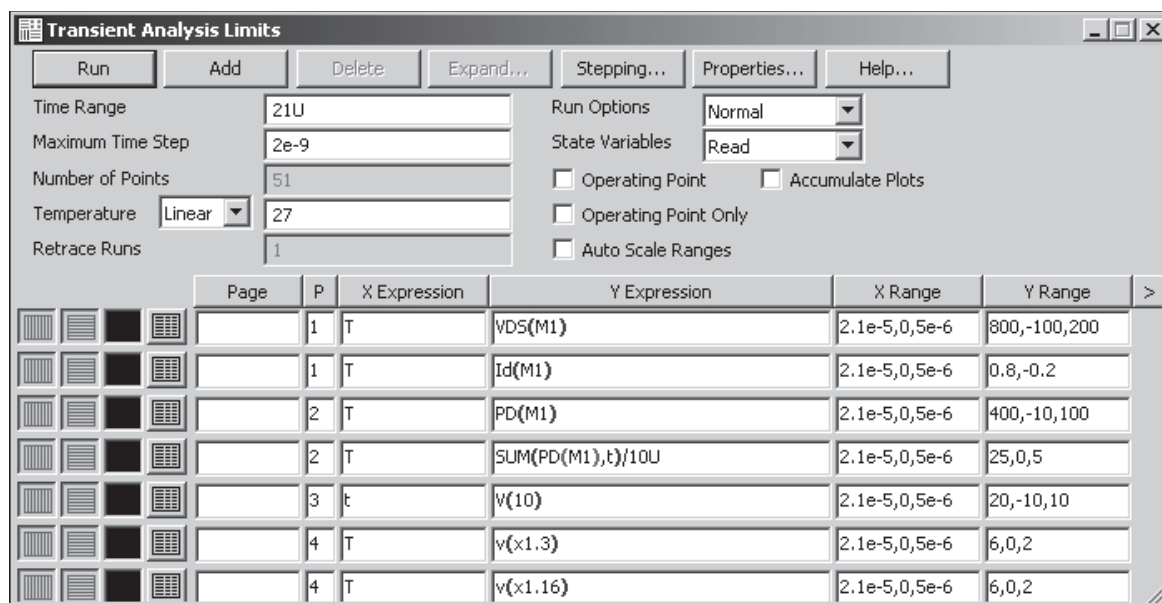


Рис. 2.36. Окно задания параметров для расчета стационарного режима работы стабилизатора

Колебательные процессы на силовом ключе обусловлены наличием индуктивности рассеяния обмоток дросселя (коэффициент связи между обмотками меньше единицы). Все надписи в поле рисунка выполнены в Micro-Cap 9, поэтому вместо строчной «ю» используется прописная «Ю». Следует отметить, что в последней версии MC10 исправлен этот недостаток, касающийся ввода русского текста.

Энергия на силовом ключе рассчитывается как интеграл мощности. Энергия, рассеиваемая на силовом ключе $SUM(PD(M1),t)$, растет с течением времени. Если приращение энергии за период коммутации разделить на длительность периода (10 мкс), то получится средняя мощность.

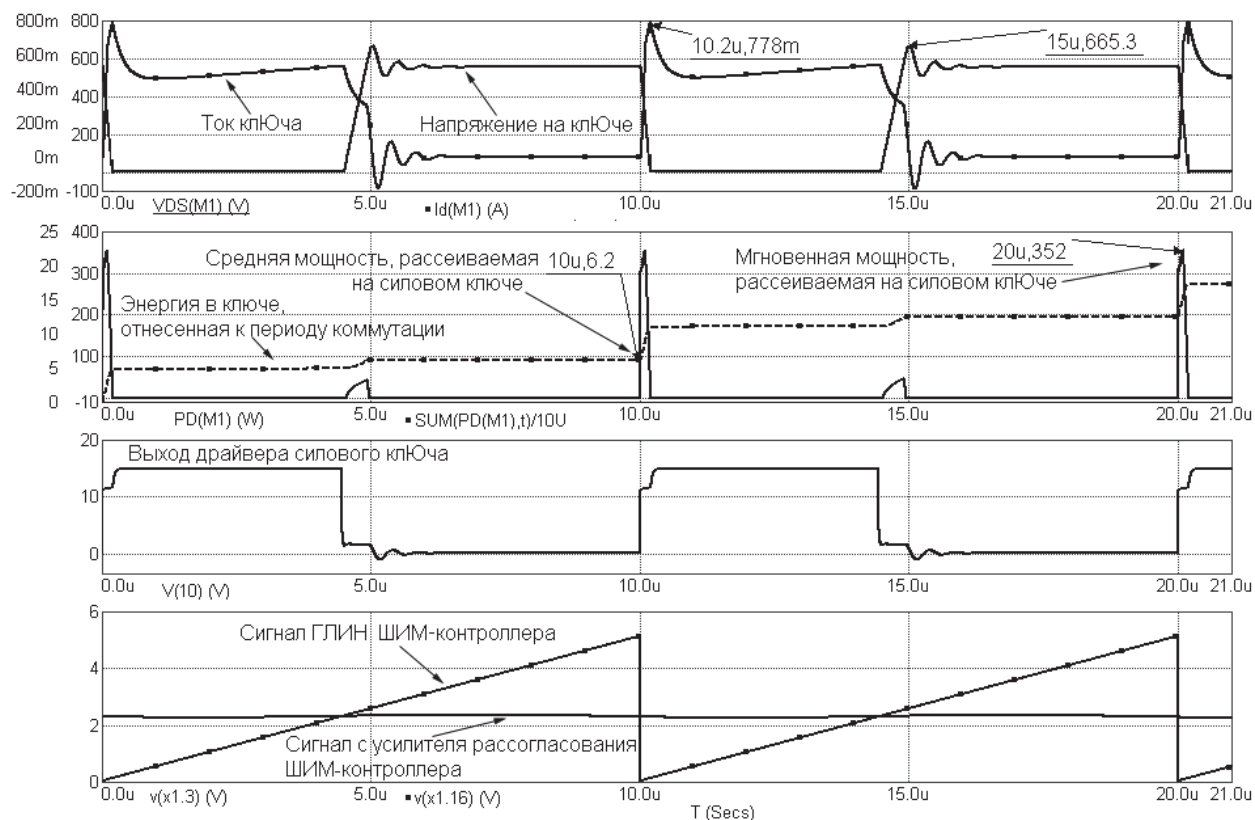


Рис. 2.37. Диаграммы стационарного режима стабилизатора

Значение средней мощности можно посмотреть непосредственно по графику. В момент времени 10 μ значение графика равно 6.2. Это означает, что средняя рассеиваемая мощность на ключе — 6.2 Вт. Мгновенная мощность на ключе максимальна при включении — 352 Вт. Мгновенная мощность при выключении снижена за счет использования демпфирующей цепи R14C4.

Для обеспечения хороших динамических характеристик в цепи ШИМ-контроллера используются специальные корректирующие цепи. Их расчет является достаточно сложной задачей, требующей построения непрерывной модели импульсного преобразовательного устройства.

Схема-пример *demo08.cir* находится в каталоге *Demo* архива примеров.

2.5.9. Использование непрерывной модели преобразователя напряжения

По полной (имитационной) модели можно получить токи и напряжения в различных компонентах импульсного источника питания, реакцию на внешние возмущения и т.п., однако невозможно оценить устойчивость его системы стабилизации. Это связано с тем, что такая оценка основывается на построении частотных характеристик, а для импульсного источника питания Micro-Cap АЧХ и ФЧХ построить не может. Эта программа, как и любые другие программы схемотехнического анализа, может строить частотные характеристики только для непрерывной системы, конфигурация которой не меняется с течением времени. Т.е. такая система не должна содержать коммутационные компоненты. Однако в состав импульсного источника такие компоненты входят обязательно (силовые ключи и выпрямительные диоды). Поэтому для построения АЧХ источников питания (точнее, систем стабилизации напряжения или тока на основе импульсных преобразовательных устройств) приходится пользоваться специальными математическими методами для преобразования коммутационных моделей в непрерывные. Одним из таких методов является метод усреднения в пространстве состояний [7, 10, 11]. Математический аппарат этого метода достаточно сложен и разъясняться здесь не будет. Главное — в результате его использования можно получить модель, в которой не происходит коммутация компонентов в установившемся режиме, однако внешние характеристики (средние значения выходных токов, напряжений, реакции на возмущения) получаются такими же, как и в полной (имитационной модели).

Построение схемы стабилизатора на базе непрерывной модели

Micro-Cap содержит библиотеку непрерывных моделей для основных типов преобразователей напряжения (раздел *SMPS>Converters* библиотеки аналоговых примитивов), на основе которых можно строить схемы стабилизаторов и исследовать их частотные характеристики. Один из примеров использования таких моделей — источник питания на основе обратного преобразователя (Flyback converter) с Г-образными выходным фильтром (рис. 2.38). Г-образный фильтр состоит из индуктивности дросселя преобразователя L и выходного фильтрующего конденсатора Cout.

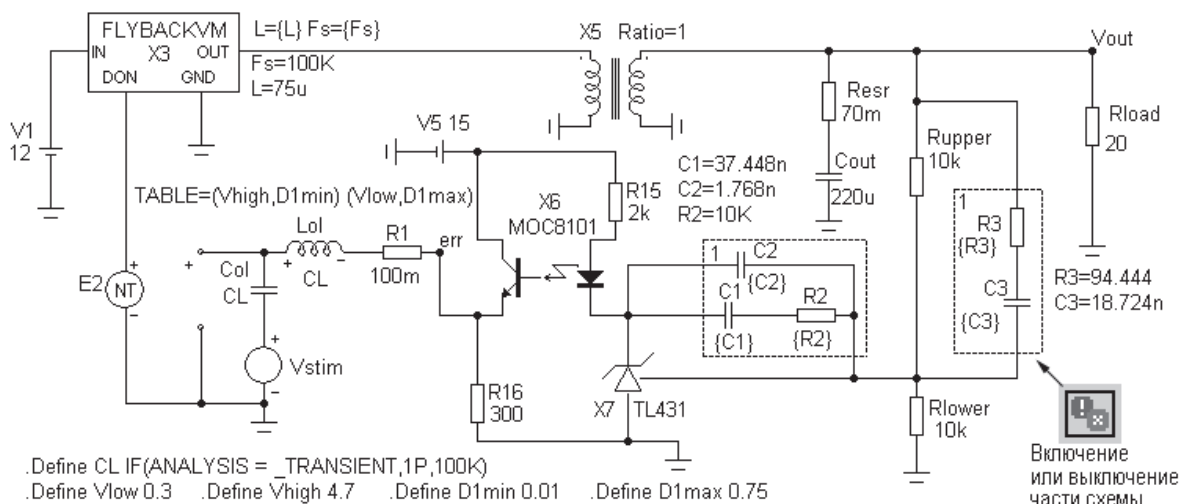


Рис. 2.38. Источник питания на основе непрерывной модели обратноходового преобразователя (Flyback converter)

Источник V1 задает входное напряжение (12В). Макромодель X3 (FLYBACKVM) — непрерывная модель обратноходового преобразователя. Для модели задаются два параметра: индуктивность первичной обмотки дросселя-трансформатора $L=75$ мкГн и частота преобразования $F_s=100$ кГц. X5 — идеальный понижающий трансформатор, моделирующий преобразование уровней напряжений обмотками обратноходового дросселя-трансформатора (Flyback Transformer). Коэффициент трансформации в рассматриваемом случае равен 1. Выходное напряжение (напряжение стабилизации) $V_{out}=5$ В, сопротивление нагрузки $R_{load}=20$ Ом. Следует отметить, что индуктивность дросселя Flyback в выходную цепь в явном виде не входит, она используется внутри макромодели FLYBACKVM.

Rupper-Rlower — делитель напряжения для сигнала обратной связи. В номинальном режиме работы стабилизатора напряжение на выходе делителя равно опорному напряжению усилителя рассогласования (2,5В). Сигнал обратной связи с этого делителя поступает на блок гальванической развязки, совмещенный с усилителем рассогласования и коррекции (X6, X7), выполненный на параллельном стабилизаторе TL431 и диодно-транзисторной оптопаре MOC8101.

Корректирующая цепь (R3, R2, Rupper, Rlower, C1...C3, X7) представляет собой пропорционально-интегрирующе-дифференцирующее звено PID [7, 9], которое обеспечивает устойчивость системы стабилизации. В него входят интегрирующие и дифференцирующие RC-цепи, номиналы которых будут определены ниже. Для того, чтобы иметь возможность отключать/подключать цепи коррекции без переделки схемы, используется специальная функция MC9, MC10 — *Region Enable*. Эта функция вызывается пиктограммой на главной панели Micro-Cap (см. рис. 2.38). При этом на схеме выделяется прямоугольный блок, а потом в открывшемся окне вводится значение 0 или 1. Если задано значение 0, то компоненты внутри блока не участвуют в работе схемы (при этом они выделяются на схеме серым цветом). Если задано значение 1, то компоненты внутри блока участвуют в работе схемы (рис. 2.39.). Можно также разрешать работу блока при выполнении условия, заданного логическим выражением.

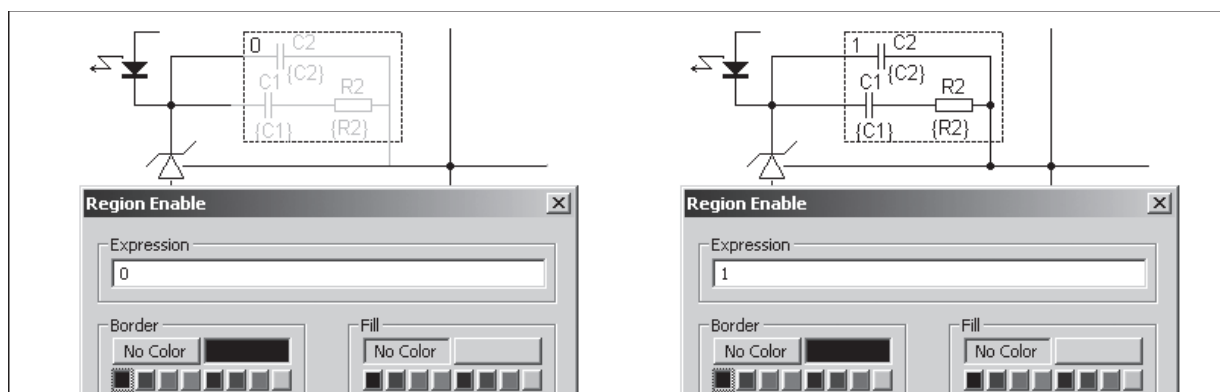


Рис. 2.39. Отключение и включение части компонентов схемы

С выхода усилителя рассогласования и коррекции сигнал ошибки ERR поступает на непрерывную модель широтно-импульсного модулятора. Выходным сигналом этой модели является напряжение, пропорциональное коэффициенту заполнения D реального преобразователя. Модель реализована с помощью функционального табличного источника NTVofV. Фактически это усилитель с двусторонним ограничением, причем максимальному сигналу ошибки $V(ERR)$ соответствует минимальный коэффициент заполнения управляющих импульсов $D1$ на его выходе (0,1), а минимальному сигналу ошибки $V(ERR)$ — максимальный коэффициент заполнения управляющих импульсов $D1=0,78$. Таким образом, выходное напряжение этого блока меняется от 0.1 до 0.78 В и не может принимать других значений.

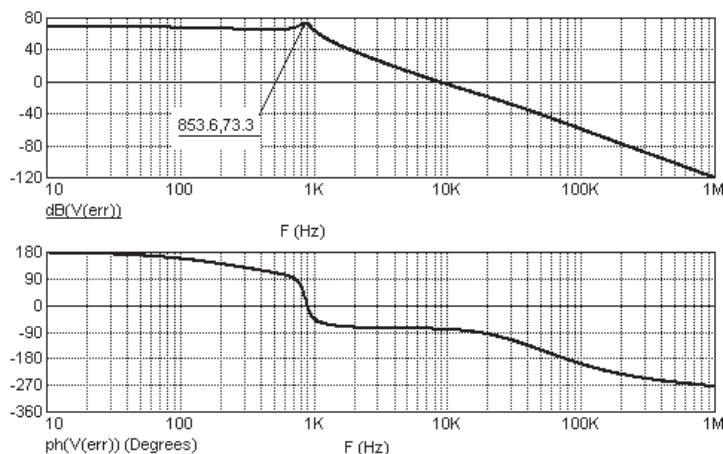
Для исследования частотных характеристик в цепь обратной связи должен быть включен источник сигнала. В данном случае это V_{stim} . Для того, чтобы он не влиял на работу цепи ОС в режиме анализа переходных процессов, в схему вводятся еще два дополнительных компонента развязки C_{ol} и L_{ol} . При анализе переходных процессов значения этих компонентов пренебрежимо малы (1p), а при остальных видах анализа — стремятся к бесконечности (100K). Изменение параметров компонентов в различных видах анализа осуществляется директивой `.Define CL IF(Analysis = _Transient,1P,100K)`. Таким образом достигается размыкание цепи ООС и введение малого гармонического возмущения при АС-анализе и замыкание цепи ООС и отключение указанного источника при других видах анализа (DC, Transient).

Анализ характеристик стабилизатора и его коррекция

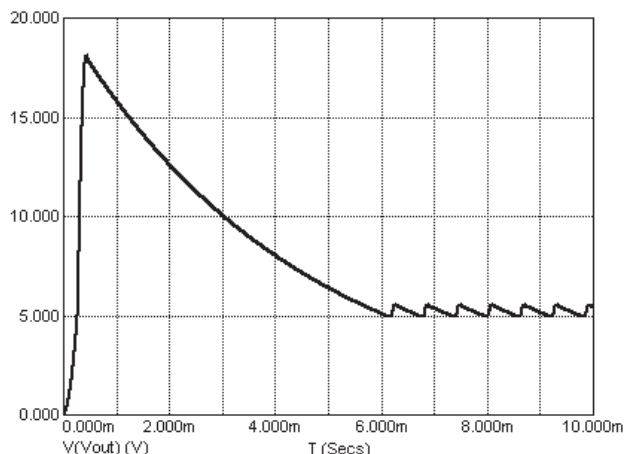
Для анализа устойчивости замкнутой системы стабилизации необходимо построить АЧХ и ФЧХ разомкнутой системы и посмотреть, удовлетворяют ли они критерию устойчивости Найквиста [9, 11]. Сначала построим характеристики стабилизатора напряжения без корректирующих цепей, отключив их установкой значения Region Enable=0. Логарифмические АЧХ и ФЧХ разомкнутой цепи обратной связи, а также график выхода на режим при включении представлены на рис. 2.40.

Как видно из рис. 2.40. а, частотные характеристики разомкнутой цепи ОС не удовлетворяют критерию устойчивости — фаза сигнала становится равной нулю при коэффициенте усиления много больше нуля (73.3 дБ). Если замкнуть обратную связь с такой частотной характеристикой, то в источнике пита-

ния должны возникнуть автоколебания, что и подтверждается анализом переходных процессов (рис. 2.40 б).



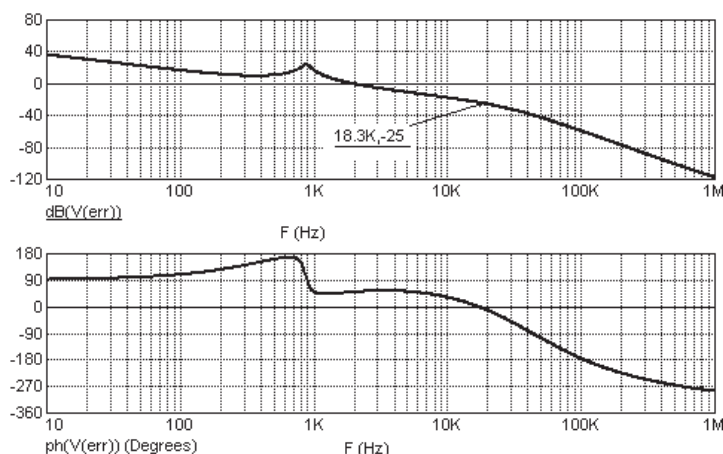
а)



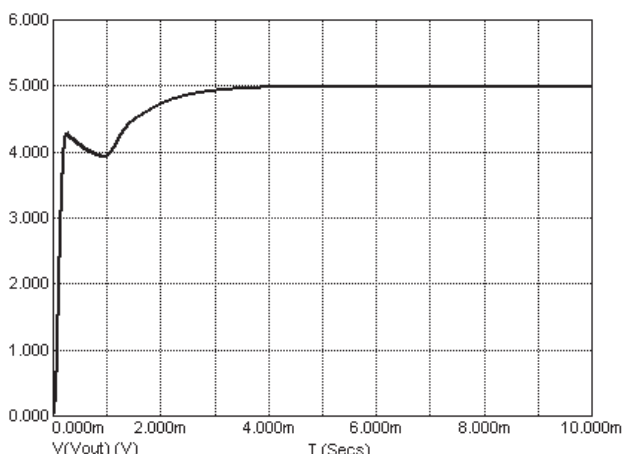
б)

Рис. 2.40. Характеристики стабилизатора с отключенной цепью коррекции:
а — ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы; б — пусковая характеристика

По полученной частотной характеристике с использованием методик [7, 10] рассчитываются параметры цепи коррекции и полученные значения присваиваются компонентам схемы. После этого можно включить корректирующие цепи, установив значение Region Enable=1 и получить характеристики скорректированного стабилизатора напряжения (рис. 2.41, а) с хорошим запасом устойчивости по амплитуде (фаза пересекает 0 при значении амплитуды 25дБ). Система стабилизации с такими характеристиками должна быть устойчивой, что подтверждается анализом переходных процессов (рис. 2.41, б).



а)



б)

Рис. 2.41. Характеристики стабилизатора с включенной цепью коррекции:
а — ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы; б — пусковая характеристика

Схема-пример *demo09.cir* находится в каталоге *Demo* архива примеров.

2.5.10. Синтез и моделирование цифрового автомата

Помимо моделирования аналоговых схем Micro-Cap позволяет анализировать работу цифровых схем. В качестве примера рассмотрим синтез и моделирование цифрового автомата на дискретных компонентах. Пусть имеются два логических управляющих сигнала Y и Z. Цифровой автомат должен выделять первый полный импульс из последовательности цифровых сигнала-

лов G после прихода управляющего сигнала Y , и вторую полную паузу после прихода управляющего сигнала Z .

Синтез цифрового автомата по заданному алгоритму работы

Теория цифровых синхронных и асинхронных автоматов и методы их синтеза на основе RS-триггеров и мультиплексоров подробно изложены в [12].

Синтезируем заданный автомат как асинхронный автомат Мура на основе асинхронных RS-триггеров. Автоматы Мура описываются функциями переходов и выходов:

$$a_{t+1} = f(a_t, x_t), \quad z_t = \phi(a_t),$$

где a_t и z_t — состояние автомата и его выходной сигнал в момент времени t соответственно. Каждое новое состояние автомата однозначно определяется предшествующим состоянием и входным сигналом, а состояние автомата в текущий момент времени однозначно определяет его выходной сигнал. Таким образом, выходной сигнал автомата Мура определяется только состоянием автомата и напрямую не зависит от входных сигналов и в случае их изменения без изменения состояния автомата, выходной сигнал не меняется. Поэтому состояния автомата (выходные сигналы) можно указать в вершинах графа переходов.

Составим граф переходов устройства, разрабатываемого как автомат Мура (см. определение выше). Вершины графа (устойчивые состояния автомата) определим с использованием противогоночного кодирования (код Грея). Исходное состояние автомата 000.

Условием возможности выделения полного импульса является наличие управляющего сигнала Y и паузы в последовательности, а условием выделения полной паузы — наличие сигнала Z и импульса в последовательности.

Указанные комбинации сигналов определяют два пути перехода автомата из исходного состояния 000 в состояние 001, либо 100. Эти пути показаны на рис. 2.42 соответствующими стрелками.

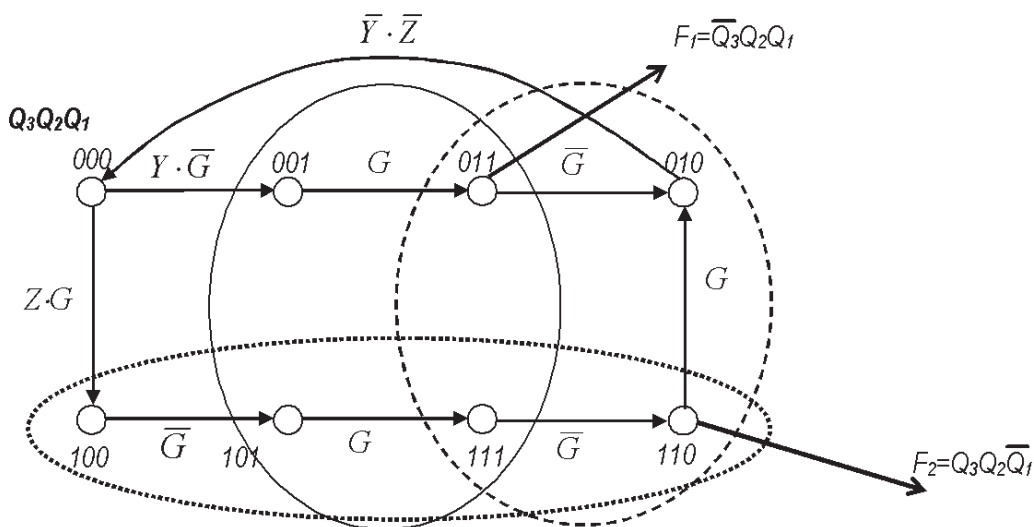


Рис. 2.42. Граф переходов асинхронного автомата Мура

По окончании действия управляющих сигналов необходимо предусмотреть возврат автомата в исходное состояние. Управляющей комбинацией для этого перехода служит $(\bar{Y} \cdot \bar{Z})$.

Охватим замкнутой линией все состояния на графе переходов, в которых значения одной и той же переменной (состояние одного элемента памяти) равны 1. Эти замкнутые кривые показаны сплошной ($Q_1=1$), штриховой ($Q_2=1$) и пунктирной линиями ($Q_3=1$) соответственно.

Вход автомата в подобную замкнутую область состояний и выход из нее требуют определенных сигналов переключения триггеров. Стрелки, входящие в область, обозначают сигналы установки (присваивающие переменной единичное значение), а стрелки, выходящие из области, — сигналы сброса (присваивающее ей нулевое значение).

Для каждого триггера составляются два выражения в форме суммы произведений (ДНФ): одно для сигнала установки (PreBar — S), а другое для сигнала сброса (ClrBar — R). Каждое произведение должно содержать входные переменные (сигналы по которым совершается переход) и вторичные переменные, связанные с данным переходом, но не меняющие свои значения.

В качестве вторичных переменных выступают двоичные разряды кода состояния в коде Грея. Включение в выражения вторичных переменных гарантирует выполнение переходов в правильной последовательности.

$$\begin{aligned} S_1 &= \overline{Q_3}\overline{Q_2}Y\overline{G} \vee Q_3\overline{Q_2}\overline{G} & R_1 &= \overline{Q_3}Q_2\overline{G} \vee Q_3Q_2\overline{G} = Q_2\overline{G}; \\ S_2 &= Q_1G & R_2 &= \overline{Q_3}\overline{Q_1}\overline{Y}\overline{Z}; \\ S_3 &= \overline{Q_2}\overline{Q_1}ZG & R_3 &= Q_2\overline{Q_1}G; \\ F_1 &= \overline{Q_3}Q_2Q_1 & F_2 &= Q_3Q_2\overline{Q_1} & F &= \overline{Q_3}Q_2Q_1 \vee Q_3Q_2\overline{Q_1}. \end{aligned}$$

Построение схемы моделирования

После этого строится схема на основе асинхронных RS-триггеров, реализующая полученные логические выражения. Для моделирования с помощью программы Micro-Cap 9, 10 в качестве асинхронных RS-триггеров используются JK или D-триггера с асинхронными входами установки (PREBAR) и сброса (CLRBAR). При этом входы синхронизации и информационные входы не задействуются.

Схема для моделирования приведена на рис. 2.43. Она строится согласно правилам, изложенным в предыдущих пунктах. Цифровые микросхемы выбираются из раздела *Component>Digital Library>...* В рассматриваемом примере для реализации автомата использована серия ИМС ТТЛ 74NNN. Следует отметить, что при рисовании цифровых устройств и оптимизации изображения схемы удобно использовать инструменты растягивающаяся линия

, ортогональный проводник  и именованная шина *Component>Analog Primitives>Connectors>Tie* (в примере не используется).

Для выполнения моделирования необходимо нужным образом запрограммировать тестовые последовательности для однобитовых генераторов цифровых сигналов U1 (Y), U2 (Z), U3 (G). Однобитовые цифровые генераторы выбираются командой *Component>Digital Primitives>Stimulus Generators>Stim1*. При размещении генератора на поле схемы (или при его выборе двойным кликом мыши) открывается окно задания его параметров, в нижней части которого можно на специальном языке задать последовательность логических состояний (рис. 2.44). До этой процедуры можно порекомендовать

Для удобства моделирования в схеме применены текстовые обозначения цифровых узлов, выполненных в режиме **T**: Y, Z, G, Pause2, Pulse1 и т.д.

Выполнение анализа для цифрового устройства

Для выполнения анализа переходных процессов необходимо выбрать команду меню *Analysis>Transient* и заполнить открывшееся окно *Analysis Limits* (рис. 2.45). В отличие от обозначений аналоговых напряжений, цифровые состояния обозначаются D(<узел>), сокращенно от Digital (цифровой). Можно выводить двоичный (Bin(Q3,Q2,Q1)), десятичный (DEC(Q3,Q2,Q1)), восьмеричный (OCT), шестнадцатеричный (HEX) код нескольких сигнальных линий. В данном примере это удобно организовать вывод двоичного кода состояния автомата Bin(Q3,Q2,Q1).

После заполнения необходимых полей, осталось нажать кнопку *RUN* и убедиться в правильной работе синтезированного цифрового автомата (рис. 2.46). Теперь чтобы придать выполненной работе законченность, можно на графики нанести текстовые пояснения, с помощью команды **T**.

Отметим, что отладку неправильно работающей цифровой схемы и поиск неисправностей в ней удобно проводить в режиме *Probe Transient*. После запуска этого режима клик мыши на интересующем узле приводит к появлению (исчезновению) графика сигнала в этом узле в левой части экрана. Так можно достаточно быстро и просто диагностировать неисправность, т.к. работа в этом режиме по скорости и принципу действия напоминает тестирование схемы с помощью логического анализатора.

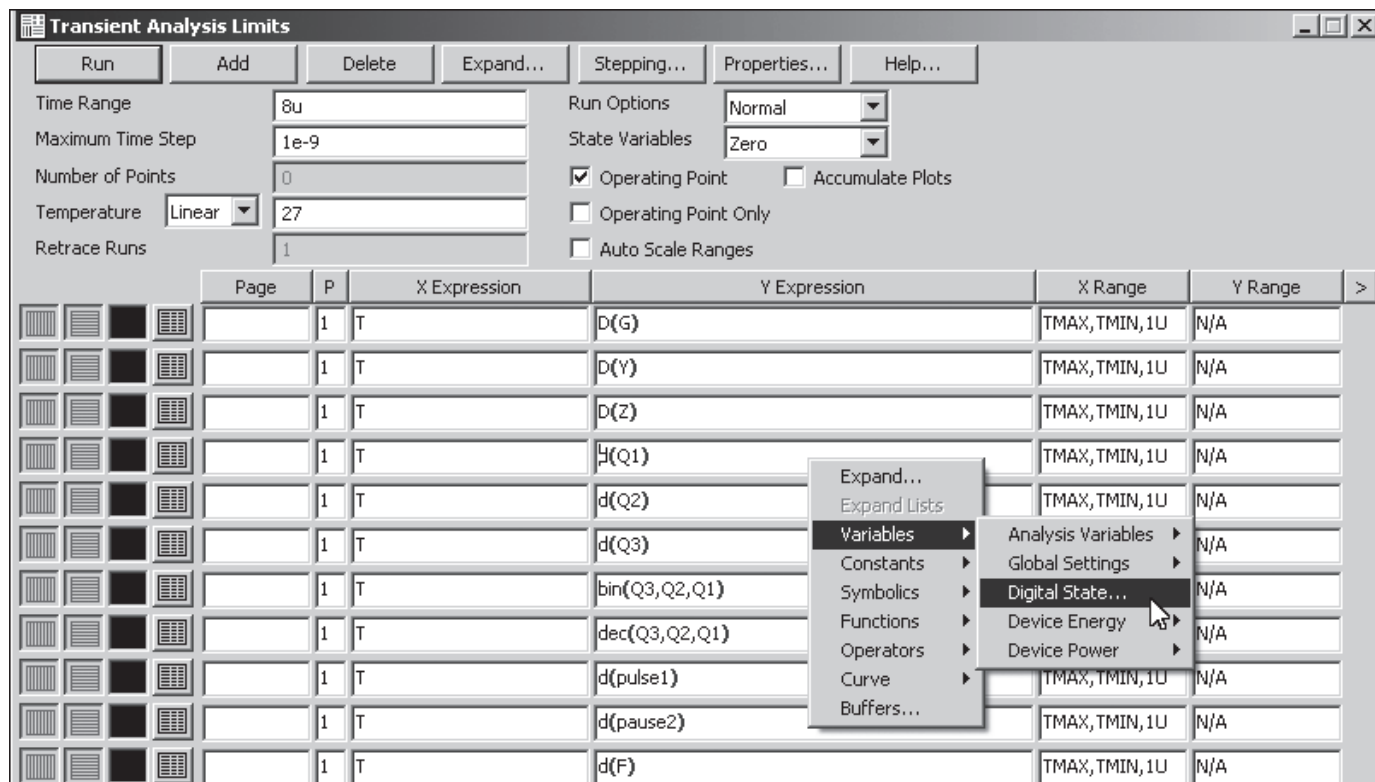


Рис. 2.45. Окно задания параметров анализа переходных процессов в автомате

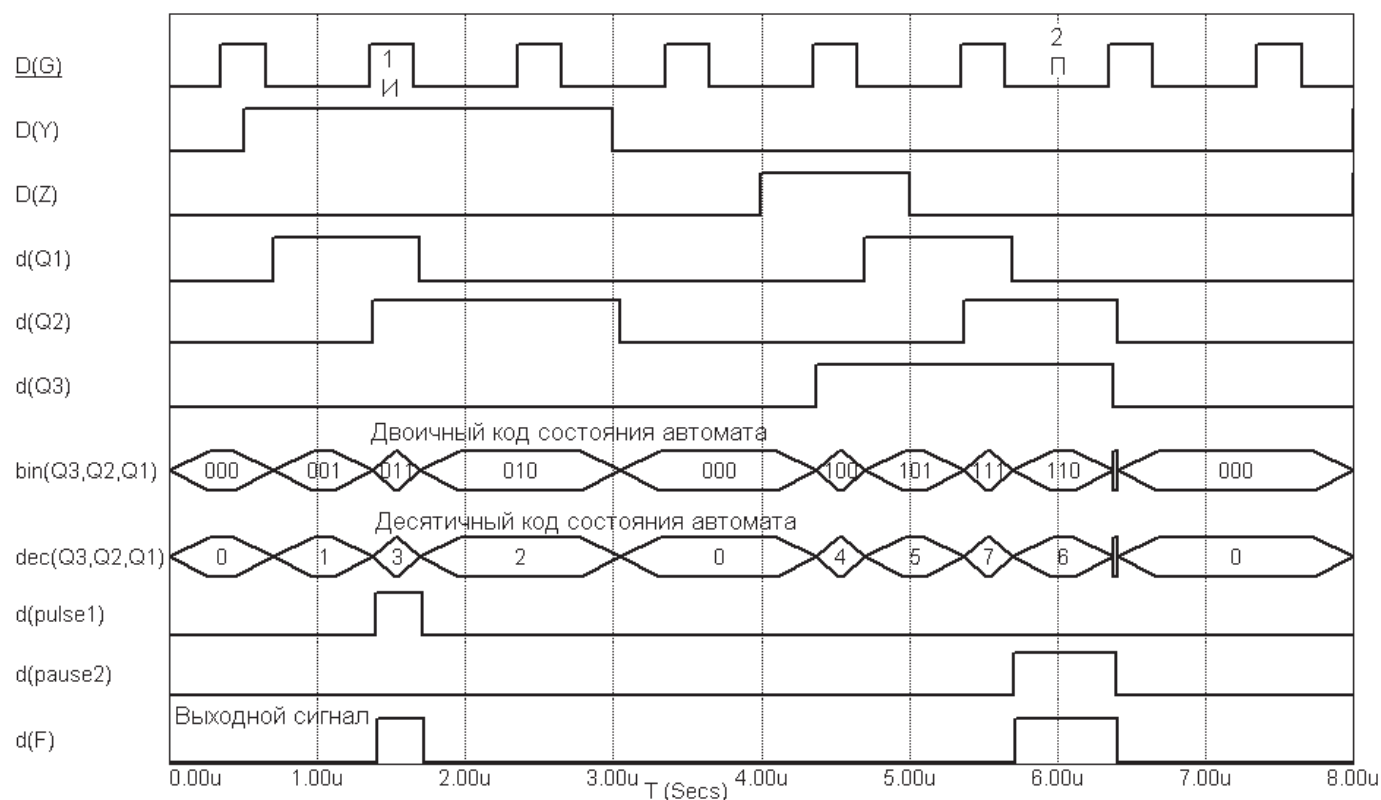


Рис. 2.46. Временные диаграммы работы автомата Мура

Схема-пример *demo10.cir* находится в каталоге *Demo* архива примеров.

2.5.11. Расчет интермодуляционных искажений усилителя

Одним из критериев оценки качества усилительного каскада является величина вносимых им интермодуляционных искажений. Интермодуляционные искажения (IMD) определяются величиной комбинационных гармоник, появившихся в спектре выходного сигнала усилителя при подаче на его вход двух синусоидальных сигналов разных частот. В общем случае величина IMD вычисляется как отношение среднеквадратической суммы амплитуд всех комбинационных гармоник к среднеквадратической сумме амплитуд входных сигналов.

В звукотехнике используются как минимум два метода измерения интермодуляционных искажений. Первый — когда разность между частотами входного сигнала достаточно велика (например, 4 кГц и 17 кГц) и амплитуды тестовых частот существенно отличаются по уровням. Это довольно «мягкий» метод измерений, не дающей полной картины об искажениях.

Второй метод — когда берутся близкие по значению частоты (например, 19 кГц и 20 кГц) с одинаковой (номинальной) амплитудой. Такой метод испытаний является более «жестким», но именно он дает более объективную оценку качеству усилителя.

Micro-Cap 9 (в отличие от Micro-Cap 10) не содержит встроенных функций для расчета интермодуляционных искажений. Однако IMD можно вычислить при совместном использовании функций *FFT* и функций *Performance*. Более того, можно построить график зависимости величины IMD от изменяемого параметра, например, от амплитуды входного сигнала.

Рассмотрим пример расчета интермодуляционных искажений усилителя с использованием второго метода. Расчеты основаны на методике международ-

ного стандарта CCIF [16]. Согласно этой методике на вход усилителя подаются две синусоиды с частотами, близкими к его верхней граничной частоте. Пусть это частоты $f_1=20$ кГц и $f_2=19$ кГц. Тогда комбинационные гармоники второго порядка: $(f_1+f_2)=39$ кГц и $(f_1 - f_2)=1$ кГц. А комбинационные гармоники третьего порядка: $(2f_1 + f_2) = 59$ кГц, $(2f_1-f_2)=21$ кГц, $(f_1+2f_2) = 58$ кГц и $(f_1-2f_2) = 18$ кГц.

Комбинационные гармоники 2-го порядка обычно значительно отличаются по частоте от входных синусоидальных сигналов, тогда как частоты комбинационных составляющих 3-го порядка обычно близки к этим частотам.

Наибольший вклад в IMD вносят, как правило, составляющие 3-го порядка, с частотами, наиболее близкими к входным синусоидальным сигналам. В рассматриваемом примере это комбинационные гармоники с частотами $(2f_1-f_2) = 21$ кГц и $(2f_2 - f_1) = 18$ кГц.

Можно запрограммировать вычисление IMD только на основе комбинационных составляющих второго и третьего порядков. Для учета составляющих более высокого порядка понадобится очень длинная строка формул, что затруднит восприятие примера и лишь незначительно увеличит точность анализа.

На вход усилителя мощности (узел *In*) подается сигнал с двух последовательно включенных источников синусоидального сигнала V11 и V12 (рис. 2.47). Анализируется сигнал на выходе усилителя (узел *O*), подключенного к нагрузке с комплексным сопротивлением.

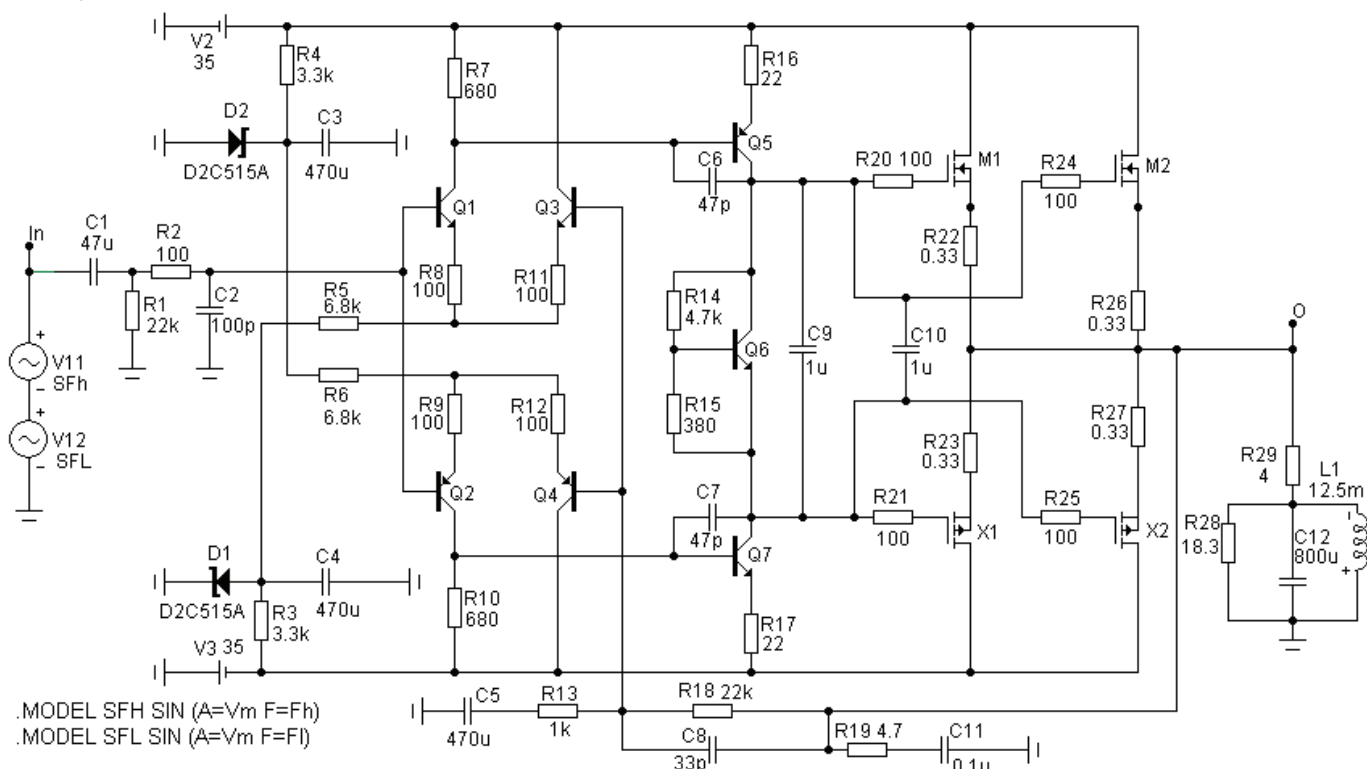


Рис. 2.47. Подключение испытательных генераторов к усилителю мощности

При задании формул желательно предусмотреть возможность изменения частот и амплитуд входных гармонических воздействий. Поэтому в расчетных формулах и окнах задания параметров для частоты и амплитуды целесообразно использовать не числовые значения, а символьные переменные, которым предварительно директивой .Define присваиваются необходимые значения (рис. 2.48).

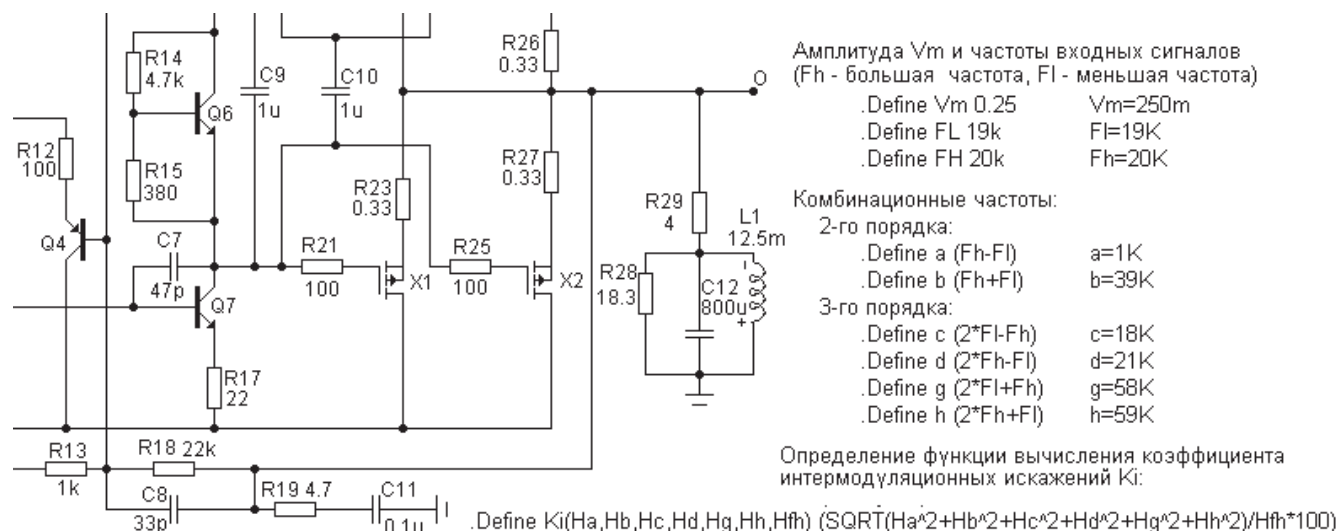


Рис. 2.48. Фрагмент схемы с текстовыми директивами

Для обозначения амплитуды синусоидального сигнала будем использовать переменную Vm, для меньшей частоты – FL, для большей – FH. Для присвоения этим символьным переменным необходимых значений в поле схемы в текстовом режиме необходимо записать (см. рис. 2.48):

```
.Define Vm 0.25
.Define FL 19k
.Define FH 20k
```

Эти же переменные необходимо внести в поля окна задания параметров синусоидальных источников (поля A и F соответственно, рис. 2.47). Кроме того, в поле схемы необходимо задать расчет значений комбинационных гармоник:

```
.Define a (Fh-Fl)
.Define b (Fh+Fl)
.Define c (2*Fl-Fh)
.Define d (2*Fh-Fl)
.Define g (2*Fl+Fh)
.Define h (2*Fh+Fl)
```

Также в поле схемы необходимо определить функцию для расчета среднеквадратического значения (встроенную функцию RMS в этом случае использовать нельзя):

```
.Define Ki(Ha,Hb,Hc,Hd,Hg,Hh,Hfh) (SQRT(Ha^2+Hb^2+Hc^2+Hd^2+Hg^2+Hh^2)/Hfh*100)
```

После этого можно переходить к заданию параметров переходных процессов (рис. 2.49). На первом графике – напряжение V(O) на выходе усилителя (напряжение в узле O). На втором графике – гармонические составляющие выходного напряжения V(O).

Для получения достоверного результата при проведении гармонического анализа необходимо, чтобы в схеме завершились все переходные процессы и схема находилась в стационарном режиме. При выбранной методике самый «медленный» процесс определяется разностью тестовых частот. Время расчета *Time Range* задано равным пяти периодам этого самого «медленного» процесса — $5/(Fh-Fl)$. Считаем, что за четыре первых периода все процессы в схеме установятся, поэтому в анализе Фурье рассматривается пятый период. Если в схеме имеются значительные инерционности, то число периодов можно

увеличить, а при анализе Фурье использовать только последний из них. Вывод только последнего периода самого «медленного» процесса для графика выходного напряжения задается в поле *X Range* — $5/(F_h - F_l), 4/(F_h - F_l), 0.1m$.

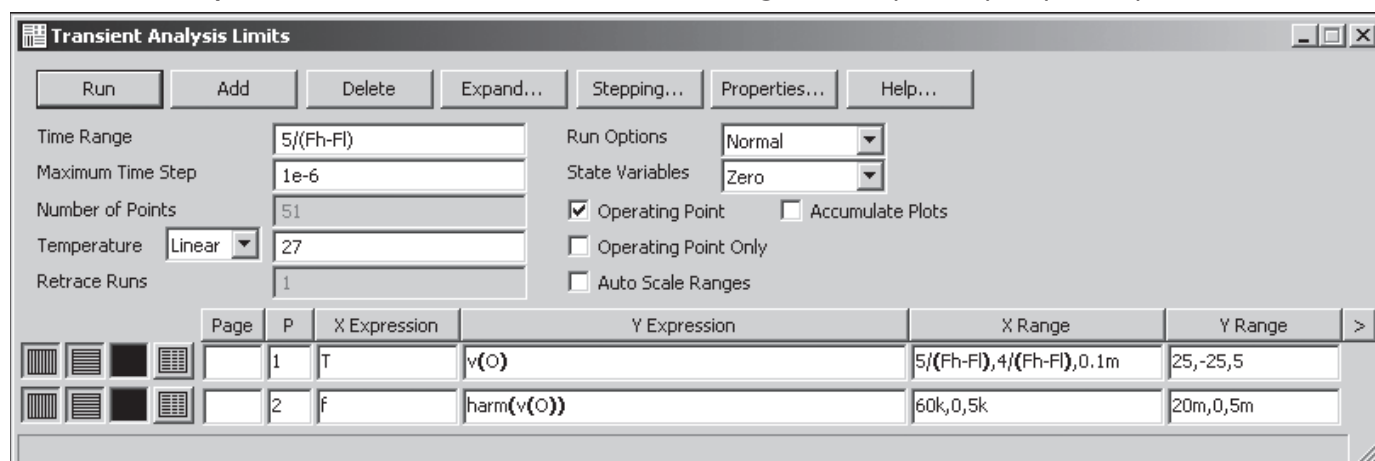


Рис. 2.49. Окно задания параметров переходных процессов

Информация о том, что для анализа Фурье надо использовать только последний период, задается в закладке *FFT* окна **Properties for Transient Analysis** (вызывается кнопкой *Properties* из окна **Transient Analysis Limits**). В этом же окне задается число отсчетов быстрого преобразования Фурье и число масштабируемых гармоник (рис. 2.50).

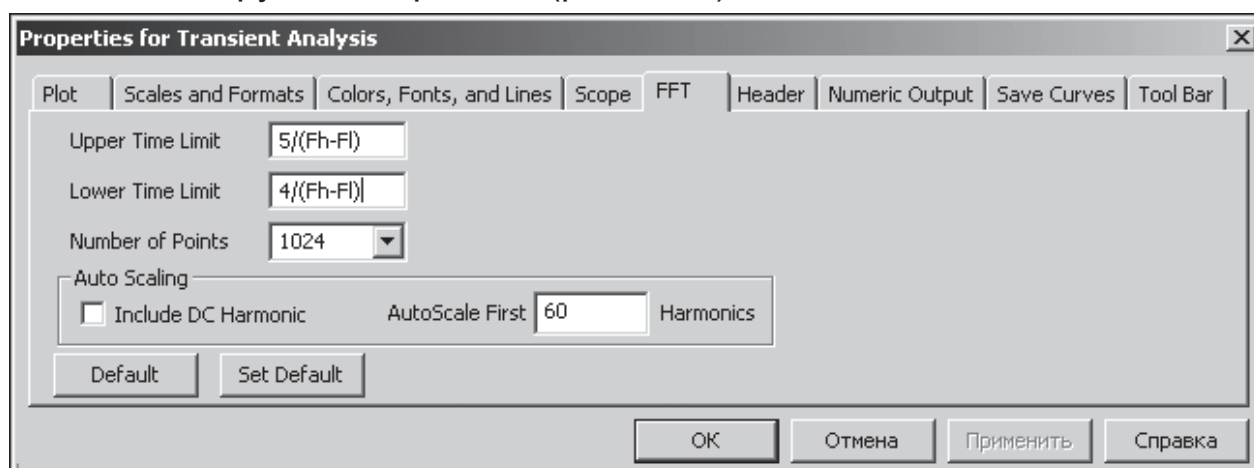


Рис. 2.50. Окно задания параметров FFT

Для получения зависимости IMD от амплитуды входного сигнала необходимо задать параметры этого изменения в окне **Stepping** (рис. 2.51). Окно вызывается одноименной кнопкой в **Transient Analysis Limits**. В этом окне в поле *Step What* задается изменяемый параметр VM – имя переменной, которым мы обозначили амплитуду сигнала синусоидальных источников. В поле *From* – начальное значение (50мВ), в поле *To* – конечное (500мВ), в поле *Step Value* – шаг изменения (1.1). Поскольку выбран логарифмический метод изменения параметра, то шаг не прибавляется к текущему значению, а умножается на него. Тип параметра задан *Symbolic*, поскольку меняется значение символьной переменной VM.

После этого можно запустить анализ и посмотреть гармонический состав выходного напряжения.

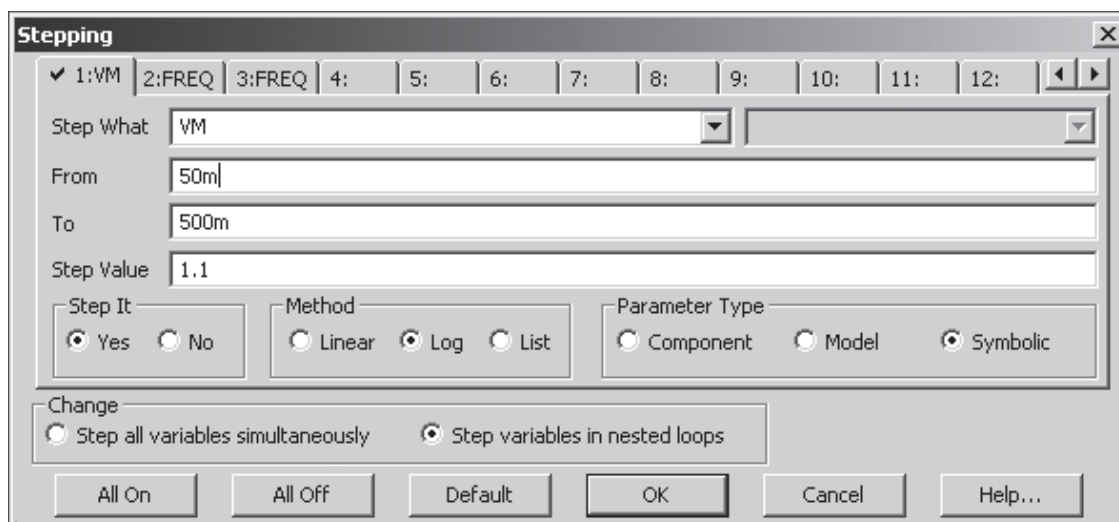


Рис. 2.51. Окно задания параметров Stepping.

После окончания расчета переходных процессов и завершения построения графиков в закладке **Transient** главного меню станет доступным окно обработки результатов измерений при помощи функций Performance — **Performance Windows**. Команда *Add Performance Window* создает новое окно обработки результатов многовариантного анализа. В этом окне можно задать функцию для вычисления интермодуляционных искажений по полученным гармоническим комбинационным составляющим выходного сигнала, которую мы определили в поле схемы — $K_i(H_a, H_b, H_c, H_d, H_g, H_h, H_{fh})$. Однако в качестве аргументов этой функции следует записать амплитуды соответствующих гармоник, рассчитанных с помощью Performance-функции Y_Level от функции $Harm$ для необходимых частот комбинационных составляющих ($Harm(v(o))$ — одна из встроенных в Micro-Cap функций быстрого преобразования Фурье, в данном случае вычисляющая спектр напряжения в узле O). Получится достаточно длинное выражение:

$K_i(Y\_Level(harm(v(o)), 1, 1, a), Y\_Level(harm(v(o)), 1, 1, b), Y\_Level(harm(v(o)), 1, 1, c), Y\_Level(harm(v(o)), 1, 1, d), Y\_Level(harm(v(o)), 1, 1, g), Y\_Level(harm(v(o)), 1, 1, h), Y\_Level(harm(v(o)), 1, 1, F_h))$

Это выражение нужно записать в поле *What to Plot* закладки *Plot* окна **Properties for Performance** (рис. 2.52). Длинное выражение для K_i на рисунке видно не полностью.

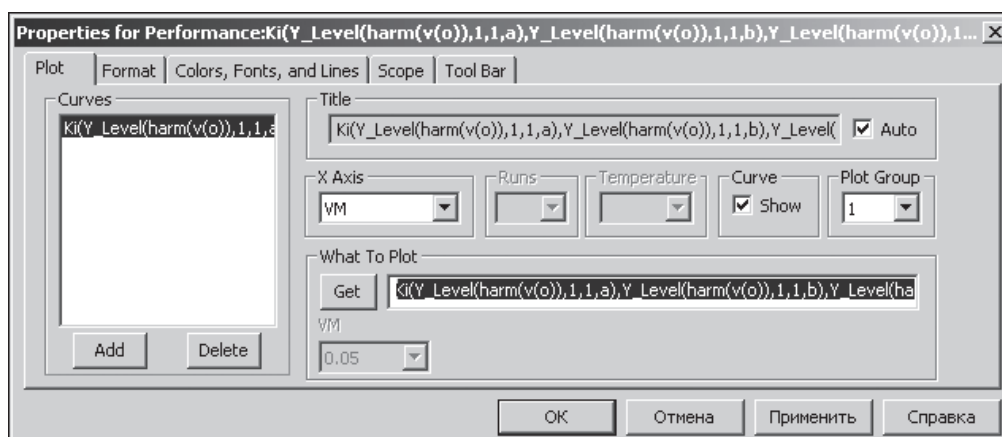


Рис. 2.52. Окно задания параметров функций Performance.

После этого при запуске анализа переходных процессов сразу будет строиться три графика — напряжение на выходе схемы, его спектральный состав и зависимость интермодуляционных искажений от амплитуды входного сигнала (рис. 2.53).

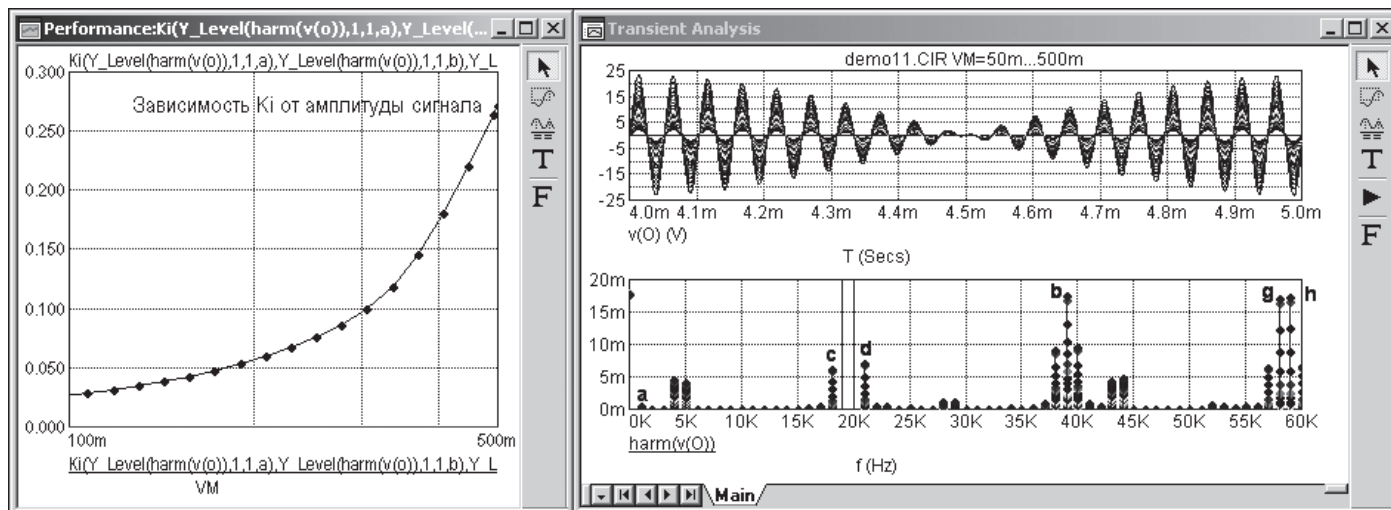


Рис. 2.53. Графики полученных зависимостей.

Окна графиков можно включать и выключать. Окно Performance выводится только тогда, когда соответствующая функция помечена галочкой в закладке **Performance Windows** меню **Transient**. Для редактирования функции, выводимой в окне **Performance**, необходимо кликнуть левой клавишей мыши в поле этого окна.

Помимо зависимости от амплитуды входного сигнала аналогичным образом можно построить зависимости от других параметров, например, от коэффициента передачи тока выходного транзистора. Тогда именно этот параметр должен быть задан в окне Stepping.

Схема-пример *demo11.cir* находится в каталоге *Demo* архива примеров.

2.5.12. Использование wav-файлов

Одной из новых возможностей версии MC10 является возможность использования источника сигнала в виде wav-файла. Он называется *WAV File Source*. Этот источник находится там же, где и остальные источники сигналов — **Component>Analog Primitives>Waveform Sources** (рис. 2.54)

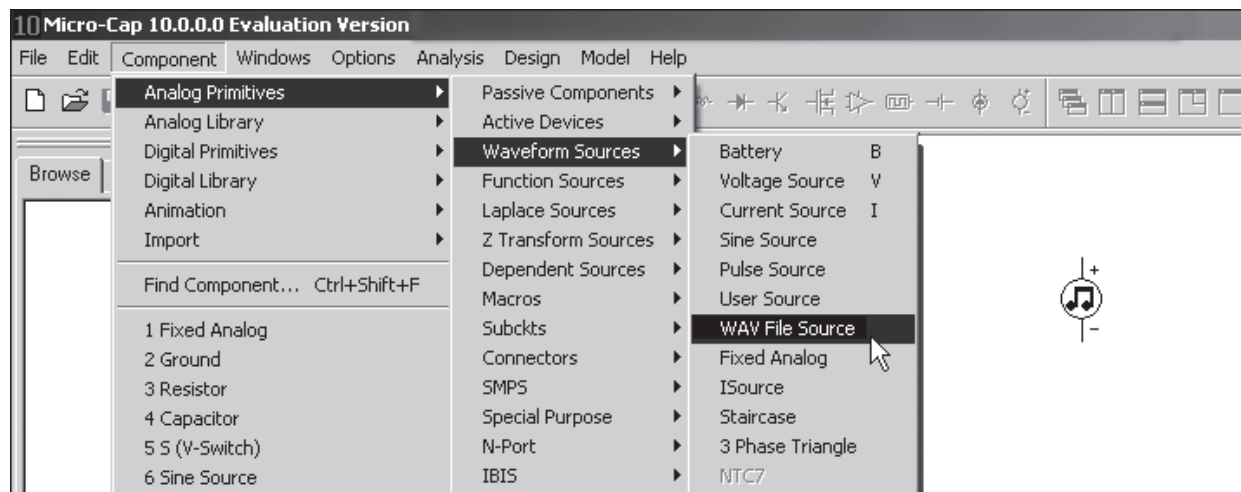


Рис. 2.54. Источник *WAV File Source* в MC10

В демонстрационной версии MC10 этот источник является недоступным. Однако, если в демонстрационную версию загрузить любой пример использования этого источника (в том числе и с сайта Spectrum Software), то этот схемный файл будет успешно работать. Более того, источник *WAV File Source* при этом импортируется в состав компонентов и становится доступным в разделе *Import* (рис. 2.55)

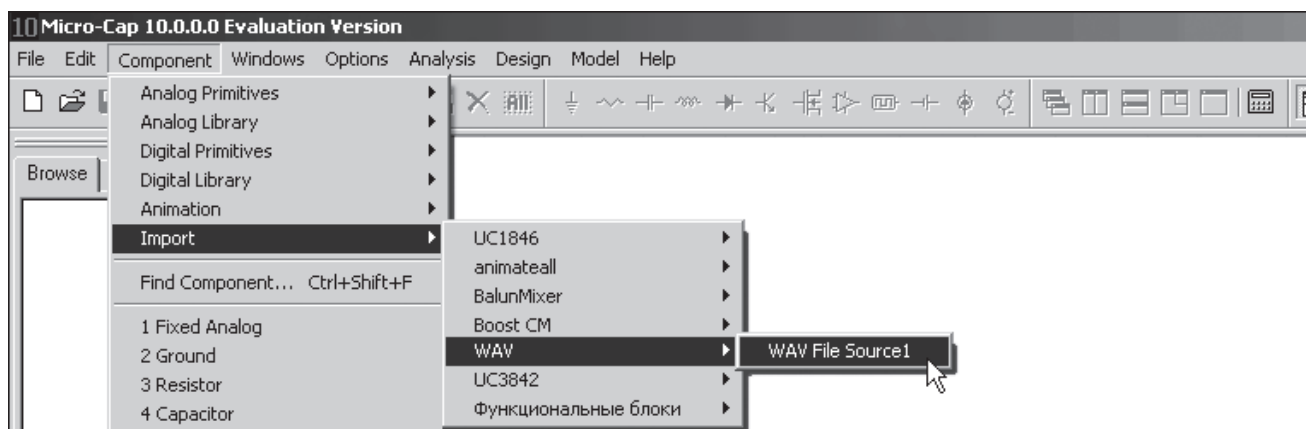


Рис. 2.55. Источник *WAV File Source* в демоверсии MC10

После того, как источник добавлен в схему, необходимо в окне задания параметров источника указать wav-файл, который будет использовать этот источник. Wav-файл необходимо предварительно скопировать в каталог **Data**. При выборе источника появится список всех wav-файлов, имеющих в этом каталоге (рис. 2.56).

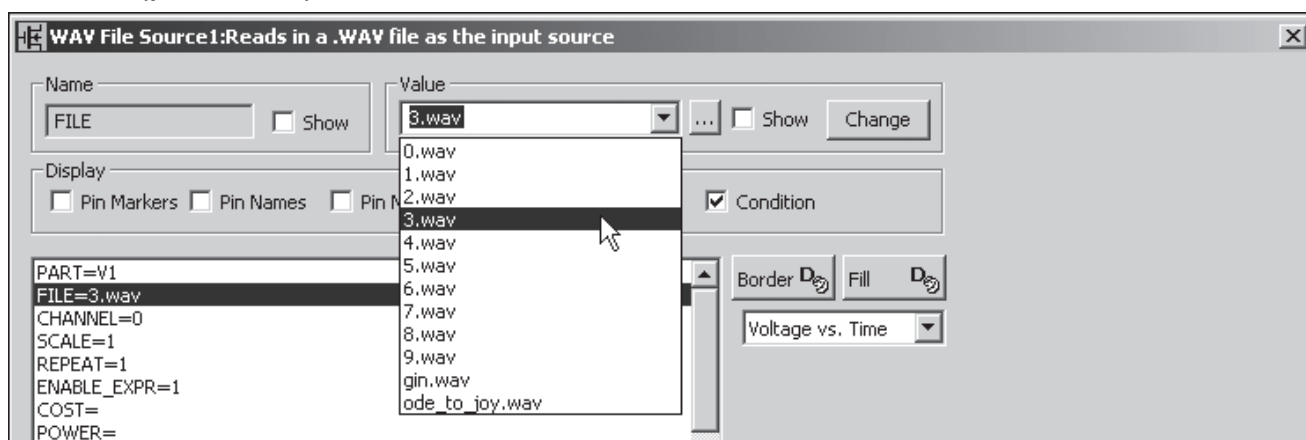
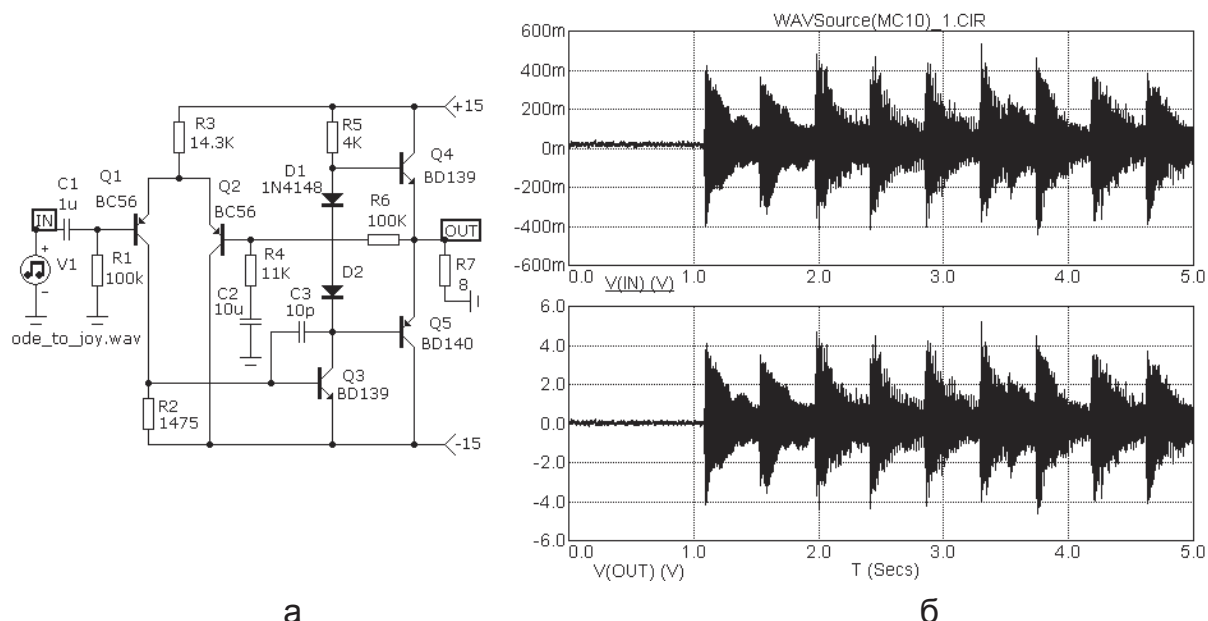


Рис. 2.56. Выбор wav-файла для источника

В качестве примера использования *WAV File Source* на рис. 2. 57, а представлена схема усилителя низкой частоты (схема-пример *demo12(MC10).cir* находится в каталоге *Demo* архива примеров. На вход IN подается сигнал от источника, с выхода OUT, нагруженного на сопротивление 8 Ом снимается полученный сигнал. Коэффициент усиления по напряжению равен 10 (т.е. 20 дБ). Временные диаграммы сигналов на входе и выходе схемы представлены на рис. 2. 57, б.

Напряжение источника *WAV File Source* представляет собой сигнал сложной формы и временные диаграммы на больших промежутках времени получаются неинформативными. Однако в MC10 есть возможность не только посмотреть полученные временные диаграммы, но и сохранить результат в виде wav-файла, а также прослушать его звучание.



2.57. Схема усилителя (а) и временные диаграммы сигналов на входе и выходе (б)

Для сохранения результатов в файле и его прослушивания необходимо зайти в окно задания свойств анализа переходных процессов **Properties for Transient Analysis** (рис. 2.58). Это окно можно вызвать щелчком левой клавиши мыши на поле графика переходных процессов. Затем в этом окне нужно выбрать закладку *Save Curves*.

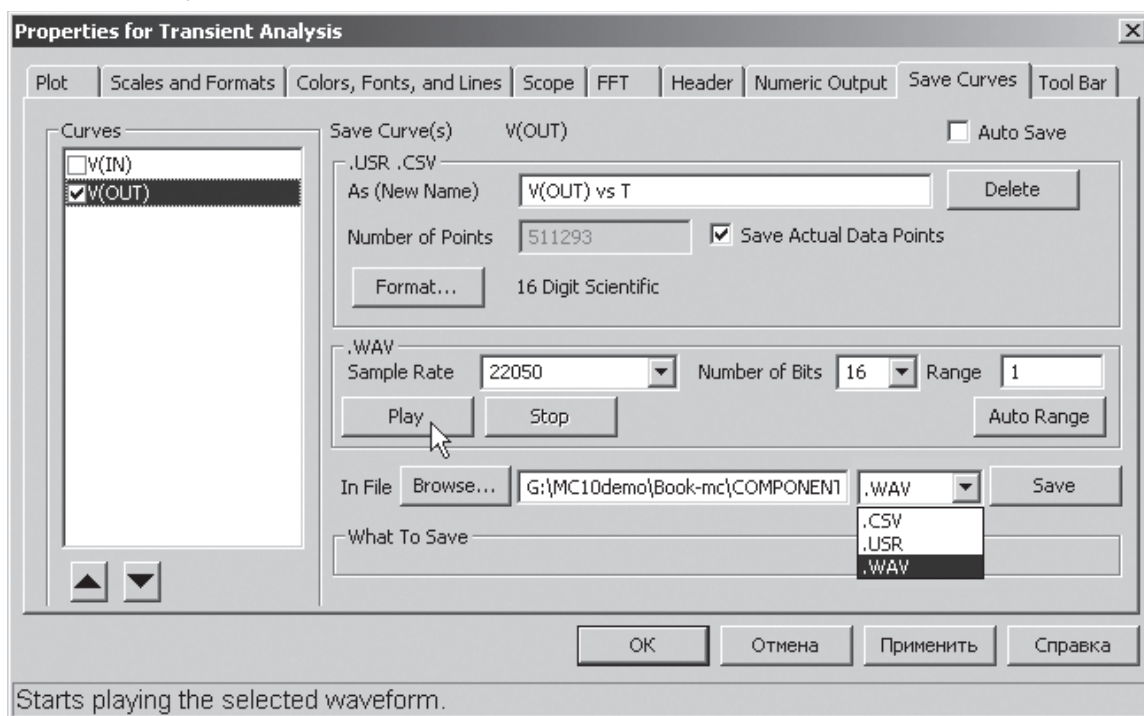


Рис. 2.58. Окно сохранения графиков и прослушивания их виде звуковых файлов

Если в этом окне в поле *Curves* выбрать какой-либо из графиков (поставить галочку), то этот файл можно воспроизвести, нажав клавишу *Play*. Для сохранения результатов в виде wav-файла необходимо выбрать этот формат в соответствующем списке.

Следует отметить, что в MC10 воспроизводить и сохранять в виде wav-файла можно любую кривую переходных процессов, а не только полученную при использовании *WAV File Source*. Например, при моделировании генераторов звуковой частоты можно прослушать звучание полученного сигнала.

3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММЕ

3.1. Установка Micro-Cap

Micro-Cap 9, 10 существует в двух вариантах: демонстрационная версия и полнофункциональная версия.

Полнофункциональные версии MC9, MC10 – платные. Ее стоимость на текущий момент составляет 4495\$. Заказать программу можно на сайте разработчика (<http://www.spectrum-soft.com/price.shtml>). Эта версия программы имеет аппаратный ключ защиты (HASP Security Key) и для его работы может понадобиться драйвер, также доступный на этом сайте. Инструкции по установке программы и драйвера защиты имеются в комплекте документации, предоставляемой при покупке программы.

Демонстрационная версия Micro-Cap – бесплатная. Она обладает практически всеми качественными возможностями полнофункциональной версии, а ограничения носят по большей части количественный характер. Так, например, демонстрационная версия позволяет моделировать схемы, число компонентов в которых не превышает 50, расчеты ряда схем проходят несколько медленнее, чем в полнофункциональной версии, ограничена библиотека компонентов, нет встроенной программы подготовки собственных моделей и некоторых других дополнительных функций.

Демонстрационную версию можно скачать с сайта разработчика программы. Для этого достаточно зарегистрироваться на сайте (<http://www.spectrum-soft.com/demoform.shtml>) и по вашему адресу электронной почты будет отправлена ссылка для скачивания файла. Установка демонстрационной версии программы специфических особенностей не имеет и ничем не отличается от установки других программ, предназначенных для работы в операционной системе Windows.

Все сказанное ниже в этом и следующем подразделах относится к двум версиям программы (MC9, MC10), однако в изложении для краткости указаны файлы 9-ой версии.

После установки Micro-Cap следует проверить пути к каталогам со схемами и библиотеками. Для этого надо запустить программу (исполняемый файл mc9.exe или mc10.exe) и зайти в подменю *File>Path* (Файлы/Пути). Там должны быть установлены:

1. Путь к каталогам схем (...**DATA**) — перечень каталогов, в котором могут размещаться схемы для моделирования. На начальном этапе работы, можно установить каталог примеров фирмы-разработчика **DATA**.. В дальнейшем можно добавлять дополнительные каталоги, например каталог учебных примеров **BOOK-MC** (можно скачать с сайта авторов книги).

2. Путь для библиотек (Model Library) — ...**LIBRARY**.

3. Путь для изображений (используемых файлов в различных графических форматах) — ...**DATA**. При необходимости систематической вставки графических файлов в схему из другого места, этот путь можно отредактировать.

Обращаем внимание, что авторы книги создали Internet-сайт поддержки пользователей Micro-Cap <http://www.microcap-model.narod.ru>, на котором раз-

мещаются учебные и справочные материалы по использованию этой программы. На форуме этого сайта можно задать любые вопросы по использованию Micro-Cap, а также по иным аспектам схемотехнического моделирования. В частности, с этого сайта можно скачать библиотеку схем-примеров, используемых в этой книге — <http://www.microcap-model.narod.ru/book-mc.rar>, а также файлы для установки русифицированного интерфейса программы Micro-Cap. Кроме того, в дополнении к оригинальному каталогу примеров DATA можно скачать архивный файл примеров DATARUS (<http://www.microcap-model.narod.ru/datarus-mc9.rar>). Он содержит те же примеры, что и каталог DATA, но только с комментариями на русском языке. Кроме того, базовый набор схем расширен дополнительными примерами.

3.2. Основные файлы каталога Micro-Cap

3.2.1. Корневой каталог MC9, MC10

- *active.flt* — текстовый файл, содержащий последние установки диалогового окна синтеза активных фильтров.
- *default.san* — текстовый файл, содержащий ограничения (по минимуму и максимуму), принятые по умолчанию для параметров математических моделей компонентов схем.
- *demo.mc9* — файл, в котором записаны демонстрационные примеры, помогающие начинающему пользователю освоить работу с программой. Они вызываются командой меню *Help>Demos* и дальше выбираются из списка. Для правильной работы демонстрационных примеров в подменю *FILE>Path* для файлов схем DATA должен быть установлен путь **...\\MC9\\DATA**. Остановить работу демонстрационного примера для чтения поясняющих сообщений (на английском языке) можно с помощью нажатия клавиши <PAUSE>, возобновить воспроизведение — с помощью нажатия любой клавиши (удобно использовать повторное нажатие <PAUSE>). Рассмотрев подробно работу демо-примеров в замедленном режиме (используя клавишу <PAUSE>), начинающий пользователь (предполагается лишь наличие у него знаний по основам электроники) может освоить все особенности работы с системой.
- *filter.bin* — бинарный файл, необходимый для синтеза фильтров.
- *filter.cmp* — библиотека электронных компонентов, необходимая для синтеза активных и пассивных фильтров.
- *help.mc9* — файл, используемый программой для выдачи сообщений об ошибках.
- *import.cmp* — расширенная библиотека компонентов. Здесь хранится информация о компонентах, созданных пользователем в процессе работы с программой.
- *import.shp* — расширенная библиотека условных графических обозначений (УГО) символов компонентов. Здесь хранится информация об УГО компонентов, созданных пользователем в процессе работы с программой.
- *mc9.chm* — встроенная подсказка (база данных)
- *mc9.cnt* — содержание встроенной подсказки программы.
- *mc9.exe* — программа MC9, исполняемый модуль.

- *mc9.hlp* — встроенная помощь для программы MC9.
- *mc9eng.dll* — интерфейсный файл программы (создается для каждого языка интерфейса)
- *mcap.dat* — файл конфигурации программы MC9. Создается автоматически после первого запуска программы. В нем, в частности, указываются:
 - значения модельных параметров компонентов, принятые по умолчанию;
 - текущие установки схемного редактора и окон анализа;
 - текущие установки глобальных параметров;
 - полные имена подкаталогов, аналогичных подкаталогам \LIBRARY и \DATA, установленные с помощью подменю *FILE>Path*).
- *mcap.inc* — глобальные установки пользователя, доступные для всех схем.
- *passive.flt* — текстовый файл, содержащий последние установки диалогового окна синтеза пассивных фильтров.
- *sanity.doc* — результирующий текстовый файл, создаваемый после запуска MC9 в пакетном режиме.
- *standard.cmp* — стандартная библиотека компонентов.
- *standard.pkg* — стандартная библиотека расположения выводов компонентов (необходима для создания списков соединений схем, передаваемых в программы разработки печатных плат).
- *standard.shp* — стандартная библиотека условных графических обозначений (УГО) символов компонентов.
- *tip.mc9* — типовые сообщения и подсказки, выдаваемые программой при запуске.
- *tolerance.dat* — текущие наборы рядов номиналов для установки допуска (согласно ряду) в диалоговом окне TOLERANCE.
- *use.mc9* — информация о последнем использовании программы.
- *wfb.bin* — бинарный файл буфера графиков.

3.2.2. Подкаталог DATA

В подкаталог **MC9\DATA** (или в подкаталог, указанный в команде PATH для данных) заносятся файлы схем и данных результатов моделирования. Список принятых расширений имен файлов:

- .AMC — текстовый файл статистической обработки расчетов частотных характеристик при разбросе параметров по методу Монте-Карло.
- .ANO — текстовые файл результатов расчета частотных характеристик, в который занесена информация о параметрах компонентов, режиме по постоянному току и таблице выходных переменных, отмеченных в меню *AC Analysis Limits*.
- .ASA — бинарный файл результатов расчетов частотных характеристик для последующей обработки графическим постпроцессором PROBE.
- .BAK_CIR — предыдущая версия схемного файла, остающаяся на диске после сохранения текущего отредактированного файла описания схемы.
- .BOM — текстовый файл перечня элементов (Bill of Materials) принципиальной схемы, создаваемый программой по специальной команде.

- .CIR — файлы описания схем в формате Micro-Cap. Эти файлы создаются пользователем при помощи графического редактора, и загружаются из каталога ...**MC9\DATA** для различных видов анализа.
- .CKT — файлы описания схем и заданий на моделирование на языке SPICE.
- .CSV — файл формата Excel с числовыми данными, разделенными запятой. Может создаваться программой после построения графиков в одном из режимов анализа по команде *Save Curves*. Может использоваться для обработки данных моделирования другими программами.
- .DANO — текстовый файл численного вывода для режима Dynamic AC.
- .DDNO — текстовый файл численного вывода для режима Dynamic DC.
- .DMC — текстовые файлы статистической обработки расчетов передаточных функций по постоянному току при разбросе параметров по методу Монте-Карло.
- .DNO — текстовый файл результатов расчета передаточных характеристик на постоянном токе, в который занесена информация о параметрах компонентов, режиме по постоянному току и таблице выходных переменных, отмеченных в меню *DC Analysis Limits*.
- .DSA — бинарный файл результатов расчетов передаточных характеристик на постоянном токе для последующей обработки графическим постпроцессором PROBE.
- .ERR — перечень ошибок описания и списка выводов корпуса.
- GNP, HNP, SNP, TNP, YNP, ZNP, ANP — текстовые файлы G(H, S, T, Y, Z, A)-параметров линейных 2N-полюсников. Вместо N в именах реальных файлов используется цифра 1, 2, 3 и т. д.
- .JED — файл программирования логических матриц в формате JEDEC.
- .NET — текстовые файлы списков соединений для переноса схем на печатные платы.
- .SEN — текстовый файл результатов расчета чувствительностей на постоянном токе.
- .STM — текстовые файлы сигнальных последовательностей для цифровых генераторов FSTIM.
- .SVV — текстовые файлы значений переменных состояния, создаваемые редактором *State Variables Editor*.
- .TMC — текстовые файлы статистической обработки расчетов переходных процессов при разбросе параметров по методу Монте-Карло.
- .TNO — текстовые файлы результатов расчета переходных процессов, в который занесена информация о параметрах компонентов, режиме по постоянному току и таблице выходных переменных, отмеченных в меню *Transient Analysis Limits*.
- .TSA — бинарные файлы результатов расчетов переходных процессов для последующей обработки графическим постпроцессором PROBE.
- .TOP — бинарные файлы значений переменных состояния, создаваемые редактором *State Variables Editor*.

- .USR — текстовые файлы дискретных отсчетов выборок сигналов для последующего использования в качестве источника сигнала, программируемого пользователем.
- .WNO — текстовый файл численного вывода для режима анализа нелинейных искажений Distortion.
- *.WSA — бинарные файлы результатов расчетов нелинейных искажений DISTORTION для последующей обработки графическим постпроцессором PROBE.

3.2.3. Подкаталог LIBRARY

В подкаталог **MC9\LIBRARY** заносятся файлы библиотек математических моделей компонентов. Список принятых расширений имен файлов:

- .CAP — ряды значений емкостей конденсаторов с указанным допуском tolerance, используемые при синтезе фильтров на основе неидеальных компонентов.
- .CIR — макромоделли электронных компонентов, оформленные в виде схемы Micro-Cap.
- .IND — ряды значений индуктивностей катушек с указанным допуском tolerance, используемые при синтезе фильтров на основе неидеальных компонентов.
- .INX — индексный файл библиотек математических моделей компонентов, создаваемый при моделировании схемы.
- .LBR — сокращенные бинарные файлы библиотек математических моделей компонентов, созданных с помощью меню MODEL, без сохранения экспериментальных данных. Просматриваются и редактируются с помощью программы Micro-Cap.
- .LIB — текстовые файлы библиотек математических моделей компонентов в формате SPICE. Просматриваются и редактируются программой Micro-Cap и любым текстовым редактором.
- .MAC — макромоделли электронных компонентов, оформленные в виде схемы Micro-Cap (аналогично .CIR).
- .MDL — полные бинарные файлы библиотек математических моделей компонентов, созданных с помощью меню MODEL с сохранением экспериментальных данных.
- .MOD — текстовые файлы математических моделей отдельных компонентов в формате SPICE.
- .RES — ряды значений сопротивлений резисторов с указанным допуском tolerance, используемые при синтезе фильтров на основе неидеальных компонентов.
- .USR — текстовые файлы дискретных отсчетов выборок сигналов.
- NOM_LIB.INX — индексный файл библиотек математических моделей компонентов (создается программой).
- NOM.LIB — перечень загружаемых библиотек математических моделей компонентов (текстовый файл, по умолчанию создается при установке программы и при необходимости может редактироваться пользователем).

3.3. Описание графического интерфейса

3.3.1. Главное окно программы

Micro-Cap является программой с многооконным графическим интерфейсом, позволяющим строить и редактировать схемы, модели и изображения компонентов, а также представлять результаты расчетов в удобном графическом виде. При помощи мыши можно менять расположение и размер окон, а также выбирать команды меню. Одновременно можно редактировать несколько схемных файлов, размещенных в разных окнах.

В программе Micro-Cap используется стандартный многооконный интерфейс с ниспадающими и разворачивающимися меню. После запуска программы MC9 экран монитора имеет вид, представленный на рис. 3.1.

Верхняя строка окна (подсвеченная синим) — **панель заголовка программы Micro-Cap**. На ней слева находится **кнопка системного меню**, дублирующая по начертанию ярлык программы. С ее помощью изменяется и восстанавливается размер окон, они перемещаются, сворачиваются и закрываются. Аналогичные операции можно делать с помощью стандартных в ОС WINDOWS кнопок, расположенных справа на панели заголовка. На этой же панели находится заголовок. Если открыто окно схем, то указывается имя файла схемы и каталога, в котором он расположен. Если же открыто окно анализа характеристик **Analysis** — указывается вид анализа.

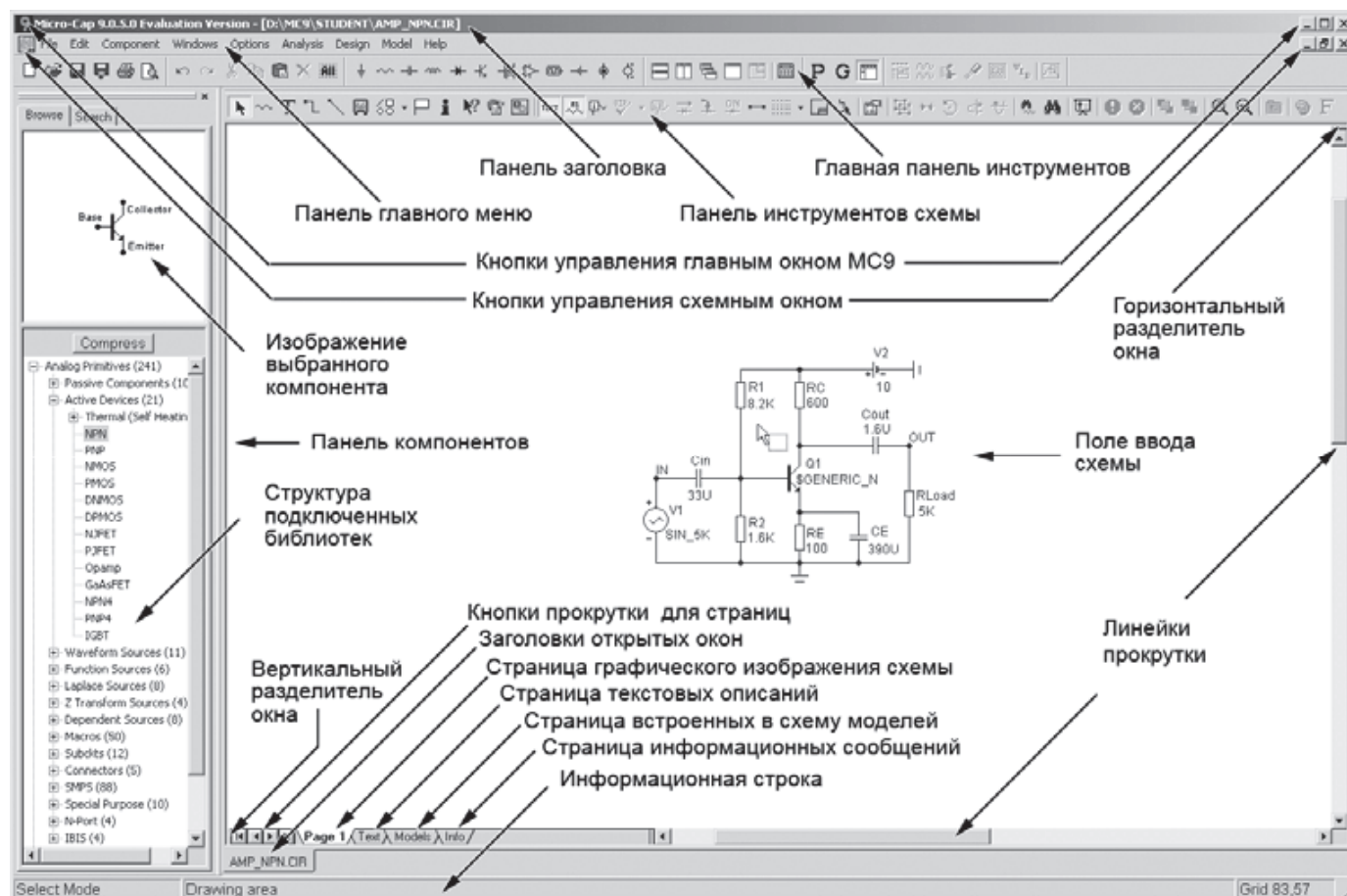


Рис. 3.1. Главное окно программы Micro-Cap

Следующая строка (2-ая сверху) — **панель главного меню команд** программы. Слева на ней расположена кнопка меню схемы, управляющая размером окна схемы, а справа 3 стандартные в WINDOWS кнопки, выполняю-

щие управление активным окном. Между этими кнопками располагается **ниспадающее меню команд программы Micro-Cap**.

Главная панель инструментов. На ней размещены пиктограммы наиболее часто используемых команд. Все они будут описаны ниже при рассмотрении соответствующих пунктов меню. Пиктограммы команд немедленного действия восстанавливают свое первоначальное положение сразу после нажатия. Пиктограммы команд, переключающих режимы, остаются в положение «включено» до выполнения следующей команды.

Линейки прокрутки. Две линейки прокрутки позволяют панорамировать окно схем или текста по горизонтали или вертикали.

Закладки переключения окна схем, окна текста. Нажатие на закладку **Text** выводит в рабочее окно содержание текстового окна, в котором можно размещать описание математических моделей компонентов текущей схемы, директивы и другую текстовую информацию, или содержание окна схем. Переключение между текущим окном схемы и текстовым окном производится также нажатием горячих клавиш **Ctrl+G**.

Нажатие на закладки **Page 1, Page 2,...** открывает соответствующую страницу схемы. Новая страница схемы создается по команде всплывающей панели **Add Schematic Page**, открываемой щелчком правой кнопки мыши, когда курсор находится на строке названия страницы.

Нажатие на закладку **Models** открывает текстовую страницу схему, в которой находятся модельные директивы, помещаемые туда командой меню **EDIT>Localize Models** (например, при подготовке файла к передаче другому пользователю).

При нажатии правой кнопки мыши курсор в окне схем приобретает форму ладони, и его перемещение при нажатой кнопке позволяет панорамировать схему (т.е. перемещать её относительно окна).

Ниже закладок переключения окна находятся **заголовки открытых окон**, включение которых осуществляется командой **Options>Window Tabs**. В этой строке показываются заголовки всех открытых схем, а при запуске определенного вида анализа — заголовки открытых окон текущей схемы.

Слева располагается отключаемая **панель компонентов**, дублирующая иерархическую структуру меню и библиотеки компонентов. Верхняя часть панели показывает УГО выбранного компонента. Выбранный компонент может быть введен в принципиальную схему левым кликом мыши — при этом откроется окно задания его параметров.

Самая нижняя строка окна программы — отключаемая **информационная строка**. В ней показывается краткая информация о выбранной кнопке панели инструментов, пункте меню или компоненте. Включение/отключение этой строки производится командой **Options>Status Bar**.

При работе с Micro-Cap используется понятие **выбора объекта** (компонента схемы, его позиционного обозначения, значения параметра, электрической цепи, блока схемы или строки текста). Выбор отдельного объекта выполняется щелчком мыши, выбор блока — заключением его в прямоугольную рамку (для этого нужно щелкнуть кнопкой мыши, поместив курсор в один из углов прямоугольной области и, не отпуская ее, растянуть рамку до необхо-

димых размеров, после чего отпустить кнопку). Выбранный объект изменяет цвет, его можно перетаскивать с помощью мыши и редактировать.

Для ускорения работы с программой используется не только мышь, но и **клавиатура**. Если команда меню имеет подчеркнутый символ, то эта команда вызывается одновременным нажатием клавиш **Alt+подчеркнутый символ**. Например, меню **EDIT** открывается нажатием клавиш **Alt+E**.

Команды открытого ниспадающего подменю, например **Select All**, вызываются нажатием подчеркнутого символа, в данном примере символа **A**. Другой способ — нажатием клавиш **↑↓** выбрать нужную строку и затем нажать **Enter**. Следует обратить внимание, что подчеркнутые символы в меню и подменю появляются только при вызове команд с помощью клавиатуры (при предварительном нажатии **Alt**).

Многие команды помимо пиктограмм вызываются нажатием *горячих клавиш* и комбинаций клавиш. Например, команда удаления с копированием в буфер обмена **Edit>Cut** вызывается нажатием пиктограммы  или комбинации клавиш **Ctrl+X**.

Горячие клавиши будут перечисляться ниже при описании команд меню.

3.3.2. Основные команды меню

Остановимся подробнее на **ниспадающем меню команд программы Micro-Cap**. Здесь и далее при описании пунктов ниспадающего меню в скобках указывается сочетание «горячих клавиш» и пиктограмма кнопки панели инструментов (3 и 4 строка экрана см. рис. 3.1), нажатие которых производит аналогичные действия.

3.3.3. Пункт меню FILE

New (, **CTRL+N**) — позволяет создать новый схемный файл или файл макроопределения в формате Micro-Cap (*.CIR, *.MAC), текстовый схемный файл в формате SPICE (*.CKT); библиотечные файлы *.LIB или *.LBR, либо библиотечный файл моделей с экспериментальными данными *.MDL для работы с программой Model.

Open (, **CTRL+O**) — позволяет открыть для редактирования или анализа схемный файл. Команда вызывает диалоговое окно открытия файла, с помощью которого можно открыть схемный (.CIR, .MAC, .CKT) или библиотечный файл (.LIB, .LBR, .STM, .MDL, .IBS, .RES, .CAP, .IND, формата Touchstone параметров линейного многополюсника).

Save (, **CTRL+S**) — позволяет сохранить схемный файл из активного окна с именем и путем, указанным в строке заголовка.

Save as — позволяет сохранить схемный файл из активного окна под другим именем (имя указывается в открывающемся окне).

Protect — позволяет сохранить находящийся в схемном окне файл с паролем в зашифрованном формате. При выборе в открывающемся диалоге группы файлов защита устанавливается на все выделенные файлы. После этого указанный файл(ы) можно просмотреть или загрузить в окно схемного редактора только введя пароль. Защищенная схема может быть использова-

на при моделировании без пароля, если она используется другой схемой как макроопределение. Команда используется для защиты макромоделей от некомпетентного редактирования. Для удаления защиты необходимо сохранить файл под другим именем командой **Save As**.

Paths — позволяет указать пути расположения рабочих схем (Data), библиотечных файлов (Model Library, Include Files), рисунков (Picture). Если необходимо указать несколько путей, то они разделяются в соответствующей строке символом «;». Micro-Cap в первую очередь ищет информацию о моделях компонентов по путям, указанным в строке данных (DATA) для схем. Затем программа просматривает пути, указанные во второй строке (Model Library and Include Files). Также можно локально изменить пути поиска моделей, указав в самом схемном файле текстовую директиву .PATH. Установка флажка «Look in subfolders» позволяет распространять действие команды на все подкаталоги любого уровня вложенности перечисленных каталогов. Установка флажка «Allow non-existent path» (только MC10) позволяет выполнять любую команду с рабочими каталогами при наличии в перечислении несуществующих путей.

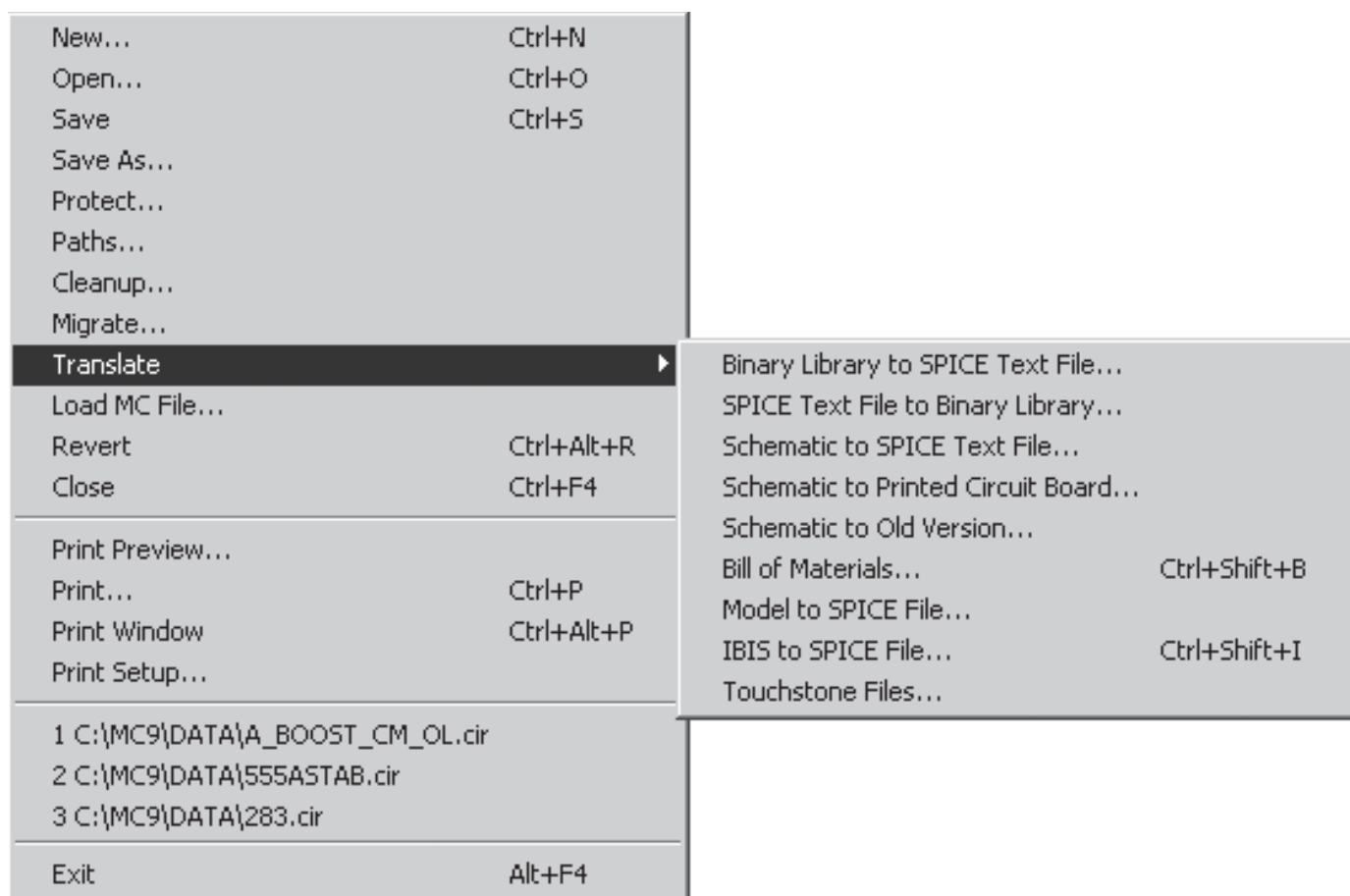


Рис. 3.2. Пункты меню **FILE**

Cleanup — позволяет навести порядок в рабочем каталоге путем удаления ненужных дополнительных файлов, возникающих при запуске анализа. Чаще всего необходимо удалять выходные текстовые файлы с таблицами значений (*.TNO, *.ANO, *.DNO) и файлы данных для графического постпроцессора PROBE (*.TSA, *.ASA, *.DSA). Обычно не представляют особой ценности также файлы с расширением *.INX и *.BAK_CIR.

Migrate — позволяет передать файлы компонентов из более ранней версии программы Micro-Cap. После того как будет указано расположение файла

MCAP.DAT более старой версии программы, MC9 (MC10) прочитает его и сформирует список файлов, которые могут быть импортированы (*.cmp, *.shp, *.pkg, *.lib, *.mac).

Translate — позволяет преобразовать форматы схемных файлов (текстового SPICE в графический Micro-Cap и наоборот, а также схемного MC9 (MC10) в схемный более ранних версий Micro-Cap и др.). Содержит следующие подпункты:

- **Binary Library to SPICE Text File** () — преобразует бинарный библиотечный файл формата .LBR в текстовый файл формата .LIB, содержащий текстовое описание модели.
- **SPICE Text File to Binary Library** () — преобразует текстовый библиотечный SPICE-файл .LIB в бинарный файл программы Micro-Cap формата .LBR.
- **Schematic to SPICE Text File** () — преобразует схемный файл Micro-Cap в активном окне в текстовый схемный SPICE-файл.
- **Schematic to Printed Circuit Board** — создает файл таблицы соединений для последующего использования в программах разводки печатных плат Protel, Accel, OrCad, или PCAD.
- **Schematic to Old Version** — преобразует схему в активном окне в форматы схем предыдущих версий Micro-Cap: MC5, MC6, MC7, MC8.
- **Bill of Materials (Ctrl+Shift+B)** — создает полный список информации о компонентах схемы (имя, тип, номинальное значение, количество и другие атрибуты). В открывающемся диалоговом окне *Bill of Materials* можно задавать формат создаваемого перечня компонентов.
- **Model to SPICE File** () — преобразует файл данных Model *.Mdl в текстовые модельные сообщения формата SPICE в виде текстового SPICE-файла.
- **IBIS to SPICE File (Ctrl+Shift+I)** — вызывает диалоговое окно IBIS, которое создает эквивалентную SPICE-модель для IBIS-файла (временные диаграммы интерфейса в специальном формате). Полученный SPICE-файл можно в дальнейшем использовать при анализе переходных процессов в буферах ввода-вывода.
- **Touchstone Files** — конвертирует таблицу частотно-зависимых S, Y, Z, G, H, T, A-параметров линейного многополюсника в любой другой вид параметров (S, Y, Z, G, H, T, A).

Load MC File — позволяет загружать файлы результатов расчета по методу Монте-Карло (*.ANO, *.DNO, *.TNO), содержащие комбинации варьируемых параметров, при которых стало истинным логическое выражение в строке *Report When* диалогового окна *Monte Carlo Options* (или так называемые варианты отказа схемы). Открывающееся диалоговое окно *Load Monte Carlo File* позволяет выбрать конкретный вариант(ы) отказа схемы и загрузить его (их) в схемный редактор для последующего просмотра и анализа.

Revert (, **CTRL+ALT+R**) — позволяет восстановить исходное состояние текущего окна из ранее сохраненного файла.

Close (CTRL+F4) — завершение работы со схемой, находящейся в активном окне.

Close all (CTRL+F4) — закрытие всех одновременно открытых файлов (только MC10).

Print Preview () — предварительный просмотр изображения перед печатью. Позволяет выбирать страницы для печати (схемную, текстовую, результатов анализа) и устанавливать их размеры.

Print (, **CTRL+P**) — вывод на печать информации из активного файла в соответствии с установками, заданными в окне *Print Preview*.

Print Window (Ctrl+Alt+P) — вывод на печать содержимого активного окна на всю площадь листа.

Print Setup () — выбор принтера и параметров бумаги.

1...10 — полные имена (включая путь) 10 последних открывавшихся схемных файлов.

Exit (ALT+F4) — завершение работы с программой Micro-Cap.

3.3.4. Пункт меню EDIT

Undo (, **CTRL+Z**) — отмена последней команды редактирования (откат назад). Зависит от объема доступной памяти (обычно не менее 20 действий). На рис. 3.3 фигурирует как **Undo Clear**, поскольку последняя выполненная команда была **Clear**.

Redo (, **CTRL+Y**) — выполнение последней отмененной команды (откат вперед). На рис. 3.3. фигурирует как **Redo Add**, поскольку последняя отмененная команда была **Add**.

Cut (, **CTRL+X**) — удаление выбранного () объекта и копирование его в буфер обмена.

Copy (, **CTRL+C**) — копирование выбранного объекта в буфер обмена.

Paste (, **CTRL+V**) — копирование содержимого буфера обмена в текущее окно в место на которое показывает курсор.

Clear (, **DEL**) — удаление выбранного объекта.

Clear Cut Wire (CTRL+DEL) — удаление с обрезкой линий соединений (проводов) по границе выделенной прямоугольной области.

Select all (, **CTRL+A**) — выделение всех объектов в текущем окне или всего текста в текстовом окне.

Copy to Clipboard — копирование в буфер обмена текущего окна (или выделенного блока в нем) в выбранном графическом формате (выбор – в открывающемся подменю).

Copy the Entire Window to a Picture File – сохранение активного окна программы в виде графического файла. Формат графического файла (BMP, JPEG, GIF, EMF, WMF, TIFF и PNG) выбирается в дополнительном окне, по-

являющемся при выполнении этой команды. В том же окне задается имя графического файла и путь к нему.

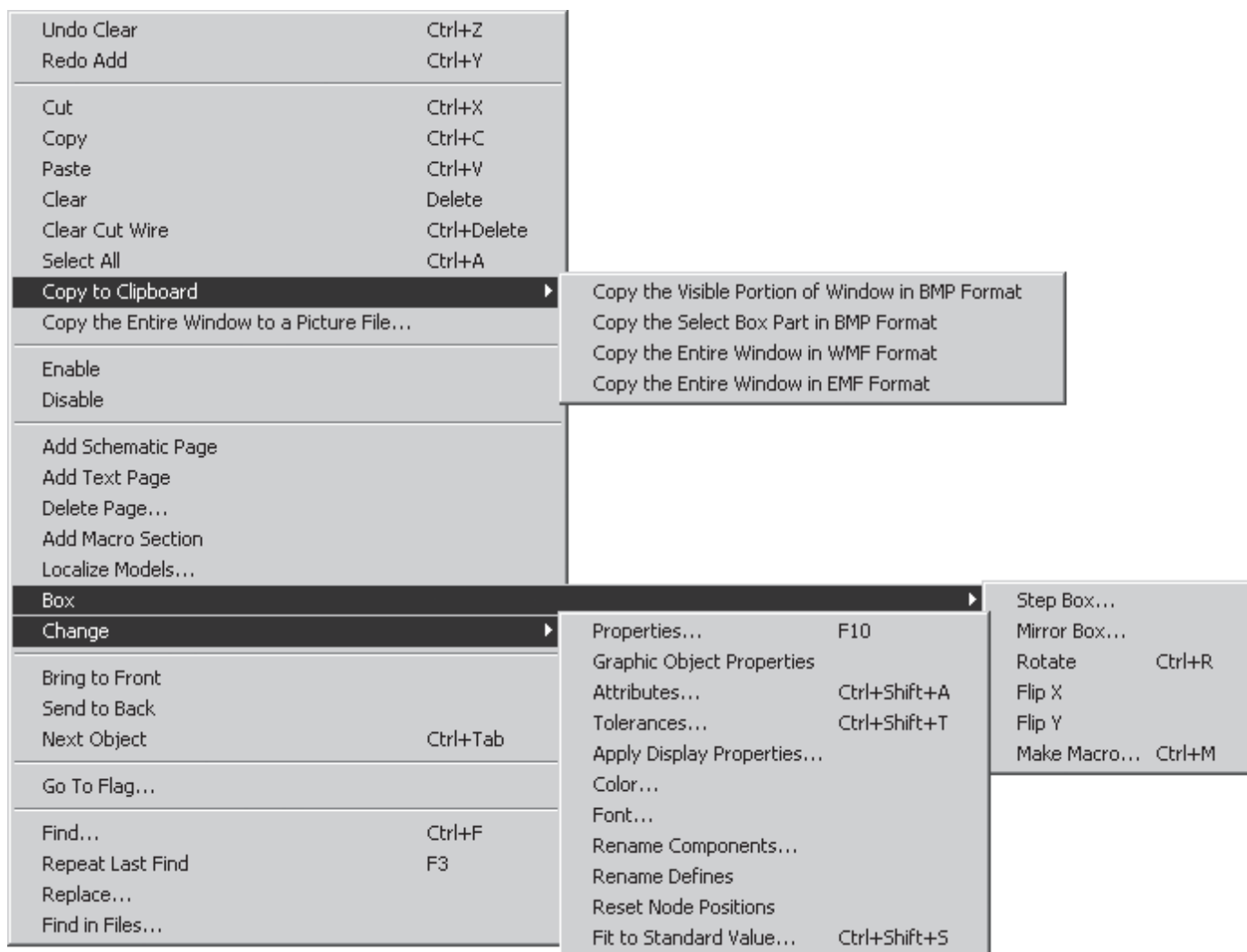


Рис. 3.3. Пункты меню **EDIT**

Enable () — разрешение выделенного схемного блока для последующего анализа, включения в перечень элементов или трансляции в текстовый SPICE-файл.

Disable () — запрет выделенного схемного блока для последующего анализа, включения в перечень элементов или трансляции в текстовый SPICE-файл.

Add Schematic Page () — добавление к схеме новой страницы (большие схемы могут размещаться на нескольких страницах).

Add Text Page — добавление новой текстовой страницы к текущему схемному файлу.

Delete Page () — удаление одной или нескольких страниц.

Add Macro Section — добавление схемной страницы для размещения схемных макроопределений в формате Micro-Cap.

Localize Models () — добавление (Add) или обновление (Update) моделей и макромоделей в текущем схемном файле. Вид операции (Add, Update)

выбирается в открывающемся диалоговом окне. В этом же окне выбирается вид включаемых макроопределений: *Model Statements* — модельные директивы; *Subcircuits* — текстовые SPICE-подсхемы; *Macros* — схемные макроопределения в формате Micro-Cap. Эта команда копирует (или обновляет) информацию о моделях из библиотек в окна текущего схемного файла. Используется в том случае, если необходимо передать схемный файл другому пользователю, не имеющему аналогичных библиотек (*Add*) или для восстановления библиотечных параметров моделей в том случае, если информация в текстовых окнах редактировалась (*Update*). В MC10 имеется возможность локализации моделей только для выбранных компонентов принципиальной схемы.

Box — редактирование объектов, заключенных в прямоугольную рамку (устанавливается мышью в режиме ).

Открывающееся подменю пункта **Box** или кнопки пиктограмм на панели инструментов  позволяют копировать блок указанного числа раз, создавать зеркально отраженный фрагмент, вращать против часовой стрелки на 90°, зеркальное отражать относительно вертикальной и горизонтальной осей, расположенных посередине блока.

Пункт подменю **Make Macro (CTRL+M)** создает макроопределение из схемы, содержащейся внутри прямоугольного блока. При этом внешним выводам присваиваются имена, макроопределение сохраняется под выбранным именем с расширением .MAC в каталоге библиотек, создается компонент в библиотеке компонентов MACRO.CMP и его условное графическое обозначение (прямоугольник с необходимым числом выводов).

Change — изменение ряда параметров отображения схемы. Содержит следующие пункты:

- **Properties** (, **F10**) — открывает диалоговое окно *Properties* для окна схемы, в котором можно изменить цвет элементов схемы и текста, приоритеты групп УГО, набор вычисляемых для отображения в последней точке расчета величин (RMS, Average, Peak), набор кнопок на панели инструментов схемы. Указанное окно вызывается также после двойного клика мыши на свободном поле схемы.
- **Graphic Object Properties** — открывает диалоговое окно *Graphic Object*, в котором можно изменить свойства отображения графических объектов, таких как линия, дуга, прямоугольник, эллипс и пр. Можно изменить тип линии, способ заливки, цвета. Изменения будут затрагивать лишь новые графические объекты, добавляемые редактором. Для изменения свойств ранее введенного отдельного графического объекта необходимо войти в его свойства с помощью двойного клика мыши.
- **Attributes** (, **CTRL+SHIFT+A**) — позволяет менять (добавлять, удалять) значения атрибутов компонентов схемы, а также включать/выключать их отображение на экране. Открывающееся вслед за выбором команды диалоговое окно *Change Attribute* позволяет запрограммировать групповую операцию. Так, например на рис. 3.4. показано изменение УГО всех резисторов в соответствии с европейским (российским) стандартом.

- **Tolerances (Ctrl+Shift+T)** — изменение величины допусков номиналов компонентов. Допуск (случайный разброс в пределах заданной в % или абсолютных значениях полосы) может быть установлен только для параметров модели. Подробности работы с окном *The Dialog of Tolerance* см. далее 7.2.2 при описании статистического анализа *Monte Carlo*.
- **Apply Display Properties of ... to all off ...** — копирует параметры отображения выбранного компонента на все другие компоненты данного класса для схемы в активном окне.

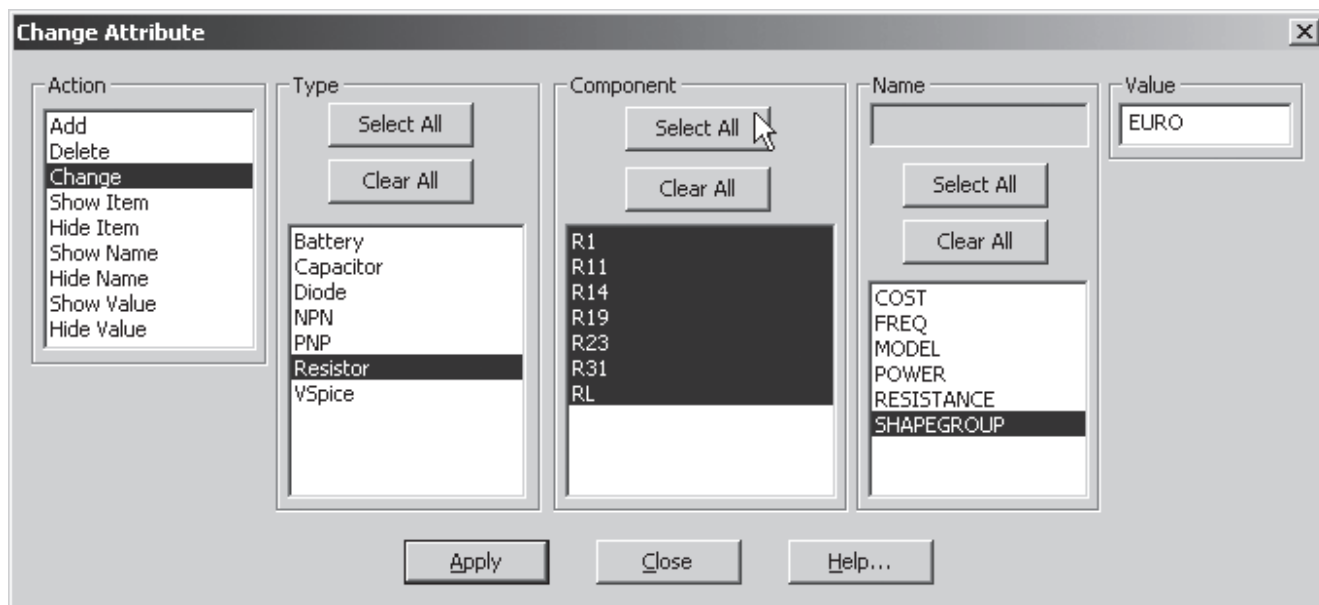


Рис. 3.4. Диалоговое окно Change Attribute

- **Color** (🎨) — позволяет изменить цвет выбранного компонента схемы (электронного компонента, текста, соединительного проводника).
- **Font** (F) — позволяет изменить параметры шрифта отображения атрибутов выбранного компонента схемы, а также схемного и оконного текста.
- **Rename Components** — изменяет номера позиционных обозначений компонентов и узлов согласно общепринятым соглашениям, так чтобы номера узлов и компонентов увеличивались в выбранном направлении (либо слева направо, либо сверху вниз). Также команда переписывает соответствующие выражения для графиков переменных состояния в окнах *Analysis Limits*, если переменная состояния при выводе определялась не относительно номеров узлов, а относительно позиционных обозначений компонента (Part Name). Например, R(RRX) будет изменено на R(R5), если позиционное обозначение поменялось с RRX на R5. Однако номера узлов в выражениях для графиков не будут затронуты. Например, V(10) не изменится на V(2), если при перенумерации десятый узел стал вторым.
- **Rename Defines** — команда переименовывает символы, определенные директивой .Define в тех случаях, когда имеется конфликт между символическими именами в различных директивах .Define.
- **Reset Node Positions** — восстановление исходной позиции информации об узлах и ветвях схемы. Номера узлов, их потенциалы, токи ветвей и мощности компонентов могут передвигаться мышью по полю схемы. Вы-

полнение команды приводит к восстановлению исходного (принятого по умолчанию) положения на схеме всей указанной информации.

- **Fit to Standard Value (Ctrl+Shift+S)** — позволяет подобрать для значений сопротивлений, емкостей, индуктивностей соответствующие компоненты (single) или комбинацию последовательно-параллельного соединения компонентов (combinations) со стандартными номиналами. Открывающееся диалоговое окно с включенной панелью *Preferences Combinations* выглядит следующим образом (рис. 3.5). В результате выполнения команды (рис. 3.5) производится следующий подбор:

Combination=45.074p = (1.1n+47p) (e=-0.11% n=2)

Данный отчет можно посмотреть в окне задания параметров конденсатора C1 (двойной клик на УГО) в поле атрибута *Combination*.

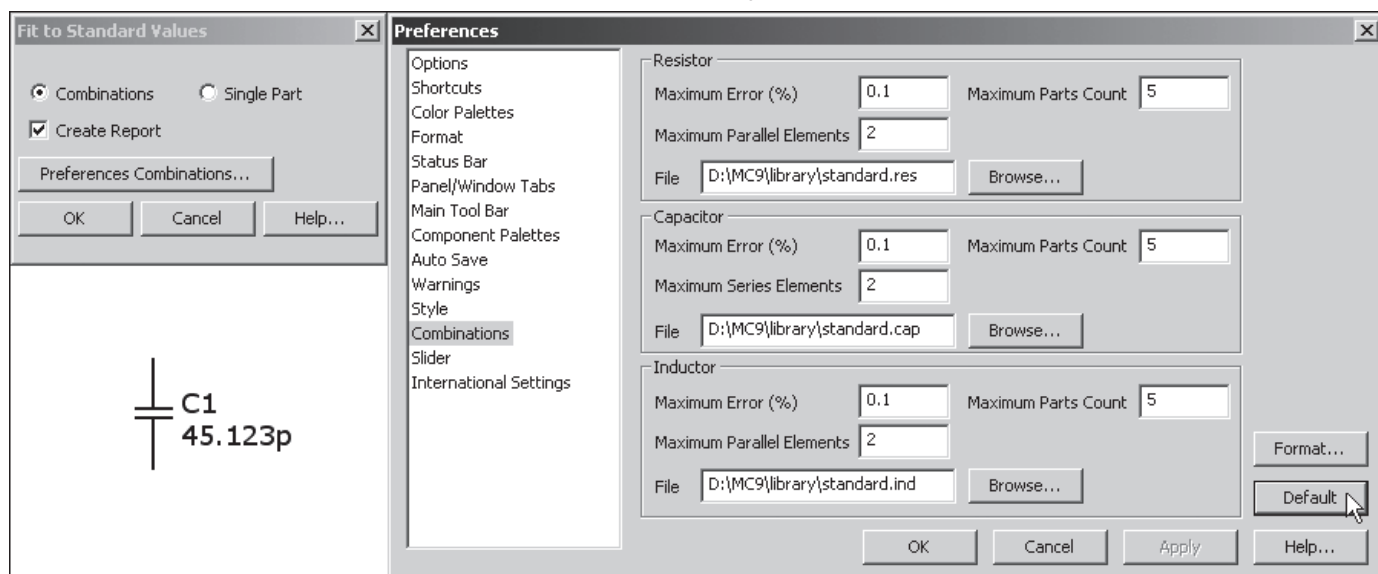


Рис. 3.5. Выполнение команды подбора комбинации стандартных компонентов

Последовательное соединение компонентов обозначается знаком '+', параллельное соединение — знаком '|'. Так, например, строка 1.2k+(8.1k|13k) означает последовательное соединение компонента величиной 1.2k с параллельным соединением 2-х компонентов: номиналом 8.1k и 13k.

Если в окне команды выбрана опция Single, то будет подобран ближайший компонент со стандартным номиналом, удовлетворяющий заданной точности (Maximum Error %). В случае отсутствия такового атрибут *Combination* останется незаполненным.

Align — выравнивание выбранных фрагментов схемного текста или текстовых атрибутов компонентов (только MC10).

Bring to Front () — перемещает выделенный перекрывающийся объект наверх.

Send to Back () — перемещает выделенный перекрывающийся объект вниз.

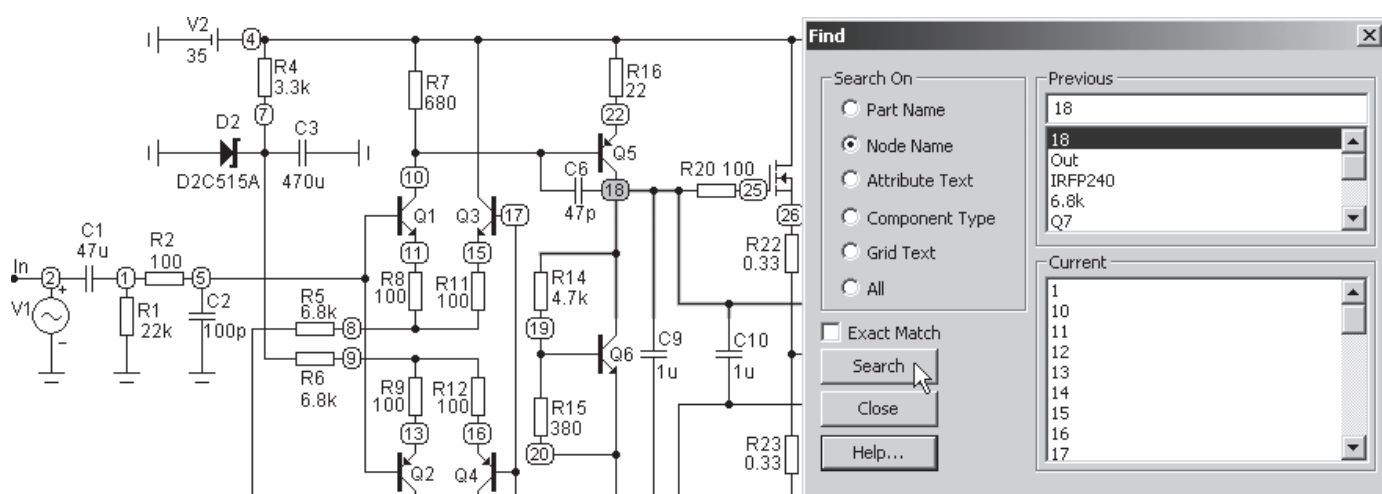
Next Object ( , **Ctrl+Tab**) — перейти к следующему объекту в стопке перекрывающихся объектов.

Go To Flag () — выполнение команды приводит к появлению диалогового окна *Go To Flag*. В нем можно выбрать нужную метку схемы (флаг). При

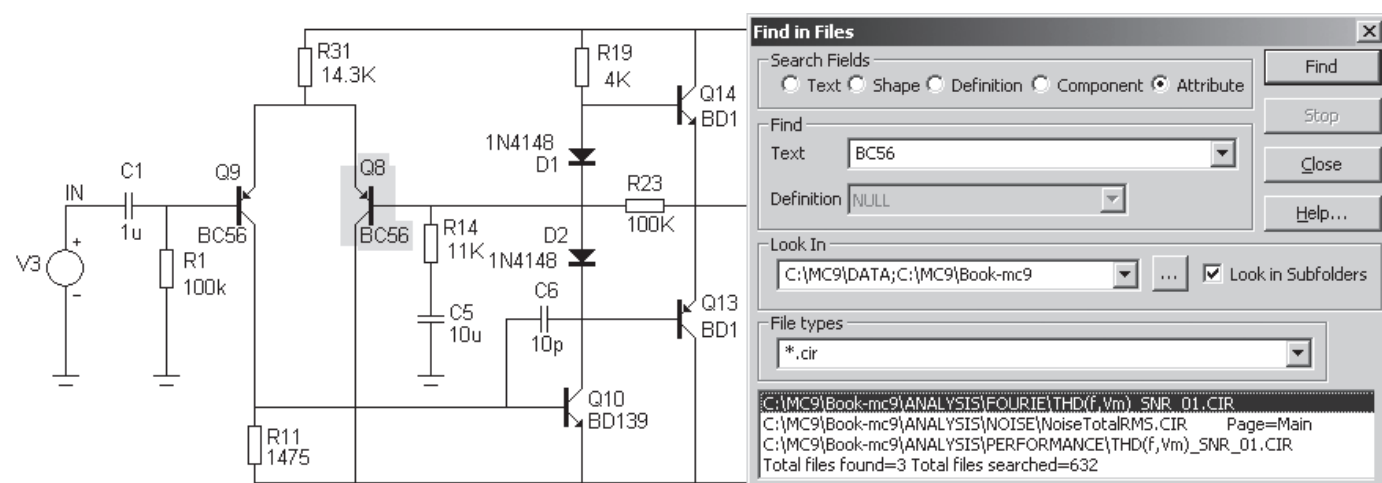
выборе соответствующего флага меняется область схемы, показываемая в окне схемного редактора. Выбор метки в диалоговом окне приводит к тому, что на экране будет отображаться часть схемы таким образом, что выбранный флаг будет находиться посередине окна схемного редактора. Флаг ставится в нужное место схемы в режиме простановки флага .

Find (, **CTRL+F**) — поиск и замена в текущем окне схем или текста разнообразных объектов, перечисленных в открывающемся диалоге (рис. 3.6, а). Можно искать позиционные обозначения компонентов (Part name), номер узла (Node Name, рис. 3.6, а), текстовый атрибут компонента (Attribute Text), тип компонента (Component Type), текст на поле принципиальной схемы (Grid Text).

Repeat Last Find: (, **F3**) — повторяет команду *Find* с текущими параметрами.



а



б

Рис. 3.6. Диалоговые окна: а — Find, б — Find in Files

Replace — производит замену текста в текстовом окне схемы или в текстовом описании схемы на языке SPICE. Функция замены текстовых атрибутов компонента схемы выполняется установками диалогового окна *Attribute*, вызываемого с помощью соответствующей команды меню *Change>Attribute*.



Find in Files (Icon): Команда вызывает диалоговое окно *Find in Files*, которое используется для поиска на диске файлов с определенным содержимым (см. рис. 3.6, б). Можно задать, например, фрагмент текста (Text), имя УГО (Shape), определение модели компонента (Definition), имя компонента (Component), значение атрибута (Attribute). Команду можно использовать в тех случаях, когда имя схемного файла забыто, зато известно, какой компонент в ней использовался. Так, например, на рис. 3.6, б показано, как искать все схемные файлы, содержащие транзистор BC56.

3.3.5. Пункт меню COMPONENT

Пункт меню **Component** содержит иерархический каталог библиотек аналоговых и цифровых компонентов. Он имеет систему разворачивающихся иерархических меню, открывающихся при наведении на них курсора мыши. Иллюстрации использования аналоговых и цифровых компонентов приведены в схемных файлах каталога *Components (Book-mc.rar)*.

Analog Primitives

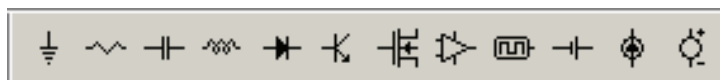
Перечень основных аналоговых компонентов этого раздела представлен на рис. 3.7. Он включает в себя:

Passive Components — резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, длинные линии, диод, повернутый на 45°, трансформатор, магнитный сердечник, стабилитрон, нагрузка постоянной мощности (Constant Power).

Active Devices — npn и pnp биполярные транзисторы, МДП-транзисторы с каналом n и p типов (NMOS, PMOS), МДП-транзисторы с индуцированным каналом n и p типов (DNMOS, DPMOS), полевые транзисторы с управляющим p-n переходом с каналом n и p типов (NJFET, PJFET), операционные усилители (OPAMP), арсенид-галлиевые полевые транзисторы (GaAsFET), биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

Waveform Sources (Источники сигналов) — источник постоянного напряжения (battery); независимые источники напряжения и тока сложной формы, зависящие от времени (Voltage Source, Current Source); источник синусоидального напряжения (Sin Source); источник импульсного сигнала (Pulse Source); источник постоянного тока (Isource); источник напряжения, зависящий от времени, программируемый пользователем в виде таблицы (User Source); источник сигнала в виде WAV-файла (только в MC10); точка фиксированного потенциала в аналоговой схеме (Fixed Analog); источник напряжения ступенчатой формы (StairCase); источник трехфазного треугольного напряжения (3 Phase Triangle), источник тестового видеосигнала в формате NTSC.

Следует отметить, что основные пассивные и активные примитивы (земля, резистор, конденсатор, катушка индуктивности, диод, npn-транзистор, NMOS-транзистор, операционный усилитель, цифровой тактовый генератор, батарея, источник тока формата SPICE, источник напряжения формата SPICE) могут быть выбраны с помощью группы кнопок на верхней панели инструментов:



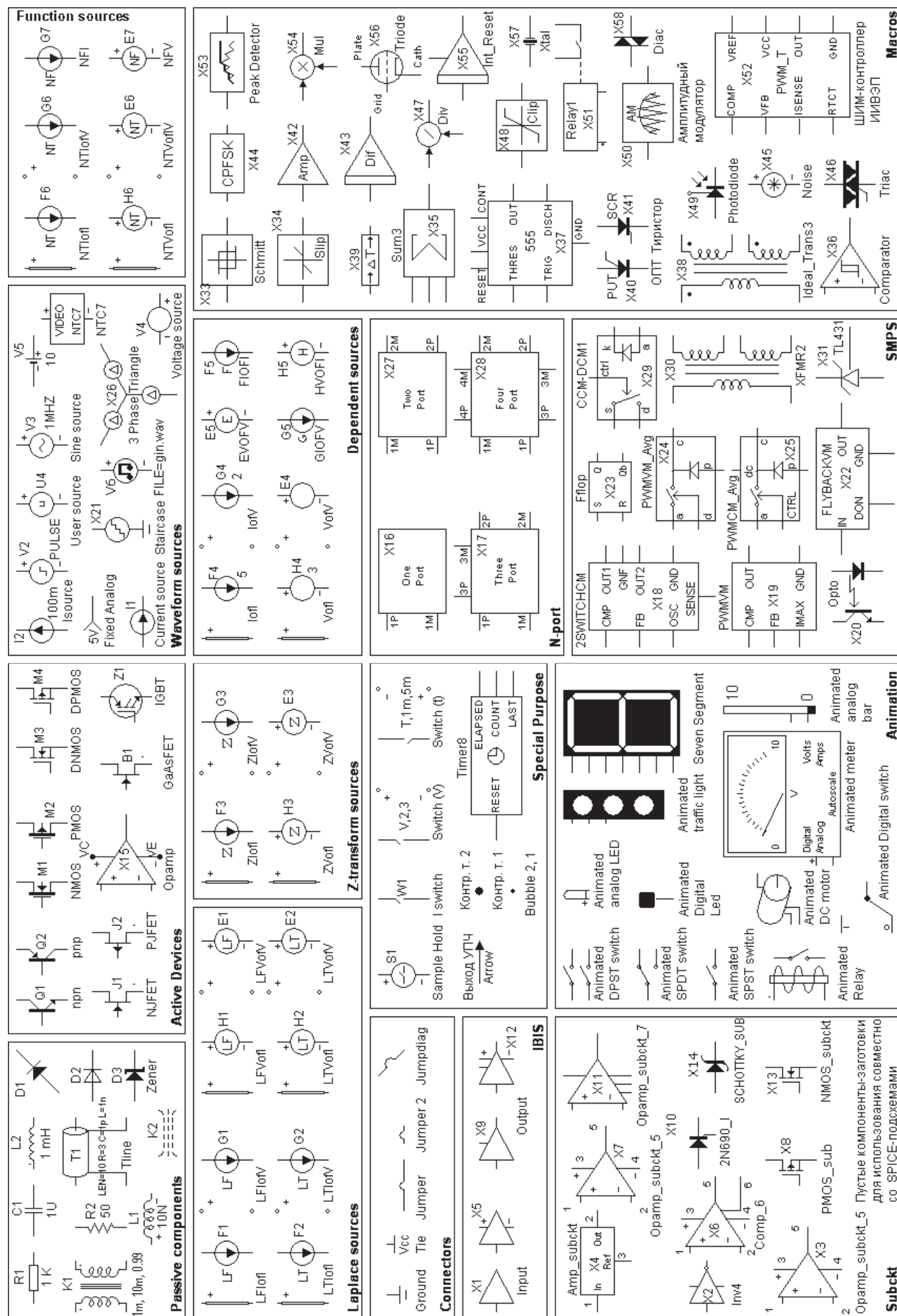


Рис. 3.7. Основные компоненты Analog Primitives и Animation

Набор кнопок часто используемых компонентов может быть изменен пользователем с помощью команды *Options>Preferences>Main Tool Bar>Component*. Также могут быть добавлены новые кнопки вызова компонентов, необходимых пользователю, при этом придется лишь дорисовать их пиктограммы (инструмент для этого имеется).

Function Sources (Функциональные источники) — функциональный источник напряжения (*NFV*), функциональный источник тока (*NFI*), таблично задаваемые зависимые источники напряжения от тока (*NTVofI*), тока от тока (*NTIofI*), тока от напряжения (*NTIofV*), напряжения от напряжения (*NTVofV*).

Источники *NFV* и *NFI* описываются произвольной функциональной зависимостью от напряжений и токов схемы.

Табличные зависимые источники напряжения от тока (*NTVofI*), тока от тока (*NTIofI*), тока от напряжения (*NTIofV*), напряжения от напряжения (*NTVofV*) задаются таблицей соответствия значений выходного сигнала (напряжения или тока) значениям входного сигнала (напряжения или тока). Для расчета выходного сигнала в промежутке между табличными точками используется линейная интерполяция. Значения выходного сигнала за пределом заданного диапазона принимаются равными значениям в крайних точках.

Laplace Sources — зависимые источники, задаваемые в операторном виде по Лапласу в виде передаточных функций в *s*-области. Разновидности:

- зависимые источники: напряжения от тока (*LFVofI*), тока от тока (*LFIofI*), тока от напряжения (*LFIofV*), напряжения от напряжения (*LFVofV*), задаваемые выражениями, содержащими символическую переменную *S*;
- зависимые источники: напряжения от тока (*LTVofI*), тока от тока (*LTIofI*), тока от напряжения (*LTIofV*), напряжения от напряжения (*LTVofV*), задаваемые в виде табличных зависимостей комплексных передаточных функций от частоты.

Z transform sources — задаваемые в виде передаточных функций в *z*-области зависимые источники: напряжения от тока (*ZVofI*), тока от тока (*ZIofI*), тока от напряжения (*ZIofV*), напряжения от напряжения (*ZVofV*).

Установка подобного источника в схему соответствует установке цифрового фильтра с соответствующей характеристикой в *Z*-области [13]. Частота дискретизации для таких источников задается в открывающемся диалоге как *Clock Frequency*, выражение для передаточной функции — *zexp*.

Dependent sources — задаваемые коэффициентом передачи линейные зависимые источники: напряжения от тока (*VofI*), тока от тока (*IofI*), тока от напряжения (*IofV*), напряжения от напряжения (*VofV*); задаваемые математическим выражением в виде полинома нелинейные зависимые источники: напряжения от нескольких напряжений (*EVofV*), тока от нескольких токов (*FIofI*), тока от нескольких напряжений (*GIofV*), напряжения от нескольких токов (*HVofI*).

Macros — макроопределения (макромодели), представляющие собой модели компонентов электронных схем (корпуса с определенным числом выводов), внутреннее содержимое которых задано в виде соответствующим образом оформленных схемных файлов в формате Micro-Cap (подробно рассмотрены в главе 5 и примерах каталога DATA).

Subckts — пустые компоненты-заготовки (УГО) для текстовых SPICE-подсхем. Непосредственно в схеме компоненты этой группы не используются. Они нужны для формирования общей библиотеки компонентов Micro-Cap, вызываемой из схемного редактора, и использования в ней моделей компонентов или функциональных блоков электронных схем, заданных в виде текстового описания в формате SPICE.

Более подробно компоненты этого раздела рассмотрены в главе 5 и примерах каталога DATA.

Connectors — аналоговая земля (*Ground*); точка, заданная на схеме буквенной меткой (*Tie*); проводники без электрического соединения в точке пересечения (*Jumper*). Использование *Tie* позволяет не загромождать принципиальную схему однотипными соединениями, например цепями питания аналоговых микросхем.

SMPS — макромодели и подсхемы для моделирования импульсных источников питания. Включают непрерывные модели различных преобразователей постоянного напряжения (конверторов) для различных режимов управления (*Voltage Mode*, *Current Mode*), модели ШИМ-контроллеров для управления импульсными стабилизаторами, усилителя рассогласования, диодно-транзисторной оптопары, диода Шоттки, силовых МДП-транзисторов, многообмоточных трансформаторов, микросхемы параллельного стабилизатора TL431 и др. Следует отметить, что макромодели, расположенные в группе SMPS, используются в примерах моделирования стабилизированных импульсных преобразователей постоянного напряжения из каталога DATA. Через меню подсказки указанные схемные файлы загружаются следующим образом: *HELP>Sample Circuits>SMPS...*

Special Purpose — устройство выборки-хранения (*Sample and Hold*); ключ, управляемый напряжением (*S*); универсальный ключ, который управляется напряжением, током или временем (*SWITCH*); ключ, управляемый током (*W*); таймер (*Timer*), стрелка для обозначения информации о сигнале (*Arrow*); точки для обозначения контактов (*bubble1*, *bubble2*).

N-Port — модели линейных 2N-полюсников ($N=1, 2, 3, 4$), заданных таблицей значений соответствующих параметров (*S*, *Y*, *Z*, *G*, *H*, *T*, *A*) в частотной области в виде файлов с расширением *s1p-s4p*, *y1p-y4p*, *z1p-z4p*, *g1p,g2p*, *h1p,h2p*, *t1p,t2p*, *a1p*, *a2p*.

IBIS — пустые заготовки для SPICE-подсхем компонентов, заданных в виде IBIS-модели. С помощью IBIS-транслятора, входящего в состав Micro-Cap, IBIS-модели преобразуются в SPICE-подсхему, которой может быть поставлен один из компонентов группы.

Analog Library

Основные компоненты Analog Library представлены на рис. 3.8.

BJT — модели биполярных транзисторов и транзисторно-резисторных сборок различного типа проводимости, реализованные в виде моделей Micro-Cap или подсхем на языке SPICE.

Comparator — модели компараторов, реализованные в виде подсхем на языке SPICE.

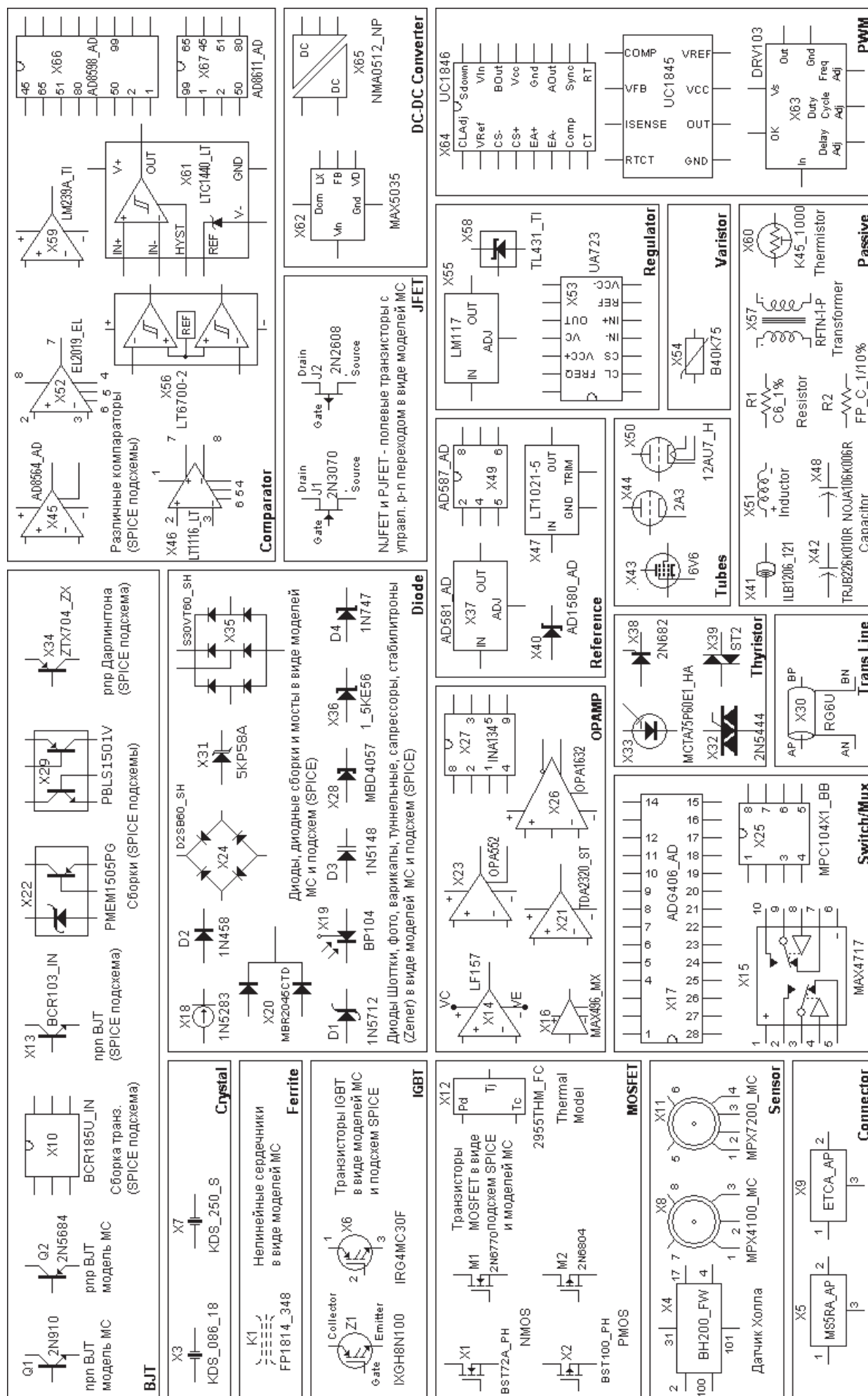


Рис. 3.8. Основные компоненты Analog Library

Connector — SPICE-подсхемы соединителей и разъемов, реализованные в виде RLC-цепей 3-го порядка (рис. 3.9).

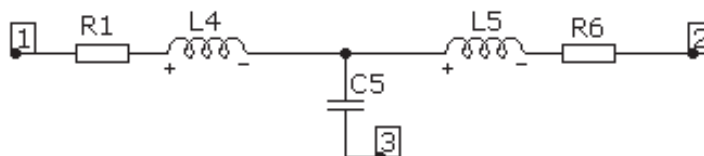


Рис. 3.9. Модель разъемного соединителя

Crystal — кварцевые резонаторы, реализованные в виде схемных макромоделей Micro-Cap XTAL.

DC-DC converter — модели преобразователей постоянного напряжения (понижающих, повышающих, с двумя выходными напряжениями), реализованные в виде SPICE-подсхем.

Diode — модели диодов, диодных мостов и сборок, реализованные в виде моделей Micro-Cap или подсхем SPICE. В состав диодов данной группы компонентов входят диоды Шоттки, фотодиоды, варикапы, туннельные диоды, стабилитроны, сапрессоры, диодные регуляторы тока.

Ferrite — модели магнитных сердечников разной формы (чашки, тороиды) с зазором и без, реализованные на основе встроенной модели Micro-Cap.

IGBT — модели IGBT-транзисторов, реализованные в виде встроенных моделей Micro-Cap и подсхем SPICE.

JFET — модели полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом, реализованные на основе встроенной модели Micro-Cap.

Miscellaneous — модели микросхем различного назначения, реализованные в виде SPICE-подсхем. Включает в себя следующие подгруппы:

- Драйверы управления силовыми ключами полумостовых и мостовых конвертеров
- Термoeлектрические контроллеры
- Источник тока
- Антидребезговая схема
- Активные RC-фильтры и фильтры на переключаемых конденсаторах
- Инфракрасные приемопередатчики
- Оптоэлектронные микросхемы
- Интеграторы
- Модуляторы-демодуляторы
- Преобразователь тока
- Аналоговые умножители-делители
- Супервизор питания
- Контроллер литий-ионной батареи
- Преобразователи среднеквадратического значения
- Контроллеры для импульсных источников питания
- Интегральные таймеры

MOSFET — модели МОП-транзисторов с изолированным затвором на основе встроенных моделей Micro-Cap и подсхем SPICE.

OPAMP — модели операционных усилителей на основе моделей Micro-Cap и подсхем SPICE.

Passive — модели пассивных компонентов:

- Ниобиевые оксидные и танталовые конденсаторы (SPICE-подсхема);
- Ферритовые бусинки с проводом (модель в виде SPICE-подсхемы параллельного RLC-контура);
- Катушки индуктивности (SPICE-подсхемы, содержащие RLC-компоненты);
- Резисторы (модели Micro-Cap);
- Термисторы (SPICE-подсхемы);
- Трансформаторы (схемная макромоделль Micro-Cap WIDEBAND).

PWM — модели широтно-импульсных модуляторов, ШИМ контроллеров для управления импульсными источниками питания.

Reference — модели источников опорного напряжения различного вида (SPICE-подсхемы).

Regulator — модели последовательных и параллельных линейных стабилизаторов напряжения, зарядных устройств, высоковольтных одноканальных контроллеров ИИВЭП со встроенным мощным ключом (SPICE-подсхемы).

Sensor — модели датчиков Холла и датчиков давления (SPICE-подсхемы).

Switch/Mux — модели аналоговых коммутаторов сигналов (SPICE-подсхемы).

Thyristor — модели диодов (схемная макромоделль Micro-Cap DIAC), МОП-тиристоров (подсхемы SPICE), обычных управляемых тиристоров (схемная макромоделль Micro-Cap SCR), симисторов или триаков (схемная макромоделль Micro-Cap TRIAC).

Trans Line — модели длинных линий (SPICE-подсхемы).

Tubes — модели Дункана Монро триодов и пентодов (SPICE-подсхемы).

Varistor — модели варисторов (SPICE-подсхемы).

Digital Primitives

Основные компоненты Digital Primitives представлены на рис. 3.10.

Standard Gates — модели стандартных логических вентилей (2, 3, 4, 5, 9 – входных) И, И-НЕ, ИЛИ, ИЛИ-НЕ; двухвходовых вентилей ИСКЛ-ИЛИ, ИСКЛ-ИЛИ-НЕ; инвертора (НЕ), и буфера (повторителя).

Tri-state Gates — модели логических вентилей (2, 3, 4, 5, 9 – входных) И, И-НЕ, ИЛИ, ИЛИ-НЕ; двухвходовых вентилей ИСКЛ-ИЛИ, ИСКЛ-ИЛИ-НЕ, инвертора (НЕ), и буфера (повторителя) с 3-мя состояниями. 3-е состояние — высокоимпедансное. У всех тристабильных схем имеется управляющий вход Enable — управление высокоимпедансным состоянием выхода.

Edge-Triggered Flip-Flops — триггеры с динамическим управлением (срабатывающие по фронту (срезу)) импульса на синхровходе CLKB.

Gated Flip-Flops/ Latches — триггеры с потенциальным управлением: статический RS-триггер и триггер защелка (D), который устанавливается в соответствии с информационным сигналом на D-входе при наличии на разрешающем входе активного (высокого) уровня.

Pullups/Pulldowns — подтягивающие резисторы. Это компоненты для подключения к источнику питания/земле выходов логических микросхем с открытым коллектором/эмиттером, а также неиспользуемых входов.

Delay line — цифровая линия транспортной задержки.

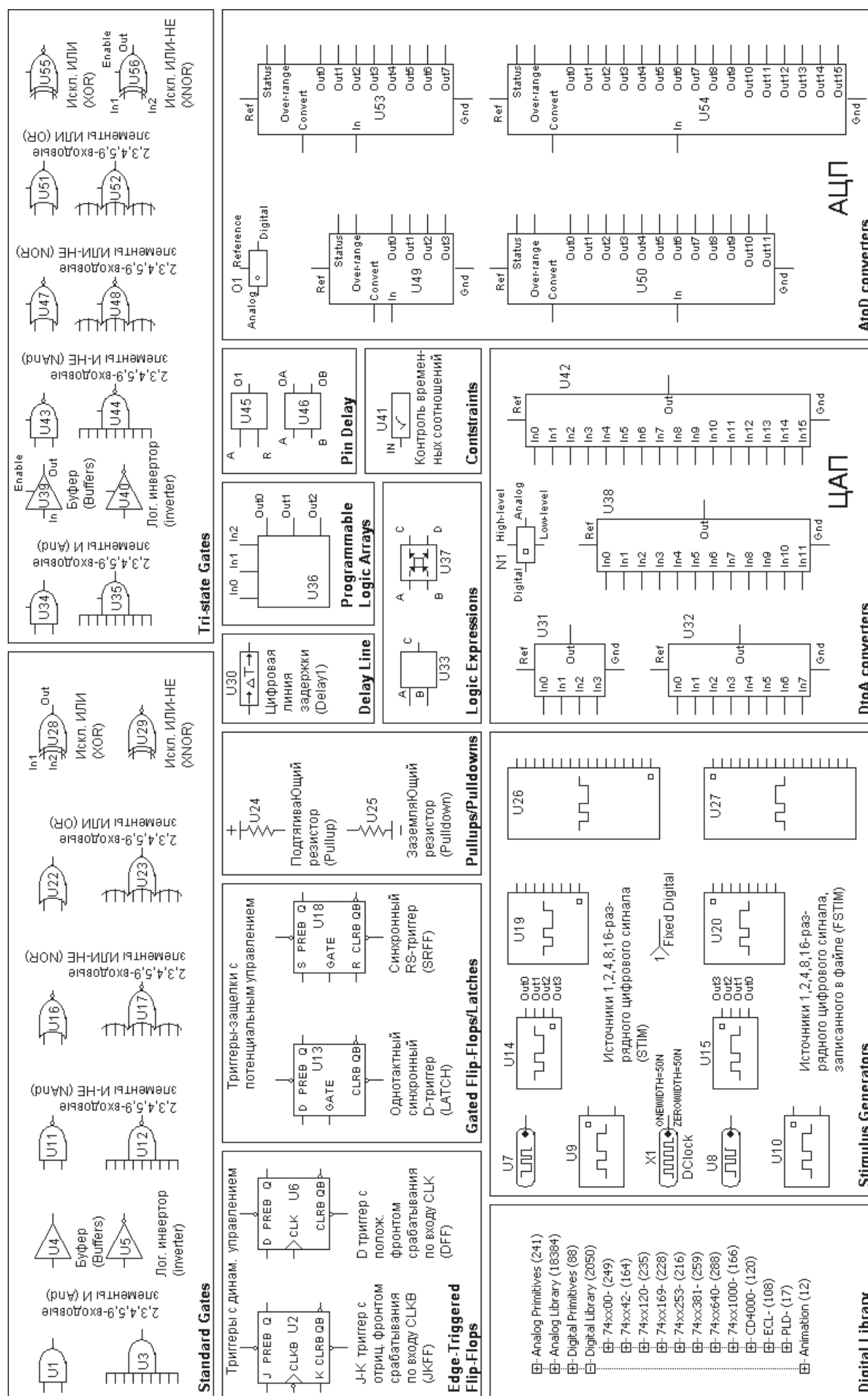


Рис. 3.10. Компоненты Digital Primitives и содержание Digital Library

Programmable Logic Arrays — программируемые логические матрицы (матрица И 3X3, матрица ИЛИ 3X3, матрица И с прямыми и инверсными входами 3X3)..

Logic Expressions — логические выражения от двух входных логических переменных с одной или двумя выходными функциями.

Pin Delay — назначение задержки распространения сигналов устройствам, рассмотренным в предыдущем пункте.

Constraints — цифровое устройство контроля соблюдения временных соотношений.

AtoD converters — 1, 4, 8, 12, 16-разрядные аналого-цифровые преобразователи.

DtoA converters — 1, 4, 8, 12, 16-разрядные цифро-аналоговые преобразователи.

Stimulus Generators — генераторы цифровых сигналов с 1, 2, 4, 8, 16 выходами 2-х типов STIM и FSTIM. Генераторы STIM программируются внутри схемного файла, в котором используются, а генераторы типа FSTIM программируются во внешнем текстовом файле.

Digital Filter Macros — элементы для построения цифровых фильтров: сумматор, масштабный усилитель, элемент задержки на один период тактовой частоты.

Digital Library

Содержит библиотеки моделей цифровых компонентов с различной технологией изготовления:

- 74*** — стандартная ТТЛ (K155, KM155)
- 74AC*** — усовершенствованная быстродействующая КМОП (KP1554)
- 74ACT*** — усовершенствованная быстродействующая КМОП
- 74ALS*** — маломощная усовершенствованная ТТЛ Шоттки (KP1533)
- 74AS*** — усовершенствованная ТТЛ Шоттки
- 74F*** — усовершенствованная ТТЛ Шоттки с повышенной мощностью и быстродействием (KP1531)
- 74H*** — быстродействующая ТТЛ (K131)
- 74HC*** — высокоскоростная КМОП
- 74HCT*** — высокоскоростная КМОП
- 74LS*** — ТТЛ Шоттки (K555, KM555)
- 74LV*** — КМОП с пониженным питанием 3.3В
- 74S*** — мощная быстродействующая ТТЛ Шоттки (KP531, KM531)
- CD4***** — медленная КМОП (K176, K561)
- 10*** — ЭСЛ (K500, K1500).

Следует отметить, что здесь значительно больше типов цифровых микросхем, чем в группе *Digital primitives* (дешифраторы, мультиплексоры, счетчики, триггеры различных типов, АЛУ). Просматривать эти библиотеки удобно

с помощью панели компонентов (, **Ctrl+Alt+X**). При выборе мышью компонента в иерархической структуре панели в ее верхней части показывается его

УГО, по которому несложно составить представление о типе и законах функционирования самого компонента. Кроме того при установке маркера мыши на компонент появляется всплывающая подсказка, сообщающая краткую информацию о его функциональном назначении.

Animation

Здесь расположены элементы, осуществляющие индикацию значений цифровых и аналоговых состояний в точках схемы; реле и ключи, переключаемые мышью; двигатель постоянного тока, вольтамперметр, семисегментный индикатор (см. рис. 3.7).

Find Component

Поиск во всех библиотеках компонента по имени и размещение его на схеме (, **Ctrl+Shift+F**).

После выбора компонента с помощью команд меню *Component* Micro-Cap переходит в режим *Component Mode*. Размещение выбранного компонента в заданном месте на схемной странице производится щелчком мыши. Перемещение мыши с нажатой левой кнопкой приводит к перемещению компонента по окну, нажатие правой кнопки при нажатой левой поворачивает компонент на 90° против часовой стрелки. Отпускание левой кнопки приводит к фиксации элемента на схеме и открытию окна задания параметров компонента (позиционного обозначения, численных значений, имени модели, параметров макроопределения и др.). При выборе в окне компонента одного из параметров в строке подсказки (Help Bar) приводится формат его ввода. Закладку поиска нужного компонента (Search) имеет и панель компонентов.

3.3.6. Пункт меню WINDOWS

Содержит команды работы с окнами.

Cascade (, **Shift+F5**) — расположить открытые окна каскадом.

The Vertical (, **Shift+F4**) — расположить открытые окна последовательно слева направо.

The Horizontal () — расположить открытые окна последовательно сверху вниз.

Overlap () — наложить окна результатов анализа поверх окна схем (подсвечивается и может быть активизирована только после запуска одного из видов анализа из меню *Analysis*).

Maximize () — развернуть активное окно на весь экран.

Arrange Icons — разместить иконки свернутых окон схем внизу рабочего поля.

Maximize over multiple monitors () — максимизация выбранного окна и расширение его на 2 или более мониторов. Это удобно, когда имеется 2 монитора с одинаковым разрешением и количеством пикселей. После этого команды *Tile Vertical* или *Tile Horizontal* разместят схему на одном мониторе, а окно анализа — на другом.

Zoom in (, **Ctrl+ <Num +>**) — увеличить масштаб изображения.

Zoom out (, **Ctrl + <Num ->**) — уменьшить масштаб изображения. Две последние перечисленные команды воздействуют только на отображение схемы на экране, но не воздействуют на распечатку.

Toggle Drawing/Text (Ctrl+G) — переключения между окном схем и соответствующим ему окном текста *Text*.

Split Horizontal — разделить рабочее окно на 2 окна (одно сверху, второе снизу). Аналогичное действие выполняет протяжка мышью горизонтального разделителя окна (см. рис. 3.1).

Split Vertical — разделить рабочее окно на 2 окна (одно слева, второе справа). Аналогичное действие выполняет протяжка мышью вертикального разделителя окна (см. рис. 3.1).

Space Splitters Evenly — выровнять размеры открытых схемных окон текущей схемы.

Remove Splitters — отменить разделение окна, сделав активным подокно, находившееся в правом нижнем углу.

Component Editor — редактор компонентов (редактирование библиотеки компонентов, добавление новых компонентов на основе заранее подготовленных макромоделей Micro-Cap или подсхем в формате SPICE).

Shape Editor — редактор условных графических обозначений компонентов (редактирование существующих УГО и создание своих новых УГО).

Package Editor — редактор корпусов компонента (редактирование типа корпуса и расположения обозначенных сигнальных выводов компонента). Информация о корпусе необходима для составления списка соединений, передаваемых во внешние программы трассировки печатных плат.

Calculator () — встроенный калькулятор с расширенными возможностями. Он позволяет выполнять операции с комплексными числами, находить производные по указанной переменной. При активном окне анализа позволяет оперировать с переменными схемы (токами, напряжениями и пр.). Закрывается окно калькулятора нажатием клавиши **ESC**.

Check Model Library Parameters — проверка параметров моделей библиотечных компонентов на соответствие ограничениям, установленным редактором ограничений параметров моделей (*Model Parameter Limits Editor*), вызываемого из меню *Options*. При этом происходит только проверка модельных примитивов, таких как NPN, NMOS, JFET и пр., проверка макромоделей и подсхем не производится.

1...10 — активизировать и разместить на переднем плане окно выбранного схемного файла.

3.3.7. Пункт меню OPTIONS

Содержит команды различного назначения (рис. 3.11).

Main tool Bar (Ctrl+0) — включить/выключить главную (верхнюю) панель инструментов (см. рис. 3.1).

Default Main Tool Bar — вернуть главную панель инструментов к виду, принятому по умолчанию.

Status Bar — включить/выключить информационную строку (описание текущей команды) (см. рис. 3.1).



Panel (, **Ctrl+Alt+X**) — включить/отключить панель компонентов.

Show error window (**Ctrl+Alt+E**) — показать окно ошибок (только MC10).



Window Tabs () — включить/отключить панель закладок открытых окон.

Mode — выбрать режим/команду для графического редактора схем или окна результатов анализа. Содержит ряд подпунктов:



Select (, **Ctrl+E**, **<SPACE>**) — выбрать объект для последующего редактирования. Используется при изменении атрибутов компонента (величины или имени модели), редактировании текста или графического объекта, а также для выделения прямоугольной области.



Component (, **Ctrl+D**) — добавить компонент в схему.

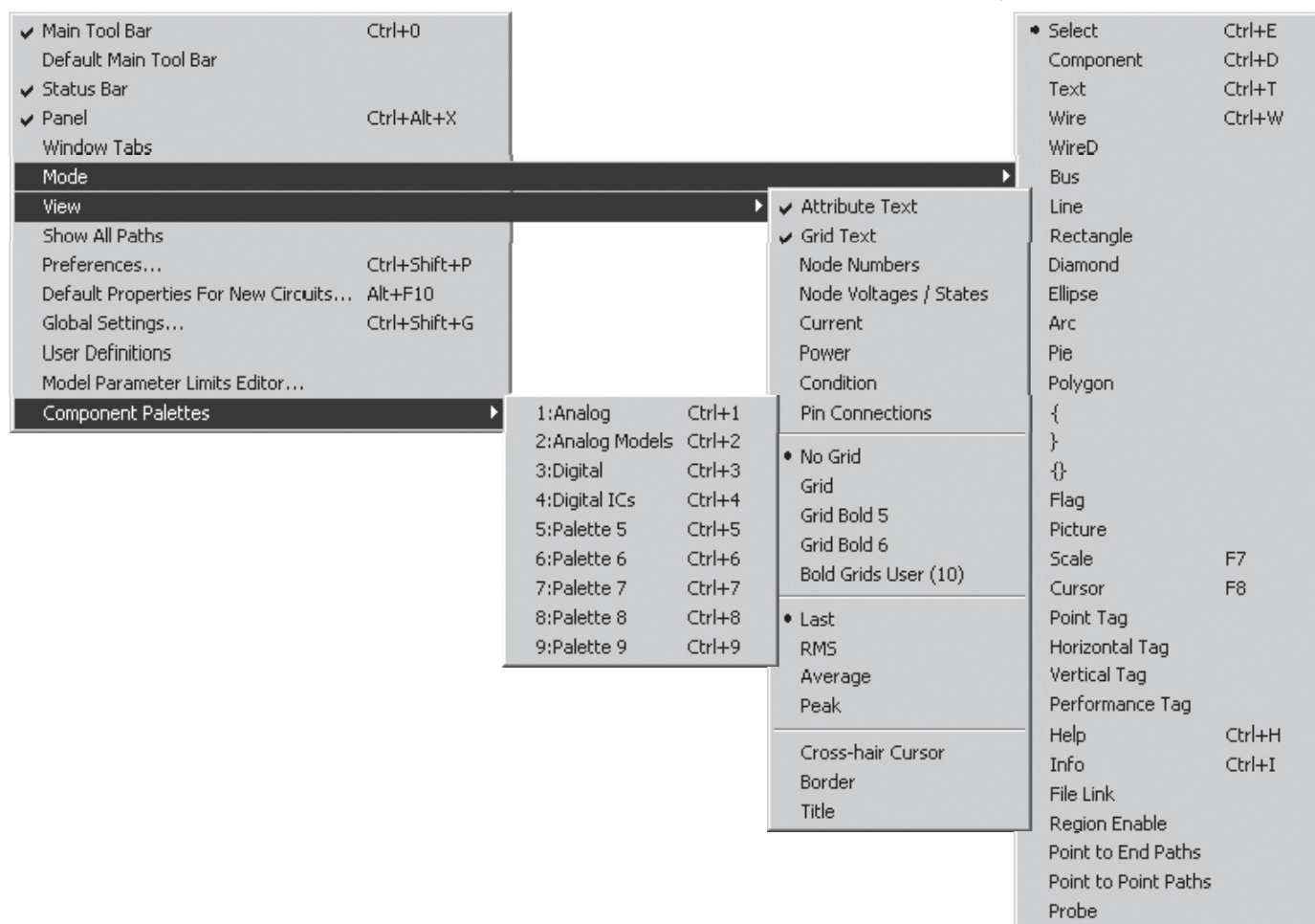


Рис. 3.11. Пункты меню OPTIONS



Text (, **Ctrl+T**) — добавить текстовые комментарии в схему или окно результатов анализа (увы, строчная буква «ю» теряется при сохранении файла в MC9, поэтому вместо нее следует использовать прописную «Ю»).



Wire (, **Ctrl+W**) — добавить в схему ортогональные проводники.



Wire D () — добавить в схему проводники произвольной ориентации.

Bus  — добавить шину (множество проводников). При выборе режима рисования шинного соединителя появляется окно задания его параметров (рис. 3.12). Это окно задает лишь шинное окончание (т.е. разветвляющуюся часть шины). Шинные окончания соединяются между собой обычным ортогональным проводником , но толщина его автоматически увеличивается.

Например, в схеме рис. 3.11 сначала в режиме шинного соединителя устанавливаются шинные окончания Bus1-Bus6. При этом отдельным выводам шин присваиваются имена в соответствии с планируемыми электрическими соединениями. Так выводам четырехпроводных шин Bus1-Bus3 (между которыми должна быть электрическая связь) присваиваются имена A1, A2, A3, A3 (в графе *Enter Pin Names* вводят сокращенно A[1:4]). Выводам же четырехпроводных шин Bus4-Bus6 (между которыми также должна быть электрическая связь) присваиваются имена B1, B2, B3, B4 (в графе *Enter Pin Names* вводят сокращенно B[1:4]). Кроме того, для точной состыковки выводов шинного соединителя и соответствующих выводов микросхемы, расстояние между выводами шинного соединителя регулируется. Число шагов координатной сетки между выводами задается в позиции *Grid Between Pins*. Можно выбрать ориентацию выводов шины (*Wire Node Alignment*) — вверх, прямо, вниз (up, straight, down) и расположение шины относительно соединителя (*Bus Node Placement*) — сверху, посередине, внизу (top, Middle, bottom).

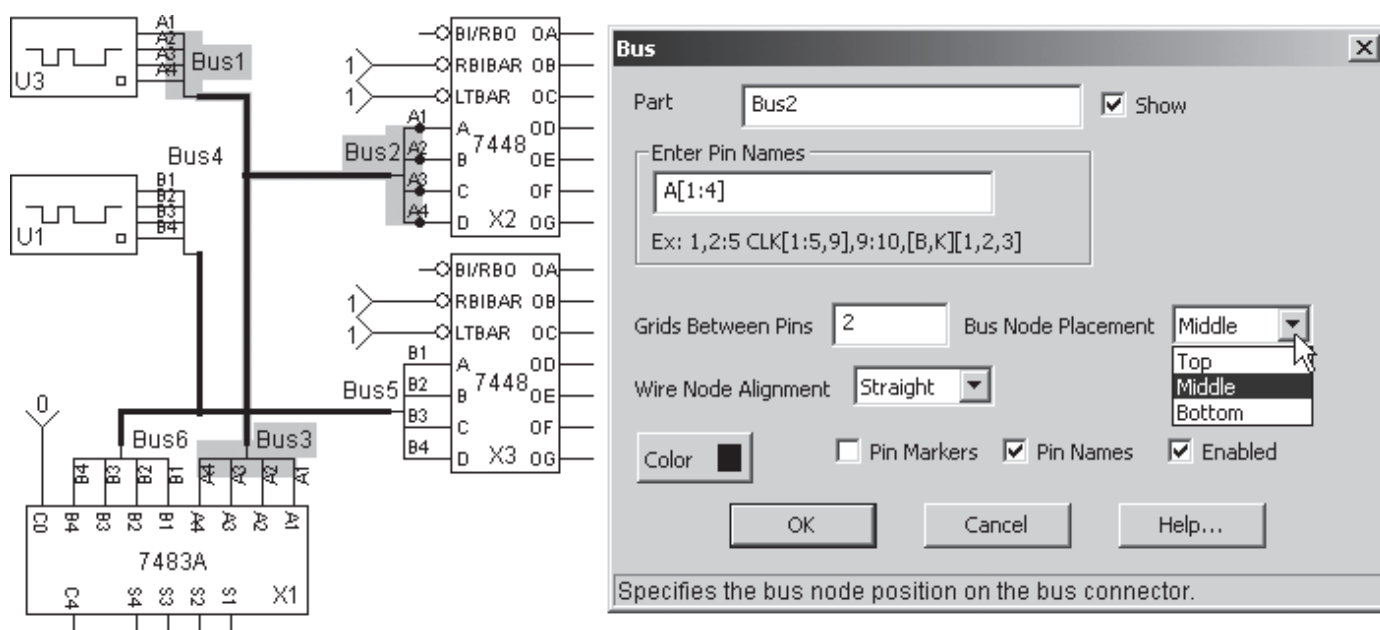


Рис. 3.12. Окно задания параметров шинного соединителя

Line , **Rectangle** , **Diamond** , **Ellipse** , **Arc** , **Pie** , **Polygon** , { { } } , { { } } , **Flag** , **Picture**  — рисование линии, прямоугольника, ромба, эллипса, дуги, сектора, полилинии, фигурных скобок, флага, изображения из файла графического формата. Причем полигон  добавляется только в режиме анализа на поле графиков. Все перечисленные команды рисования могут быть выполнены путем выбора из раскрывающегося списка, осуществляемого кликом по пиктограмме .

Flag () – ввод флагов для быстрой навигации по схеме.

Следующие 6 режимов доступны только при выводе окна результатов анализа.

Scale (, **F7**) – режим вывода на экран графиков с возможностью масштабирования (в Micro-Cap используется по умолчанию). Масштабирование осуществляется выбором участка графика рамкой, образованной протяжкой левой клавиши мыши.

Cursor (, **F8**) – режим вывода на экран графиков с двумя электронными курсорами, активизируемыми левой и правой клавишей мыши.

Point Tag () – нанесение на график значений координат выбранной курсором точки.

Horizontal Tag () – нанесение на график разности значений между двумя точками графика по оси X (как правило, измерение частотного диапазона в АС анализе или времени в TRANSIENT анализе).

Vertical Tag () – нанесение на график разности значений по оси Y между двумя точками графика.

Performance Tag () — нанесения на график динамических размерных линий вычисления Performance-функций. Размерная линия с измеренной функцией изменяется при каждом новом запуске анализа, а также при перемещениям по вариантам графиков многовариантных анализов (Stepping, Monte Carlo).

Help (, **Ctrl+H**) – вызов текстовой информации (помощи) о задании параметров модели выбранного компонента.

Info (, **Ctrl+I**) – вызов информации о параметрах модели выбранного компонента. Команда открывает окно задания параметров компонента для примитива, текст определения модели или подсхемы для библиотечного компонента, или внутреннюю схему макроопределения для MACRO.

File Link () — включение режима связи с файлом. Можно установить ссылку на локальный файл своего ПК (например, на справочный листок в PDF-формате) или на Internet-адрес сайта фирмы-производителя компонента. Ссылка по умолчанию — [http://www.google.com/search?q=\"%s\"+\"data sheet\"](http://www.google.com/search?q=\). Она вызывает поиск справочных данных на компонент с заданным именем модели в поисковой системе Google. При этом вместо %s подставляется имя модели выбранного компонента. Ссылка для компонента задается в строке *Link*, когда запущен редактор компонентов (*Windows>Component Editor*) и маркер мыши указывает на выбранный компонент.

Region Enable () — в этом режиме протяжкой мыши выделяется блок схемы и следом вводится логическое выражение (обычно зависящее от символьных переменных, определенных директивами .define или .param). Выделенный блок разрешается при выполнении анализа и других действий, если

заданное логическое выражение становится истинным. Кроме того, разрешить (или запретить) выделенный блок можно непосредственным вводом 1 (или 0) в поле логического выражения.

Point to End Paths () – Щелчок мыши в этом режиме на цифровом компоненте вызывает окно, в котором показаны все пути сигнала с задержками положительного и отрицательного фронтов от выбранного компонента до конечной точки. В качестве конечной точки может выступать логический вентиль или триггер, который не управляет другими логическими вентилями или триггерами. Выбор мышью пути в этом окне приводит к его выделению другим цветом на схеме.

Point to Point Paths () – Два последовательных щелчка мыши на двух различных цифровых компонентах схемы вызывают окно, в котором показываются все пути сигналов от одного компонента к другому с задержками положительного и отрицательного фронтов. Выбор мышью пути в этом окне приводит к его выделению другим цветом на схеме.

Probe () — возврат к построению графиков в режиме анализа с графическим постпроцессором **Probe** после редактирования схемы, производимом в схемном окне. Кроме того, в этом виде анализа переключение между режимами *Probe* и *Select* можно осуществить с помощью клавиши пробела.

Rubberbanding (, **SHIFT+CTRL+R**) — «Растягивание» проводников схемы, без отрыва их от узлов и выводов компонентов при выполнении операций перемещения компонентов и блоков.

View — выбор дополнительной информации выводимой вместе со схемой. Содержит ряд подпунктов:

Attribute Text () – текстовые атрибуты компонента (позиционные обозначения, номиналы и пр., т. е. те атрибуты, которые заданы в окне задания параметров каждого конкретного компонента и показ которых в нем установлен).

Grid Text () – текстовые надписи в схемном окне.

Node numbers () – номера узлов схемы.

Следующие 4 команды подсвечиваются лишь после проведения одного из видов анализа.

Node voltage/states () – узловые потенциалы аналоговых узлов и логические состояния цифровых узлов. После проведения АС анализа и во время анализа *Dynamic DC* на схему выводятся узловые потенциалы в рабочей точке (режим по постоянному току); после проведения *Transient* анализа — узловые потенциалы в конечной точке расчета либо пиковое, среднее или среднеквадратичное значение за время расчета; во время проведения *Dynamic AC* анализа — комплексные значения на переменном токе в формате, выбираемом в окне *Dynamic AC Limits*.

Current () – токи ветвей. После проведения АС анализа и во время анализа *Dynamic DC* на схему выводятся токи в рабочей точке (режим по постоян-

ному току); после проведения Transient анализа — значения токов в конечной точке расчета либо пиковое, среднее или среднеквадратичное значение за время расчета); во время проведения *Dynamic AC* анализа — комплексные значения на переменном токе в формате, выбираемом в окне *Dynamic AC Limits*.

Power () — рассеиваемая на компонентах мощность. После проведения AC анализа и во время анализа *Dynamic DC* на схему выводятся мощность в рабочей точке (режим по постоянному току): после проведения Transient анализа — мощность в конечной точке расчета либо пиковое, среднее или среднеквадратичное значение мощности за время расчета; во время проведения *Dynamic AC* анализа — комплексные значения на переменном токе в формате, выбираемом в окне *Dynamic AC Limits*.

Condition () — состояния транзисторов и p-n-переходов: LIN — линейный активный режим, SAT — режим насыщения, ON — переход открыт, OFF — переход закрыт (или транзистор в режиме отсечки), HOT — транзистор перегрет. Подробнее см. раздел 6.4.

Pin connections () — концы выводов компонентов (обозначаются красной точкой). Используется для проверки правильности соединений между компонентами схемы.

No Grid — не показывать координатную сетку на схеме.

Grid — вывести на схему обычную координатную сетку без жирных точек.

Grid Bold 5 — вывести на схему координатную сетку с отображением каждой 5-ой метки жирной точкой.

Grid Bold 6 — вывести на схему координатную сетку с отображением каждой 6-ой метки жирной точкой.

Bold Grids User (N) — вывести на схему координатную сетку, с отображением каждой N-ой метки жирной точкой. N устанавливается в диалоговом окне *Properties*, вызываемом двойным кликом мыши по свободному полю схемы.

Все вышеперечисленные 5 команд могут быть выполнены путем выбора позиции раскрывающегося списка, открываемого кликом мыши на иконке .

Last — вывод на схему напряжения, тока или мощности в последней точке расчета переходных процессов (Tmax).

RMS — вывод на схему среднеквадратического значения напряжения, тока или мощности, вычисленных за интервал [Tmin, Tmax].

Average — вывод на схему среднего значения напряжения, тока или мощности, вычисленных за интервал [Tmin, Tmax].

Peak — вывод на схему максимального по абсолютной величине значения напряжения, тока или мощности за интервал анализа [Tmin, Tmax].

Выбор всех вышеперечисленных выше 4-х вариантов вывода значений на схему может быть осуществлен из списка, открываемого кликом мыши на иконке  (при этом в свойствах схемы *Properties>View>Calculate* должен быть установлен расчет соответствующих величин). Выбор в списке устанавливает, какие именно значения будут выводиться на схему при выборе пунктов *Node voltage/states*, *Current* и *Power* из меню **View**.

Cross-hair Cursor () — курсор в виде перекрестья во весь экран.

Border () – вывести рамку на чертеж схемы.

Title () – вывести угловой штамп на чертеж.

Show All Paths () — создать список всех возможных путей распространения цифровых сигналов с указанием задержек. Выбранный в списке путь высвечивается на схеме.

Preferences (, **Ctrl+Shift+P**) — диалоговое окно установки общих параметров Micro-Cap (настройка внешнего вида и содержания панелей и окон, шрифтов, форматов, горячих клавиш, предупреждений, выбор языка пользовательского интерфейса и т.п.). Содержит ряд закладок:

Options — закладка окна содержащая флаги, изменение которых может понадобиться при вводе схем и проведении моделирования, приведены ниже в табл. 3.1. (обычно их не требуется изменять).

Таблица 3.1. Параметры закладки Options диалогового окна Preferences

Параметр	Описание	Значение по умолчанию
General		
Time Stamp	Автоматическое добавление метки времени на графики и выходные текстовые файлы в формате Numeric Output	Нет
Date Stamp	Автоматическое добавление метки даты на графики и выходные текстовые файлы в формате Numeric Output	Нет
File List Size	Устанавливает количество файлов, отображаемых в секции <i>Recent</i> меню File (не более 20)	10
Help File on Top	Подсказка всегда наверху	Нет
Print Background	Вывод на печать фона схемы и графиков в цветовых параметрах, установленных пользователем	Нет
Warning Time (Sec)	Длительность показа предупреждающих сообщений	3 с
Add Parentheses to defines	Автоматическое добавление пары круглых скобок ко всей 2-ой части определения .DEFINE, при его интерпретации программой.	Да
Component Menu Shape Display	Показ в левом нижнем углу экрана УГО компонента, на котором стоит маркер в меню Component	Да
Component List Size	Максимальное количество компонентов в списке последних использованных компонентов в нижней части меню COMPONENT	10
Show Full Paths	Показывать полный путь к файлу в нижних частях меню File, Window и на заголовке схемы	Да
Use Bitmaps in Menus	Показывать в пункте меню соответствующую иконку панели инструментов, если она существует	Нет
Sort Model Parameters	При разрешении все модельные параметры при просмотре размещаются в алфавитном порядке	Да

Продолжение табл. 3.1

Параметр	Описание	Значение по умолчанию
Bold Group Names	При разрешении происходит выделение жирным шрифтом имен групп в меню компонентов и иерархической панели компонентов (только в MC10)	Нет
Sound Error, Sound Illegal Operation, Sound Finished Run	Включение звукового сигнала предупреждения при ошибках, неправильных операциях и окончании симуляции соответственно (только в MC10)	Да
Analysis		
Select Mode	Возвращаться в подрежим Select в режиме анализа схемы после выполнения любой другой операции.	Нет
Add DC Path to Ground	Автоматическое добавление резисторов с сопротивлением, равным 1/GMIN, во все ветви, не имеющие путей по постоянному току на «землю»	Нет
Inertial Cancellation	Игнорирование во время моделирования коротких импульсов, длительность которых меньше задержек цифровых устройств.	Да
Select Curve Color	Окрашивание выбранного графика многовариантного анализа в цвета Color Primary (левый курсор) и Color Secondary (правый курсор)	Да
Smart Entry	Автоматическое помещение умолчательных установок многовариантного анализа в диалоговое окно Stepping при выборе варьируемой переменной	Да
Plot on Top	Размещение графиков результатов моделирования поверх окна схемного редактора	Да
Analysis Progress Bar	Отображение индикатора процесса выполнения моделирования	Нет
Macro Drill Down	Разрешение извлекать сигналы из вложенных макроопределений и подсхем	Да
Convergence Assist	Включение утилиты Convergence Assist для попытки оптимизации параметров (Global Settings), влияющих на сходимость алгоритмов анализа (RELTOL, ABSTOL, VNTOL, ITL2, ITL4, GMIN, METHOD). При удачном выполнении добавляется текстовая директива .Options с измененными параметрами Global Settings.	Да
Dynamic Auto Run	Разрешить автоматический запуск после окончания редактирования схемы в режиме анализа	Да
Derrivative Threshold	Устанавливает предельную длину символьного выражения, при которой может быть выполнено символическое дифференцирование; при его превышении выполняется численное дифференцирование	10000

Продолжение табл. 3.1

Параметр	Описание	Значение по умолчанию
Data Point Buffer	Устанавливает размер буфера данных. Линия графика результатов анализа рисуется только тогда, когда количество ненарисованных точек становится равно этой величине. Увеличение буфера обычно ускоряет анализ, но время выдачи результатов при этом ограничивается в основном построением графика (MC10).	10
Circuit		
Text Increment	Инкрементировать текстовые обозначения узлов при операциях вставки, размножения, отражения и пр.	Да
Component Cursor	Автоматическая замена формы курсора изображением компонента, выбранного для размещения на схеме в режиме Component	Да
Copy/Paste Model Information	Когда элемент схемы вырезается/копируется, а затем вставляется, любое связанное с ним макроопределение, подсхема, модельная директива или директива .define вставляются вместе с ним	Нет
Node Snap	Принудительно размещать объект в ближайшем узле координатной сетки	Да
Rubberbanding	«Растягивание» проводников схемы, без отрыва их от узлов и выводов компонентов при выполнении операций перемещения компонентов и блоков.	Нет
Block Select Display Mode	Включение режима показа выделенного блока, при котором окрашивается фон выбранных объектов.	Да
Auto Show Model	Автоматический показ текстового окна в режиме разделения окон (Split) с добавленными модельными директивами после выполнения команды Localize Models.	Нет
Node Highlight	Автоматическая подсветка всех проводников соединенных с узлом при подведении курсора к узлу.	Да
Automatically Add Opamp Power Supplies	Автоматическое добавление на схему и подключение источников питания к модели 3-го уровня сложности операционного усилителя. Источники VC и VE размещаются на отдельной странице Power Supplies	Да
Element Info	Показывать основную информацию о компоненте схемы при наведении на него курсора мыши	Да
Expended Element Info	Показывать дополнительную информацию о компоненте схемы при наведении на него курсора мыши: beta транзистора, проводимости, емкости и т.п. (только в MC10)	Да
Component import	Разрешение импорта компонентов в библиотеку из загружаемых схемных файлов, если они отсутствуют в библиотеке компонентов или чем-либо отличаются от существующих	Да
Select Mode	Автоматическое включение режима выбора объектов схемы при завершении любого другого режима	Нет

Окончание табл. 3.1

Параметр	Описание	Значение по умолчанию
Nodes Recalculation Threshold	Максимальное количество узлов схемы, при превышении которого не будут переопределяться номера узлов схемы при добавлении или удалении компонентов или цепей при включенном режиме <i>Show Node Numbers</i>	1 000 000
File Link Default	Ссылка на файл (File Link), используемая по умолчанию: <i>http://www.google.com/search?q="%s"+"data sheet"</i>	

Shortcuts — закладка, служащая для управления горячими клавишами команд панелей инструментов. Комбинации горячих клавиш можно удалять, добавлять, переназначать.

Main Tool Bar — эта закладка позволяет изменить набор кнопок, выводимых на главную (верхнюю) панель инструментов для каждого пункта основного меню File, Edit, Component, Windows, Options, Analysis.

Color Palettes — в этой закладке можно определить собственную цветовую палитру. Для этого достаточно щелкнуть мышью на любом образце цвета и в открывшемся диалоговом окне изменить его параметры.

Rainbow — позволяет управлять последовательностью цветов в радужной цветовой гамме результатов многовариантного анализа (только в MC10).

Format — в этой закладке можно установить формат вывода для различной числовой информации (координат точек графика, таблицы расчетных точек файла численного вывода, напряжений в узлах, токов и мощностей в ветвях, задержек цифровых сигналов в путях прохождения, чисел в формулах). Имеется только в версии MC9.

Status Bar — эта закладка позволяет изменить формат текста информационной строки (гарнитуру и размер шрифта).

Panel/Window Tabs — установка параметров отображения панели компонентов и панелей открытых окон. Закладка имеет две панели — левая управляет панелью компонентов, а правая — заголовками открытых окон. Включение/отключение указанных панелей дублируется соответствующими командами меню *Options* и кнопками панели инструментов  .

Component Palettes — эта закладка позволяет выбрать используемые палитры компонентов из приведенных девяти. После установки палитру можно переместить на панель инструментов. Также её можно включать/отключать последовательным нажатием комбинации клавиш Ctrl+N (где N — номер палитры).

Auto Save — позволяет установить автосохранение схемного файла перед запуском анализа и (или) автосохранение через определенный интервал времени.

Warnings — управляет показом окон с предупреждениями; можно установить выдачу предупреждающих сообщений при следующих событиях:

- *File* — при закрытии файла, который редактировался, но ещё не был сохранен;
- *Quit* — при завершении работы с программой;

- *Opamp Power Supplies* — при добавлении программой Micro-Cap источников питания для операционных усилителей;
- *Add DC Path to Ground* — при добавлении программой резисторов минимальной проводимости GMIN для обеспечения соединения по постоянному току плавающего узла с землёй;
- *Excessive Time Points* — при задании в параметрах анализа слишком большого количество расчетных точек по оси времени (отношение *Time Range/Maximum Time Step* слишком велико);
- *Excessive Data Points* — при чрезмерном количестве всех расчетных точек при анализе (сумме расчетных точек всех кривых на всех графиках);
- *Excessive Source Points* — при чрезмерном количестве точек в источниках сигнала типа PWL, STIM, или User;
- *Revert* — при выполнении команды REVERT (возврат к дисковой версии редактируемого файла);
- *AC Signal* — при попытке запустить АС анализ когда АС значения всех источников сигнала схемы равны нулю;
- *Part and Node the same* — при совпадении имени узла с позиционным обозначением какого либо компонента схемы;
- *SPICE3 TEMP parameter* — при использовании параметра SPICE3 TEMP в качестве атрибута компонента;
- *Level Changed* — при изменении уровня (Level) модели компонента там, где при этом должны быть изменены и параметры модели.
- *Tnom and TMEASURED* — при указании для компонента обеих значений TNOM и TMEASURED;
- *Model Attribute not used* — при задании для компонента выражения, зависящего от времени и модельного атрибута одновременно;
- *Change Part Name* — при изменении позиционного обозначения компонента программой при использовании в нем недопустимых символов.
- *Duplicate Part Name* — при использовании несколькими компонентами одного и то же позиционного обозначения.
- *Leave / Retrace with Threads* — выдача предупреждения, когда опции *Retrace* или *Leave* запрещают использование распараллеливания вычислительных процессов (threads). Актуально только для версии MC10.
- *Create .IC Statement* — при генерации директивы .IC statement из редактора начальных условий (только в MC10).

Did You Know? — управляет выдачей напоминаний при запуске каждого из перечисленных разделов (только в MC10).

Style — показывает доступные стили для вывода текстовых атрибутов компонентов схемы и позволяет определить новые стили текста. Стили включают в себя гарнитуру, размер, начертание и цвет шрифта.

Combinations — позволяет установить параметры подбора комбинаций пассивных компонентов со стандартными номиналами для заданного точного номинала резистора (конденсатора, катушки), см. рис. 3.5. Можно установить максимальную ошибку подбора комбинации (Maximum Error %), максимальное число параллельно соединенных стандартных компонентов (Maximum

Parallel Elements), общее число элементов в комбинации (Maximum Parts Count), файл рядов номиналов каждого из пассивных компонентов RLC.

Slider — позволяет установить параметры движковых регуляторов: расположение (Position), числовой формат и тип шрифта (Floating slider), процентное изменение номинала компонента при перемещении движка на один шаг (Slider Percentage Step Size).

International Settings — выбор языка пользовательского интерфейса программы.

Threads — распараллеливание вычислительных процессов путем использования нескольких ядер многоядерного процессора (только в MC10). Есть несколько опций для управления распараллеливанием.

- *Use Threads* — разрешение распараллеливания операций, если компьютер имеет несколько процессоров или многоядерный процессор..
- *Use Threads Count* — при разрешенной опции Use Threads, устанавливает максимальное количество параллельных процессов.
- *Use Extra Thread for Plotting* — при установке опции один параллельный процесс резервируется под построение графиков, если он не используется в расчетном процессе анализа.

Default properties for New Circuits (Alt+F10) — окно задания параметров для вновь создаваемых схем. Все закладки имеют кнопку *Default*, восстанавливающую умолчательные параметры. Если возникает необходимость изменить параметры *загруженной* схемы, то используется команда *Properties*

(, **F10** или двойной клик по свободному полю схемы в режиме *Select*).

Schematics — параметры ввода новых схем:

- *Color/Font*. Позволяет установить тип шрифта, основной и фоновый цвета для различных элементов схемы (УГО компонентов, текстовых атрибутов компонента, текста на схеме, текстовых баннеров для режимов Sensitivity, Transfer Function, Dynamic AC и DC, фона схемы и пр.)
- *Format*. Позволяет установить числовой формат для вывода на схеме потенциалов узлов, токов, ветвей, мощностей компонентов, для вывода чисел в предупреждениях, для расчетных значений в формульном режиме (только в MC10).
- *View*. Устанавливает пользовательскую координатную сетку; приоритеты использования групп УГО при задании в поле атрибута Shapegroup значения Default (Shape Group Priority); расчет среднеквадратических, средних и пиковых значений (Calculate); вид значений, индицируемых на схеме после расчета (Default Display).
- *Title Block*. Позволяет задать на создаваемой схеме прорисовку заголовочного блока со штампом и его содержимое.
- *Tool Bar*. Позволяет для вновь создаваемой схемы выбрать кнопки панели инструментов в режиме рисования схем и установить ее расположение на экране.

SPICE Files — параметры создаваемых текстовых файлов на языке SPICE:

- *Color/Font*. Установка цветовых параметров шрифта (цвет символа и фона).
- *Tool Bar*. Настройка панели инструментов и выбор кнопок на ней для создаваемого текстового SPICE файла.

Analysis Plots — параметры выводимых графиков в различных режимах анализа для вновь создаваемых схем.

- *Scales and Formats*. Позволяет установить единицы, масштабный множитель (как по оси абсцисс, так и по оси ординат) и формат числового вывода для графиков анализа. Содержит поля и флаги:
 - *Scale Factor*. Позволяет использовать масштабный множитель. При установке Auto выбирается подходящий масштабный множитель из списка: Т – тера (10^{12}), G – гига (10^9), Meg – мега (10^6), K – кило (10^3), m – милли (10^{-3}), μ – микро (10^{-6}), n – нано (10^{-9}), p – пико (10^{-12}), f – фемпто (10^{-15}).
 - *Scale Units*. Позволяет добавить единицы измерения (вольты, амперы и пр.) к построенным графикам. При выборе «Auto» единицы измерения выставляются автоматически.
 - *Scale Format*. Управляет форматом числового вывода графиков. Можно выбрать один из 4-х доступных форматов scientific (1.00E4), engineering (10.00K), decimal (10,000.00), default (10K).
 - *Value (Cursor) Format*. Управляет форматом чисел, выводимых на график в режиме Cursor Mode и данных численного вывода. Доступны все форматы, перечисленные в предыдущем пункте.
 - *Auto/Static Grids*. Указывает количество линий координатной сетки как в режиме автомасштабирования (Autoscale), так и в режиме фиксированной сетки (Static Grid)
 - *Enable Scaling*. Разрешает автомасштабирование по осям X и Y.
 - *Optimizer*. Устанавливает числовой формат для окна оптимизации.
 - *Watch*. Устанавливает числовой формат для окна Watch.
 - *Same Y Scales for Each Plot Group*. Установка или сброс одинакового масштаба для всех графиков в одном графическом окне. Если флаг сброшен, то для каждого графика в окне используется отдельная Y-ось.
 - *Static Grids*. Установка фиксированной координатной сетки. Эта сетка не меняется даже в том случае, если графики панорамируются (как было в MC6). При сброшенном флаге используется стандартная сетка Micro-Cap.
 - *Keep X Scales the Same*. При установке данного флага используются одинаковые масштабы по оси X для различных графических окон.
 - *Slope Calculation*. Воздействует на способ вычисления производной переменной, откладываемой по оси Y. Возможные установки normal, dB/octave, dB/decade. Последние две используются преимущественно в АС анализе при измерении наклона амплитудно-частотных характеристик.
- *Colors, Fonts, and Lines*. Позволяет устанавливать шрифт для текста и цвет для различных объектов графических окон. Например, можно установить шрифт для текстовых блоков заголовка и масштабов по осям, цвет фона окна и графиков, цвет каждой кривой на графике, ее толщину и способ прорисовки.

- *Scope*. Здесь устанавливаются некоторые параметры отображения графиков, используемые по умолчанию для новой схемы. Опции дублируют результаты выполнения двух групп команд меню *Scope*: *View* и *Trackers*. В основном используются для умолчательной установки параметров координатной сетки.
- *Tool Bar*. Здесь можно установить для вновь создаваемой схемы расположение и состав панели инструментов, активизирующейся после запуска любого вида анализа.
- *FFT*. Позволяет задать умолчательные параметры для функций спектрального анализа, строящихся по результатам расчета переходных процессов и частотных характеристик. Эти параметры — число отсчетов графика для применения к нему прямого и обратного быстрого преобразования Фурье и опции автомасштабирования. Другие установки в этом окне для новой схемы (*Upper Time Limit*, *Lower Time Limit*, *Upper Frequency*) первоначально совпадают с установками окна *Analysis Limits* соответствующего вида анализа (*Transient*, *AC*).
- *Numeric Output*. Установки этой закладки воздействуют на содержимое файлов числового вывода типа *.TNO, *.ANO, и *.DNO.
 - *Include Numeric Output*. Разрешение создания файла результатов расчета. Остальные ниже перечисленные флаги этой закладки воздействуют лишь на содержимое этого файла.
 - *Include Main Header* — включение основного заголовка.
 - *Include Analysis Limits*. Добавляет в выходной файл параметры расчета, задаваемые пользователем (*Analysis Limits*).
 - *Include Branch Header* — включение заголовка варианта анализа (варианта анализа *Stepping*, реализации *Monte Carlo*, температурного варианта и др.).
 - *Include Model Parameters*. В выходной файл результатов расчета включаются параметры моделей.
 - *Include Zero Parameters*. Включение в выходной файл параметров, значения которых равны нулю.
 - *Include Undefined Parameters*. Включение в выходной файл значений параметров моделей, которые не были определены и были приняты равными умолчательным значениям.
 - *Include Operating Point Values*. Печать в выходной файл результатов расчета рабочей точки по постоянному току.
 - *Include Waveform Values*. Воздействует на печать всех заданных сигналов в выходной файл. Для этого необходимо также, чтобы была активизирована соответствующая иконка для нужного сигнала в параметрах графиков окна *Analysis Limits*.
 - *Include Waveform Headers*. Воздействует на печать заголовков всех графиков в выходной файл численного вывода.
 - Формат таблицы выводимых данных

3D Plots. Управляет параметрами вывода трехмерных графиков и имеет следующие закладки:

- *Color*. Здесь можно установить цвета окна и заднего фона графиков, координатных осей, текста, линий сетки поверхности.
- *Font*. Здесь можно установить тип шрифта для всех текстовых объектов.
- *Scales and Formats*. Здесь устанавливается формат вывода числовых меток линий сетки по всем 3-м координатам, таблиц величин для курсорных функций, также в этой закладке устанавливается способ вычисления наклона (производной).
- *Tool Bar*. Закладка позволяет настроить для вновь создаваемой схемы положение и состав панели инструментов, активизирующейся в этом режиме.

Monte Carlo Histograms. Управляет параметрами вывода гистограмм для анализа методом Монте-Карло вновь создаваемой схемы.

- *Color*. Установка цвета текстовых объектов, окна и фона графиков, столбиков диаграммы (гистограммы).
- *Font*. Установка гарнитуры шрифта для всех текстовых объектов гистограммы.
- *Tool Bar*. Настройка положения и состава панели инструментов, активизирующейся в этом режиме для новой схемы.

Performance Plots. Управляет параметрами графиков окна Performance для новой схемы и содержит следующие закладки.

- *Scales and Formats*. Здесь указываются единицы, масштабный множитель, формат числового вывода и другие установки для графиков в окне Performance. Все установки аналогичны соответствующим установкам для графиков анализа (Analysis Plots>Scales and Formats).
- *Colors, Fonts, and Lines*. Здесь можно устанавливать шрифт для текстовых объектов и цвета для различных объектов графических окон. Например, можно установить шрифт для текстовых блоков заголовка и масштабов по осям, цвет окна и фона графиков, цвет, толщину и способ прорисовки линии каждой кривой графика.
- *Tool Bar*. Здесь можно установить расположение и состав (кнопки) панели инструментов, активизирующейся в этом режиме для новой схемы.
- *Numeric Output*. Устанавливает формат численного вывода для графиков в окне Performance (только в MC10).

FFT. Управляет параметрами окна FFT новой схемы, открываемого через меню анализа переходных процессов TRANSIENT.

- *Scales and Formats*. Здесь указываются единицы, масштабный множитель, формат числового вывода и другие установки для FFT графиков. Все установки аналогичны соответствующим установкам для графиков анализа.
- *Colors, Fonts, and Lines*. Здесь можно устанавливать шрифт для текстовых объектов и цвета для различных объектов графических окон. Например, можно установить шрифт для текстовых блоков заголовка и масштабов по осям, цвет фона окна и графиков, цвет, толщину и способ прорисовки линии каждой кривой графика.
- *Tool Bar*. Здесь можно установить расположение и состав (кнопки) панели инструментов, активизирующейся в этом режиме.
- *FFT*. Эта закладка позволяет выбрать параметры по умолчанию для вычисления функций спектрального анализа: число отсчетов функции (Num-

ber of points), используемых при вычислении быстрого преобразования Фурье; опции автомасштабирования. Другие установки в этом окне (Upper Time Limit, Lower Time Limit) первоначально совпадают с установками окна Transient Analysis Limits.

- *Numeric Output.* Устанавливает формат численного вывода для графиков в окне FFT (только в MC10).

Model. Воздействует на основные установки программы подготовки моделей компонентов.

- *Colors/Font.* Управляет параметрами шрифта и цветом различных объектов на графиках.
- *Format.* Позволяет установить числовой формат для масштабов по осям в графиках моделей (только в MC10).
- *Tool Bar.* Здесь можно установить расположение и состав (кнопки) панели инструментов, активизирующейся в этом режиме.

Globals. Эта закладка управляет свойствами графических объектов и форматами языка SPICE, используемых при чтении SPICE-файлов.

- *Graphical Object.* Воздействует на свойства графических объектов в новой схеме — цвет и тип начертания границы и заливку замкнутых фигур, шрифт текста размерных линий.
- *SPICE Type.* Позволяет установить разновидность SPICE-формата, которая будет использоваться при чтении любого материала на языке SPICE.

Global Settings () — окно общих параметров моделирования. По умолчанию доступны два набора параметров: обычный (Standart Default) и для силовых схем (Power Default). Описание этих параметров и их значения для Standart Default представлены в табл. 3.2. Иногда, особенно при выполнении моделирования силовых схем, цифровых схем или смешанного моделирования, может потребоваться изменение некоторых из этих параметров.

User Definitions — открытие и просмотр содержимого файла MCAP.INC. Этот файл расположен в той же директории, что и исполнимый модуль MC9.EXE (MC10.exe), и содержит глобальные определения для использования во всех схемах. Содержимое файла включается автоматически во все схемы Micro-Cap.

Model Parameters Limits Editor — окно редактирования ограничений на параметры моделей. Можно установить ограничения по максимуму и минимуму на любой параметр любой модели. В этом файле указываются также значения модельных параметров, принятые по умолчанию, однако отсутствует возможность их редактирования. Если используемые в схеме модельные параметры выйдут за пределы разрешённого диапазона, будет выдано предупреждающее сообщение. Также можно произвести полную проверку всех библиотечных моделей командой *Windows>Check Model Library Parameters*.

Components Palettes — включение различных наборов компонентов (палитр). Палитры компонентов удобно использовать в режиме рисования схем. Самые употребительные наборы — Analog и Digital.

Таблица 3.2. Глобальные параметры (Global Settings)

Параметр	Описание	Размерность	Значение по умолчанию
Numeric Options (числовые параметры)			
ABSTOL	Допустимая абсолютная ошибка расчета токов в режиме Transient. Добавляется к величине относительной ошибки. Эта сумма должна быть больше разности двух последовательных решений для каждого тока схемы. Увеличение параметра часто позволяет улучшить сходимость при расчете схемы с большими токами	А	10^{-12}
CHGTOL	Допустимая ошибка расчета заряда в режиме Transient. Аналогичен параметру ABSTOL, но относится к расчету величин зарядов.	Кл	10^{-14}
CSHUNT	Емкость конденсаторов, которые неявно включаются между каждым узлом схемы и «землей». При значении «0» конденсаторы отсутствуют	Ф	0
DEFAD	Площадь области стока МОП-транзистора	м ²	0
DEFAS	Площадь области истока МОП-транзистора	м ²	0
DEFL	Длина канала МОП-транзистора	м	10^{-4}
DEFNRD	Количество квадратов для определения сопротивления области стока	1/м	0
DEFNRS	Количество квадратов для определения сопротивления области истока	1/м	0
DEFPD	Периметр области рп-перехода стока	м	0
DEFPS	Периметр области рп-перехода истока	м	0
DEFW	Ширина канала МОП-транзистора	м	10^{-4}
DIGDRVF	Минимальное выходное сопротивление интерфейсной модели IO цифровых компонентов	Ом	2
DIGDRVZ	Максимальное выходное сопротивление интерфейсной модели IO цифровых компонентов	кОм	20
DIGERRDEFAULT	Максимальное количество сообщений об ошибках, вызванных ограничениями для временных соотношений отдельной цифровой модели		20
DIGERRLIMIT	Максимальное количество сообщений об ошибках для всех цифровых устройств во время каждого сеанса расчета		0
DIGFREQ	Максимальная частота дискретизации при анализе цифровых устройств (минимальный временной шаг равен 1/DIGFREQ с)	ГГц	10
DIGINITSTATE	Начальные состояния триггеров: 0 — сброс; 1 — установка; 2 — X состояние		0
DIGIOLVL	Уровень A/Ц (AtoD), Ц/A (DtoA) интерфейсной модели IO по умолчанию (1 – 4)		2

Продолжение табл. 3.2

Параметр	Описание	Размерность	Значение по умолчанию
DIGMNTYMX	Селектор выбора задержки цифрового устройства по умолчанию: 1 – минимум; 2 – типичное значение; 3 – максимум; 4 – мин/макс (наихудший случай для цифровых устройств)		2
DIGMNTYSCALE	Масштабный коэффициент для расчета минимальной задержки цифровых компонентов		0,4
DIGOVRDRV	Минимальное отношение выходных сопротивлений цифровых устройств с объединенными выходами, при котором изменяется состояние общего выходного узла		3
DIGTYMXSCALE	Масштабный коэффициент для расчета максимальной задержки цифровых компонентов		1,6
GMIN	Минимальная проводимость ветви цепи (проводимость ветви, меньшая GMIN, считается равной нулю)	См	10^{-12}
INTERPOLATION_ORDER	Порядок интерполяции для FFT при нахождении спектра (только в MC10)		2
ITL1	Максимальное количество итераций при расчете режима по постоянному току (operating point)		100
ITL2	Максимальное количество итераций при расчете каждой точки передаточных функций по постоянному току (DC)		50
ITL4	Максимальное количество итераций при расчете каждой точки в режиме анализа переходных процессов (TRANSIENT)		10
LONE	Величина, присваиваемая логическому выражению, когда его значение истинно TRUE (для логических операторов SPICE3)		3,5
LTHRESH	Минимальное значение аналогового напряжения, при котором в логическом выражении оно интерпретируется как логическая «1». Например, выражение V(1) AND V(2) будет истинным (TRUE) и равным аналоговой величине LONE только в случае если V(1) ≥ LTHRESH и V(2) ≥ LTHRESH		1,5
LZERO	Величина, присваиваемая логическому выражению, когда его значение ложно (FALSE)		0,3
PERFORM_M	Количество расчетных точек до и после выбранной точки, которое используется при нахождении функций Performance. Применяется для минимизации шумовых эффектов при их вычислении.		2
PIVREL	Минимальная относительная величина элемента матрицы, необходимая для его выделения в качестве ведущего элемента		10^{-3}

Продолжение табл. 3.2

Параметр	Описание	Размерность	Значение по умолчанию
PIVTOL	Минимальная абсолютная величина элемента матрицы, необходимая для его выделения в качестве ведущего элемента		10^{-13}
RELTOL	Допустимая относительная ошибка расчета напряжений и токов в режиме TRANSIENT. Увеличение или уменьшение этого параметра иногда требуется для достижения сходимости процесса решения проблемных схем.		10^{-3}
RMIN	Минимальное сопротивление резистора и минимальное сопротивление металлических выводов электродов полупроводниковых приборов	Ом	10^{-6}
RP_FOR_ISOURCE	Сопротивление резисторов, неявно помещаемых параллельно всем источникам тока. Значение «0» означает, что резисторы отсутствуют	Ом	0
RSHUNT	Сопротивление резисторов, неявно подключаемых между каждым узлом схемы и «землей». Значение «0» означает отсутствие резисторов	Ом	0
R_NODE_GND	Величина резистора, подключаемого между узлом и землей, когда установлен флаг <i>Add DC Path to Ground</i> в меню <i>Options>Preferences</i> и узел не имеет схемного пути на землю		10^{12}
SANDH_PRECISION	Точность, которая должна быть определена для обеспечения сходимости при расчете схем с устройством выборки-хранения Sample and Hold (только в MC10)		10^{-4}
SD	Отношение диапазона разброса случайных параметров к среднеквадратичному отклонению. Определяет процент попадания случайных значений в полосу допуска.		2,58
SEED	Начальное значение (зерно) для генераторов случайных чисел на основе функций RND, RNDR, RNDC и RNDI(t). Если $SEED \geq 1$, последовательности генерируемых случайных чисел одинаковы при каждом вызове функции		0
TNOM	Номинальная температура (температура, для которой указаны модельные параметры и по умолчанию производятся все виды анализа)	°C	27
TRTOL	Коэффициент формулы для LTE, оценивающий истинную ошибку на каждом шаге. Определяет реальную величину шага в режиме Transient		7
VNTOL	Допустимая абсолютная ошибка расчета напряжений в режиме Transient. Аналогичен параметру ABSTOL, но относится к расчету величин напряжений. Увеличение VNTOL ведет к улучшению сходимости расчета высоковольтных схем	В	10^{-6}

Продолжение табл. 3.2

Параметр	Описание	Размерность	Значение по умолчанию
WIDTH	Длина строки выходного файла (80 или 132) в символах		80
Численные методы			
EULER	Выбор метода Эйлера численного интегрирования. Чаще используется при академических исследованиях и редко при практическом моделировании, два других метода намного более точные (только в MC10).		No
GEAR	Выбор метода численного интегрирования дифференциальных уравнений GEAR (по 6 точкам)		No
TRAPEZOIDAL	Выбор метода трапеций численного интегрирования дифференциальных уравнений		Yes
Дополнительные опции расчета			
NOOUTMSG	Отмена передачи в выходной файл сообщений об ошибках моделирования цифровых схем		No
NUMERIC_DERIVATIVE	Использование численного дифференцирования вместо символического в функциональных источниках		No
PRIVATEANALOG	Создание отдельных копий моделей всех аналоговых компонентов. При установке флага вариация параметров модели относится только к одному выбранному компоненту, в противном случае ко всем компонентам, имеющим такую же модель. При наличии в модели параметра DEV такие копии создаются автоматически независимо от значения параметра PRIVATEANALOG		Yes
PRIVATEDIGITAL	Создание отдельных копий моделей всех цифровых компонентов. Действие флага аналогично действию флага PRIVATEANALOG но относится к цифровым компонентам		No
TRYTOCOMPACT	Упрощение алгоритма расчета длинных линий с потерями, ведущее к ускорению расчета при незначительном снижении точности.		No
PATH_TO_GROUND	При установке вызывает проверку пути по постоянному току на землю перед запуском анализа. Все схемные узлы должны иметь путь по постоянному току на землю для обеспечения сходимости. Если подобные узлы будут найдены, Micro-Cap может добавить проводимость на землю в соответствующем месте (только в MC10).		Yes

Параметр	Описание	Размерность	Значение по умолчанию
VOLTAGE_LOOP_CHECK	При установке вызывает проверку отсутствия контуров, содержащих только элементы с предопределенными напряжениями (источники ЭДС и катушки). Схема не должна иметь таких контуров для обеспечения решаемости. Проверку рекомендуется выполнять при первом запуске, а затем отключать для экономии времени запуска анализа. Указанное время обычно существенно лишь для очень больших схем (только в MC10).		Yes
FLOATING_NODES_CHECK	При установке вызывает проверку отсутствия плавающих узлов (только с единственным соединением). Т.к. наличие подобных узлов не вызывает проблем решаемости для программы рекомендуется опцию отключать (только в MC10)		No

3.3.8. Пункт меню ANALYSIS

Содержит команды запуска различных режимов моделирования:

Transient (Alt+1) — расчет переходных процессов в схеме. Позволяет строить зависимости от времени различных переменных состояния схемы и наблюдать их в графическом окне так же как на экране осциллографа.

AC (Alt+2) — расчет частотных характеристик схемы. Позволяет строить зависимости от частоты различных переменных схемы при подаче на вход гармонического воздействия с меняющейся частотой и постоянной амплитудой. Выводимые графики подобны тому, что наблюдается на экране прибора измерителя частотных характеристик.

DC (Alt+3) — расчет передаточных функций по постоянному току (при вариации постоянной составляющей одного или двух источников сигналов, вариации температуры или параметров моделей компонентов). Выводимые графики подобны графикам, наблюдаемым на экране характериографа.

Dynamic DC (Alt+4) — расчет режима по постоянному току и динамическое отображение на схеме узловых потенциалов, токов ветвей и рассеиваемой мощности. В этом режиме можно изменять напряжения батарей, значения резисторов с помощью специальных движков (Sliders) или курсорных клавиш, редактировать схему, добавляя или удаляя компоненты, меняя значения параметров и прочее. Micro-Cap сразу же после проведенных изменений рассчитывает режим по постоянному току и показывает значения узловых потенциалов  (токов ветвей , рассеиваемых мощностей , состояний полупроводниковых приборов ).

Dynamic AC (Alt+5) — расчет малосигнальных характеристик при заданных списком значениях частот и их динамическое отображение на узлах схемы при изменении значений компонентов. Для каждой заданной частоты

можно регулировать величины батарей, резисторов, конденсаторов, индуктивностей. Micro-Cap в ответ проводит малосигнальный анализ на текущей частоте и выводит прямо на поле схемы комплексные величины узловых потенциалов  (токов ветвей , мощностей ).

Sensitivity (Alt+6) — расчет чувствительностей режима по постоянному току. В этом режиме рассчитываются чувствительности одной или нескольких выходных переменных к изменению одного или нескольких входных параметров. В качестве входных изменяемых параметров для этого вида анализа могут выступать все параметры моделей, величины пассивных компонентов, символьные параметры. При установке множества входных параметров и выходных функций может быть сгенерирован весьма обширный объем данных.

Transfer Function (Alt+7) — расчет малосигнальных передаточных функций в режиме по постоянному току. Рассчитывается отношение измеренного изменения заданного пользователем выходного выражения к вызвавшему это изменение малому возмущению заданного пользователем входного источника постоянного напряжения (тока). При этом автоматически рассчитываются входное и выходное сопротивления схемы на постоянном токе.

Distortion в MC9, **Harmonic distortion** в MC10 (**Alt+8**) — расчет нелинейных искажений усилительных схем с использованием математического аппарата спектрального Фурье-анализа. Фактически в этом режиме запускается анализ переходных процессов при гармоническом воздействии на входе схемы и используются функции спектрального анализа для расчета нелинейных искажений. Можно изменять уровень входного сигнала и (или) его частоту и строить зависимости коэффициента гармоник THD и связанных с ним показателей (THDN, SINAD, SNR), а также гармоники выходного сигнала с любым номером от следующих величин:

- входного сигнала VIN,
- выходного сигнала — VOUT,
- входной мощности — PIN,
- или выходной мощности — POUT.

Графики могут быть выведены в обычных единицах, в децибелах, и в процентах. Для достижения быстрой сходимости и минимизации погрешностей быстрого преобразования Фурье используются методы PSS.

Intermodulation Distortion в MC10 (**Alt+9**) — расчет интермодуляционных искажений усилителя по одной из 3-х методик: SMPTE, CCIF, DIN. Можно изменять уровень входного сигнала и (или) его частоту и строить зависимости интермодуляционных составляющих IM2 — второго порядка, IM3 — третьего порядка, H1 — первой гармоники от частоты F, входного сигнала VIN, выходного сигнала — VOUT, входной мощности — PIN или выходной мощности — POUT. Измерение интермодуляционных составляющих осуществляется с использованием одной из трех методик: SMPTE, CCIF, или DIN. При этом используются стандартные уровни и частоты входных сигналов или они могут задаваться пользователем.

Probe Transient... (Ctrl+Alt+1) — анализ переходных процессов и отображение их результатов в режиме Probe. В этом режиме производится запуск анализа переходных процессов и сохранение результатов анализа на

диске. Если кликнуть мышью в интересующий узел схемы, то выведется зависимость от времени сигнала в этом узле.

Probe AC... (Ctrl+Alt+2) — анализ частотных характеристик и отображение их результатов в режиме Probe.

Probe DC... (Ctrl+Alt+3) — анализ передаточных функций по постоянному току и отображение их результатов в режиме Probe.

Следует отметить, что при запуске любого режима Probe (Transient, AC, DC) в верхней части экрана появляются новые пункты меню: Probe, Vertical, Horizontal, которые содержат команды управления этим режимом (они будут рассмотрены ниже).

3.3.9. Пункт меню DESIGN

Содержит команды синтеза активных и пассивных фильтров.

Active Filters... — команда запуска синтеза активных фильтров с заданными параметрами. Можно создавать фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосно-пропускающие фильтры (ФПП), полосно-заграждающие фильтры (ФПЗ), фильтры задержки. Для синтеза фильтров можно использовать полиномиальные аппроксимации Баттерворта, Чебышева, Бесселя, инверсную Чебышева, Кауэра (эллиптическую). Для реализации звеньев синтезируемого фильтра можно использовать различные схемы на основе операционных усилителей, начиная от схемы Саллена-Ки и кончая схемой Тоу-Томаса. В процессе синтеза доступны для просмотра синтезируемая схема фильтра, импульсная, переходная, амплитудно-частотная характеристика идеализированной схемы. На заключительном этапе диалога создается схема фильтра в виде новой схемы или макромодели (по выбору).

Passive Filters... команда запуска синтеза пассивных LC-фильтров в соответствии с введенными параметрами. Можно создавать фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосно-пропускающие фильтры (ФПП) и полосно-заграждающие фильтры (ФПЗ). Для них можно выбирать полиномиальные аппроксимации Баттерворта, Чебышева, Кауэра и использовать для реализации звеньев схемы 2-х видов.

В процессе синтеза и активных и пассивных фильтров доступны для просмотра синтезируемая схема фильтра, импульсная, переходная, амплитудно-частотная характеристика идеализированной схемы. На заключительном этапе диалога создается схема фильтра в виде новой схемы или макромодели (по выбору). Подробную информацию о синтезе фильтров см. в соответствующей главе.

3.3.10. Пункт меню MODEL

Меню работы с библиотеками моделей электронных приборов в бинарном формате (с расширением .LBR) и в модельном формате (с расширением .MDL). Можно просматривать и редактировать параметры моделей указанного формата, создавать новые модели на основе справочных и экспериментальных данных с помощью встроенного оптимизатора. Подробности см. в главе описания математических моделей компонентов и соответствующих экранных окон программы MODEL.

4. ФОРМАТЫ ЗАДАНИЯ КОМПОНЕНТОВ

4.1. Общие сведения

Параметры всех электронных компонентов задаются при добавлении в принципиальную схему. При этом открывается окно задания параметров (окно атрибутов). Кроме того, параметры компонента можно в любой момент отредактировать — окно задания параметров открывается щелчком левой клавиши мыши по компоненту схемы.

Все компоненты в Micro-CAP могут быть заданы двумя способами:

- непосредственным вводом номинального значения компонента (или функции для этого значения) в позиции Capacitance, Inductance, Resistance, Value (как правило, используется для задания пассивных компонентов) или (и) вводом имени используемой модели в позицию MODEL (как правило, используется для задания активных компонентов);
- заданием имени переменной, обозначающей номинал компонента (например, Rload, Cout, Cin, Lpins и т.д.), которое вводится в строке значения (Capacitance, Inductance, Resistance), с последующим текстовым вводом информации, ставящей в соответствие этой переменной его номинал или модель. Это соответствие устанавливается директивой «.Define» и может быть осуществлено как в схемном окне (что более наглядно), так и в текстовом окне. Пример директивы: .Define Rload 10K.

Задание вторым способом является более универсальным. Оно предоставляет пользователю ряд дополнительных возможностей при выполнении анализа, которые будут рассмотрены в последующих примерах.

Ввод номинальных значений компонентов осуществляется в системе СИ, за исключением катушки с магнитным (нелинейным) сердечником. Значения компонентов задаются либо непосредственно (2600), либо в показательной форме (2.3E3), либо условными буквенными обозначениями (5K). Используются следующие буквенные обозначения для множителей (см. табл. 4.1):

Таблица 4.1. Буквенные обозначения множителей для численных значений

10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^3	10^6	10^9	10^{12}
Фемпто	пико	нано	микро	милли	Кило	мега	гига	Тера
F (f)	P (p)	N (n)	U (u)	M (m)	K (k)	MEG (meg)	G (g)	T (t)

Следует обратить внимание, что в Micro-Cap целая часть чисел отделяется от дробной **не запятой, а точкой**. Например, 1.3K или 1.3E3.

На рис. 4.1 приведен пример задания одного из пассивных компонентов — резистора. В рассмотренном примере на схеме отображается позиционное обозначение компонента R5 (PART), величина 1MEG (RESISTANCE) и имя модели CT_10% (MODEL) (возможно для тех резисторов, у которых модель задана). Набор показываемых атрибутов определяется установками флажка отображения *Show* для соответствующих позиций (рис. 4.1). Отметим, что величина любого пассивного компонента (сопротивление резистора, емкость конденсатора, индуктивность катушки) может определяться как любая функ-

ция узловых напряжений схемы, токов ветвей, времени и температуры, что выгодно отличает программу Micro-Cap от PSPICE.

Так, например, сопротивление резистора R4 (рис. 4.1) зависит от напряжения $V(R5)$, тока $I(R1)$ и от времени T ; сопротивление резистора R3 прямо пропорционально температуре $TEMP$; сопротивления резисторов R2, R5 также зависят от температуры, но уже через модельный параметр TC .

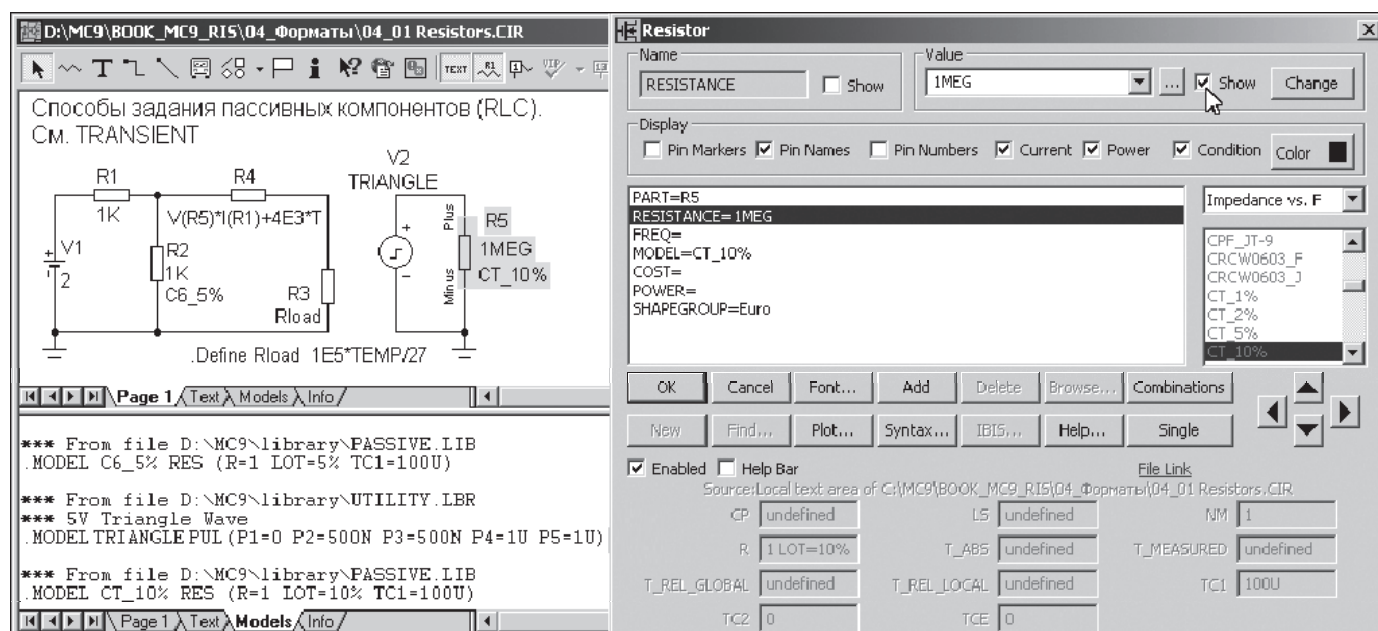


Рис. 4.1. Способы задания компонента

Структура окна задания параметров компонента (или, как будем его для краткости называть в дальнейшем, окна атрибутов), представлена на (рис. 4.2).

В заголовке окна указывается краткая информация о компоненте (если она предварительно введена в поле *Мето* редактора компонентов). Эта же информация появляется при наведении на компонент курсора мыши. Ниже располагаются панели, управляющие отображением текстовых атрибутов компонента на принципиальной схеме. Панель слева (*Name*) позволяет отобразить наименование атрибута, панель справа (*Value*) — его значение. Кроме того панель *Value* содержит кнопку *Change*, управляющую установкой значений (чисел, записанных в позиции *Value*, Capacitance, Inductance, Resistance) однотипных компонентов. Кнопка *Change* задействована при нахождении маркера на позиции *Value* (или аналогичных ей) в списке атрибутов.

Ниже располагается панель *управления отображением схемных атрибутов* компонента (*Display*). Помимо кнопки *выбора цвета* компонента (*Color*), она содержит следующие флаги:

- Pin Markers — показ жирными точками концов выводов компонента;
- Pin Names — показ на схеме названий выводов;
- Pin Numbers — показ на схеме номеров выводов корпуса;
- Current — разрешить показ на схеме токов компонента;
- Power — разрешить показ на схеме рассеиваемой мощности;
- Condition — разрешить показ на схеме состояния полупроводникового прибора.

Ниже располагается окно со *списком атрибутов* компонента и их значениями (слева), раскрывающийся *список графиков* и *список моделей* (справа). Выбирая в списке атрибутов параметр компонента, можно его редактировать в строке *текущего атрибута*, при необходимости используя кнопку *открытия окна ввода* , а затем и зуммирования изображения.

Список графиков позволяет выбрать график, строящийся при нажатии кнопки *Plot*. Так, на рисунке 4.2 выбран график построения семейства выходных характеристик полевого транзистора $I_d(V_{ds})$.

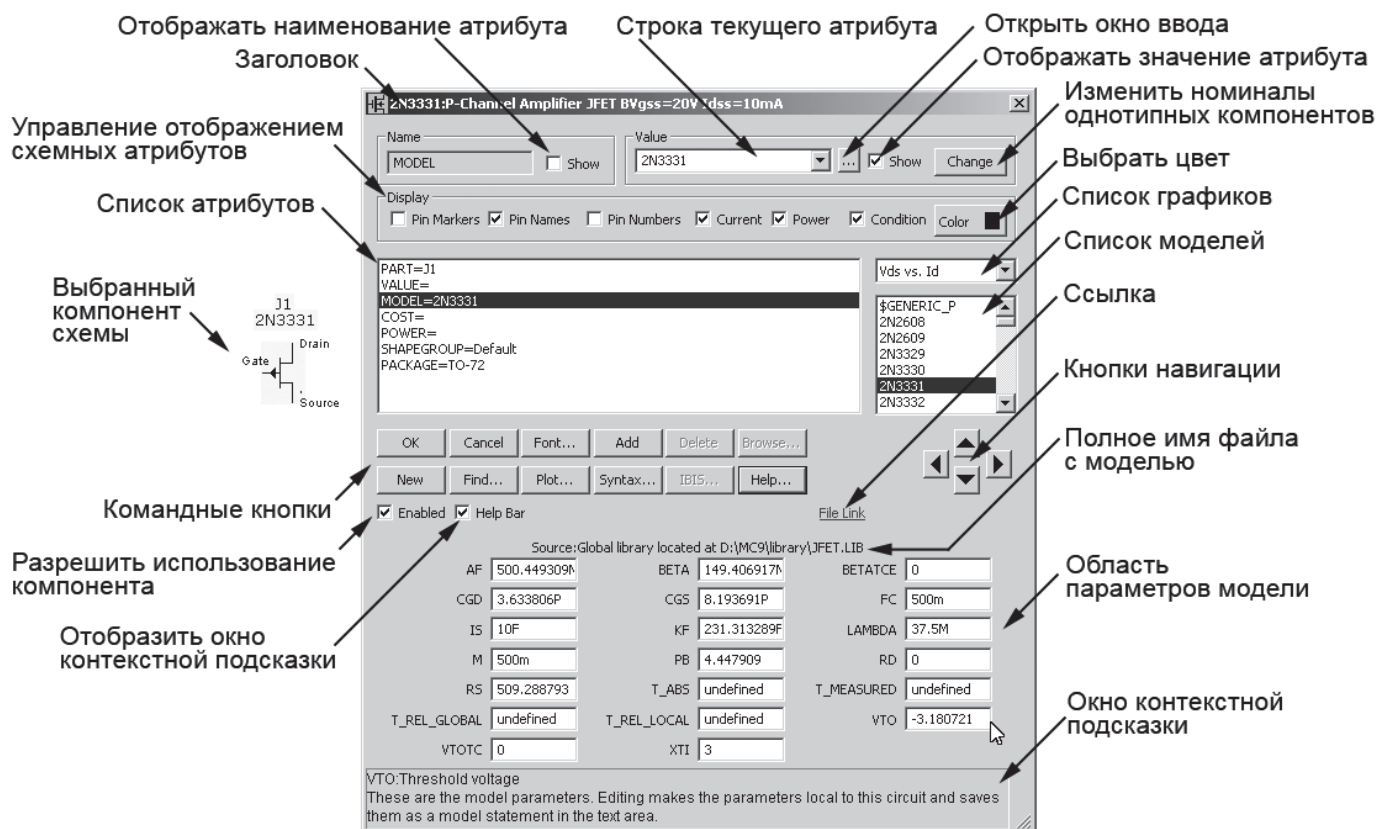


Рис. 4.2. Структура окна атрибутов компонента

Ниже располагаются командные кнопки и кнопки навигации:

- *OK* — закрыть окно атрибутов с сохранением сделанных изменений;
- *Cancel* — закрыть окно без сохранения изменений;
- *Font* — изменить шрифтовые параметры отображения выбранного атрибута;
- *Add* — добавить новый атрибут;
- *Delete* — удалить выбранный атрибут. Можно удалять только новые, добавленные пользователем, атрибуты;
- *Browse* — выбор файла на ПК. Кнопка активна, если компонент имеет атрибут *FILE* (например, схемная макромодель) и этот атрибут выбран в списке атрибутов;
- *New* — Если в списке атрибутов выбран атрибут *MODEL*, создается новая локальная модель с умолчательными параметрами, имя которой можно отредактировать. Создать новую локальную модель с умолчательными параметрами можно просто набрав в строке *MODEL* имя, которого нет в подключаемых библиотеках;

- *Find* — поиск заданного параметра модели в области модельных параметров;
- *Plot* — построение графика, выбранного в списке графиков. В списке в зависимости от типа компонента может быть 0–4 позиции. Для SPICE-подсхем и схемных макромоделей графики не строятся, для биполярных транзисторов имеется 4 графика, для источников сигнала — 1. Если график выведен, то изменение параметров компонента приводит к изменению графика, выведенного в соседнем окне;
- *Syntax* — показывает синтаксис описания соответствующего примитива из файла подсказки;
- *IBIS* — вызов IBIS-транслятора. Активна в том случае если компонент является IBIS-компонентом. С его помощью можно редактировать и выбирать IBIS-модели интерфейсов ввода-вывода;
- *Combinations* (см. рис. 3.5, 4.1) — подбор для данного пассивного компонента последовательно-параллельной комбинации из соответствующих пассивных компонентов со стандартными номиналами. Кнопка имеется в окнах задания параметров резисторов, конденсаторов, катушек.
- *Help* — помощь по диалоговому окну атрибутов компонента;
- Кнопки навигации   — навигация в соответствующем направлении по компонентам аналогичного типа.
- Кнопки навигации   — навигация по компонентам других типов.

Ниже командных кнопок находятся флаги *разрешения использования компонента* в схеме (*Enabled*) и *отображения окна контекстной подсказки* (*Help Bar*).

Флаг *Enabled* показывает текущее состояние компонента. Если он установлен, то компонент включается в схему и используется при выполнении различных видов анализа, при формировании перечня элементов (Bill of Materials), списка соединений. В противном случае компонент исключается из соответствующих операций. Любой объект принципиальной схемы может быть разрешен или запрещен — компонент, текст, проводник, выделенный блок. Установка/сброс данного флага в окне атрибутов эквивалентны выполнению команд безусловного разрешения/запрета  / .

При нажатии на *ссылку* (*File Link*) производится заданная или умолчательная ссылочная операция (см. пункт 3.3.7).

Ниже ссылки располагается строка с *полным именем файла*, содержащего определение модели компонента.

Далее идет *область параметров модели*, которая имеется только у компонентов, базирующихся на встроенных в Micro-Cap модельных примитивах (Resistor, Inductor, Capacitor, npn, pnp, njfet, pjfet и пр.). При редактировании параметров модели автоматически создается модельная директива .MODEL с измененными параметрами модели, которая помещается на страницу встроенных в схему моделей *Models* (см. рис. 4.1). При этом параметры модели в библиотеке Micro-Cap не меняются, а схемный файл использует эту

измененную копию (модели, помещенные в окно *Models* имеют больший приоритет по сравнению с одноименными библиотечными моделями).

При описании принципиальных схем также используются числа, переменные, математические выражения и текстовые директивы.

4.2. Схемный текст

Для ввода текста необходимо выбрать соответствующий режим, нажав пиктограмму  (**Ctrl+T**). Клик мыши на поле схемы приводит к открытию диалогового окна (рис. 4.3), в котором обычным образом набирается текст. После окончания ввода следует нажать кнопку ОК. Набранный текст появится в заданном месте на поле схемы. Для редактирования уже имеющегося схемного текста следует сделать двойной клик по нему в режиме Select . После этого откроется диалоговое окно с текстом, который можно редактировать (рис. 4.3).

В диалоговом окне Grid Text на закладке Text имеются следующие опции:

- *Enable* — разрешение схемного текста, который показывается в окне;
- *Formula* — установка этой опции заставляет интерпретировать текст, ограниченный символами, указанными в позиции *delimiter*, как математическую формулу и производить по ней вычисления. При этом вместо текста формулы на поле схемы выводится результат вычислений.
- *Delimiter* — символы набранные в этой позиции, предписывают программе интерпретировать их в качестве ограничителя математической формулы. Могут быть использованы любые символы, однако для удобства восприятия рекомендуется использовать квадратные [] или фигурные { } скобки.

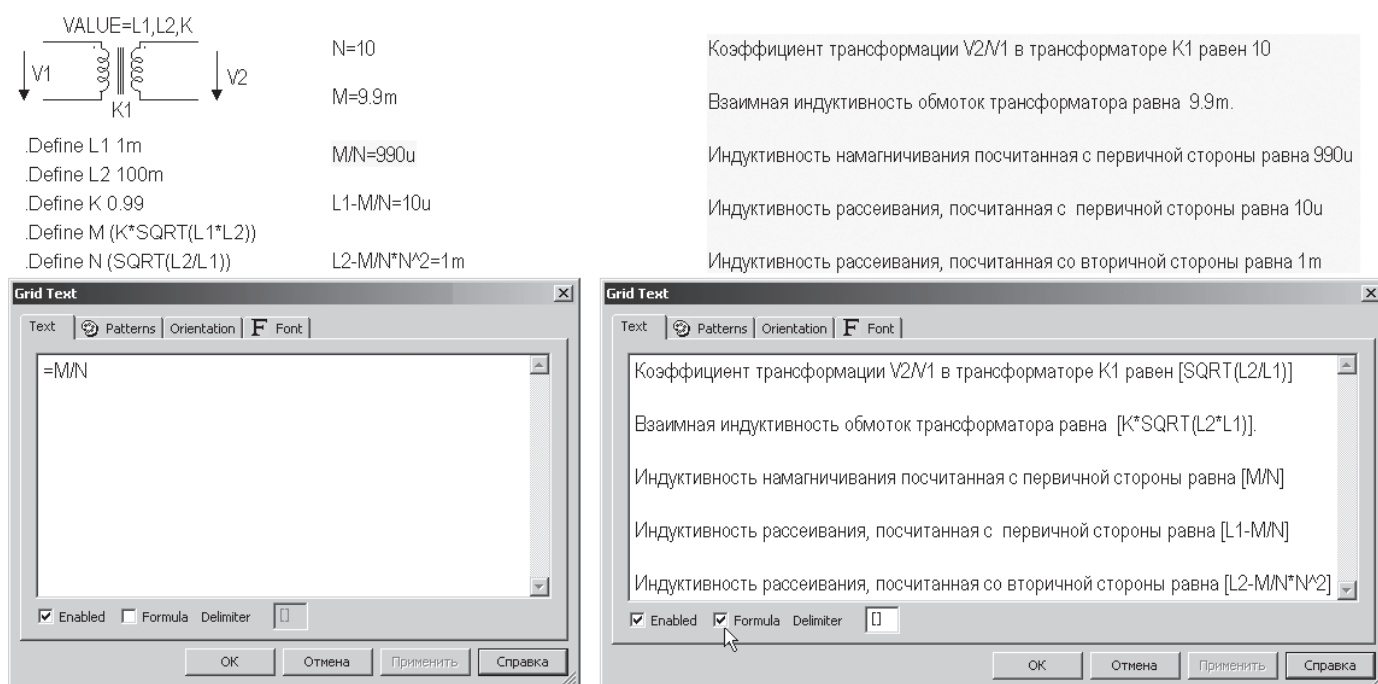


Рис. 4.3. Использование схемного текста для вычислений

Использование схемного текста в программе Micro-Cap имеет особенности. С его помощью можно осуществлять промежуточные вычисления пара-

метров электрических цепей, не прибегая при этом к помощи внешних программных пакетов, а полученные результаты сразу отображать на поле схемы. На рис. 4.3 показаны 2 возможных режима вычислений по формулам в схемном тексте. Параметры трансформатора заданы символьными переменными L1, L2, K, определенными тремя операторами .Define на поле схемы.

Первый режим вычислений (рис. 4.3, а) организуется так же, как и в предыдущих версиях программы (MC8). Набор в окне *Grid Text* начинается со знака равенства «=», за которым следует текст формулы. При этом флаг *Formula* не устанавливается и другого текста, помимо единственной формулы, в данном фрагменте присутствовать не должно. Результат вычислений показан на рис. 4.3, а вверху — $M/N=990\Omega$. Для вычислений по пяти формулам (как в приведенном примере) они должны быть набраны в пяти отдельных текстовых фрагментах (на рис. 4.3, а приведено окно только одного из них).

Второй режим вычислений организуется путем установки флага *Formula*, определения ограничителя математической формулы *Delimiter* и последующего ввода необходимого текста и формул (рис. 4.3, б). Этот режим более гибкий — он дает возможность в одном текстовом фрагменте сочетать сразу несколько текстовых сообщений и вычислений по формулам.

4.3. Числа

Числовые значения параметров компонентов представляются в виде:

- *действительных чисел с фиксированным десятичным знаком* (обратите внимание, что в качестве десятичного знака в программе Micro-Cap используется точка). Например, сопротивление 2,5 кОм, записывается как 2500 или 2.5k, а емкость 1 мкФ как 0.000001;
- *действительных чисел с плавающей точкой*, например, емкость 1.5 мкФ может быть записана как 1.5E-6;
- *действительных чисел с плавающей точкой в инженерной интерпретации*, согласно которой различные степени десяти обозначаются буквами (см. табл. 4.1).

Для экономии места на осях X, Y графиков результатов моделирования малая буква "m" обозначает 10^{-3} , большая буква "M" — 10^6 (вместо MEGA). Во всех остальных случаях большие и малые буквы не различаются.

Например, сопротивление 1,5 МОм может быть записано как 1.5MEG, 1.5meg или 1500K, емкость 1 мкФ как 1U или 1uF. В последнем примере показано, что для большей наглядности после стандартных буквенных обозначений **допускается помещать любые символы, которые при интерпретации чисел не будут приниматься во внимание. Пробелы между числом и буквенным суффиксом не допускаются!**

4.4. Переменные

В программе Micro-Cap ряд констант и переменных имеют стандартные значения:

T — время в секундах;

F — частота в герцах;

E — EXP(1)= 2.718281828459045;

PI — число $\pi=3.141592653589793$;

J — мнимая единица, корень квадратный из -1 ;

S — комплексная переменная, используемая при анализе аналоговых устройств, чаще всего под этой переменной понимается комплексная частота $S=j \cdot 2\pi f$ (в отечественной литературе по курсам «Основы теории цепей» и «Математический анализ» анализа она обозначается p);

Z — комплексная переменная, используемая при анализе дискретных устройств (цифровых фильтров). $Z = \exp\left(\frac{j \cdot 2\pi \cdot F}{F_{clock}}\right)$, где F_{clock} — частота дискретизации.

TEMP — температура компонентов в градусах Цельсия;

VT — температурный потенциал **p-n**-перехода, равный $1,3806226 \cdot 10^{-23} \cdot (273,15 + \text{TEMP}) / (1,6021918 \cdot 10^{-19})$; при $\text{TEMP}=27^\circ\text{C}$ $\text{VT}=25,86419\text{мВ}$;

CASE — номер реализации случайного процесса (номер запуска) анализа Monte Carlo.

GMIN — минимальная проводимость ветви, задаваемая в диалоговом окне **Options>Global Settings**;

TMIN — начальный момент времени расчета переходных процессов;

TMAX — конечный момент времени расчета переходных процессов;

DT — шаг по времени в режиме анализа переходных процессов;

DCINPUT1 — первая входная переменная (Variable 1) в расчете передаточных характеристик по постоянному току (DC analysis).

DCMIN — начальное значение переменной Variable1 в DC-анализе;

DCMAX — конечное значение переменной Variable1 в DC-анализе;

FMIN — начальная частота расчета частотных характеристик;

FMAX — конечная частота расчета частотных характеристик;

INOISE — шум, приведенный ко входу в режиме анализа частотных характеристик (AC);

ONoise — шум, приведенный к выходу в режиме анализа частотных характеристик (AC);

ANALYSIS — текстовая переменная, указывающая вид проводимого анализа. Она может принимать следующие значения:

- **_TRANSIENT** (в режиме анализа переходных процессов)
- **_DC** (в режиме анализа характеристик на постоянном токе)
- **_DYNAMICAC** (в динамическом AC-анализе)
- **_DYNAMICDC** (в динамическом DC-анализе)
- **_TF** (в режиме анализа малосигнальных передаточных функций на постоянном токе)
- **_SENS** (в режиме анализа чувствительностей на постоянном токе)
- **_DISTORTION** (в режиме анализа нелинейных искажений)

Переменные глобальных установок — любая переменная, указанная в окне **Global Settings**, например ABSTOL, RELTOL, GMIN.

Суммарные мощности и энергии схемы

PGT — общая мощность, генерируемая источниками энергии схемы;

PST — общая мощность, запасаемая в индуктивных и емкостных компонентах схемы;

PDT — общая рассеиваемая в схеме мощность;

EGT — полная энергия, генерируемая источниками схемы;

EST — полная энергия, запасаемая в индуктивных и емкостных компонентах схемы;

EDT — полная энергия, рассеиваемая в схеме;

Номера узлов, присваиваемые программой Micro-Cap автоматически, представляют собой целые числа, например 0, 2, 25. Кроме того, пользова-

тель по команде **Options>Mode>Text** (, **Ctrl+T**) может присвоить любому узлу имя в виде текстовой алфавитно-цифровой переменной, начинающейся с буквы или символа "_" и содержащей не более 50 символов латинского алфавита, например A1, Out, Reset, Set, J1, K1, In.

В математических выражениях могут использоваться следующие переменные (см. табл. 4.2):

Таблица 4.2. Переменные, используемые в программе Micro-Cap

Переменная	Описание
D(A)	Логическое состояние цифрового узла A или потенциал аналогового узла A
V(A)	Напряжение на узле A (B) или цифровое состояние узла A (напряжение измеряется относительно узла "земли", которой программа присваивает номер 0)
V(A,B)	Разность потенциалов между узлами A и B (B)
V(D1)	Напряжение между выводами двухвыводного компонента D1 (B)
I(D1)	Ток через двухвыводной компонент D1 (A)
I(A,B)	Ток через ветвь между узлами A и B (между этими узлами должна быть включена единственная ветвь) (A)
IR(Q1)	Ток, втекающий в вывод R компонента Q1 с количеством выводов больше 2 (A)
VRS(Q1)	Напряжение между выводами R и S компонента Q1 с количеством выводов больше 2 (B)
CRS(Q1)	Емкость между выводами R и S компонента Q1 с количеством выводов больше 2 (Ф)
QRS(Q1)	Заряд емкости между выводами R и S компонента Q1 с количеством выводов больше 2 (Кл)
R(R1)	Сопротивление резистора R1 (Ом)
C(X1)	Емкость конденсатора или диода X1 (Ф)
Q(X1)	Заряд конденсатора или диода X1 (Кл)
L(L1)	Индуктивность катушки индуктивности L1 (Гн)
X(L1)	Магнитный поток в катушке индуктивности L1 (Вб)
B(L1)	Магнитная индукция в сердечнике катушки L1 (Гс)
BSI(L1)	Магнитная индукция в сердечнике катушки L1 (Тл)
H(L1)	Напряженность магнитного поля в сердечнике катушки L1 (Э)
HSI(L1)	Напряженность магнитного поля в сердечнике катушки L1 (А/м)
T	Время
F	Частота

Окончание табл. 4.2

Переменная	Описание
S	Комплексная частота, равная $2\pi \cdot F \cdot j$
ONoise	Корень квадратный из спектральной плотности напряжения шума на выходе схемы
INoise	Корень квадратный из спектральной плотности напряжения шума на входе схемы, равный $ONoise / (\text{коэффициент передачи по напряжению})$
EG(V1)	Энергия, генерируемая источником V1
ES(Q1)	Энергия, накапливаемая в компоненте Q1
ED(D1)	Энергия, рассеиваемая компонентом D1
PG(V1)	Мощность, генерируемая источником V1
PS(X1)	Реактивная мощность, накапливаемая в компоненте X1
PD(D1)	Мощность, рассеиваемая компонентом D1

В этом перечне символы A и B обозначают номера узлов схемы, D1 — имя компонента с двумя выводами или управляемого источника, Q1 — имя любого активного устройства или линии передачи. Символы R и S заменяются аббревиатурами выводов устройств согласно таблице 4.3.

Таблица 4.3. Аббревиатуры выводов электронных компонентов

Устройство	Аббревиатуры выводов	Названия выводов
МОП-транзистор (MOSFET)	D, G, S, B	Сток, затвор, исток, подложка
Полевой транзистор (JFET)	D, G, S	Сток, затвор, исток
Арсенид-галлиевый полевой транзистор (GaAsFET)	D, G, S	Сток, затвор, исток
Биполярный транзистор (BJT)	B, E, C, S	База, эмиттер, коллектор, подложка
Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT)	C, G, E	Коллектор, затвор, эмиттер
Линия передачи (Trans. Line)	AP, AM, BP, BM	Вход+, вход–, выход+, выход–

Отдельно следует сказать о возможности использования шаблонов в полях *Y Expression* окон *Analysis Limits* для построения множества графиков однотипных переменных. В качестве обозначения шаблона, на место которого может быть поставлена любая символьная последовательность используется символ “@”, а на место которого могут быть поставлены любые номера узлов — “@@”. При клике правой клавишей мыши на имени шаблона в поле *Y Expression* активизируется команда *Expand Lists*. При ее выборе шаблон расширяется, т.е. окно *Analysis Limits* изменяется и в нем перечисляются уже все графики, заданные с помощью шаблона, для которого выполнена команда.

Примеры шаблонов для задания графиков в полях *Y Expressions*

D([@@]) — графики состояний всех цифровых узлов и потенциалов всех аналоговых узлов.

V([@@]) — графики потенциалов всех аналоговых узлов и состояний всех цифровых узлов.

$V([A@@])$ — графики потенциалов всех аналоговых узлов, текстовое наименование которых начинается с буквы А.

$V([@])$ — графики напряжений на всех компонентах схемы.

$I([@])$ — токи всех компонентов схемы.

$V([R@])$ — графики напряжений на всех компонентах схемы, позиционное обозначение которых начинается с буквы «R».

$I([L@])$ — токи через все компоненты, позиционное обозначение которых начинается с буквы «L»: $I(L1)$, $I(LAB)$, ..., $I(Lall)$.

$V([C1,C2,C3])$ — графики напряжений на конденсаторах C1, C2, C3: $V(C1)$, $V(C2)$, $V(C3)$.

$V(L[1:3])$ — графики напряжений на катушках L1, L2, L3: $V(L1)$, $V(L2)$, $V(L3)$.

$V[C,B]([@])$ — потенциалы коллекторов и баз всех транзисторов: $VC(Q1)$, $VC(Q2)$, ... $VB(Q1)$, $VB(Q2)$...

$[V,C,I,Q,X] ([C@,L@])$ — графики напряжений, емкостей, токов, зарядов, магнитных потоков всех компонентов, позиционное обозначение которых начинается с буквы C или L.

4.5. Параметры моделей, внутренние узлы и компоненты схемных макро и подсхем

Параметры моделей компонентов можно вывести в текстовой форме или на графики, используя ссылки на них в виде: **позиционное_обозначение_компонента.имя_параметра**

Приведем несколько примеров:

Q1.bf — коэффициент передачи тока базы BF биполярного транзистора Q1;

M1.GAMMA — параметр GAMMA МОП-транзистора M1;

J1.VTO — пороговое напряжение VTO полевого транзистора J1.

В связи с тем, что в процессе моделирования параметры моделей компонентов не изменяются, их графики представляют собой прямые линии. Тем не менее, строить их имеет смысл при выполнении вариации параметров или статистических испытаниях по методу Монте-Карло, чтобы убедиться, что изменения параметров производятся в правильном диапазоне.

Внутренние узлы и компоненты схемных макро и подсхем имеют похожий синтаксис при использовании их в математических выражениях. Например, для задания 5 узла подсхемы X13 следует записать X13.5.

Примеры:

$V(X13.5)$ — потенциал узла 5 подсхемы X13;

$I(CHOPPER4.DSTUB)$ — ток через диод DSTUB SPICE-подсхемы CHOPPER4;

QBE(AMP1.Q3) — заряд емкости база-эмиттерного перехода биполярного транзистора Q3 в схемном макроопределении AMP1;

$V(X1.X2.X3.10)$ — напряжение в 10-ом узле макроопределения X3, которое входит в макроопределение X2. Макроопределение X2 в свою очередь является макроопределением, вложенным в макроопределение X1.

4.6. Примеры выражений, используемых в Micro-Cap

$I(R1)$ — ток через резистор R1;
 $R(Rload)$ — сопротивление резистора Rload;
 $IC(Q1)$ — ток коллектора биполярного транзистора Q1;
 $VBE(Q1)$ — напряжение между базой и эмиттером биполярного транзистора Q1;
 $VGS(M1)$ — напряжение затвор-исток МДП-транзистора M1;
 $ID(J1)$ — ток стока полевого транзистора J1;
 $D(A)$ — логическое состояние цифрового узла A или потенциал аналогового узла A;
 $V(B)$ — потенциал аналогового узла B относительно земли или цифровое состояние цифрового узла B;
 $HEX(A1,A2,A3,A4)$ — логические состояния цифровых узлов A1, A2, A3, A4, представленные шестнадцатеричным числом (в данном случае цифрой в диапазоне 0–F);
 $BIN(A1,A2,A3,A4)$ — логические состояния цифровых узлов A1, A2, A3, A4, представленные числом в двоичном коде;
 $OCT(A1,A2,A3)$ — логические состояния цифровых узлов A1, A2, A3, представленные восьмеричным числом, в данном случае цифрой в диапазоне 0-7;
 $DEC(A1,A2,A3,A4)$ — логические состояния цифровых узлов A1, A2, A3, A4, представленные десятичным числом;
 $C(C2)$ — емкость конденсатора C2;
 $L(L1)$ — индуктивность катушки L1;
 $I(V1)$ — ток через источник сигнала V1
 $PD(Q1)$ — мощность, рассеиваемая транзистором Q1;
 $ES(C1)$ — энергия, накопленная конденсатором C1;
 $V(F1)$ — напряжение на зажимах функционального источника сигнала F1;
 $V(X1.MID)$ — потенциал узла MID в подсхеме X1;
 $IB(G3.Q1)$ — ток базы биполярного транзистора Q1 в макроопределении G3;
 $V(G1.G2.N)$ — потенциал узла N макроопределения G2, которое в свою очередь входит в макроопределение G1.

4.7. Математические выражения и функции

В операторах присваивания директивы .DEFINE и при указании переменных, выводимых на графиках при проведении моделирования, возможно использование следующих математических операций.

Соглашения об используемых символах при описании математических операций:

n, m — целые числа.

dt — шаг по времени при использовании цифровой обработки сигнала (функций DSP).

x, y, u — действительные числа и выражения. Например, 26.5, T при анализе переходных процессов, V(10) — при DC анализе.

z — комплексная величина $z=x+j\cdot y$. Например, напряжение V(1) при AC анализе.

S — спектр сигнала, вычисленный с помощью одной из DSP-функций.

D1, D2 — состояния цифровых узлов.

4.7.1. Арифметические операции

+ — сложение.

– — вычитание.

***** — умножение.

/ — деление.

DIV — целочисленное деление.

MOD — остаток целочисленного деления.

4.7.2. Операции с логическими переменными

Операции с логическими переменными — это операции с состояниями цифровых узлов схемы.

D(A) — логическое состояние цифрового узла A.

HEX(A,B,C,D) — значение состояний цифровых узлов A, B, C, D в шестнадцатеричной системе.

BIN(A,B,C,D) — значение состояний цифровых узлов A, B, C, D в двоичной системе.

DEC(A,B,C,D) — значение состояний цифровых узлов A, B, C, D в десятичной системе.

OCT(A,B,C,D) — значение состояний цифровых узлов A, B, C, D в восьмеричной системе.

+ — сумма двух двоичных, восьмеричных, шестнадцатеричных или десятичных чисел.

– — разность двух двоичных, восьмеричных, шестнадцатеричных или десятичных чисел.

DIV — целочисленное деление двух двоичных, восьмеричных, шестнадцатеричных или десятичных чисел.

MOD — остаток после целочисленного деления двух двоичных, восьмеричных, шестнадцатеричных или десятичных чисел.

& — операция логического И состояний двух цифровых узлов.

| — операция логического ИЛИ состояний двух цифровых узлов.

^ — операция логического исключающего ИЛИ (XOR) состояний двух цифровых узлов.

~ — операция логического отрицания (инверсии) состояния цифрового узла.

4.7.3. Трансцендентные функции

В Micro-Cap используются тригонометрические, показательные, логарифмические функции от действительных и комплексных величин (x — действительная, $z=x+j\cdot y$ — комплексная величина).

Sin(z) — синус, z в радианах.

Cos(z) — косинус, z в радианах.

Tan(z) — тангенс, z в радианах.

Cot(z) — котангенс z .

Sec(z) — секанс z .

Cosec(z) — косеканс z .

Asin(z) — арксинус.

Acos(z) — арккосинус.

Atn(z), **Arctan(z)** или **Atan(z)** — арктангенс.

Atan2(y,x) = **Atn(y/x)**.

Acot(z) — арккотангенс.

Asec(z) — арксеканс.

Acsc(z) — арккосеканс.

Sinh(z) — гиперболический синус.

Cosh(z) — гиперболический косинус.

Tanh(z) — гиперболический тангенс.

Coth(z) — гиперболический котангенс.

Sech(z) — гиперболический секанс.

Csch(z) — гиперболический косеканс.

Asinh(z) — гиперболический арксинус.

Acosh(z) — гиперболический арккосинус.

Atanh(z) — гиперболический арктангенс.

Acoth(z) — гиперболический арккотангенс.

Asech(z) — гиперболический арксеканс.

Acsch(z) — гиперболический арккосеканс.

LN(z) — натуральный логарифм комплексного числа:

$$\log_e(|x + j \cdot y|) + j \cdot \tan^{-1}(y/x).$$

LOG(z) — десятичный логарифм комплексного числа:

$$\log_{10}(|x + j \cdot y|) + j \cdot \frac{\tan^{-1}(y/x)}{\log_e 10}.$$

LOG10(z)=LOG(z).

EXP(z) — экспоненциальная функция от комплексного аргумента:

$$e^x \cdot (\cos(y) + j \cdot \sin(y)).$$

EXPL(x,max) — экспоненциальная функция с ограничением:

EXPL(x,max)=exp(x), если $x < \max$

EXPL(x,max)=exp(max)*(x+1-max)

EXPLP(x,max) — производная функции EXPL(x,max) по x

POW(z,x) — степенная функция, вычисляемая как $z^x = e^{x \cdot \ln(z)}$. Например, POW(-1+j,2)=-2j, POW(2,2)=4.

^ или ******. То же, что и POW(z,x). $z^x = z^{**}x = \text{POW}(z,x)$. Например, (-1+j)**2 = -2j, j^2 = -1.

PWR(y,x) — степенная функция действительных аргументов, равная y^x . Например, PWR(-2,3) = -8, PWR(-2,2) = 4.

PWRS(y,x) — степенная функция, вычисляемая в зависимости от знака основания. Если $y < 0$ PWRS(y,x)=-|y|^x, если $y > 0$ PWRS(y,x)=|y|^x. Например, PWRS(-2,2)=-4, PWRS(2,2)=4.

DB(z) — 20*LOG(|z|).

RE(z) — действительная часть комплексной величины z.

IM(z) — мнимая часть комплексной величины z. **IMAG()** и **IMG()** работают в точности так же.

MAG(z) — модуль комплексной величины z. **M()** делает то же самое.

PH(z) — аргумент (угол) комплексной величины z в градусах. **PHASE()** и **P()** работают аналогично.

GD(z) — групповая задержка (производная фазового сдвига по частоте) $\text{Group delay} = \partial(-\text{Phase}(z) \text{ в радианах}) / \partial \omega = \partial(-\text{Phase}(z) \text{ в радианах}) / \partial (2\pi \cdot f)$.

4.7.4. Булевы операции и операции отношения

Стандартные булевы операторы

Булево выражение истинно **TRUE** (значение 1.0) если оно больше нуля, в противном случае оно ложно **FALSE** и по величине равно 0.0. Например, если $V(1)=.00001$, то $V(1)$ в булевском выражении принимается равным **TRUE** или 1.0.

AND — операция логического умножения (И).

NAND — операция логического умножения с последующей инверсией И-НЕ.

OR — операция логического сложения (ИЛИ).

NOR — операция логического сложения с последующим отрицанием результата (ИЛИ-НЕ).

XOR — логическая операция «Исключающее ИЛИ».

NOT — операция логического отрицания.

< — меньше.

> — больше.

<= — меньше или равно.

>= — больше или равно;

!= или **<>** — не равно;

== — равно.

SPICE3 булевы операторы

В булевых операторах этого типа $A=VONE$ если $V(A) \geq VTHRESH$, в противном случае $A=VZERO$. Значения параметров **VTHRESH**, **VONE** и **VZERO** берутся из окна *Global Settings*.

& — аналогично **AND**

| — аналогично **OR**

~ — аналогично **NOT**

4.7.5. Предельные и условные операторы

MIN(z1,z2) — минимальные значения действительной и мнимой частей комплексных чисел z1 и z2.

MAX(z1,z2) — максимальные значения действительной и мнимой частей комплексных чисел z1 и z2.

LIMIT(z,z1,z2) — возвращается комплексная величина z, если ее действительная часть находится в пределах диапазона от **RE(z1)** до **RE(z2)**, а мнимая часть — в диапазоне от **IM(z1)** до **IM(z2)**.

IF(b,z1,z2) — если логическое выражение b истинно, функция возвращает z1, в противном случае — возвращается z2.

4.7.6. Операторы обработки сигналов

Здесь приняты следующие обозначения: u , v — действительные сигналы при анализе переходных процессов, S — спектры сигналов. В Micro-Cap используются следующие операторы обработки сигналов в виде FFT-функций:

HARM(u , bw) — расчет гармоник сигнала u , bw — необязательное значение ширины полосы.

HARMN(u , f) — аналогична функции HARM, но найденные величины гармоник нормируются по гармонике с частотой f . При отсутствии необязательного параметра f нормировка производится по 1-ой гармонике (только в MC10).

THD(S , F) — коэффициент гармоник спектра S , в процентах относительно уровня составляющей на частоте F ; если частота F не указана, то относительно составляющей на частоте первой гармоники, равной $1/T_{max}$ в анализе переходных процессов.

IHD(S , F) — коэффициент гармонических искажений отдельных составляющих спектра S , в процентах относительно уровня составляющей на частоте F ; если частота F не указана, то относительно составляющей на частоте первой гармоники, равной $1/T_{max}$ в Transient-анализе.

FFT(u) — прямое преобразование Фурье дискретных отсчетов сигнала $u(t)$. Отличается от функции HARM множителем $N/2$ для гармоник с первой до N -й и множителем N для нулевой гармоники, где N — количество дискретных отсчетов входного сигнала $u(t)$.

FFTS(u , bw) — прямое дискретное преобразование Фурье, промасштабированное таким образом, что $RE(FFTS(u))$ вычисляет последовательность косинусных коэффициентов ряда, а $IM(FFTS(u))$ вычисляет последовательность синусных коэффициентов ряда. Полоса частот bw — необязательный параметр. Подобна функции HARM(u), но в отличие от HARM(u) вычисляет комплексные коэффициенты ряда (или амплитудный и фазовый спектры).

FS(u , $[[N1],N2]$) — частичное разложение в ряд Фурье от гармоники с номером $N1$ до гармоники с номером $N2$. $N1$ по умолчанию принимается равным 0 (постоянная составляющая), а $N2$ — числу отсчетов быстрого преобразования Фурье, поделенному на 2 ((FFT Number of Points)/2).

RES(u , $[[n1],n2]$) — остаточное разложение в ряд Фурье, равное анализируемой функции $u(t)$ минус гармоники ряда Фурье начиная от гармоники с номером $n1$ и кончая гармоникой с номером $n2$. $N1$ по умолчанию принимается равным 0 (постоянная составляющая), а $N2$ — 1, так что $RES(u) = RES(u,0,1)$, и, следовательно, в сущности, показывает гармонические составляющие спектра с номерами больше или равными двум.

IFT(S) — обратное преобразование Фурье спектра S .

IFTS(S) — масштабированное обратное преобразование Фурье. Для него выполняется $IFTS(FFTS(u)) = u$.

CONJ(S) — комплексно сопряженный спектр для спектра S .

CS(u , v) — взаимный спектр сигналов u и v , равный $CONJ(FFTS(v)) * FFT(u) * dt * dt$.

AS(u) — автоспектр сигнала $u(t)$, равный $CS(u,u)$.

CC(u , v) — взаимная корреляционная функция сигналов $u(t)$ и $v(t)$, равная $IFT(CS(u,v))/dt$.

AC(u) — автокорреляционная функция сигнала $u(t)$, равная $IFT(AS(u))/dt$.

COH(u,v) — нормированная корреляционная функция сигналов $u(t)$ и $v(t)$, равная $CC(u,v)/\sqrt{AC(u(0))*AC(v(0))}$.

REAL(S) — действительная часть спектра S , рассчитанного с помощью FFT.

IMAG(S) — мнимая часть спектра S , рассчитанного с помощью FFT.

MAG(S) — амплитудный спектр S , рассчитанный с помощью FFT.

PHASE(S) — фазовый спектр S , рассчитанный с помощью FFT.

4.7.7. Операторы численного интегрирования и дифференцирования

В Micro-Cap используются операторы численного интегрирования и дифференцирования (x, y, u — действительные переменные) нескольких типов.

Относительно произвольной указанной переменной

DER(u,x) — производная переменной u по переменной x .

SUM(y,x[,start]) — текущий интеграл от переменной y по переменной x ; начальное значение x равно $start$.

Относительно независимой переменной конкретного вида анализа

SD(y[,start]) — текущий интеграл от переменной y по времени T при анализе переходных процессов; по частоте F при AC-анализе или по переменной $DCINPUT1$ при DC-анализе; начальное значение независимой переменной равно $start$ (необязательно указывать). Если $start$ опущен, то начальное значение независимой переменной принимается равным $TMIN$, $FMIN$, $DCMIN$ в зависимости от вида анализа.

DD(y) — производная y по времени T при анализе переходных процессов, по частоте F при анализе частотных характеристик AC и по переменной $DCINPUT1$ при анализе по постоянному току DC.

RMS(y[,start]) — текущее среднеквадратичное значение величины y при интегрировании по времени T при анализе переходных процессов (эквива-

лентно $\sqrt{\frac{1}{t} \cdot \int_{t_{start}}^t y^2(t) \cdot dt}$); по частоте F при анализе частотных характеристик

AC и по переменной $DCINPUT1$ при анализе по постоянному току DC. Начальное значение независимой переменной равно значению $start$.

AVG(y[,start]) — текущее среднее значение переменной y при интегрировании по времени T при анализе переходных процессов (эквивалентно

$\frac{1}{t} \cdot \int_{t_{start}}^t y(t) \cdot dt$); по частоте F при анализе частотных характеристик AC; по пе-

ременной $DCINPUT1$ при анализе по постоянному току DC. Начальное значение независимой переменной равно значению $start$.

Относительно времени T

SDT(y) — текущий интеграл процесса $y(t)$ относительно времени T , начиная от $T=Tmin$.

DDT(y) — производная процесса $y(t)$ относительно времени T .

DEL(y) — приращение процесса $y(t)$ относительно предыдущего отсчета времени при расчете переходных процессов. Производная рассчитывается как отношение двух таких операторов, например производная dy/dt равна $DEL(y)/DEL(t)$.

LAST(y,N) — N-ая предшествующая точка расчета процесса y . $N=1$ возвращает значение y в последней точке расчета, $N=2$ приводит к возврату значения y в предпоследней точке расчета и т.д.

4.7.8. Специальные функции

ABS(z) — абсолютное значение z , равное $(|z|^2)^{0.5}$.

BUFFER("W") — импортирует кривую "W" из буфера графиков.

CURVEY("F", "W") — импортирует значения Y кривой W из файла пользователя F . Файл с координатами точек графика может быть предварительно сохранен с использованием команд секции *Save Curves* диалогового окна *Plot Properties*.

CURVEX("F", "W") — импортирует значения X кривой W из файла F .

DELAY(x,d) — возвращает выражение x , задержанное на d секунд.

DIFA(u,v[,d]) — сравнение значений двух аналоговых кривых u и v во всех точках анализа при расчете переходных процессов. DIFA возвращает значение 1, если во всех точках абсолютное значение разности функций больше величины d , в противном случае возвращается 0. Параметр d необязательный, по умолчанию полагается $d=0$.

DIFD(u,v[,d]) — сравнение значений двух логических сигналов u и v во всех дискретных точках при расчете переходных процессов. DIFD присваивается значение 1, если во всех точках значения функций отличаются друг от друга, в противном случае присваивается 0. В течение первых d секунд после начала расчета переходных процессов сравнение не проводится. Параметр d необязательный, по умолчанию полагается $d=0$.

FACT(u) — факториал целой части от величины u .

u! — факториал целочисленной величины u . При использовании символа «!», u должна быть символьной переменной или константой.

IMPORT(f,y) — импорт кривой y из файла f . Текстовый файл должен иметь формат выходного файла SPICE или Micro-Cap (.tno, .ano, .dno); в него помещается таблица значений переменных, в качестве которых могут выступать время (T), частота (F), напряжение источника напряжения [V(имя источника)], ток источника тока [I(имя источника)] и значение выражения y . Функция Y должна быть обозначена точно так же, как в указанном файле и содержать четное количество скобок.

IMPULSE(y) — импульсная функция от аргумента y единичной площади. Представляет собой импульс с нулевой длительностью фронтов, начинающий действовать в момент времени $T=0$, амплитудой y , и длительностью $1/y$ (т.е. площадь импульса всегда равна 1). См. пример *impulse_source.cir* из каталога *Components\Sources*.

INT(x) — функция усечения до меньшего целого, например $INT(2.7)=2$ (только в MC10).

NINT(x) — функция округления до большего целого, например $INT(2.7)=3$ (только в MC10).

JN(n,z[m]) — функция Бесселя n-го порядка первого рода комплексного аргумента z, полученная суммированием первых *m* членов ряда; по умолчанию *m*=10.

J0(z) — функция Бесселя нулевого порядка первого рода комплексного аргумента z, аналогичная JN(0,z,10).

J1(z) — функция Бесселя первого порядка первого рода комплексного аргумента z, аналогичная JN(1,z,10).

LAST(z,n) — кривая z задержанная на *n* отсчетов. Например, LAST(z,1)_i=z_{i-1}.

MAXR(x) — возвращает наибольшее значение x, полученное во время расчета переходных процессов и передаточных характеристик по постоянному току.

MINR(x) — возвращает наименьшее значение x, полученное во время расчета переходных процессов и передаточных характеристик по постоянному току.

NORM(z,x0) — кривая z(x) нормируется к величине, которая достигается при значении аргумента x равном x0. Функции DB нормализуются по отношению к значению в нулевой точке.

NORMMAX(z) — кривая z нормируется к максимальной величине z.

NORMMIN(z) — кривая z нормируется к минимальной величине z.

PN(n,x) — полиномиальная функция Лежандра n-го порядка от аргумента x.

PROD(n,n1,n2,z) — рассчитывается произведение последовательности комплексных выражений, зависящих от целого *n*: z=z(n), от *n*=n1 до *n*=n2. Например, PROD(n,1,3,j+n) = (j+1)*(j+2)*(j+3)=0+10j.

SERIES(n,n1,n2,z) — рассчитывается сумма последовательности комплексных выражений, зависящих от целого *n*: z=z(n), от *n*=n1 до *n*=n2. Например, SERIES(n,1,3,n+j) = (j+1)+(j+2)+(j+3)=6+3j.

SGN(y) — знак числа y, +1 (если y>0), 0 (если y=0), -1 (если y<0).

SQRT(z) — корень квадратный из комплексной величины z, равный $z^{0.5}$.

STP(x) — функция единичного скачка, равная 1 при $T \geq x$ и равная 0 при $T < x$. См. пример *stp_source.cir* из каталога *Components\Sources*.

TABLE(x,x1,y1,x2,y2,...,xn,yn) — табличная зависимость функции y от x. Производится интерполяция функции y, по её известной табличной зависимости от x. Сначала выясняется, в какой промежуток попадает заданное значение аргумента x. В промежуточных точках между (xi, yi) используется линейная интерполяция. Если $x < x1$ то $y = y1$, если $x > xn$, то $y = yn$.

W(z) — функция Ламберта комплексного переменного z.

YN(n,z[m]) — функция Бесселя n-го порядка второго рода комплексного аргумента z, полученная суммированием первых *m* членов ряда; по умолчанию *m*=10;

Y0(z) — функция Бесселя нулевого порядка второго рода комплексного аргумента z, аналогичная YN(0,z,10);

Y1(z) — функция Бесселя первого порядка второго рода комплексного аргумента z, аналогичная YN(1,z,10).

4.7.9. Функции генерации случайных чисел RND

Функции, перечисленные ниже, возвращают случайное число в диапазоне от 0 до 1, используя начальное значение (зерно SEED) из установок *Global Settings>Seed*. Если $SEED \geq 1$ функции возвращают повторяющуюся последовательность случайных чисел. Если SEED не установлено или $SEED < 1$, функции возвращают неповторяющиеся последовательности случайных чисел. SEED инициализируется в начале каждого запуска анализа (нажатие F2), но не для каждой температуры из ряда значений, или варианта многовариантного анализа Stepping, Monte Carlo.

RND — генерирует случайное число с равномерным законом распределения на отрезке $[0, 1]$ в каждый отсчет времени;

RNDR — генерирует случайное число при каждом запуске анализа по F2.

RNDC — генерирует случайное число при каждом запуске нового анализа Monte Carlo, вариации температуры или других параметров (Stepping).

RNDI(t) — генерирует новое случайное число через каждые t секунд анализа.

4.7.10. Функции статистического анализа Monte Carlo (MC10)

AGAUSS(val,abs,s) — возвращает случайное число, определяемое распределением Гаусса со средним значением (mean value) val и стандартным отклонением (standard deviation) abs/s .

GAUSS(val,rel,s) — возвращает случайное число, определяемое распределением Гаусса со средним значением (mean value) val и стандартным отклонением (standard deviation) $val*rel/s$.

UNIF(var,rel) — возвращает случайное число, определяемое равномерным распределением в полосе от $val - val*rel$ до $val + val*rel$.

AUNIF(var,abs) — возвращает случайное число, определяемое равномерным распределением в полосе от $val - abs$ до $val + abs$.

4.7.11. Примеры использования выражений с переменными в MC9, MC10

$1.0/(1.0+.001*s)$ — передаточная функция фильтра низких частот, заданная с помощью преобразования Лапласа;

$\exp(-T/.5)*\sin(2*PI*10*T)$ — функциональный источник затухающего гармонического сигнала с частотой 10 Гц;

$-k*(v(p)-v(c)+mu*(v(g)-v(c)))**1.5$ — выражение для анодного тока вакуумного триода. Буквенные обозначения p , g и c — обозначения узлов анода, сетки и катода соответственно.

$2pf/((1-v(p,n)/.7)^.5)$ — типичное выражение для барьерной емкости r_p -перехода.

$5.0pF*(1+2e-6*T)$ — емкость конденсатора, зависящая от времени;

$4.7K*(1+.3*V(P,M))$ — сопротивление резистора, зависящее от напряжения;

$5*(1+2*(TEMP-273)^2)$ — сопротивление резистора, зависящее от температуры;

$1uh*coth(1+I(L1)/10ma)$ — нелинейная индуктивность, зависящая от тока.

$2.6uh*(1+(t-1e-7)**2.0)$ — индуктивность, зависящая от времени.

$V(VCC)*I(VCC)$ — мгновенная мощность источника напряжения VCC;

PD(R1) — мощность, рассеиваемая на резисторе R1.

SUM(V(VCC)*I(VCC),T) — энергия источника VCC на интервале времени от 0 до T;

FFT(V(A)+V(B)) — преобразование Фурье от V(A)+V(B));

RMS(V(Out)) — текущее среднеквадратическое значение напряжения V(Out));

IM(V(7)) — мнимая часть комплексного напряжения в узле 7;

MAG(VCE(Q1)*IC(Q1)) — модуль комплексной мощности, выделяемой на биполярном транзисторе Q1 (при анализе частотных характеристик);

5*(T>10ns AND T<20ns) — одиночный импульс с амплитудой 5В на интервале времени 10...20 нс;

5*((T mod 50)>10 AND (T mod 50)<20) — импульс с амплитудой 5 В на интервале времени от 10 с до 20 с, период 50 с.

TABLE(V(1),-10,-1,10,1) — определение табличной функции. Принимает значения:

- -1, если $V(1) < -10$;
- $0.1 * V(1)$, если $-10 \leq V(1) \leq 10$;
- 1, если $V(1) > 10$.

IMPORT(A.OUT,V(1)) — импорт кривой V(1) из файла A.OUT

CURVEX("T1","I(V1)") — импортирует таблицу абсцисс кривой I(V1) из пользовательского файла T1.

RNDI(10n) — возвращает случайное число в диапазоне от 0 до 1 через каждые 10 нс расчета.

2*RNDR — возвращает случайное число в диапазоне от 0 до 2 при каждом запуске анализа нажатием F2.

1+2*RNDC — возвращает случайное число в диапазоне от 1 до 3 в начале каждой вариации Монте-Карло, температуры и других параметров (Stepping).

4.8. Правила использования выражений и переменных

1. Значения операторов отношения и булевых операторов равно 1.0, если они истинны, и 0.0, если они ложны.

2. Интегро-дифференциальные операторы (AVG, DEL, RMS, SUM...) могут использоваться только при выводе данных и не могут использоваться в выражениях для параметров.

3. ONOISE и INOISE могут использоваться только при АС анализе и их нельзя использовать в выражениях в совокупности с другими величинами, например с напряжениями.

Поэтому их следует выводить на экран по отдельности в разных сеансах моделирования.

4. В АС анализе все промежуточные вычисления выполняются с комплексными величинами. Однако при построении графиков указание имени переменной означает построение графика ее модуля.

Например, указание имени переменной V(1) эквивалентно использованию функции вычисления модуля комплексной величины MAG(V(1)). И более того, спецификация выражения V(1)*V(2) приведет к построению модуля произведе-

ния двух комплексных напряжений. Для вывода мнимой части произведения используется запись $IM(V(1)*V(2))$, действительной части — $RE(V(1)*V(2))$.

5. При моделировании в режимах AC и DC значение переменной T (время) полагается равной нулю. При расчете переходных процессов и в режиме DC равной нулю полагается переменная F (частота).

6. В выражениях для преобразования Лапласа передаточных функций может использоваться только символ S для обозначения комплексной переменной.

При отсутствии в выражении для такой передаточной функции символа S выдается сообщение об ошибке. Поэтому преобразования Лапласа нельзя использовать для задания линейных блоков с постоянным коэффициентом передачи — в этих целях используйте другие типы управляемых источников сигналов.

7. Перед выполнением моделирования или составлением списка электрических соединений программа Micro-Cap вычисляет значения всех операторов .DEFINE.

В связи с этим применение этих операторов внутри оператора .MODEL может привести к ошибке. Пусть, например, имеются два оператора

```
.define BF 111
```

.model Q1 NPN (BF=50 ...) В результате подстановки в оператор .MODEL определения .define BF 111 он приобретет неожиданный совершенно ошибочный вид:

```
.model Q1 NPN (111=50 ...)
```

Поэтому применение определений .DEFINE в директиве .MODEL недопустимо! В этих целях можно использовать идентификатор промежуточной переменной. В рассматриваемом примере это может быть:

```
.define VALUE 111
```

```
.model Q1 NPN (BF=VALUE ...)
```

Тогда после подстановки оператор .MODEL приобретет правильный вид:

```
.model Q1 NPN(BF=111 ...)
```

8. Помните, что выражения в операторах определения переменных .DEFINE понимаются буквально. Пусть, например, имеются два определения

```
.define A 4+C
```

```
.define B A*X
```

Следует иметь в виду, что выражение 4+C не подразумевается заключенным в скобки (4+C). Поэтому величина B равна 4+C*X. Если же величина B должна быть равной (4+C)*X, скобки нужно проставить в определении величины A:

```
.define A (4+C)
```

Следует отметить, что защититься от подобной нежелательной интерпретации выражения без скобок в .define можно установкой флага «Add Parentheses to Define» в Preferences (установлен по умолчанию), поэтому вышесказанное относится к более старым версиям программы и файлам, подготовленным с их помощью.

4.9. Текстовые директивы

Директивы программы Micro-Cap представляют собой текстовые выражения, начинающиеся с точки «.». При графическом вводе схем они помещаются в окне текста или непосредственно в окне схем, при текстовом вводе в формате SPICE — в текстовом файле. В связи с этим MC9, MC10 имеют два набора директив: один для графического ввода схем, второй для текстовых файлов в формате SPICE [4, 6].

Практически все директивы Micro-Cap совпадают с директивами известной программы PSPICE [6], исключение составляют лишь директивы .DEFINE, .MACRO и .PARAMETERS.

При описании форматов директив используются те же обозначения (метаязык), что и при описании форматов моделей (см. раздел 5.1). Специфические функции выполняют символы < >, [], ., *, + и курсивный текст:

- **<X>** — обязательный параметр X. Если его не указать в текстовой директиве, то при расчете появится сообщение об ошибке.
- **[X]** — дополнительный (необязательный) параметр X. Вместо него по умолчанию автоматически подставляется значение, принятое по умолчанию.
- **|** — Символ логической операции ИЛИ (OR) “|” определяет взаимно исключающие альтернативные варианты. Например: PUL | EXP | SIN — означает PUL или EXP или SIN.
- Текст, набранный курсивом, как например *<значение>*, означает, что указанные данные вводятся пользователем.
- ***** — повторяющийся элемент в строке описания формата. Запись *<имя>** означает, что может быть задано несколько имен, например, A1 A2 A3.
- **+** — означает перенос SPICE-директивы на следующую строку.

Обычные () и фигурные { } скобки в метаязыке выполняют общепринятую функцию скобок математических выражений.

Ниже приведено описание наиболее часто используемых директив в алфавитном порядке с указанием областей их применения.

.AC — малосигнальный частотный анализ схемы

Формат SPICE

.AC [[DEC] | [OCT] | [LIN]] *<число точек>* *<fmin>* *<fmax>*

Примеры:

.AC DEC 30 20 20K

.AC LIN 10 100 200

Ключевые слова DEC, OCT, и LIN указывают вариант изменения шага по частоте, используемый при проведении анализа. DEC или OCT соответствуют выбору логарифмического шага по частоте с изменением частоты в 10 раз и в 2 раза соответственно; LIN — линейного.

<число точек> — число точек на декаду при использовании логарифмического масштаба или общее число точек при использовании линейного масштаба.

.ARRAY — объявление массива чисел

Общий формат (схем Micro-Cap и SPICE-текста)

Одномерный массив

.ARRAY имя массива V1[,V2 [,V3...[,Vn]]]

Примеры:

.ARRAY RESISTANCE 3.3K,4.5K,5.0K

.ARRAY WIDTHS .07u,1u,1.2u,1.5u,2u

Двумерный массив

.ARRAY имя массива (m,n)

{v11,v12,...v1n},

{v21,v22,...v2n},

...

{vm1,vm2,...vmn}

Пример:

.ARRAY RV (2,3)

{1+2*j , 2+3*j , 4+6*j},

{5+2*j , 3+7*j , 4+2*j}

При таком определении двумерного массива RV(I)(J) ссылается на элемент столбца J строки с номером I. Так RV(1,2) это ссылка на элемент массива 4+2*j. Следует обратить внимание, что нумерация элементов матрицы начинается с нуля, поэтому J=2 соответствует ссылке на третий столбец, а I=1 — на вторую строку.

Команда .ARRAY объявляет массив величин, которые могут использоваться в полях атрибутов компонента и в параметрах моделей. Доступ к элементам массива организуется, начиная с нулевого индекса и далее. Например, рассмотрим следующие директивы:

.ARRAY CAP 1p,10p,15p,24p,36p

.DEFINE INDEX 0

После этих деклараций можно использовать выражение CAP(INDEX) как атрибут VALUE одного или нескольких конденсаторов, а затем дать приращение переменной INDEX для последовательного присвоения атрибутам различных конденсаторов объявленных значений 1p, 10p, 15p, 24p, 36p.

Другой пример:

.MODEL N1 NPN (BF=BETA1(INDEX) CJE=1.8P CJC=0.8P TF=.5N)

.MODEL N2 NPN (BF=BETA2(INDEX) CJC=1P CJE=2P TF=1N TR=1N)

.DEFINE INDEX 0

.ARRAY BETA1 100,200,300

.ARRAY BETA2 60,70,90

После приведенных деклараций можно, меняя INDEX, одновременно получать доступ к двум массивам, присваивая определенные пары значений для коэффициентов передачи токов базы моделей двух транзисторов. Переменная INDEX не является обязательной, можно получить доступ к определенным массивам непосредственно: BETA1(0), BETA1(1), BETA1(2), и т.д.

Пример использования массива см. в схемном файле *ARRAY1.cir* каталога *Statements* (Book-MC.rar).

.DC — анализ на постоянном токе**Формат SPICE***Изменение значений источников с линейным шагом*`.DC [LIN] <v1> <start1> <end1> <step1> [<v2> <start2> <end2> <step2>]`*Изменение значений источников с логарифмическим шагом*`.DC <OCT | DEC>``+ <v1> <start1> <end1> <количество точек1 на октаву или декаду>``+ [<v2> <start2> <end2> <количество точек2 на октаву или декаду>]`*Изменение значений источников согласно списку*`.DC <v1> LIST <значение>* [<v2> LIST <значение>*]`

<V1> и <v2> могут быть именами независимых источников напряжения(тока), параметром модели, температурой, символьной переменной.

Примеры:

`.DC VIN1 -.001 .001 1U``.DC VCC 0 5 0.1 IB 0 0.005 0.0005``.DC DEC RES RMOD(R) 1m 100 5``.DC PARAM FILTER_Q 10 20 1``.DC VCC LIST 4.0 4.5 5.0 5.5 6.5 VEE LIST 24 25 26`**.DEFINE — присвоение значений и задание функций***Общий формат (схем Micro-Cap и SPICE-текста)*`.DEFINE [{LOT[t&d]=<n>[%]]} <текст1> <текст2>``где t&d [/<lot#>] [/GAUSS | UNIFORM | WCASE]`

Основное назначение данной разновидности директивы .Define — определить значение символьной переменной. Действие этой директивы состоит в том, что <текст1> заменяется на <текст2> везде за исключением атрибута компонента VALUE и имени параметров моделей.

Примеры:

`.Define V1 (2*T*sin(2*pi*T))``.DEFINE RVAL 128.5K``.DEFINE {LOT=10%} LVAL 1200MH``.DEFINE {LOT/1/GAUSS=10%} CVAL 1200NF`*Формат схем Micro-Cap*`.DEFINE <имя(<p1>[,<p2>][...,<pn>])> f(<p1>[,<p2>][...,<pn>])`

Здесь f(...) — некоторое выражение, включающее параметры <p1>[,<p2>][...,<pn>]. Директива указанного формата подобна директиве .FUNC языка SPICE.

Определения с помощью директивы .DEFINE схемного формата часто применяются для задания генераторов цифровых сигналов, программируемых логических матриц, нелинейных и лапласовых табличных источников.

Пример 1. Использование директивы для программирования генераторов цифровых сигналов типа STIM. Для фрагмента, приведенного ниже, использование в команде STIM атрибута COMMAND=SQUAREWAVE, приведет при запуске анализа к подстановке вместо него текста из нескольких строк:

```
.define SQUAREWAVE
+ 0NS 0
+ LABEL=START
+ +10NS 1
+ +10NS 0
+ +10NS GOTO START 10 TIMES
```

Примечание. В записи + + один + означает перенос на другую строку, а второй — относительное время (более подробно рассмотрено в главе 13).

Пример 2. Определение значений символьных переменных. В этом примере производится глобальное присвоение размерам канала (W и L) всех МОП-транзисторов с моделью MX заданных значений:

```
.DEFINE W1 2U
.DEFINE L1 .3U
.MODEL MX NMOS (W=W1 L=L1....)
```

Пример 3. Определение пользовательских функций. Ниже приведены макроопределения для вычисления сопротивления и проводимости прибора X. Если подобное определение сделать в схемном файле, то использование Z(C12) и G(C12) в выражениях для Y Expressions окна параметров частотного анализа приведет к построению графиков комплексного сопротивления и проводимости конденсатора C12.

```
.DEFINE IMPEDANCE(X) V(X)/I(X)
.DEFINE CONDUCTANCE(X) I(X)/V(X)
```

Нижеприведенное определение позволяет рассчитать мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора:

```
.DEFINE PC(Q) VCE(Q)*IC(Q)
```

При наличии такого определения мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора Q10, можно построить, набрав в окне Y Expression PC(Q10).

Функция HOT, определение которой приведено ниже, принимает значение 1 при превышении мгновенной мощностью транзистора допустимого уровня, и значение 0 — в остальных случаях:

```
.DEFINE HOT(Q,MAX) IF((VCE(Q)*IC(Q)>MAX),1,0)
```

При наличии такого определения выражение HOT(QX3,100MW), набранное в окне задания параметров графиков, приведет к выводу на соответствующий график единичного значения, при превышении мгновенной мощности на транзисторе QX3 значения 100мВт.

Определения .Define, сделанные внутри схемного файла, являются локально действующими. Определения .define, сделанные в файле MCAP.INC, являются глобальными и относятся ко всем схемам. Последний пример как раз и взят из данного файла. Файл MCAP.INC может редактироваться пользователем, доступ к нему организуется через команду *Options>User Definitions*.

.ELIF — условный оператор

Общий формат (SPICE-текста и текста Micro-Cap)

```
.ELIF <выражение>
```

Является начальным оператором вложенной условной конструкции в составе условного блока, определенного директивой .IF. Если выражение ис-

тинно, то выполняется следующий за .ELIF оператор. Если выражение ложно, то осуществляется переход к следующему .ELSE или .ELIF.

Условный блоки размещаются в текстовой области схемы.

Например:

```
.IF USING_WORST_CASE1  
.MODEL B1 NPN (BF=110...)  
.ELIF USING_WORST_CASE2  
.MODEL B1 NPN (BF=150...)  
.ENDIF
```

Следует отметить, что выражение может использовать только те переменные, которые не изменяются во время анализа, как например символьные переменные определенные операторами .DEFINE и .PARAM. Переменные могут, конечно различаться в отдельных реализациях анализа, например в вариантах анализа Stepping.

Операторы .ELIF и .IF не могут использоваться в библиотечном LIB-файле.

.ELSE — условный оператор

Общий формат (SPICE-текста и текста Micro-Cap)

```
.ELSE
```

Эта директива — вторая часть условной конструкции «если ..., то ...». Она добавляет к оператору .IF (первой части условной конструкции) блок директив, определяющих действия, в случае если выражение .IF ложно. Вместе .IF, .ELIF и .ENDIF составляют условный управляющий блок. Например:

```
.IF BP1>1  
.DEFINE F0 1.0Meghz  
.ELSE  
.DEFINE F0 2.0Meghz  
.ENDIF
```

.END — конец текстового файла

Формат SPICE

```
.END
```

Обозначает конец текстового SPICE-файла, определяющего схему. SPICE-текст может быть помещен в текстовую область обычного схемного файла Micro-Cap. Все описания схем и команды должны располагаться до директивы .END.

.ENDIF — окончание условного блока

Общий формат (SPICE-текста и текста Micro-Cap)

```
.ENDIF
```

Оператор заканчивает условный блок, начатый директивой .IF. Вместе .IF и .ENDIF ограничивают управляющий блок. Например:

```
.IF BEST_CASE  
.DEFINE C1 1.2pF  
.ENDIF
```

.ENDS — конец определения подсхемы

Общий формат (SPICE-текста и текста Micro-Cap)

.ENDS [*<имя подсхемы>*]

Примеры:

.ENDS

.ENDS FILTER

Директива ограничивает снизу описание подсхемы. Имя закрываемой подсхемы указывать необязательно, указывается лишь при наличии нескольких вложенных определений для полной ясности.

.ENDSPICE — конец SPICE-текста

Формат текста Micro-Cap

.ENDSPICE

Директива обозначает конец управляющего блока на языке SPICE. Этот блок может быть помещен в текстовую область схемы. Например:

.SPICE

.MODEL DD D ()

D1 OUT A DD

C10 A 0 100N

.ENDSPICE

Данная последовательность команд создает маленькую схему, состоящую из диода и конденсатора, которая подсоединяется к узлу OUT главной схемы (в графическом схемном окне). Промежуточный узел A также доступен для анализа.

.FUNC — определение функции

Общий формат (схем Micro-Cap и SPICE-текста)

.FUNC *<имя(<p1>[,<p2>][...,<pn>])>* *f(<p1>[,<p2>][...,<pn>])*

Эта директива аналогична директиве **.DEFINE** и часто используется в моделях, поставляемых производителем электронных компонентов. Имя определяемой функции не должно совпадать ни с одной из встроенных (sin, cos и пр.).

Примеры:

.FUNC MAX3(A,B,C) MAX(MAX(A,B),C)

.FUNC QUAD(A,B,C,X) A*X^2+B*X+C

.FUNC DIVIDER(A,B,C) V(B,C)/V(A,C)

.HELP — текстовая подсказка

Формат схем Micro-Cap

.HELP *<имя параметра>* *<"текст подсказки">*

Директива помещает текст, заключенный в кавычки в схемное макроопределение. Указанный текст показывается в строке состояния диалогового окна атрибутов макромоделей, когда она вставляется в схему и редактируется.

<имя параметра> — один из параметров схемного макроопределения, перечисленный в директиве **.PARAMETERS**.

Примеры:

.HELP VP "Максимальная амплитуда выходного сигнала"

.HELP KF "Девияция частоты в Hz/Volt"

.IC — задание начальных условий

Общий формат (схем Micro-Cap и SPICE-текста)

Для аналоговых узлов:

.IC <V(<узел1>[,<узел2>])=<напряжение>>*

Для индуктивностей:

.IC <I(<имя катушки индуктивности>)=<ток>>*

Для цифровых узлов:

.IC <D(<цифровой узел>)=<состояние>>*

Примеры:

.IC V(VOUT)=2.0

.IC I(L1)=6.0 V(3)=2

.IC D(1440)=0

.IC D(DIN)=X D(12)=1

Директива .IC устанавливает начальные значения напряжений на компонентах, токов в индуктивностях, состояний цифровых узлов схемы при расчете рабочей точки по постоянному току или при расчете первой точки в режиме анализа DC и TRANSIENT.

Она присваивает указанное начальное значение аналоговому или цифровому узлу и удерживает это значение в течение всего времени расчета режима по постоянному току. После того как режим рассчитан, принудительные начальные значения (установленные директивой .IC) снимаются. Директивы.NODESET и .IC могут присутствовать в одном файле вместе, причем значение, заданное в директиве .IC, имеет высший приоритет.

Следует отметить, что использование директивы .IC для установки напряжений на катушках индуктивности и источниках ЭДС бесполезно. Во время расчета режима по постоянному току напряжения на индуктивностях принимаются равными нулю, а напряжения источников ЭДС — значениям в нулевой момент времени.

При проведении анализа AC и TRANSIENT директива .IC работает следующим образом:

1. Если расчет переходных процессов запущен при установленном флажке *Operating Point* или если запущен малосигнальный анализ по переменному току (AC), то рассчитывается режим по постоянному току. Значения, указанные в директиве .IC, фиксируются на время расчета рабочей точки.

2. Если расчет переходных процессов запущен при сброшенном флажке *Operating Point*, то режим по постоянному току не рассчитывается. Начальные условия, указанные в директиве .IC используются при расчете первой точки графика процесса.

.IF — условный оператор

Общий формат (SPICE-текста и текста Micro-Cap)

.IF <выражение>

Эта директива — первая часть условной конструкции «если ..., то ...». С нее начинается условный управляющий блок, в который входят директивы, .ELIF, .ELSE, и .ENDIF.

Если *выражение* истинно, то выполняется следующий за .IF оператор. Если *выражение* ложно, то осуществляется переход к следующему оператору .ELSE (определяющему, что делать в альтернативном случае) или оператору .ELIF (началу вложенного условного блока). Заканчивается конструкция оператором .ENDIF. Оператор .IF не может использоваться в библиотечном LIB-файле.

Пример:

```
.IF BANDPASS_FILTER1
.DEFINE FCTR 41.563Meg
.ELSE
.DEFINE FCTR 42.563Meg
.ENDIF
```

.INCLUDE — включение текстового файла

Общий формат (схем Micro-Cap и SPICE-текста)

```
.INC[LUDE] <"имя_файла">
```

Примеры:

```
.INCLUDE "D:\Micro-Cap\DATA\EXDEF.TXT"
.INC "D:\Micro-Cap\DATA\MYSMALL.LIB"
```

Включение текстового файла в текущую схему перед выполнением моделирования. Имя файла может включать имя диска и полный путь к нему. Заключать имя файла в кавычки не обязательно. В основном используется для подключения файлов библиотек математических моделей небольшого размера. В связи с тем, что текстовые файлы включаются в описание схемы целиком, для подключения больших библиотек целесообразнее использовать директиву .LIB, подключающую только описания тех моделей, на которые в схеме есть ссылки.

.LIB — подключение файлов библиотек компонентов

Общий формат (схем Micro-Cap и SPICE-текста)

```
.LIB ["имя файла библиотеки"]
```

Примеры:

```
.LIB
.LIB "C:\Micro-Cap\DATA\BIPOLAR.LIB"
```

Использование директивы .LIB — это альтернативный способ включения модельной информации в схему или SPICE-файл. Она организует доступ к моделям, содержащимся в бинарных файлах (*.LBR) или к текстовым модельным директивам типа MACRO, .MODEL, или .SUBCKT, содержащихся в текстовых библиотечных файлах (*.LIB). Имя файла может включать имя диска и полный путь к нему. Заключать имя файла в кавычки не обязательно. Расширение имени файлам библиотек по умолчанию не назначаются. Поэтому расширение имени, например .LIB, должно быть указано в явном виде. Файлы с расширением .LIB, на которые ссылается одноименная директива, могут содержать команды .MODEL, .SUBCKT, .MACRO, .ENDS, .PARAM или .LIB. Остальные ко-

манды игнорируются и помечаются знаком комментариев «*» в начале текстовой строки; и «;» при аннулировании оставшейся части строки.

Имя файла, используемое по умолчанию — NOM.LIB. В этом файле перечислены имена файлов всех поставляемых библиотек и, таким образом, автоматически предоставляется доступ ко всем библиотечным файлам. Как только программе потребуется информация из макрокоманд, модельных директив или подсхем, поиск будет осуществляться в следующем порядке:

- Если моделируемое устройство представляет собой **схемный файл**:
 - в тексте на рисунке схемы или в текстовой области;
 - в файле, названном в позиции *File attribute* (если компонент имеет таковой);
 - во всех файлах, перечисленных в директиве .LIB внутри схемного файла;
 - во всех файлах, перечисленных в файле NOM.LIB.
- Если моделируемое устройство представляет собой **текстовый SPICE-файл**:
 - в тексте описания схемы;
 - в файлах, перечисленных в директиве .LIB внутри описания схемы;
 - во всех файлах, перечисленных в файле NOM.LIB.

При поиске файлов моделей Micro-Cap сканирует каталоги библиотек, перечисленные в окне **File/Paths**. Если в окне указано более одного каталога, поиск производится в порядке слева направо. Если нужная информация не находится, выдается сообщение об ошибке. В общем случае Micro-Cap сначала ищет информацию внутри схемного файла, а затем во всех библиотечных папках.

При указании в задании на моделирование имени какого-либо конкретного компонента, модель которого содержится в библиотечном файле, в память загружается не весь файл, а только его часть, относящаяся к данному компоненту.

Файл NOM.LIB в котором перечислены директивы подключения всех используемых библиотек должен находиться в каталоге Micro-Cap\LIBRARY\.

Пример фрагмента этого файла, включающего библиотеки российских компонентов:

```
.lib "R-DIOD.LIB"  
.lib "R-NPN.LIB"  
.lib "R-PNP.LIB"  
.lib "SOVBIPOL.LIB"  
.lib "SOVDIOD.LIB"  
.lib "SOVPOL.LIB"  
.lib "SOVSTAB.LIB"  
.lib "R-COMP.LIB"  
.lib "R-OPAMP1.LIB"  
.lib "R-OPAMP2.LIB"  
.lib "R-OPAMP3.LIB"  
.lib "X-OPAMP.LIB"  
.lib "DIGRUS.LIB"  
.lib "DIGRUS2.LIB"
```

.MACRO — задание определений макросов

Общий формат (схем Micro-Cap и SPICE-текста)

.MACRO <имя макроса> <имя схемной макромоделли(список параметров)>

Эта директива определяет имя макроса и набор значений параметров, подставляемых в схему. Используется для более компактной записи параметров моделей, поскольку позволяет вместо длинного перечня директив .DEFINE для определений параметров использовать всего одну директиву, в которой указывается имя макроса и имя модели со списком значений параметров.

Пример:

.MACRO MY_SCR SCR(50m,40m,1u,1,50,50MEG,20u,.5,1)

Здесь дано определение макроса MY_SCR, который при вызове в моделируемой схеме будет заменен схемной макромоделью тиристора с соответствующими параметрами SCR(50m,40m,1u,1,50,50Meg,20u,0.5,1).

.MODEL — описание модели компонента

Общий формат (схем Micro-Cap и SPICE-текста)

.MODEL <имя модели> [AKO: <имя модели прототипа >] <тип модели>
+([<имя параметра>=<значение>]
+[LOT[t&d]=<значение>[%]] [DEV[t&d]=<значение>[%]])

Здесь <имя модели> — имя модели компонента схемы, назначаемое пользователем произвольно, например RLOAD, KT315V, D104. После ключевого слова AKO (A Kind Of), присутствие которого необязательно, помещается ссылка на <имя модели прототипа>. Это позволяет указывать только значения различающихся параметров. Далее идет имя типа модели (диод — D, резистор — RES и т.д. см. табл. 4.4). Затем в круглых скобках указывается список значений параметров модели компонента. Если этот список отсутствует или не полный, то недостающие значения параметров модели назначаются по умолчанию.

Примеры:

.MODEL RLOAD RES (R=1.5 TC1=0.2 TC2=.005)

.MODEL D104 D(IS=1E-10)

.MODEL 2N2222A AKO:2N2222 NPN(BF=55 ISE=10F)

.MODEL CK CAP(C=1 DEV=0.1)

.MODEL M1 NMOS (Level=3 VTO=2.5 LOT=30% DEV=1%)

.MODEL VIN1 PUL (Vone=10V p1=0 p2=.1u p3=10u p4=10.1u p5=15u)

.MODEL NPN_A NPN (RE=12 LOT/1/GAUSS=30% DEV/2/UNIFORM=2%)

Использование AKO позволяет создавать новые модели на основе существующих. В нижеприведенных примерах диод 1N914A имеет одинаковые параметры с диодом 1N914, за исключением RS, который равен 10; транзистор KT315G — одинаковые параметры с транзистором-прототипом KT315A, за исключением BF=130.

.MODEL 1N914A AKO:1N914 D(RS=10)

.MODEL KT315G AKO:KT315A NPN(BF=130)

<Тип модели> определяется видом компонента и имеет условное обозначение, указанное в табл. 4.4.

Таблица 4.4. Типы моделей компонентов

Имя типа модели	Тип компонента
Аналоговые компоненты	
RES	Резистор
CAP	Конденсатор
CORE	Магнитный сердечник трансформатора
IND	Индуктивность
D	Диод
GASFET	Арсенид-галлиевый полевой транзистор с каналом n-типа
NIGBT	Биполярный транзистор с изолированным затвором n-типа
NPN	Биполярный n–p–n-транзистор
PNP	Биполярный p–n–p-транзистор
LPNP	Боковой биполярный p–n–p-транзистор
NJF	Полевой транзистор с каналом n-типа
PJF	Полевой транзистор с каналом p-типа
NMOS	МОП-транзистор с каналом n-типа
PMOS	МОП-транзистор с каналом p-типа
TRN	Линия передачи
VSWITCH	Ключ, управляемый напряжением
ISWITCH	Ключ, управляемый током
OPA	Операционный усилитель
PUL	Источник импульсного сигнала
SIN	Источник синусоидального сигнала
Устройства интерфейса	
DINPUT	Аналого-цифровой интерфейс
DOUPUT	Цифроаналоговый интерфейс
Цифровые устройства	
UADC	Аналого-цифровой преобразователь
UDAC	Цифроаналоговый преобразователь
UIO	Модель вход/выход цифрового устройства
UGATE	Стандартный клапан
UTGATE	Клапан с тремя состояниями
UEFF	Триггер с динамическим управлением
UGFF	Триггер с потенциальным управлением
UDLY	Цифровая линия задержки
UPLD	Программируемые логические матрицы

Каждый параметр модели может принимать случайные значения относительно своего номинального значения. Определение разброса имеет следующий формат:

[LOT[t&d]=<tol1>[%]] [DEV[t&d]=<tol2>[%]]

LOT — ключевое слово для параметров, принимающих коррелированные случайные значения.

DEV — ключевое слово для параметров, принимающих независимые случайные значения;

[t&d] — определяет случайную последовательность и распределение, используя следующий формат:

[/lot#>][<закон распределения>]

Эти спецификации следуют сразу же за ключевыми словами DEV и LOT без пробела и разделяются символом «/».

<lot#> — определяет номер одного из 10 генераторов случайных чисел, используемого для генерации отклонений параметра. Позволяет согласовывать (коррелировать) разброс разных параметров в пределах одной модели или одного параметра для разных моделей. Генератор случайных величин DEV устанавливается независимым от генератора LOT, четким разграничением номеров генераторов. Указание точности без <lot#> вызывает генерацию уникальной последовательности. <Закон распределения> указывает вид распределения отклонения случайной величины, которое может быть следующим:

UNIFORM — равновероятное распределения случайного отклонения в пределах заданного процентного разброса.

GAUSS — нормальное Гауссово распределение случайного отклонения.

WCASE — наихудший случай разброса параметров.

Если тип распределения случайного отклонения не задан параметром [t&d], он указывается в диалоговом окне анализа Монте-Карло.

После этих ключевых слов указывается значение разброса случайного параметра в абсолютных единицах или в процентах.

Пример задания модельных параметров со случайным разбросом величин:

.MODEL NPN_A NPN (RE=12 LOT/1/GAUSS=30% DEV/2/UNIFORM=2%)

Директивы моделей конденсатора, индуктивности, резистора, диода, арсенид-галлиевого полевого транзистора (GaAsFET), биполярного транзистора (BJT), полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом (JFET) и изолированным затвором (MOSFET), IGBT-транзистора могут задавать две температуры:

- Температуру измерений (T_MEASURED) — температуру при которой предполагается измерение модельных параметров. Эта температура является точкой отсчета для расчета температурно-зависимых величин. Умолчательное значение этой величины берется равным параметру TNOM Global Settings (27°C). TNOM может быть изменен с помощью директивы .OPTIONS TNOM.
- Температуру работы прибора — температуру, используемую для расчета модельных параметров, исходя из их значений при температуре T_MEASURED.

Для изменения температуры измерения параметров, надо указать в директиве модели значение T_MEASURED. Например:

.Model M710 NMOS (Level=3 VTO=2.5 T_MEASURED=35)

Температуру работы прибора можно изменить тремя способами:

Ключевое слово	Температура работы прибора
T_ABS	T_ABS
T_REL_LOCAL	T_REL_LOCAL + T_ABS (для АКО-прототипа)
T_REL_GLOBAL	T_REL_GLOBAL + глобальная температура

Глобальная температура может задаваться следующими способами:

- В схемах на языке SPICE глобальная температура определяется директивой `.TEMP`, текстовой строкой `.OPTIONS TNOM=XXX` или (при их отсутствии) — величиной `TNOM` в *Global Settings*. Когда запускается анализ, определенная вышеуказанным образом глобальная температура подставляется в поле *Temperature* (температура) диалогового окна параметров анализа (*Analysis Limits*).
- В схемных файлах глобальная температура определяется полем *Temperature* окна *Analysis Limits*. Директива `.TEMP` не действует.

Примеры:

- В этом примере температура работы прибора N1 — 47 °C:
`.TEMP 47`
`.MODEL N1 NPN(BF=50)`
- В этом примере температура работы прибора N1 — 35 °C:
`.MODEL N1 NPN(BF=50 T_ABS=35)`
- В этом примере температура работы прибора N1 — 30 °C, а прибора N2 — 55 °C:
`.MODEL N1 NPN(BF=50 T_ABS=30)`
`.MODEL N2 AKO:N1 NPN(T_REL_LOCAL=25)`
- В этом примере температура работы прибора N1 — 75° C:
`.TEMP 35`
`.MODEL N1 NPN(BF=50 T_REL_GLOBAL=40)`

.NODESET — задание начального приближения для режима по постоянному току

Общий формат (схем Micro-Cap и SPICE-текста)

Для аналоговых узлов:

`.NODESET <V(<узел1>[,<узел 2>])=<напряжение>>*`

Для индуктивностей:

`.NODESET <I(<имя катушки>)=<ток>>*`

Для цифровых узлов:

`.NODESET <D(<цифровой узел>)=<состояние>>*`

Примеры:

`.NODESET V(IN1)=45UV V(OUT)=1.2MV`

`.NODESET V(7)=4 D(H1)=1`

`.NODESET I(L10)=3.5ma`

По директиве `.NODESET` в режимах AC и TRANSIENT производится установка начальных значений узловых потенциалов аналоговых узлов и логических состояний цифровых узлов для расчета режима схемы по постоянному току. В отличие от директивы `.IC` состояния этих узлов фиксируются только во время вычислений одной итерации расчета режима по постоянному току. Это необходимо при расчете устройств с несколькими устойчивыми состояниями (например, триггеров) и полезно для улучшения сходимости при анализе режима по постоянному току сложных схем. Если имеются обе директивы `.NODESET` и `.IC`, то директива `.NODESET` игнорируется.

.NOISE — задание параметров режима анализа шумов*Формат SPICE***.NOISE** V(<узел1>[,<узел2>]) <имя источника> [<интервал>]

Примеры

.NOISE V(10) V1**.NOISE** V(4,3) VAC1 50**.NOISE** V(10,12) I1 100

V(<узел1>[,<узел2>]) — выходные узлы, относительно которых рассчитывается спектральная плотность шума на выходе схемы ONOISE.

<имя источника> — источник, определяющий входные узлы схемы, относительно него рассчитывается спектральная плотность шума, приведенного ко входу INOISE.

<интервал> — интервал вывода подробного отчета о вкладе отдельных элементов в общий шум схемы в файл численного вывода (количество точек по частотной оси).

.OP — вывод результатов рабочей точки*Формат SPICE***.OP**

Задаёт вывод результатов расчёта рабочей точки на постоянном токе в файл численного вывода.

.OPTIONS — установки значений глобальных параметров*Общий формат (схем Micro-Cap и SPICE-текста)***.OPTIONS** [<имя параметра>]* [<имя параметра>=<значение>]*

Примеры:

.options GMIN=1e-9 VNTOL=1n ABSTOL=1n DEFAS=.1u**.options** NOOUTMSG

Команда позволяет изменить значения параметров, установленных в окне *Global Settings*.

.PARAM — задание параметров*Общий формат (схем Micro-Cap и SPICE-текста)***.PARAM** <<имя параметра> = {<выражение>}>*Оператор **.PARAM** задаёт значения параметров.

Примеры:

.PARAM VSS = 5 VEE = -12**.PARAM** RISETIME={PERIOD/10}

Оператор **.PARAM** подобен оператору **.DEFINE**. Он обеспечивает совместимость со многими коммерческими библиотеками.

<Выражение>, определяющее значение параметра, должно быть ограничено фигурными скобками. Скобки могут не использоваться в том случае, если выражение является константой, как в первом примере, приведенном выше.

Например, переменную BF1 можно определить следующим образом:

.PARAM BF1={100+TEMP/20}

После подобного определения переменную BF1 можно использовать в операторе описания модели:

```
.MODEL Q1 NPN (BF={BF1})
```

Эквивалентная последовательность операторов с использованием директивы .DEFINE:

```
.DEFINE BF1 100+TEMP/20
```

```
.MODEL Q1 NPN (BF=BF1)
```

Как при использовании оператора .DEFINE, так и при использовании .PARAM <имя параметра> не должно повторять имена зарезервированных переменных (T — время, F — частота, S — комплексная частота) или имена зарезервированных констант (VT, TEMP, PI, GMIN).

.PARAMETERS — задание параметров схем

Формат схем Micro-Cap:

```
.PARAMETERS (<имя [=<значение>]> [> [, <имя [=<значение>]>]>]*)
```

Примеры:

```
.Parameters(GBW, Slew, Iscp, F1=1K, F2=1.1K)
```

```
.Parameters(Gain,ROUT=50)
```

Директива .PARAMETERS помещается в схеме макроопределения (макромодели) либо непосредственно на поле схемы, либо в текстовой области. Она перечисляет имена параметров, которые будут передаваться при вызове макромодели. <Значение> представляет собой числовую величину, которая передается в макромодель. Значение параметра, определенное этой директивой, может быть использовано в макромодели в качестве атрибута (например, атрибута *Resistance* резистора) или как численного значения параметра модели (например, BF биполярного транзистора).

Необязательное поле <значение> определяет значение параметра, принятое по умолчанию. Это значение присваивается параметру, когда макромодель помещается на поле основной схемы. Это поле может быть отредактировано в диалоговом окне атрибутов макромодели. Если значение параметра, принятое по умолчанию не объявлено в директиве .PARAMETERS внутри макроопределения, его величина обязательно должна быть указана при вызове макромодели в основную схему. См. в качестве примеров схемы макроопределений SCR, XTAL, PUT, или TRIAC из каталога Library.

.PATH — указание путей расположения информации

Общий формат (схем Micro-Cap и SPICE-текста)

```
.PATH DATA <путь данных 1>[;<путь данных 2>]*
```

```
.PATH LIBRARY <путь библиотек 1>[;<путь библиотек 2>]*
```

```
.PATH PICTURE <путь графики 1>[;<путь графики 2>]*
```

```
.PATH DOCUMENT<путь документов1>[;<путь документов2>]*
```

Примеры:

```
.PATH DATA C:\Micro-Cap\DATA
```

```
.PATH LIBRARY C:\Micro-Cap\LIBRARY
```

```
.PATH DATA F:\Micro-Cap\DATA;D:\DATA
```

```
.PATH LIBRARY C:\Micro-Cap\LIBRARY;D:\LIB1;E:\MY_LIB\LIB2
```

Команда позволяет указать один или более путей для доступа к файлам данных (схемные или *.usg файлы), пути нахождения библиотек (обычно файлы моделей компонентов), папки расположения рисунков и документов. Пути, указанные в этой команде, имеют высший приоритет по сравнению с аналогичными путями, указанными в команде *File>Paths*.

.PLOT — построение графиков

Формат SPICE

.PLOT <вид анализа> [<выходная переменная>]
+ [<начальное значение>, <конечное значение>])**

Пример:

.PLOT AC V(10) V(1,2) (0,10)

Указывает какая переменная должна быть выведена на график. Оператор управляет установками окна *Analysis Limits*.

<вид анализа> — обозначает один из видов проводимого анализа (AC, DC, NOISE, или TRAN).

.PRINT — управление файлом числового вывода

Формат SPICE

*.PRINT <вид анализа> [<выходная переменная>]**

Пример

.PRINT TRAN V(1) D(10)

Оператор определяет переменные, значения которых должны быть выведены в файл числового вывода.

<вид анализа> — обозначает один из видов проводимого анализа (AC, DC, NOISE, или TRAN).

Выводить в файл можно напряжения, токи, состояния цифровых узлов. Файлы числового вывода имеют для различных видов анализа следующие расширения:

*.TNO — для анализа переходных процессов Transient;

*.ANO — для анализа частотных характеристик AC;

*.DNO — для анализа передаточных характеристик на постоянном токе DC.

.SENS — установки анализа чувствительности

Формат SPICE

*.SENS <выходное выражение> [<выходное выражение>]**

Примеры:

.SENS V(1) V(3)

*.SENS V(D1)*I(D1)*

Оператор *.SENS* управляет установками анализа чувствительностей. В результате его выполнения будут рассчитаны чувствительности выходных выражений к изменению всех модельных параметров.

.SPICE — начало SPICE-текста

Формат текста Micro-Cap

.SPICE

Оператор обозначает начало текста на языке SPICE. Этот текст может быть помещен только в текстовое окно (но не на поле схемы). См. пример к директиве .ENDSPICE.

.STEP — параметры многовариантного анализа

Формат SPICE

Линейное изменение переменной:

.STEP LIN <переменная> <start> <end> <step> ;\$MCE <параметр>

Логарифмическое изменение переменной:

.STEP [DEC | OCT] <переменная> <start> <end> <кол. точек> ;
+ \$MCE <параметр>

Изменение переменной согласно списка:

.STEP <переменная> LIST <значение>* ;\$MCE <параметр>

Оператор задает способ и параметры изменения переменных при проведении многовариантного анализа *Stepping*.

Первый вариант анализа выполняется при значении переменной <start>, затем она изменяется в соответствии с величиной шага <step> и анализ повторяется. Так будет происходить до тех пор пока переменная не достигнет значения <end>.

Примеры:

```
.STEP LIN RES RES1(R) 0.5 2 0.3
.STEP DEC CAP POLY1(C) 10P 1N 10
.STEP RES RCARBON(R) LIST 1 2 3 4 5
```

.SUBCKT — директива определения подсхемы на языке SPICE

Общий формат (SPICE-текста и текста Micro-Cap)

```
.SUBCKT <имя подсхемы> [<узел>]*
+ [OPTIONAL:<имя узла>=<номер узла по умолчанию>]*]
+ [PARAMS:<имя параметра>=<значение по умолчанию>]*]
+ [TEXT: <имя текста>=<текст по умолчанию>]*]
```

Примеры:

```
.SUBCKT LT1037 1 2 3 50 99
.SUBCKT CLIP IN OUT PARAMS: LOW=0 HIGH=10
.SUBCKT 7400 D1 D2 Y1 OPTIONAL: DPWR=44 DGND=55
```

Директива обозначает начало определения подсхемы. Определение заканчивается директивой .ENDS. Все команды расположенные между указанными директивами включаются в определение подсхемы.

<Имя подсхемы> — имя подсхемы, т.е. имя, которое используется при ее вызове.

[<узел>]* — номера узлов, передаваемые из подсхемы в вызывающую схему. Номера узлов при вызове подсхемы должны соответствовать номерам узлов в директиве .SUBCKT. Когда подсхема вызывается, узлы в вызове заменяются на выводы подсхемы в том же порядке, что и в директиве SUBCKT. Рассмотрим пример:

```
X1 1 2 BLOCK
.SUBCKT BLOCK 10 20
R1 10 0 1K
```


R2 20 0 2K

.ENDS

В этом примере резистор R1 включается между узлом 1 и узлом 0, а резистор R2 — между узлом 2 и узлом 0 основной схемы.

Ключевое слово OPTIONAL позволяет добавить один или несколько узлов при вызове подсхемы. Если узлы добавляются, их номера заменяют номера, указанные по умолчанию. Это используется для изменения цифровых глобальных выводов питания. При вызове подсхемы можно указать один или более необязательных (OPTIONAL) узлов. Однако, если используется последний узел, все предшествующие также должны быть указаны, в противном случае компилятор не сможет определить какие узлы не указаны. Например:

.SUBCKT GATE 1 2

+ OPTIONAL: A=100 B=200 C=300

Следующие вызовы являются синтаксически корректными:

X1 1 2 GATE ; результат A=100 B=200 C=300

X2 1 2 20 GATE ; результат A=20 B=200 C=300

X3 1 2 20 30 GATE ; результат A=20 B =30 C=300

X4 1 2 20 30 40 GATE результат A=20 B =30 C=40

После ключевого слово PARAMS определяются многочисленные численные параметры, используемые при вызове подсхемы. *<Имя параметра>* определяет его имя, *<значение по умолчанию>* — определяет величину, которая будет присваиваться параметру, если он не указывается при вызове подсхемы. Например:

.SUBCKT BAND 10 20 30 PARAMS: F0=10K BW=1K

Любой из ниже приведенных вызовов подсхемы является синтаксически правильным:

X1 10 20 30 BAND ;параметры принимают умолчательные значения F0=10K BW=1K

X2 10 20 30 BAND PARAMS: F0=50K BW=2K; вызов с параметрами F0=50K BW=2K

X3 10 20 30 BAND PARAMS: BW=2K; вызов с параметрами F0=10K BW=2K

После ключевого слова TEXT определяются текстовые параметры, передаваемые при вызове подсхемы. *<Имя текста>* определяет имя текстового параметра; *<текст по умолчанию>* определяет значение, которое будет принимать текстовый параметр, не указанный при вызове подсхемы. Например, для определения подсхемы:

.SUBCKT PLA 1 2 3 4 TEXT: FILE="JEDEC_10",

любой из ниже приведенных вызовов является синтаксически корректным:

X1 10 20 30 40 PLA; приводит к тому, что FILE="JEDEC_10"

X2 10 20 30 40 PLA TEXT:FILE="JE20"; приводит к тому, что FILE="JE20"

Текстовый параметр используется в следующих случаях:

- Для указания имени файла типа JEDEC для компонента с программируемой логикой.
- Для указания имени файла с формой сигнала для источника цифрового сигнала FSTIM.
- Для определения текстового параметра подсхемы.

.TEMP — задание температуры анализа

Формат SPICE

.TEMP <значение температуры>*

Примеры:

.TEMP 50 — один запуск анализа при температуре 50°C.

.TEMP 0 50 100 — 3 запуска анализа при температурах 0, 50 и 100°C.

Оператор .TEMP задает значения температур, для которых будет производиться анализ. Значение температуры по умолчанию — 27°C. Величины температурно-зависимых параметров схемы являются функциями разности действующей температуры (TEMP) и температуры измерения (TNOM).

Температура измерения задается директивой:

.OPTIONS TNOM=<значение>

Если такая директива отсутствует в описании схемы, то будет использовано значение TNOM из установок окна *Global Settings*.

.TF — установки анализа малосигнальных передаточных функций

Формат SPICE

.TF <выходное выражение> <имя входного источника>

Примеры:

.TF V(OUT) V1

.TF VBE(Q1)*IB(Q1) VIN

Директива задает анализ малосигнальных передаточных функций на постоянном токе для <выходного выражения> относительно <входного источника>.

.TIE — соединение одноименных выводов компонентов одного типа

Формат схем Micro-Cap

.TIE <тип компонента> <имя вывода компонента>

Примеры:

.TIE JKFF CLKB; выводы CLKB всех триггеров JKFF соединяются

.TIE LF155 VCC; выводы VCC всех ОУ LF155 соединяются

Директива .TIE соединяет вместе все указанные одноименные выводы компонентов указанного типа. Это удобный способ присоединения большого количества выводов одновременно. Обычно используется для шин питания, тактовых сигналов, сигналов сброса и установки.

Отметим, что <тип компонента> это общее название компонентов данного вида из библиотеки компонентов, а не позиционное обозначение компонента. Например, в схеме с тремя триггерами JKFF, имеющими позиционные обозначения U1, U2, и U3; в результате выполнения директивы примера 1 все выводы CLKB будут соединены.

.TR — задание максимальных шагов по времени в режиме TRANSIENT

Формат схем Micro-Cap:

.TR <s1 t1> [s2 t2...sn-1 tn-1 sn tn]

Директива .TR позволяет задавать различные значения максимального шага на разных стадиях расчета переходных процессов.

Пример:

.TR 1n 100n .1n 200n 10n 1u

В этом примере временной шаг ограничен $1n$ на интервале от t_{min} до $100n$. На интервале от $100ns$ до $200ns$ он ограничен значением $.1n$. На интервале от $200ns$ до $1\ us$ временной шаг ограничен значением $10n$.

Цель использования этой команды — обеспечить максимальную гибкость при расчете сложных схем. Используется главным образом тогда, когда схема требует меньший шаг во время некоторой критической части расчета, имеющей короткую протяженность, в то время как общее время велико по сравнению с указанным интервалом. В отсутствие этой команды максимальный шаг расчета в течение всего времени анализа определяет параметр *Maximum Time Step*, указываемый в диалоговом окне *Transient Analysis Limits*.

.TRAN — установки анализа переходных процессов

Формат SPICE

`.TRAN <printstep> <run stop time> [<print start time> [<max time step>]] [UIC]`

Примеры:

`.TRAN 10ps 110ns`

`.TRAN 1ns 1us 500ns .5ns UIC`

Директива задает параметры анализа переходных процессов Transient, которые копируются в установки диалогового окна *Transient Analysis Limits* следующим образом:

Number of Points = $1 + \text{<run stop time>/<printstep>}$

Time Range = `<run stop time>`

Maximum Time Step = `<max time step>`

UIC — снимает флажок предварительного расчета рабочей точки на постоянном токе (*Operating Point*) и использует в качестве начальных условий установки операторов `.IC`.

`<printstep>` — задает шаг численного вывода результатов анализа в файл *.tno.

.WARNING — вывод предупреждающих сообщений

Формат схем Micro-Cap:

`.WARNING ["Заголовок"[,]]"Сообщение"[,]условие[,печатаемое выражение]`

Пример 1.

`.WARNING "Capacitor overvoltage", V(C1)>50`

Сообщение при проведении анализа переходных процессов:

Warning:

Capacitor overvoltage at T=0

Пример 2.

`.WARNING "Reminder", "Power is excessive", PDT>5, V(VCC)`

Сообщение при проведении анализа переходных процессов:

Reminder:

Power is excessive at V(VCC)=5.5

Пример 3.

`.WARNING "AC Gain inadequate", dB(V(OUT))<41`

Сообщение при проведении AC анализа:

Warning:

AC Gain inadequate at F=1E3

Команда позволяет определить предупреждающее сообщение, которое появляется при выполнении заданного в операторе *условия*. *Условие* представляет собой логическое выражение типа $I(R1) > 2$. Если *<Условие>* становится истинным при проведении анализа, то будет выведено сообщение с указанным заголовком, при этом будет выведено также значение *<печатаемого выражения>*. Если *печатаемое выражение* не определено, тогда в режиме DC анализа при выполнении условия будет выведено значение DCINPUT1, во время TRANSIENT анализа — время T, во время частотного анализа — частота F. Если указан текст заголовка то замещается умолчательный заголовок «Warning». Все запятые, указанные в определении командной строки могут быть заменены пробелами. Текст "\n" вызывает переход на новую строку при выводе сообщения. См. файлы примеров *warn.cir* и *warn2.cir* из каталога *Statements* для анализа работы этой команды.

В операторах предупреждающих сообщений можно также использовать групповую условную операцию. Например:

PD(D@)>100mW — предупреждение, когда мощность, рассеиваемая на двухвыводном компоненте, позиционное обозначение которого начинается с символа “D”, превышает 100мВт.

I(RX@)>15m — предупреждение, когда ток любого двухвыводного компонента, позиционное обозначение которого начинается с символов “RX”, превышает 15мА.

См. схемный файл *warn4.cir* из каталога *Statements* для анализа работы предупреждающих команд с групповым условием.

.WATCH

Формат SPICE

.WATCH [DC][AC][TRAN] [*<выходная переменная>*]*

Примеры:

.WATCH TRAN V(220) I(L1)

.WATCH AC DB(V(1)) PH(V(1))

.WATCH DC V(OUT)

Позволяет задать выходные переменные, значения которых будут выводиться в специальном окне во время проведения анализа SPICE-схемы.

5. МОДЕЛИ АНАЛОГОВЫХ КОМПОНЕНТОВ

5.1. Общие сведения о моделях компонентов

Все компоненты (аналоговые и цифровые), из которых составляется электрическая принципиальная схема, имеют математические модели трех типов:

- Встроенные математические модели стандартных компонентов, таких как резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, независимые и зависимые источники сигналов, логические вентили и др., которые не могут быть изменены пользователями; можно только изменять значения их параметров. В свою очередь встроенные модели программы Micro-Cap подразделяются на две категории:
 - простые модели, характеризующиеся малым числом параметров, которые можно указать непосредственно на схеме в виде атрибутов (например, модель резистора чаще всего описывается одним – тремя параметрами, причем часть из них можно сделать на схеме невидимыми, чтобы не загромождать чертеж);
 - сложные модели, характеризующиеся большим числом параметров, которые заносятся в библиотеки моделей (например, модель биполярного транзистора характеризуется 52 параметрами).
- Модели в виде подсхем, написанных на языке SPICE. Как правило, предоставляются производителями электронных компонентов.
- Модели в виде схем Micro-Cap (макромодели). Такие модели могут создаваться пользователями самостоятельно с использованием стандартных компонентов.

В программах MC9, MC10 моделируемое устройство может быть описано двумя способами:

- в виде чертежа его принципиальной электрической или функциональной схемы;
- в виде текстового описания в формате SPICE.

Кроме того, при составлении принципиальной схемы часть параметров моделей компонентов задаются в виде их атрибутов и указываются непосредственно на схеме — такие модели будем называть моделями в формате схем Micro-Cap. Остальные модели задаются в текстовом окне с помощью директив .MODEL и .SUBCKT по правилам SPICE. Их будем называть моделями в формате SPICE.

В основном при моделировании в MC9, MC10 используются модели в формате схем Micro-Cap. Но в данном описании для большинства компонентов приводятся два формата описания: текстовый формат SPICE и схемный формат Micro-Cap. Добавление текстового формата SPICE вызвано тем, что подавляющее большинство встроенных библиотек используют именно этот формат, он же является стандартом для описания моделей, предоставляемых производителями электронных компонентов. Сведения об этом формате не являются лишними при работе в программе, осмысленное развитое моделирование невозможно без знания основ языка SPICE.

При описании форматов задания параметров моделей компонентов приняты следующие обозначения:

- * — повторяющийся элемент в строке описания формата. Например *<имя индуктивности>** означает, что могут быть указаны позиционные обозначения нескольких катушек индуктивностей: L1 L2 L3.
- **<X>** — обязательный параметр. Без заполнения поля этого параметра расчет проводиться не будет и появится сообщение об ошибке. Например, модель резистора имеет два обязательных параметра — позиционное обозначение (или имя) и величина сопротивления.
- **[X]** — дополнительный (необязательный) параметр. Может использоваться совместно с указателем обязательного параметра **< >**. Например, запись:

VALUE: *<значение>* [TC=*<tc1>*[,*<tc2>*]],

означает, что параметру **VALUE** обязательно должна быть сопоставлена некая величина или выражение, записываемое в поле *<значение>*. Параметр TC — необязательный, но если его обозначение вписали в поле задания **VALUE**, то ему нужно обязательно присвоить одно значение *<tc1>*. Задание второго значения *<tc2>* не обязательно, но возможно. Таким образом, параметр **VALUE** можно записать:

1000

1000 TC=1m

1000 TC=1m,1u

- | — Символ логической операции ИЛИ (OR) “|” определяет взаимно исключающие альтернативные варианты. Например:

PUL | EXP | SIN

означает PUL или EXP или SIN.

- Текст, набранный курсивом, как например *<значение>*, означает, что указанные данные вводятся пользователем.
- + — означает перенос SPICE-директивы на следующую строку.

5.2. Пассивные компоненты

В меню **Passive components** входят резисторы, конденсаторы, индуктивности, линии передачи, трансформаторы, взаимные индуктивности, диоды и стабилитроны (рис. 5.1).

Следует обратить внимание, что значения сопротивлений, емкостей и индуктивностей могут быть числом или выражением, зависящим от времени, узловых потенциалов, разности узловых потенциалов или токов ветвей, температуры и других режимных параметров. Непосредственная зависимость параметров от времени в программе PSPICE не предусмотрена, здесь Micro-Cap имеет явные преимущества.

В отличие от предыдущей версией программы MC8 [2] в MC9, MC10 окна задания параметров резисторов, конденсаторов и катушек имеют панель *Single* и *Combinations*, нажатие на которые позволяет подобрать для текущей величины пассивного компонента ближайший номинал из стандартного ряда либо комбинацию из последовательно-параллельного соединения компонентов с номиналами из стандартных рядов. Параметры комбинации компонен-

тов для достижения точного значения пассивного компонента задаются в соответствующей позиции пользовательских предпочтений *Preferences*.

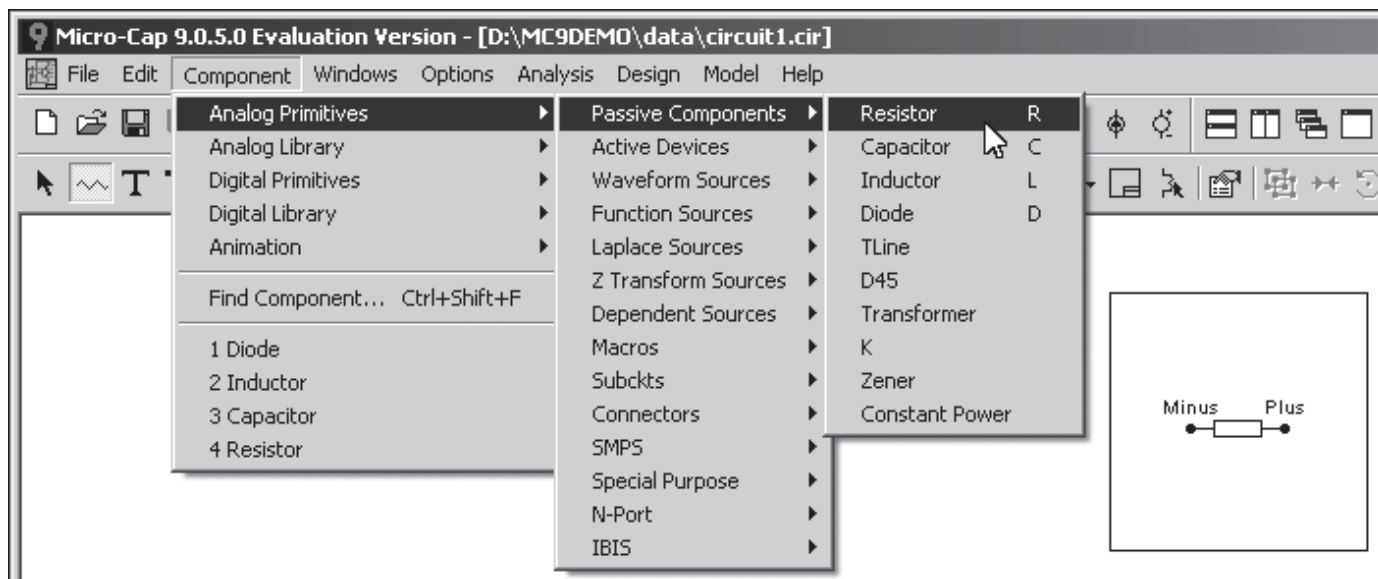


Рис. 5.1. Пассивные компоненты

Следует обратить внимание, что в MC9 появилась возможность задавать паразитные параметры для резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности. Для этого нужно выбрать модель пассивного компонента и задать в ней набор параметров (последовательное и параллельное сопротивление, параллельную емкость, последовательную индуктивность).

5.2.1. Резистор (Resistor)

Формат SPICE

R<имя> <узел +> <узел -> [имя модели]
+<сопротивление> [TC=<tc1>,<tc2>]]

Пример:

R1 2 3 50

Формат схем Micro-Cap (рис. 5.3)

- Атрибут **PART**: <имя> — позиционное обозначение или произвольно заданное имя компонента.

Примеры:

R5

CARBON5

- Атрибут **RESISTANCE** <сопротивление> [TC=<tc1>,<tc2>]] — величина сопротивления.

Примеры

50

10K

50K*(1+V(6)/100)

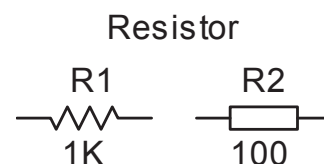


Рис. 5.2. УГО резистора

<Сопротивление> может быть числом или выражением, включающим переменные, зависящие от времени T. Если сопротивление определяется в виде выражения, содержащего переменные состояния схемы, то это выражение используется только при анализе во временной области. Например, выраже-

ние, записанное в позиции **RESISTANCE** $100+V(10)*2$ содержащее значение потенциала узла 10, будет использовано при анализе переходных процессов, при расчете режима по постоянному току перед выполнением малосигнального частотного анализа (AC), и при расчете передаточных характеристик по постоянному току (DC). В режиме малосигнального частотного анализа (AC) зависимость рассматриваемого сопротивления от потенциала $V(10)$ не принимается во внимание. Если в рабочей точке по постоянному току значение потенциала узла 10 оказалось равным 2В, то сопротивление рассматриваемого резистора во время проведения частотного анализа будет равным $100+2*2=104$.

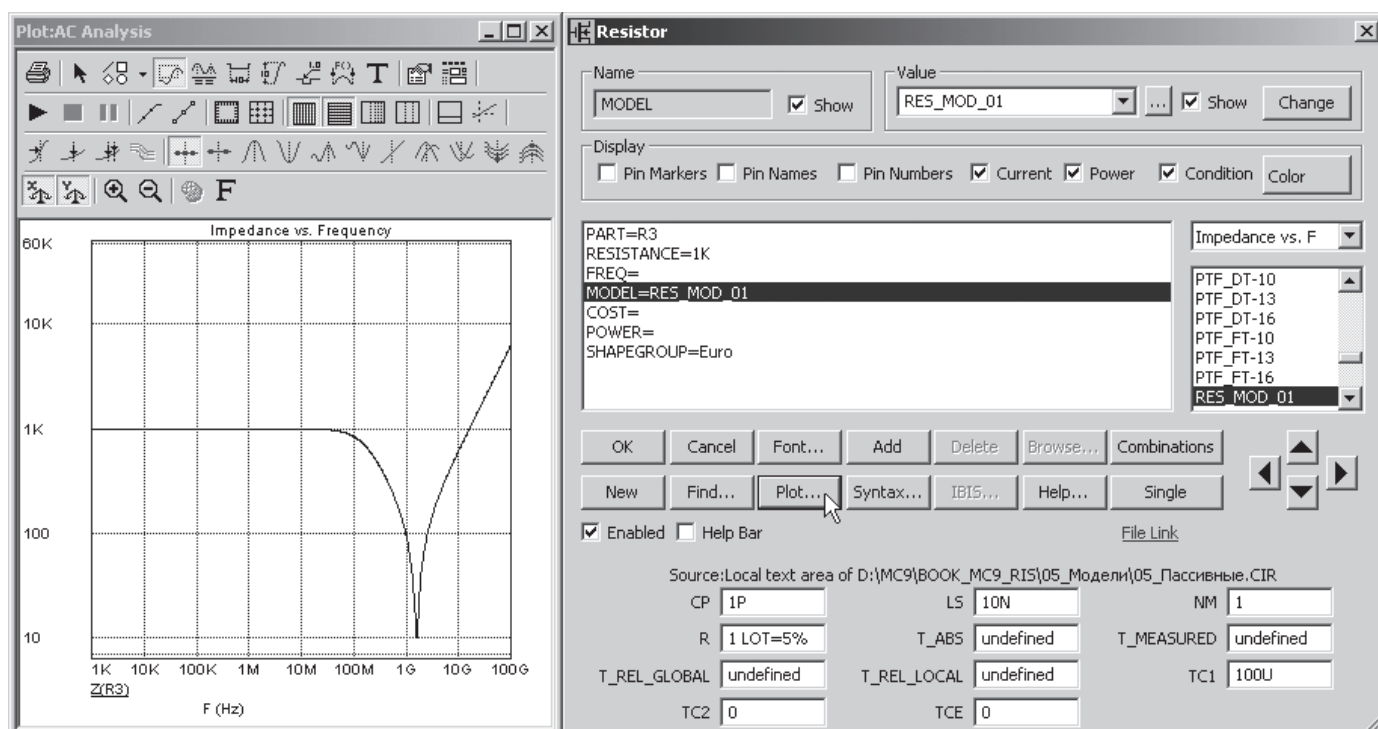


Рис. 5.3. Окно задания параметров резистора

- Атрибут **FREQ**: [*F-выражение*]

Если в этой позиции набрано частотно-зависимое выражение, например $V(4,5)*(1+F/1e7)$, то оно при проведении малосигнального частотного анализа (AC) заменяет значение атрибута **RESISTANCE**. Например, в вышеприведенном выражении для атрибута **FREQ** F обозначает независимую переменную AC-анализа — частоту, а $V(4,5)$ — малосигнальное напряжение между узлами 4 и 5. При расчете переходных процессов и передаточных характеристик по постоянному току сопротивление резистора равно значению атрибута **RESISTANCE** независимо от наличия и значения атрибута **FREQ**.

- Атрибут **MODEL**: [*имя модели*]

- Атрибут **COST** [*стоимость*]

Используется при составлении перечня компонентов (Bill of Materials).

- Атрибут **POWER** [*рассеиваемая мощность*]

Используется при составлении перечня компонентов (Bill of Materials).

- Атрибут **SHAPEGROUP** [*имя группы УГО компонента*]

Можно, например, задать *Main* (см. рис. 5.2, R1) или *Euro* (см. рис. 5.2, R2). Используется для выбора стандарта условного графического обозначения компонента на текущей принципиальной схеме.

- Атрибут **PACKAGE**: [тип корпуса или разводки внешних выводов] — например С6. Используется при составлении списка соединений между компонентами в формате PCB для передачи параметров в программу разводки печатных плат.

Формат текстовой директивы модели резистора:

.MODEL <имя модели> RES ([параметры модели])

Пример:

.MODEL RM RES (R=2.0 LOT=10% TC1=.015)

Параметры, описывающие модель резистора в Micro-Cap, приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Параметры модели резистора

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
R	Масштабный множитель сопротивления	—	1
LS	Последовательная индуктивность	Гн	0.0
CP	Параллельная емкость	Ф	0.0
TC1	Линейный температурный коэффициент сопротивления	°C ⁻¹	0
TC2	Квадратичный температурный коэффициент сопротивления	°C ⁻²	0
TCE	Экспоненциальный температурный коэффициент сопротивления	%/°C	0
NM	Масштабный коэффициент спектральной плотности шума	—	1
T_MEASURED	Температура измерения	°C	—
T_ABS	Абсолютная температура	°C	—
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	°C	—
T_REL_LOCAL	Разность между температурой устройства и модели-прототипа (АКО)	°C	—

В примере на рис. 5.3 в модели резистора задана паразитная емкость CP=1пФ, паразитная индуктивность LS=10нГн, масштабный множитель, определяющий разброс параметров, R=1 LOT=5% и линейный температурный коэффициент сопротивления 100мк°С⁻¹. Из-за наличия паразитных параметров частотная характеристика резистора имеет резонансный пик в области СВЧ.

Влияние температуры

Существуют два основных температурных фактора — квадратичный и экспоненциальный. Квадратичный фактор характеризуется модельными параметрами TC1 и TC2 или значениями <tc1>, <tc2> в строке задания атрибута **RESISTANCE**. Экспоненциальный фактор задается модельным параметром TCE.

Если температурные коэффициенты [TC=<tc1>[,<tc2>]] указаны в строке атрибута **RESISTANCE**, величина сопротивления определяется как <сопротивление>*TF, где TF определяется по формуле:

$$TF = 1 + \langle tc1 \rangle \cdot (T - Tnom) + \langle tc2 \rangle \cdot (T - Tnom)^2.$$

Если указано *<имя модели>*, но не указан TCE, сопротивление рассчитывается аналогично: *<сопротивление>* * TF, где TF определяется по формуле:

$$TF = 1 + TC1 \cdot (T - TNOM) + TC2 \cdot (T - TNOM)^2.$$

Параметр модели резистора TC1 — линейный температурный коэффициент, часто задается в справочном листке резистора как миллионные доли на °C (ppm/degree C). Для преобразования этого справочного параметра в TC1 необходимо его деление на 1000000. Так, например, справочный параметр 3000 ppm/degree C соответствует значению TC1=3E-3.

Если *<имя модели>* указано и указан TCE, сопротивление рассчитывается как *<сопротивление>* * TF, но температурный фактор TF определяется по экспоненциальной формуле:

$$TF = 1,01^{TCE(T-TNOM)}.$$

Если определено и *<имя модели>*, и [TC=*<tc1>*[,*<tc2>*]] в строке атрибута **RESISTANCE**, то значения температурных коэффициентов в строке **RESISTANCE** [TC=*<tc1>*[,*<tc2>*]] имеют приоритет.

Во всех вышеприведенных формулах T — текущее значение температуры (указывается по директиве .TEMP); TNOM — номинальная температура, равная по умолчанию 27° C (указывается в окне *Global Settings*).

Разброс сопротивления при использовании Monte-Carlo

Допуски LOT и DEV для анализа Монте-Карло, доступны только при определении *<имени модели>* в окне задания параметров или модельной директивы .MODEL в текстовой области или на поле схемы. Допуски могут выражаться в относительных (процентах) или абсолютных единицах и могут быть указаны для всех параметров модели, за исключением температурных параметров. Обе формы задания допусков преобразуются в эквивалентное процентное отклонение и воздействуют на MF (фактор Монте-Карло), который, в свою очередь умножается на величину сопротивления с учетом температурных факторов.

$$MF = 1 \pm \langle \text{разброс в процентах DEV или LOT} \rangle / 100$$

Если значение разброса в % (LOT или DEV) равно нулю или анализ по методу Монте-Карло не используется, то MF-фактор устанавливается в единичное значение и не воздействует на окончательную величину сопротивления резистора *Rvalue* (рис. 5.4).

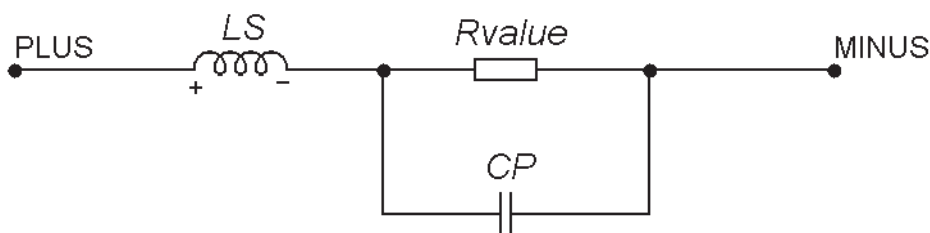


Рис. 5.4. Модель резистора

Окончательно сопротивление резистора *Rvalue* вычисляется по формуле:

$$Rvalue = \langle \text{сопротивление} \rangle \cdot R \cdot TF \cdot MF$$

Шумы резистора

Резистору свойственно напряжение шума, которое возникает из-за неупорядоченного теплового движения носителей заряда. Спектральная плотность теплового шумового тока резистора рассчитывается по формуле Найквиста:

$$I = NM \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T}{Rvalue}} \left[\frac{A}{\sqrt{Hz}} \right]$$

NM представляет собой масштабный коэффициент шумового тока и является модельным параметром. Установка его в нулевое значение приводит к тому, что все резисторы, имеющие заданную модель не вносят вклад в общий шум схемы.

Примеры задания резисторов и их атрибутов см. в схемных файлах *resistors.cir*, *resistor_freq.cir*. из папки *Components\Passive Comp* (book-mc.rar).

5.2.2. Конденсатор (Capacitor)

Формат SPICE

C<имя> <узел +> <узел -> [имя модели]
+ [емкость] [IC=<начальное напряжение>]

Пример:

C2 7 8 110P IC=2

Формат схем Micro-Cap (рис. 5.6)

- Атрибут **PART**: <имя> — позиционное обозначение или произвольное имя компонента.

Примеры:

C5

XC16

- Атрибут **CAPACITANCE**: <емкость> [IC=<начальное напряжение>]

Если <емкость> определяется в виде выражения, содержащего переменные состояния схемы, то это выражение используется только при анализе во временной области. Например, выражение, записанное в позиции **CAPACITANCE** 1n+V(10)*2n, содержащее значение потенциала узла 10, будет использовано при анализе переходных процессов, при расчете режима по постоянному току перед выполнением малосигнального частотного анализа (AC), и при расчете передаточных характеристик по постоянному току (DC).

В режиме малосигнального частотного анализа (AC) зависимость рассматриваемой емкости от потенциала V(10) не принимается во внимание. Если в рабочей точке по постоянному току значение потенциала узла 10 оказалось равным 2В, то емкость рассматриваемого конденсатора во время проведения частотного анализа будет равной 1n+2*2n=5n.

IC=<начальное напряжение> — присваивает начальное значение напряжению на конденсаторе.

Примеры:

1U

110P IC=3

Capacitor

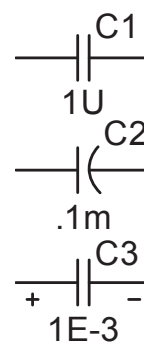


Рис. 5.5. УГО конденсатора

$$50U*(1+V(6)/100)$$

$$1N/(1+V(C1)^2)$$

• Атрибут **CHARGE**: [заряд]

Пример:

$$ATAN(V(C1))$$

Если поле атрибута CHARGE [заряд] заполняется, то оно должно быть выражением, включающим переменные состояния схемы, такие как, например, напряжение на конденсаторе и другие, возможно символьные переменные, определенные директивами (.define или .param).

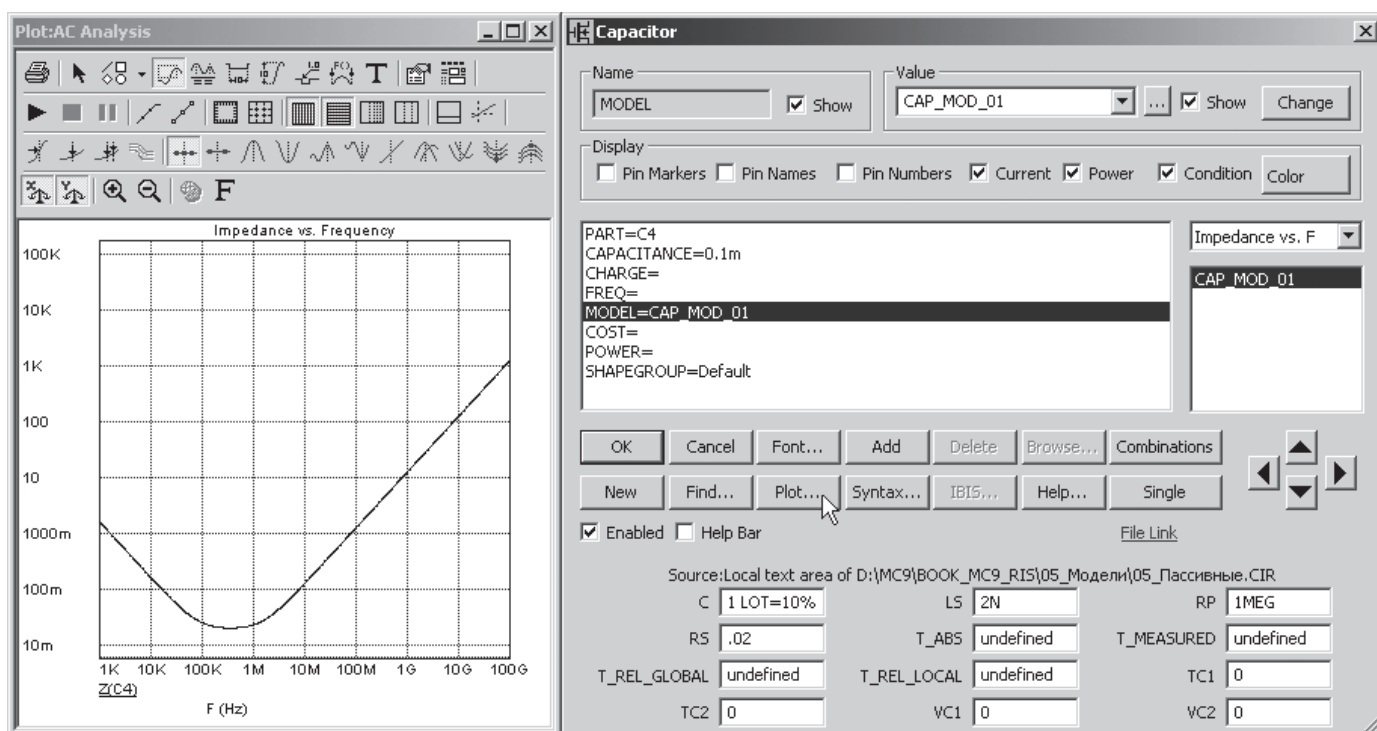


Рис. 5.6. Окно задания параметров конденсатора

Правила использования выражений в полях атрибутов CHARGE и CAPACITANCE

- 1) Может быть использован любой из атрибутов [емкость] или [заряд].
- 2) Если заполнены поля обоих атрибутов и [емкость] и [заряд], пользователь должен гарантировать, что [емкость] — это производная от [заряда] по напряжению на конденсаторе, т.е. $[емкость] = d([заряд])/dV$.
- 3) Если атрибут [емкость] не задан, а атрибут [заряд] задан, Micro-Cap создаст выражение для вычисления емкости путем взятия производной от заряда по напряжению: $C = dQ/dV$.
- 4) Если [емкость] задается в виде выражения $C(V)$, и [заряд] не определяется, Micro-Cap создает эквивалентную схему, содержащую источник тока величиной $C(V)*DDT(V)$. В этом случае, заряд конденсатора всегда будет равен нулю. Во всех других случаях, переменная заряда конденсатора *Charge* — доступна.
- 5) Если [заряд] определяется, выражение для него должно включать напряжение на конденсаторе. Даже для постоянной емкости, $Q(C) = C*V(C)$.
- 6) Если [емкость] или [заряд] даются в виде выражений, зависящих от времени, атрибут MODEL игнорируется. Емкость и заряд определяются ис-

ключительно выражениями и на них не оказывают никакого влияния модельные параметры.

- Атрибут **FREQ**: [*<F-выражение>*].

Если в поле этого атрибута присутствует выражение, то оно при проведении АС-анализа заменяет значение емкости, рассчитанное в рабочей точке по постоянному току. Т.е. если в этой позиции набрано частотно-зависимое выражение, например $1n+1E-9 \cdot V(1,2) \cdot (1+10m \cdot \log(f))$, то оно при проведении малосигнального частотного анализа (АС) заменяет значение атрибута **CAPACITANCE**. Например, в вышеприведенном выражении для атрибута **FREQ** *F* обозначает независимую переменную АС-анализа — частоту, а *V(1,2)* — малосигнальное напряжение между узлами 1 и 2. При расчете переходных процессов и передаточных характеристик по постоянному току емкость конденсатора будет определяться значениями атрибутов **CAPACITANCE** и **CHARGE**, независимо от наличия и значения атрибута **FREQ**.

- Атрибут **MODEL**: [*имя модели*]
- Назначение остальных атрибутов **COST**, **POWER**, **SHAPEGROUP**, **PACKAGE** — аналогично ранее рассмотренным для резистора (см. 5.2.1).

Представленные УГО конденсатора (рис. 5.5), показывают разновидности значений атрибута **SHAPEGROUP**: C1 — *main*; C2 — *electrolytic*; C3 — *polarity*.

Формат текстовой директивы модели конденсатора

.MODEL <имя модели> **CAP** ([*параметры модели*])

Параметры модели конденсатора приведены в табл. 5.2.

Примеры:

.MODEL CMOD CAP(C=2.0 LOT=10% VC1=2E-3 VC2=.0015)

.MODEL CEL CAP(C=1.0 LOT=5% DEV=.5% T_ABS=37)

Если [*имя модели*] задано и модельные параметры определены тем или иным способом (в библиотеке или текстовой директиве), то они используются при анализе. Однако, если при этом определен один из атрибутов [*емкость*] или [*заряд*] в виде выражений, зависящих от времени, тогда значение атрибута **MODEL** игнорируется.

Квадратичная зависимость емкости от напряжения

Если в окне атрибутов используется [*имя модели*], то значение, записанное в строке атрибута **CAPACITANCE** умножается на QF-фактор для вычисления емкости конденсатора, зависящей от напряжения на его выводах:

$$QF = 1 + VC1 \cdot V + VC2 \cdot V^2$$

Эта возможность оставлена в программе Micro-Cap для сохранения совместимости с версией языка SPICE 2G.

Температурная зависимость емкости

Температурная зависимость емкости подобна температурной зависимости сопротивления, задается значениями 2-х модельных коэффициентов TC1 и TC2. В случае задания [*имени модели*] в окне атрибутов, <емкость> в стро-

ке атрибута **CAPACITANCE** домножается на значение TF-фактора, который вычисляется по формуле:

$$TF = 1 + TC1 \cdot (T - T_{nom}) + TC2 \cdot (T - T_{nom})^2$$

Таблица 5.2. Параметры модели конденсатора

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
C	Масштабный множитель емкости	—	1
LS	Последовательная индуктивность	Гн	0
RP	Параллельное сопротивление	Ом	∞
RS	Последовательное сопротивление	Ом	0
VC1	Линейный коэффициент зависимости от напряжения	V^{-1}	0
VC2	Квадратичный коэффициент зависимости от напряжения	V^{-2}	0
TC1	Линейный температурный коэффициент емкости	$^{\circ}C^{-1}$	0
TC2	Квадратичный температурный коэффициент емкости	$^{\circ}C^{-2}$	0
T_MEASURED	Температура измерения	$^{\circ}C$	—
T_ABS	Абсолютная температура	$^{\circ}C$	—
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	$^{\circ}C$	—
T_REL_LOCAL	Разность между температурой устройства и модели-прототипа (АКО)	$^{\circ}C$	—

Разброс емкости

Задается так же, как и разброс сопротивления в модельной строке с помощью ключевых слов LOT или DEV для любых параметров модели, за исключением температурных. В вычислении значения емкости учитывается домножением на MF-фактор, вычисляемый по формуле:

$$MF = 1 \pm \langle \text{разброс в процентах DEV или LOT} \rangle / 100$$

Окончательное значение емкости конденсатора при задании в окне атрибутов [имени модели] Cvalue (рис. 5.7) определяется выражением:

$$Cvalue = \langle \text{емкость} \rangle \cdot C \cdot QF \cdot TF \cdot MF = \\ = \langle \text{емкость} \rangle \cdot C \cdot (1 + VC \cdot V + VC2 \cdot V^2) [1 + TC1(T - TNOM) + TC2(T - TNOM)^2] MF.$$

Шумы конденсатора

Если заданы модельные параметры RS и RP, то указанные резисторы рассматриваются как источники теплового шума:

$$IRS = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T}{RS}} ; \quad IRP = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T}{RP}}.$$

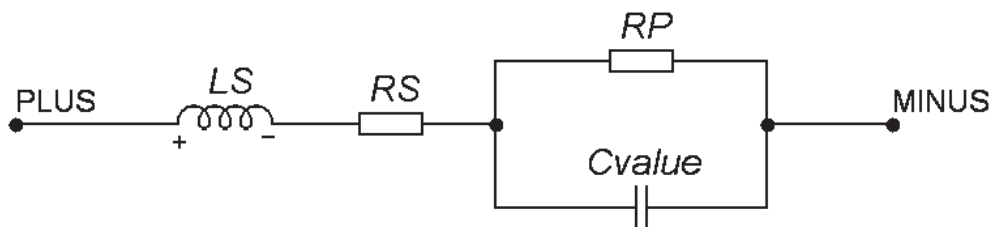


Рис. 5.7. Модель конденсатора

5.2.3. Катушка индуктивности (Inductor)

Формат SPICE

L<имя> <узел +> <узел -> [имя модели]
+ [индуктивность] [IC=<начальный ток>]

Примеры:

L1 2 3 1U

L2 7 8 110P IC=2

Формат схем Micro-Cap (рис. 5.9)

- Атрибут **PART**: <имя>

Примеры: L5, L1

- Атрибут **INDUCTANCE** <индуктивность> [IC=<начальный ток>]

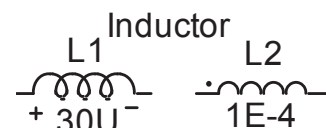


Рис. 5.8. УГО индуктивности

Если <индуктивность> определяется в виде выражения, содержащего переменные состояния схемы, то оно используется только при анализе во временной области. Например, выражение, записанное в позиции INDUCTANCE $1U/(1+I(L2)^2)$, содержащее ток катушки L2, будет использовано при анализе переходных процессов, при расчете режима по постоянному току перед выполнением малосигнального частотного анализа (AC), и при расчете передаточных характеристик по постоянному току (DC). В режиме малосигнального частотного анализа (AC) зависимость рассматриваемой индуктивности от тока $I(L2)$ не принимается во внимание. Если в рабочей точке по постоянному току значение тока через катушку L2 оказалось равным 2А, то рассматриваемая индуктивность во время проведения частотного анализа будет принята равной $1U/(1+2^2)=0.2U$.

IC=<начальный ток> — присваивает начальное значение току через катушку в режиме анализа переходных процессов, если флажок *Operating Point* сброшен.

Примеры:

1U

110U IC=3

$1U/(1+I(L2)^2)$

- Атрибут **FLUX**: [магнитный поток]

Пример:

$1u*ATAN(I(L2))$

При задании атрибута **FLUX** должно быть указано выражение, включающее переменные состояния катушки, такие как ток через нее и возможно, другие символьные переменные, определяемые директивами .define или .param.

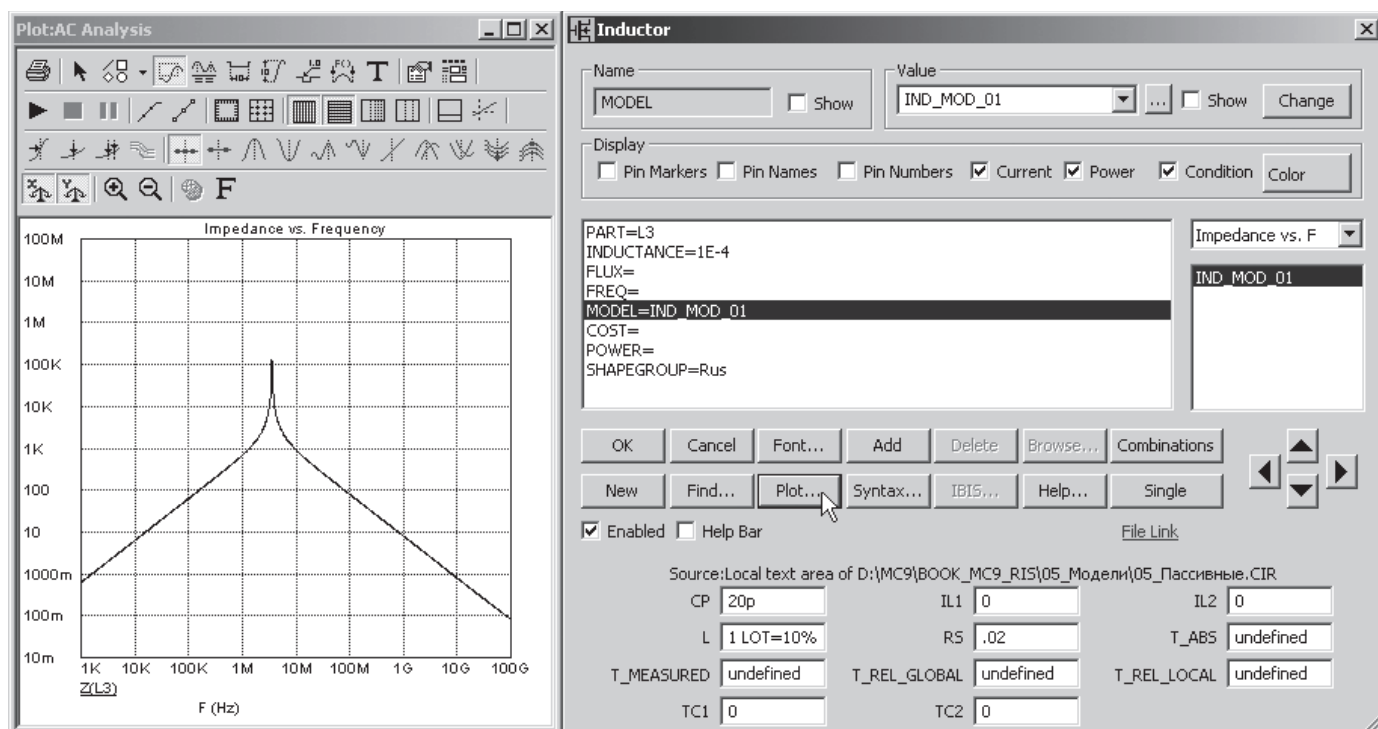


Рис. 5.9. Окно задания параметров катушки индуктивности

Правила использования выражений для атрибутов *FLUX* и *INDUCTANCE*

1) Должно быть задано хотя бы одно выражение либо [*индуктивности*] либо для [*магнитного потока*].

2) Если заданы оба значения как [*индуктивности*], так и [*магнитного потока*] в виде выражений, зависящих от времени, пользователь должен гарантировать, что [*индуктивность*] является производной [*магнитного потока*] по току через катушку: [*индуктивность*]=d([*магнитный поток*])/dI

3) Если [*индуктивность*] не задается, а [*магнитный поток*] представляет собой выражение, зависящее от времени, Micro-Cap создаст выражение для индуктивности путем дифференцирования магнитного потока по току катушки: $L=dX/dI$.

4) Если [*индуктивность*] является выражением, зависящим от времени, а [*магнитный поток*] не задается, Micro-Cap создаст эквивалентную схему для катушки, состоящую из источника эдс величиной $L(I)*DDT(I)$.

5) Если [*магнитный поток*] представляет собой выражение, зависящее от времени, то оно должно включать в себя ток через катушку. Даже для линейной катушки $X(L)=L*I(L)$.

6) Если [*индуктивность*] или [*поток*] заданы выражением во временной области, атрибут MODEL не принимается во внимание и катушка не может быть связана с К-сердечником, т.е. обладать взаимной индуктивностью. Индуктивность и поток определяются исключительно выражениями во временной области и на них не могут оказывать влияние модельные параметры.

Выражение, зависящее от времени, представляет собой любое выражение, использующее переменные, которые изменяются в течение проведения моделирования, такие как V(L1) или I(L2).

- Атрибут **FREQ**: [*<F-выражение>*].

Пример:

$$1.2\text{mh}+5\text{m}*(1+\log(F))$$

Если в поле этого атрибута присутствует выражение, то оно при проведении АС-анализа заменяет значение индуктивности, рассчитанное в рабочей точке по постоянному току с помощью выражения в поле атрибута **INDUCTANCE**. Т.е. если в этой позиции набрано частотно-зависимое выражение, например $10\text{mh} + I(L1) \cdot (1 + 1\text{E-}9 \cdot f) / 5\text{m}$, то оно при проведении малосигнального частотного анализа (АС) заменяет значение атрибута **INDUCTANCE**. Например, в вышеприведенном выражении для атрибута **FREQ** F обозначает независимую переменную АС-анализа — частоту, а $I(L1)$ — малосигнальный ток через катушку $L1$. При расчете переходных процессов и передаточных характеристик по постоянному току индуктивность будет равна значению атрибута **INDUCTANCE** независимо от наличия и значения атрибута **FREQ**.

- Атрибут **MODEL**: [имя модели]
- Назначение остальных атрибутов **COST**, **POWER**, **SHAPEGROUP**, **PACKAGE** — аналогично ранее рассмотренным для резистора (см. 5.2.1).

Представленные УГО катушки индуктивности (рис. 5.8), показывают разновидности значений атрибута **SHAPEGROUP**: $L1$ – main; $L2$ – Rus (доработка авторов).

Формат текстовой директивы модели индуктивности

.MODEL <имя модели> IND ([параметры модели])

Примеры:

.MODEL LMOD IND (L=2.0 LOT=10% IL1=2E-3 IL2=.0015)

.MODEL L_W IND (L=1.0 LOT=5% DEV=.5% T_ABS=37)

Параметры модели индуктивности приведены в табл. 5.3.

Если в окне атрибутов катушки [имя модели] опущено, то её индуктивность равна <индуктивности> в Генри, записанному в строке атрибутов **INDUCTANCE**. В противном случае индуктивность вычисляется умножением на масштабный коэффициент индуктивности L и на коэффициенты факторов, перечисленных ниже.

Квадратичная зависимость индуктивности от тока

Если в окне атрибутов используется [имя модели], то значение, записанная в строке атрибута **INDUCTANCE** умножается на QF-фактор для вычисления индуктивности катушки, зависящей от тока в ней:

$$QF = 1 + IL1 \cdot I + IL2 \cdot I^2$$

Эта возможность оставлена в программе Micro-Cap для сохранения совместимости с версией языка SPICE 2G.

Температурная зависимость индуктивности

Температурная зависимость индуктивности подобна температурной зависимости сопротивления и емкости (см. 5.2.1, 5.2.2). Задается значениями двух коэффициентов — TC1 и TC2. В случае задания [имени модели] в окне атрибутов, <индуктивность> в строке атрибута **INDUCTANCE** домножается на значение TF-фактора, который вычисляется по формуле:

$$TF = 1 + TC1 \cdot (T - T_{nom}) + TC2 \cdot (T - T_{nom})^2$$

Таблица 5.3. Параметры модели индуктивности

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
L	Масштабный множитель индуктивности	—	1
CP	Параллельная емкость	Ф	0
RS	Последовательное сопротивление	Ом	0
IL1	Линейный коэффициент зависимости от тока	A ⁻¹	0
IL2	Квадратичный коэффициент зависимости от тока	A ⁻²	0
TC1	Линейный температурный коэффициент индуктивности	°C ⁻¹	0
TC2	Квадратичный температурный коэффициент индуктивности	°C ⁻²	0
T_MEASURED	Температура измерений	°C	—
T_ABC	Абсолютная температура	°C	—
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	°C	—
T_REL_LOCAL	Разность между температурой устройства и модели-прототипа (АКО)	°C	—

Разброс индуктивности

Задается так же, как и разброс сопротивления в модельной строке с помощью ключевых слов LOT или DEV для любых параметров модели, за исключением температурных. При расчете значения индуктивности учитывается умножением на MF-фактор, вычисляемый по формуле:

$$MF = 1 \pm \langle \text{разброс в процентах DEV или LOT} \rangle / 100$$

Окончательное значение индуктивности катушки L_{value} (рис. 5.10) при задании в окне атрибутов [имени модели] определяется выражением:

$$L_{value} = \langle \text{индуктивность} \rangle \cdot L \cdot QF \cdot TF \cdot MF =$$

$$= \langle \text{индуктивность} \rangle L (1 + IL1 \cdot I + IL2 \cdot I^2) [1 + TC1(T - T_{NOM}) + TC2 \cdot (T - T_{NOM})^2] \cdot MF.$$

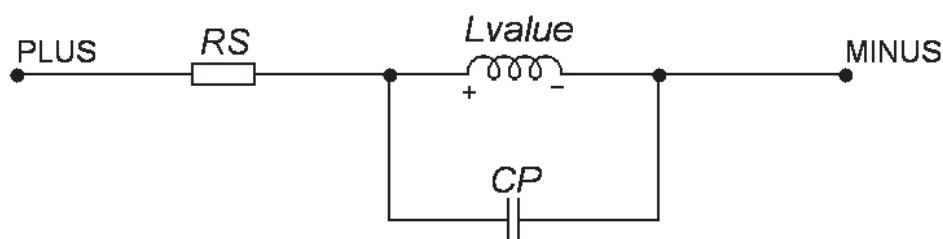


Рис. 5.10. Модель катушки индуктивности

Из-за наличия паразитных параметров частотная характеристика катушки индуктивности может иметь резонансный пик (см. рис. 5.9).

Шумы катушки индуктивности

Если в параметрах модели задано паразитное последовательное сопротивление RS , то оно рассматривается как источник теплового шума, задаваемый в виде спектральной плотности шумового тока:

$$IRS = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T}{RS}}$$

5.2.4. Взаимная индуктивность и магнитный сердечник (K)

Формат SPICE

K<имя> L<имя катушки> <L<имя катушки>>* <коэффициент связи>

K<имя> L<имя катушки>* <коэффициент связи> <имя модели>

Примеры:

K1 L1 L2 .98

K1 L1 L2 L3 L4 L5 L6 .999

Формат схем Micro-Cap (рис. 5.12, 5.13)

- Атрибут **PART**: <имя>

Пример: K1

- Атрибут **INDUCTORS**: <имя катушки> <имя катушки>*

Пример: L1 L2 L3

- Атрибут **COUPLING**: <коэффициент связи>

Пример: 0.99

- Атрибут **MODEL**: [имя модели]

Пример: K_3C8

K

⌋⌋⌋⌋⌋⌋ K1
MODEL=

⌋⌋⌋⌋⌋⌋ K2
MODEL=N97

Рис. 5.11. УГО магнитного сердечника

Порядок перечисления имен индуктивностей Lyyu, Lzzz ... не имеет значения, знак взаимной индуктивности определяется положительными направлениями токов индуктивностей относительно начал обмоток. Параметром взаимной индуктивности является коэффициент связи.

На одном сердечнике помещается одна или несколько обмоток с именами Lyyu, Lzzz... Все обмотки имеют одинаковое значение <коэффициента связи>. При хорошей магнитной связи, осуществляемой посредством замкнутого ферромагнитного сердечника, величина коэффициента связи находится в пределах 0.98...0.999. Единичное значение коэффициента связи соответствует 100%-ной магнитной связи между обмотками, что является эквивалентом отсутствия индуктивностей рассеивания.

При задании магнитной связи возможны 2 варианта:

- магнитосвязанные индуктивности линейны;
- магнитосвязанные индуктивности нелинейны (имеется нелинейный магнитный сердечник, определяемый моделью типа CORE).

Выбор нелинейного или линейного магнитного сердечника зависит от моделируемого электронного устройства. Если нелинейные явления в сердечнике (гистерезис и насыщение) являются принципиальными для работы устройства (например, в ключах на магнитных усилителях и магнитных реакторах), то используется нелинейный сердечник, если же — нет, (например импульсный или сетевой трансформатор), то используется линейный сердечник.

Магнитосвязанные линейные индуктивности.

Если при описании взаимной индуктивности и магнитного сердечника **K** (рис. 5.12) не задан атрибут **MODEL**, то расчеты проводятся для линейных индуктивностей.

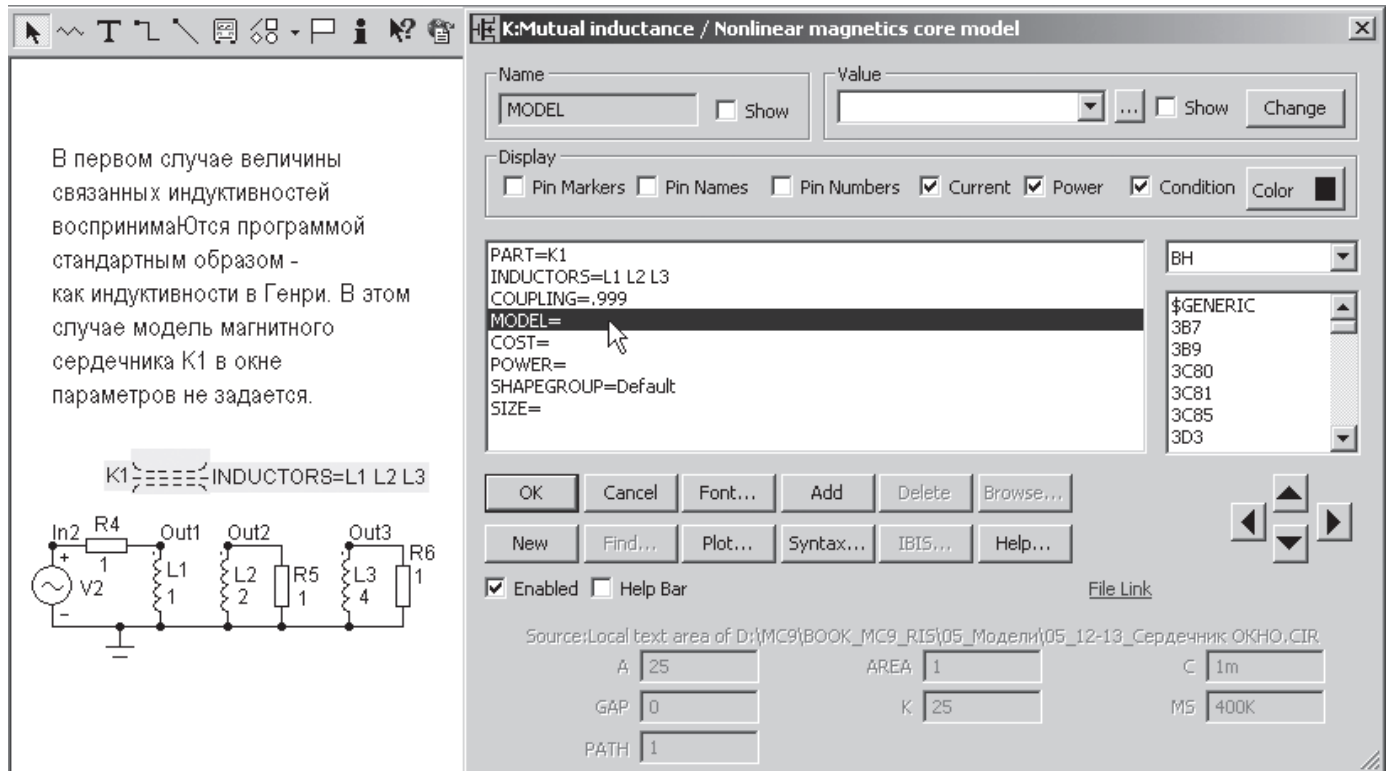


Рис. 5.12. Окно задания параметров линейного сердечника

Коэффициент связи K_{ij} двух обмоток (i, j) определяется выражением

$$K_{ij} = \frac{M_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}},$$

где L_i, L_j — индуктивности обмоток; M_{ij} — их взаимная индуктивность.

Напряжение на катушке L_i , с учетом взаимной индукции определяется выражением:

$$U_i = L_i \frac{dI_i}{dt} + M_{ij} \frac{dI_j}{dt} + M_{ik} \frac{dI_k}{dt} + \dots,$$

где I_i — ток, втекающий в вывод (+) обмотки (помечен на схеме точкой).

В этом случае при вводе в схему связанных индуктивностей посредством вставки элемента K, в открывающемся окне параметров задается лишь позиционное обозначение сердечника KN, позиционные обозначения всех катушек индуктивности (INDUCTORS) с которыми он связан и коэффициент связи (COUPLING) (см. рис. 5.12).

Магнитосвязанные катушки с нелинейным магнитным сердечником

Если при описании взаимной индуктивности и магнитного сердечника **K** (рис. 5.13) задан атрибут **MODEL** (указана модель сердечника), то расчеты проводятся для нелинейных индуктивностей.

Следует обратить внимание, что при этом изменяется смысл параметра <индуктивность> для магнитосвязанных катушек индуктивности Lxxx, перечисленных в поле параметра INDUCTORS. Теперь при описании каждой обмотки Lxxx численное значение, задаваемое в позиции INDUCTANCE окна параметров катушки индуктивности определяет не индуктивность, а число витков соответствующей обмотки сердечника.

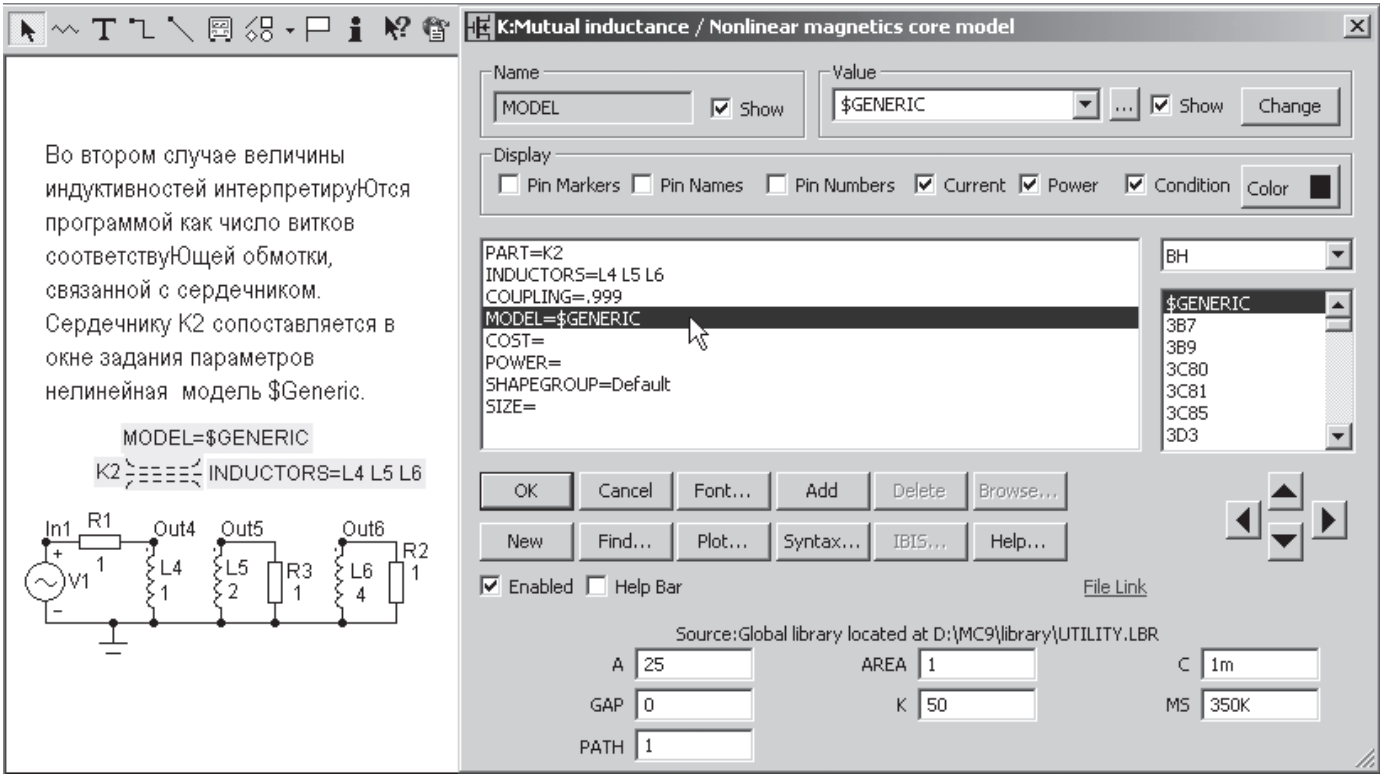


Рис. 5.13. Окно задания параметров нелинейного сердечника

Следовательно, в случае использования нелинейного магнитного сердечника, величина, задаваемая в позиции **INDUCTANCE** катушки индуктивности, не может быть выражением, а должна быть целым положительным числом.

Параметры модели магнитного сердечника приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4. Параметры модели магнитного сердечника

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
AREA	Площадь поперечного сечения магнитопровода	см ²	1
PATH	Средняя длина магнитной силовой линии	см	1
GAP	Ширина воздушного зазора	см	0
MS	Намагниченность насыщения	А/м	400·10 ³
A	Параметр формы безгистерезисной кривой намагничивания	А/м	25
C	Постоянная упругого смещения доменных границ		0.001
K	Постоянная необратимой деформации доменных стенок	А/м	25

Список связанных индуктивностей в окне задания параметров сердечника может включать даже единственную катушку.

Пример задания и моделирования магнитосвязанных катушек с линейным и нелинейным сердечниками см. в схемном файле *Core3.cir* из каталога *Components\Passive Comp* (book-mc.rar).

Формат текстовой директивы модели сердечника:

.MODEL <имя модели> **CORE** (параметры модели)

Примеры:

.MODEL K1 CORE (Area=2.54 Path=.54 MS=2E5)

.MODEL K2 CORE (MS=2E5 LOT=25% GAP=.001)

Особенности модели магнитного сердечника

В Micro-Cap в качестве модели магнитного сердечника используется модель Джилса-Атертона, которая не учитывает изменение параметров магнитного сердечника в зависимости от частоты (более подробно см. в 11.1). В этой модели петли гистерезиса для разных уровней перемагничивания магнитного материала (значений H_m), базируются на безгистерезисной кривой, которая строится в предположении отсутствия эффектов деформации и вращения векторов намагниченности доменных структур ферромагнетика. Сами же гистерезисные зависимости $M(H)$ или $B(H)$, получаются на основе этой кривой с использованием дифференциального уравнения процесса (аналогичного сухому трению в механике), характеризующегося постоянной коэрцитивной силой K .

Параметры модели магнитного сердечника имеют сложную и далеко не очевидную связь со справочными параметрами реальных магнитных материалов. Для расчета параметров модели используется пункт меню **MODEL**.

Для выяснения влияния параметров модели магнитного сердечника A , K , C на кривую петли гистерезиса можно загрузить пример *core.cir* из каталога *Components\Passive Comp* (book-mc.rar) и запустить анализ переходных процессов. Затем можно организовать многовариантный анализ при изменении модельных параметров. Влияние увеличения каждого модельного параметра представлено в табл. 5.5:

Таблица 5.5. Качественная оценка связи физических параметров сердечника и параметров модели

Параметр	μ	HC	BR
A	—	+	+
K		+	+
C	+	—	—

В таблице μ — дифференциальная магнитная проницаемость; HC — величина коэрцитивной силы; BR — величина остаточной индукции.

Построение графиков напряженности поля H и магнитной индукции B

В окне задания параметров анализа переходных процессов (Transient Analysis Limits) в графе Y expression можно задавать построение графиков магнитных величин в сердечнике следующим образом:

$B(L1)$ — построение графика зависимости индукции B в сердечнике катушки L1 в единицах системы СГС (гаусс);

$H(L1)$ — построение графика зависимости напряженности магнитного поля H в сердечнике катушки $L1$ в единицах системы СГС (эрстед);

$BSI(L1)$ — построение графика зависимости индукции B в сердечнике катушки $L1$ в единицах системы СИ (тесла);

$HSI(L1)$ — построение графика зависимости напряженности магнитного поля H в сердечнике катушки $L1$ в единицах системы СИ (А/м).

5.2.5. Трансформатор (Transformer)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>

Пример: T1

- Атрибут **VALUE**: <индуктивность первичной обмотки>, <индуктивность вторичной обмотки>, <коэффициент связи>

Пример: .01,.0001,.98

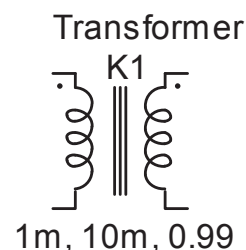


Рис. 5.14. Трансформатор

Фактически трансформатор представляет собой две катушки индуктивности, связанные магнитно между собой (пронизываемые практически одинаковым магнитным потоком). Его модель эквивалентна двум отдельным катушкам индуктивности, связанным через общий линейный сердечник (компонент K без указания имени модели, см. 5.2.4), определяющий величину взаимной индуктивности указанных катушек. Коэффициент связи K связан с величиной взаимной индуктивности катушек M следующим соотношением:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_P L_S}},$$

где L_P , L_S — индуктивности первичной и вторичной обмоток соответственно.

При выполнении моделирования между входным и выходным плюсовым выводом трансформатора включается сопротивление величиной $1/GMIN$, для того чтобы не возникли проблемы со сходимостью вычислительных алгоритмов (обеспечивается гальваническая связь с «землей»).

Еще один способ задания трансформатора — в виде схемной макромоделли, содержащей магнитосвязанные индуктивности. Так Micro-Cap имеет встроенную модель двухобмоточного трансформатора со средней точкой **Component>Analog Primitives>Macros>Centap**.

Все 3 способа задания трансформатора в схеме для моделирования иллюстрирует пример *transformer.cir* из каталога *Components\Passive Comp* (book-mc.rar).

Следует отметить, что в Micro-Cap имеются встроенные макромоделли идеальных трансформаторов, не содержащие индуктивных компонентов. Они построены на основе линейных зависимых источников напряжения и тока, трансформирующих соответствующие физические величины. Это компоненты из группы **Component>Analog Primitives>Macros**: *Ideal_Trans2*, *Ideal_Trans3*, представляющие собой модель идеального двухобмоточного и трехобмоточного трансформаторов. Они могут быть использованы при моделировании устройств, в которых не существенны процессы, происходящие в индуктивных компонентах (в индуктивностях намагничивания и рассеивания).

При необходимости модель идеального трансформатора может быть дополнена индуктивностью намагничивания для моделирования реальных трансформаторов со 100%-й магнитной связью между обмотками. Для моделирования трансформатора с неидеальной магнитной связью в дополнение к индуктивности намагничивания добавляются и индуктивности рассеяния обмоток. При этом получается модель, эквивалентная трем вышеперечисленным, однако неидеальная магнитная связь здесь задается не с помощью коэффициента связи $K < 1$, а наличием индуктивностей рассеивания определенной величины (как правило, на несколько порядков меньше индуктивности намагничивания).

5.2.6. Длинная линия (Tline)

Формат SPICE

Идеальная линия без потерь

T<имя> <А порт+> <А порт-> <В порт+> <В порт-> [имя модели]
+ [Z0=<значение> [TD=<значение>] | [F=<значение> [NL=<значение>]]]

Примеры:

T1 10 20 30 40 Z0=50 TD=3.5ns

T1 10 20 30 40 Z0=150 F=125Meg NL=0.5

T1 20 30 40 50 TLMODEL

Линия с потерями

T<имя> <А порт +> <А порт-> <В порт+> <В порт->

+ [<имя модели> [физическая длина]]

+ [LEN=<длина>

+ R=<погонное сопротивление> L=<погонная индуктивность>

+ G=<погонная проводимость> C=<погонная емкость>]

Примеры:

T1 20 30 40 50 LEN=1 R=.5 L=.8U C=56PF

T3 1 2 3 4 TMODEL 12.0

Формат схем Micro-Cap (рис. 5.16)

- Атрибут **PART**: <имя>

Пример:

T1

Для идеальной длинной линии без потерь

- Атрибут **VALUE**:

Z0=<значение> [TD=<значение>] | [F=<значение> [NL=<значение>]];

Здесь Z0 — волновое сопротивление линии (Ом); TD — задержка сигнала в линии (с); NL — электрическая длина линии на частоте F ($NL = L/\lambda$, где L — геометрическая длина линии, λ — длина волны в линии, по умолчанию $NL = 0.25$).

При описании линии передачи задается параметр TD либо F и NL.

Пример:

Z0=50 TD=3.5ns

Для длинной линии с потерями:

- Атрибут **VALUE**: <физическая длина> LEN=<длина>

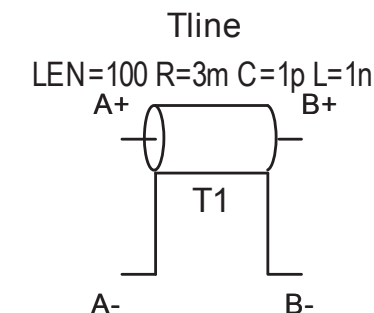


Рис. 5.15. Длинная линия

R =<погонное сопротивление> L =<погонная индуктивность>

G =<погонная проводимость> C =<погонная емкость>

Пример:

LEN=1 R=.5 L=.8U C=56PF

R=.5 L=.8U C=56PF

- Атрибут **MODEL**: [имя модели]

Пример:

RELAY

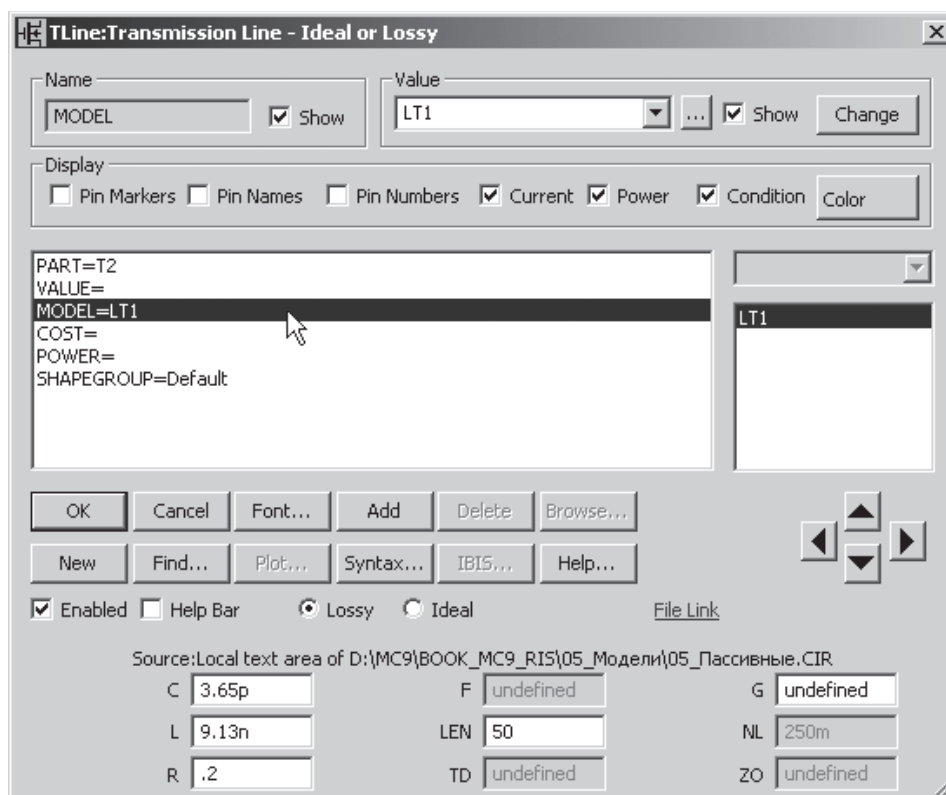


Рис. 5.16. Окно задания параметров длинной линии

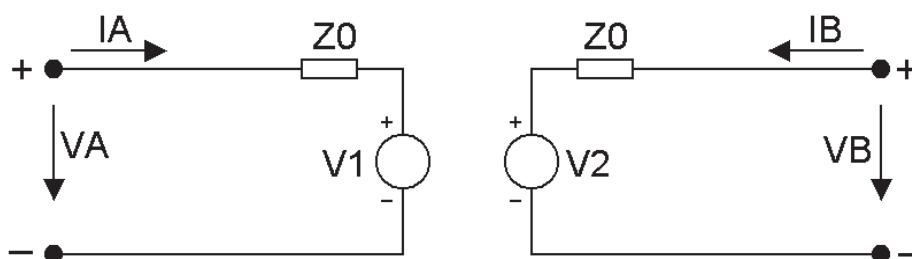
Формат текстовой директивы модели длинной линии:

.MODEL <имя модели> TRN(параметры модели)

Уравнения модели длинной линии

Эквивалентная схема замещения длинной линии без потерь и с потерями представлена на рис. 5.17. Принципиальное отличие двух моделей — реализация функции задержки сигнала (delay). В модели идеальной линии без потерь задержка моделируется функцией, заданной списком пар значений (время, величина) со сдвигом во времени.

В линии передачи с потерями задержка моделируется принципиально другим способом, состоящим в использовании интеграла свертки импульсной характеристики линии с входным воздействием для расчета реакции на выходе. Импульсная характеристика получается из предварительно выведенной аналитической формулы. Предварительное аналитическое решение для нахождения импульсной характеристики является наиболее быстрым и точным способом по сравнению с обратным преобразованием Фурье передаточной характеристики в S-области. Свертка подразумевает возможность использования любого входного воздействия.



$$V1 = V_B(\text{delayed}) + Z0 \cdot I_B(\text{delayed})$$

$$V2 = V_A(\text{delayed}) + Z0 \cdot I_A(\text{delayed})$$

Рис. 5.17. Схема замещения длинной линии

Таблица 5.6. Параметры модели длинной линии

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
Идеальная линия без потерь			
Z0	Волновое сопротивление	Ом	—
TD	Время задержки сигнала	с	—
F	Частота для расчета NL	Гц	—
NL	Электрическая длина на частоте F (относительно длины волны)		0,25
Линия с потерями			
R	Погонное сопротивление	Ом/м	—
L	Погонная индуктивность	Гн/м	—
G	Погонная проводимость	См/м	—
C	Погонная емкость	Ф/м	—
LEN	Длина линии	м	—

Следует отметить, что поддерживаются только следующие типы длинных линий — RLC, RC, RG, и LC. Ненулевые значения для модельных параметров R, L, C, и G, задающие другой тип распределенной линии, вызовут сообщение об ошибке.

Для обоих типов линии передачи могут быть указаны и значения в строке атрибута **VALUE** и модельные параметры. В этом случае параметры строки **VALUE** имеют приоритет и замещают модельные параметры при расчетах. Если модификатор длины <физическая длина> задан, то он замещает параметр модели LEN.

Линия передачи без потерь при расчете переходных процессов выполняет роль линии задержки, при расчете частотных характеристик она представляет собой безынерционное звено с линейной ФЧХ.

Примеры моделирования линий передачи без потерь — *tline_01.cir*, *tline_02.cir*, *tline_03.cir*; линии передачи с потерями — *tline_L_3.cir*. Схемы находятся в каталоге *Components\Passive Comp* (book-mc.rar).

5.3. Источники сигналов

Выбираются из раздела меню *Component>Analog Primitives>Waveform sources*.

5.3.1. Независимые источники постоянного напряжения и тока

Точка нулевого потенциала или общий провод (Ground)

 — компонент Ground. Выбирается из раздела *Component>Analog primitives>Connectors*. Его называют земля, общий провод или точка нулевого потенциала. Этот компонент обязательно должен присутствовать в схеме, при его отсутствии схема моделироваться не будет.

Источник постоянного напряжения (Battery)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **VALUE**: <значение>
- Примеры:
- 5V
- 15V

Battery

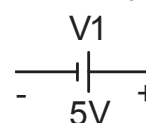


Рис. 5.18. Источник постоянного напряжения

Батарея (Battery) представляет собой источник постоянного напряжения. Напряжение на ее выводах равно заданному <значению>, независимо от подключенной к ней внешней цепи.

Фиксированное смещение для аналоговых цепей (Fixed Analog)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **VALUE**: <значение>
- Примеры:
- 15V
- 12.5

Fixed Analog



Рис. 5.19. Источник постоянного смещения

Компонент **Fixed Analog** на своем выходе создает фиксированный потенциал, равный заданному <значению>, независимо от подсоединенной внешней цепи. Постановка подобного компонента в схему эквивалентна включению батареи с соответствующим значением напряжения, один из выводов которой подключен к земле (Ground .

Источник постоянного тока (Isource)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **VALUE**: <значение>
- Примеры:
- 100mA
- 1E-6

Isource

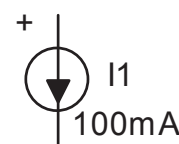


Рис. 5.20. Источник постоянного тока

Компонент **Isource** представляет собой источник постоянного тока. Ток через источник равен заданному <значению>, независимо от подключенной к его выводам внешней цепи.

5.3.2. Источники сигнала, зависящего от времени (в формате Micro-Cap)

Источник импульсного напряжения (Pulse source)

Формат схем Micro-Cap (рис. 5.23)

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **MODEL**: <имя модели>

Формат текстовой директивы модели источника импульсного сигнала

.MODEL <имя модели> PUL([параметры модели])

Пример:

.MODEL STEP PUL (VZERO=.5 VONE=4.5 P1=10n P2=20n P3=100n P4=110n P5=500n)

Параметры модели источника импульсного напряжения приведены в табл. 5.7, график его выходного напряжения с указанием характерных точек — на рис. 5.22, окно задания параметров — на рис. 5.23.

Таблица 5.7. Параметры модели источника импульсного сигнала Micro-Cap

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
VZERO	Начальное значение	В	0
VONE	Максимальное значение	В	5
P1	Начало переднего фронта	с	1E-7
P2	Начало плоской вершины импульса	с	1.1E-7
P3	Конец плоской вершины импульса	с	5E-7
P4	Момент достижения с уровня VZERO	с	5.1E-7
P5	Период повторения	с	1E-6

Примечание. В режиме анализа АС независимо от заданных параметров источник выдает гармонический сигнал с единичной амплитудой. Т.е. для режима АС узлы подключения источника импульсного сигнала являются местом приложения гармонического воздействия изменяющейся частоты и единичной амплитуды.

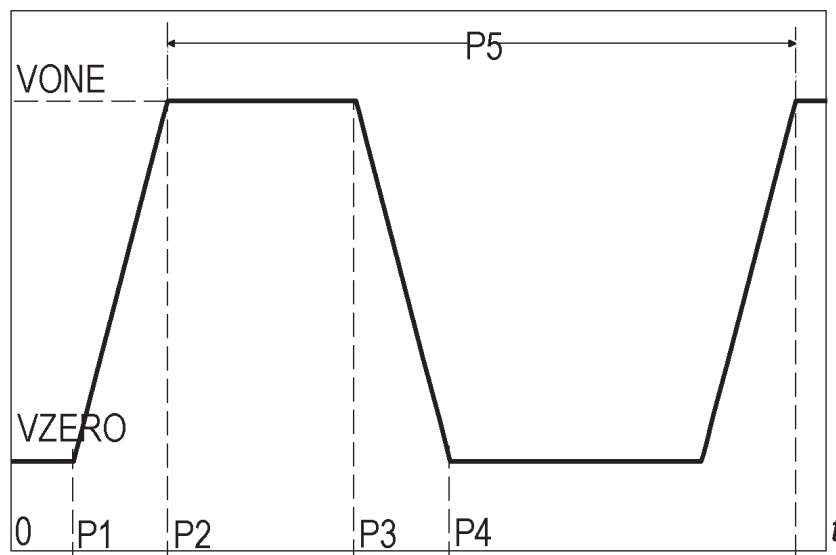


Рис. 5.22. Описание импульсного сигнала в формате Micro-Cap

Pulse source



MODEL=PULSE

Рис. 5.21. Источник импульсного напряжения

Напряжение во время фронта (спада) импульса источника импульсного сигнала формата Micro-Cap (Pulse) изменяется по линейному закону. При необходимости использования фронтов другой формы следует использовать источники импульсного сигнала формата SPICE (Voltage Source или Current Source, см. далее).

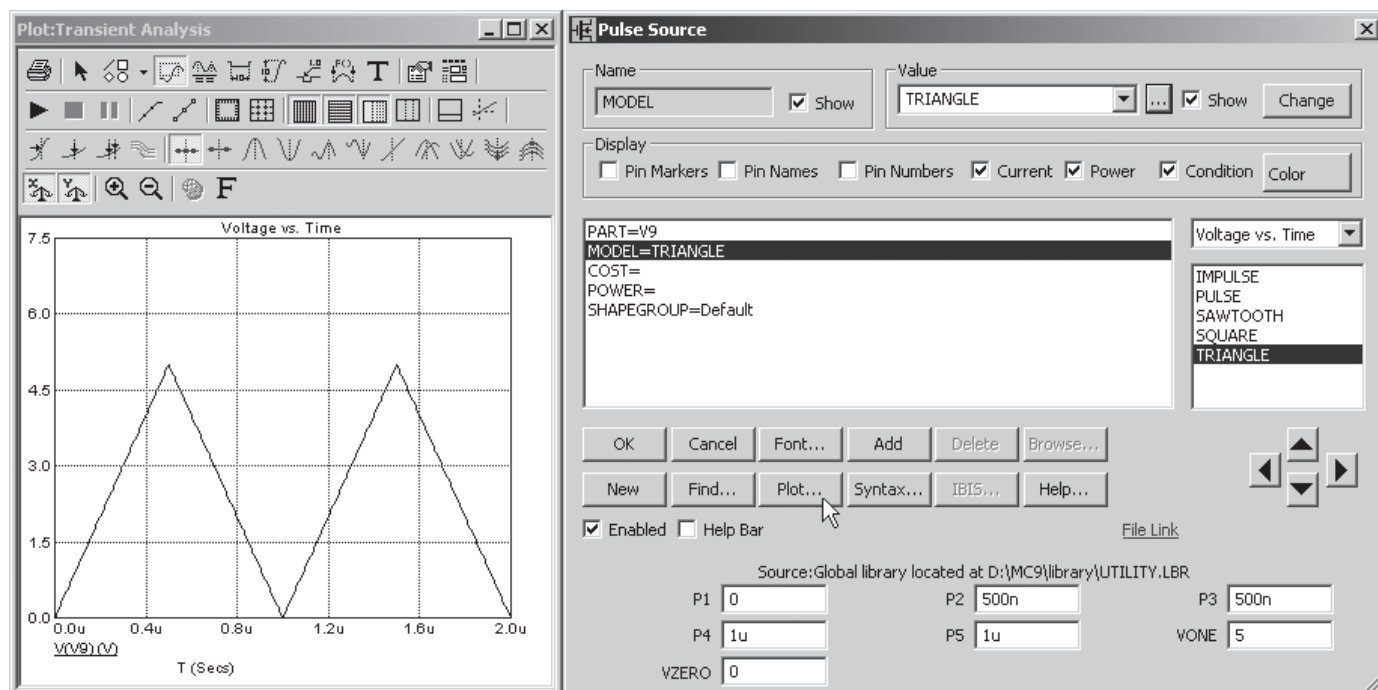


Рис. 5.23. Окно задания параметров источника импульсного сигнала

Генерируемый источником PULSE сигнал описывается следующей временной зависимостью:

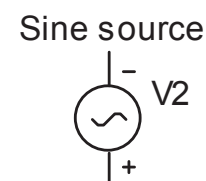
$$V(t) = \begin{cases} V_{ZERO}, & \text{при } 0 < T \leq P_1 \\ V_{ZERO} + \frac{V_{ONE} - V_{ZERO}}{P_2 - P_1} (T - P_1), & \text{при } P_1 < T \leq P_2 \\ V_{ONE}, & \text{при } P_2 < T \leq P_3 \\ V_{ONE} + \frac{V_{ZERO} - V_{ONE}}{P_4 - P_3} (T - P_3), & \text{при } P_3 < T \leq P_4 \\ V_{ZERO}, & \text{при } P_4 < T < P_5 \end{cases},$$

где $T = (TIME \bmod P_5)$. Импульс повторяется через каждые P_5 секунд. Следует отметить, что при задании параметров источника PULSE всегда должно соблюдаться неравенство $P_5 \geq P_4 \geq P_3 \geq P_2 \geq P_1$.

Источник синусоидального напряжения (Sine source)

Формат схем Micro-Cap (рис. 5.26)

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **MODEL**: <имя модели>



MODEL=1MHZ

Рис. 5.24. Источник синусоиды

Формат текстовой директивы модели источника синусоидального напряжения

.MODEL <имя модели> SIN ([параметры модели])

Параметры модели источника синусоидального напряжения приведены в табл. 5.8, а его форма на рис. 5.25, окно задания параметров — на рис. 5.26.

Таблица 5.8. Параметры модели источника гармонического сигнала Micro-Cap

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
F	Частота	Гц	1E6
A	Амплитуда	В	1
DC	Постоянная составляющая	В	0
PH	Начальная фаза	радиан	0
RS	Внутреннее сопротивление	Ом	1E-3
RP	Период повторения экспоненциального затухания	с	0
TAU	Постоянная времени изменения амплитуды сигнала по экспоненциальному закону	с	0

Примечание. Амплитуда сигнала в режиме AC принимается равной 1 В

Уравнения модели:

Если $TAU=0$, то $V_{\sin} = DC + A \cdot \sin[2\pi \cdot F \cdot TIME + PH]$.

Если $TAU \neq 0$, то $V_{\sin} = DC + A \cdot e^{\frac{-T}{TAU}} \cdot \sin[2\pi F \cdot TIME + PH]$,

где $T = TIME \bmod RP$.

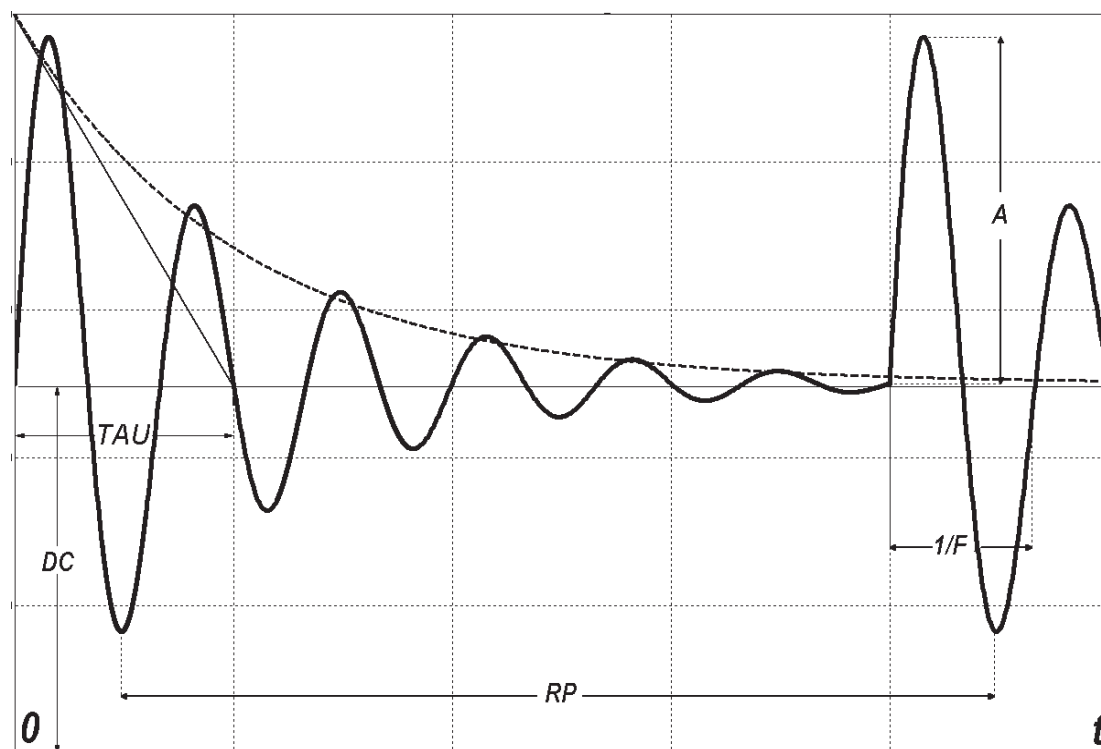


Рис. 5.25. Синусоидальный сигнал с периодическим экспоненциальным затуханием

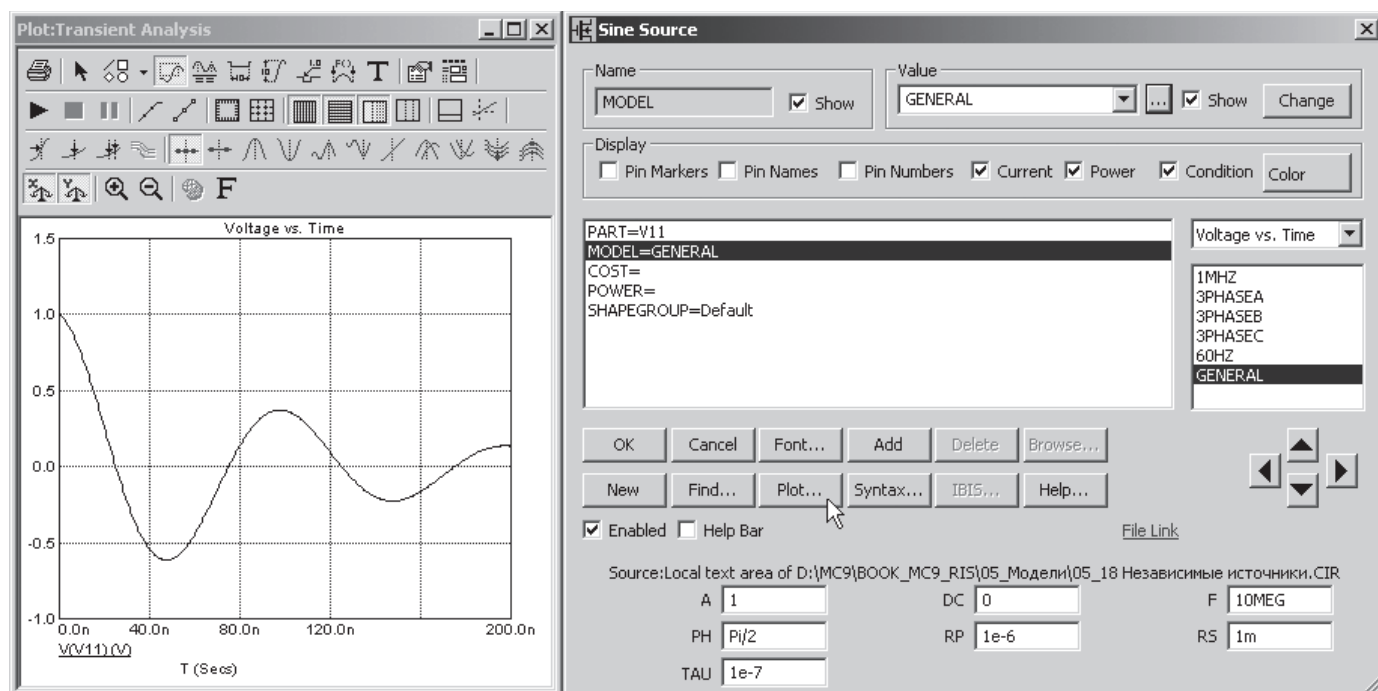


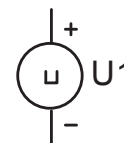
Рис. 5.26. Окно задания параметров источника синусоидального напряжения

Источник напряжения, задаваемый пользовательским файлом (User source)

Формат схем Micro-Cap (рис. 5.28)

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример:
U1
- Атрибут **FILE**: <имя файла>
Пример:
AMP.USR
- Атрибут **EXPRESSION**: [текстовое выражение]
Пример:
V(OUT) vs T
LABEL vs T
- Атрибут **REPEAT**: [целое число]
Пример:
5
- Атрибут **ENABLE_EXPR**: [логическое выражение]
Примеры:
V(OUT)>3.2
Time>110ns

User source



FILE=D:\MC9\exp.usr

Рис. 5.27. Источник напряжения, задаваемый пользователем

Представляет собой источник напряжения, форма которого задается в пользовательском текстовом файле. Повторяется заданное число раз (значение атрибута **REPEAT**) в режиме анализа переходных процессов **TRANSIENT**, один раз — в режимах **AC**- и **DC**-анализа.

Пользователь имеет возможность задать источник напряжения произвольной формы. Отсчеты сигнала записываются в текстовый файл, который имеет стандартное расширение .USR. В этом файле записывается общее количество отсчетов N и пары чисел, определяющие значения моментов

времени и соответствующие им значений переменных состояния. Этот файл может быть создан с помощью любого текстового редактора (на что потребуются значительное время) или образован путем сохранения одного или нескольких сигналов, полученных в результате расчета переходных процессов. На рис. 5.28 показано окно задания параметров пользовательского источника. Текстовый файл с расширением *.usr должен быть создан заранее путем сохранения кривой переходного процесса расчета другой схемы. Для этого после получения графиков переходных процессов двойным щелчком левой клавиши вызывается диалоговое окно **Properties**, в нем выбирается закладка **Save Curves** и выбирается график, который мы хотим взять как пользовательский сигнал, затем нажимается кнопка **Save**.

В окне задания параметров (рис. 5.28) пользовательского источника в позиции **EXPRESSION** необходимо в этом случае указать, какая именно зависимость будет использована в качестве источника (в примере это зависимость напряжения $V(2)$ от времени — $V(2)$ vs T), а в позиции **FILE** имя и путь сохраненного *.USR файла (можно воспользоваться кнопкой **BROWSE**).

Отметим, что если во время сохранения кривой переходного процесса название сохраняемой зависимости поменять на **LABEL vs T**, то позицию **EXPRESSION** в окне задания атрибутов источника можно не заполнять.

Если в позиции атрибута **ENABLE_EXPR** задается [логическое выражение], оно разрешает работу пользовательского источника при условии его истинности. Если указанное выражение отсутствует, работа источника всегда разрешена. Когда [логическое выражение] становится истинным, сигнал генерируется, если оно становится ложным, выходной сигнал источника фиксируется на последнем значении перед переходом из истинного в ложное.

Примеры с применением пользовательских источников см. в схемных файлах *Waveform Sources.CIR*, *User4.CIR* каталога *Components\Sources* (book-mc.rar).

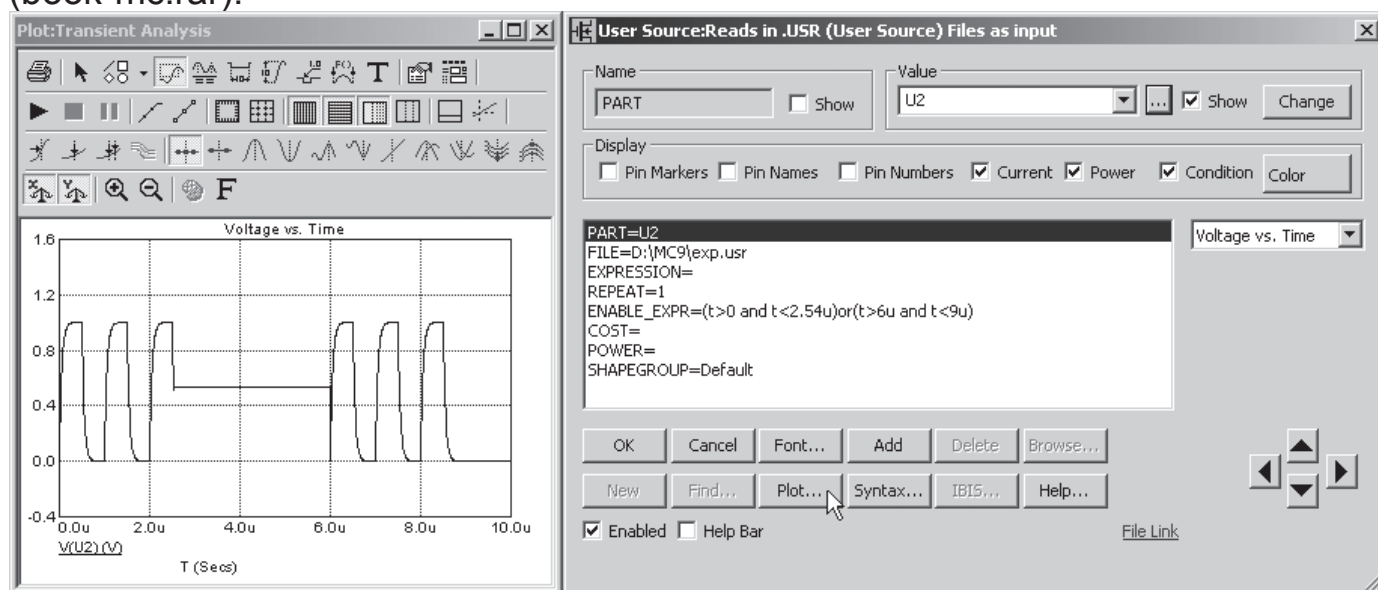


Рис. 5.28. Окно задания параметров пользовательского источника

Следует отметить, что в разделе *Component>Analog Primitives>Waveform sources* имеются и другие источники специальных сигналов, определенные в виде схемных макромоделей. Это источники: *3 Phase Triangle* — трехфазного

треугольного напряжения, *Staircase* — ступенчатого напряжения, *NTC7* — тестового видеосигнала.

Способы их задания и генерируемые сигналы иллюстрирует пример *Special_New_MC8.cir* из каталога *Components\Sources*.

Источник напряжения, задаваемый WAV-файлом (MC10)

Формат схем *Micro-Cap* (рис. 5.30)

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример:
W1
- Атрибут **FILE**: <имя файла>
Примеры:
AUDIO2.WAV
ode_to_joy.wav
- Атрибут **CHANNEL**: <номер канала>
Примеры:
0
1
- Атрибут **SCALE**: <множитель>
Примеры:
1
15
- Атрибут **REPEAT** <число повторов>
Примеры:
1
3
- Атрибут **ENABLE** <логическое выражение>
Примеры:
Time>110mS
Record_flag=TRUE

wav file source



FILE=gin.wav

Рис. 5.29. Источник напряжения с сигналом из WAV-файла

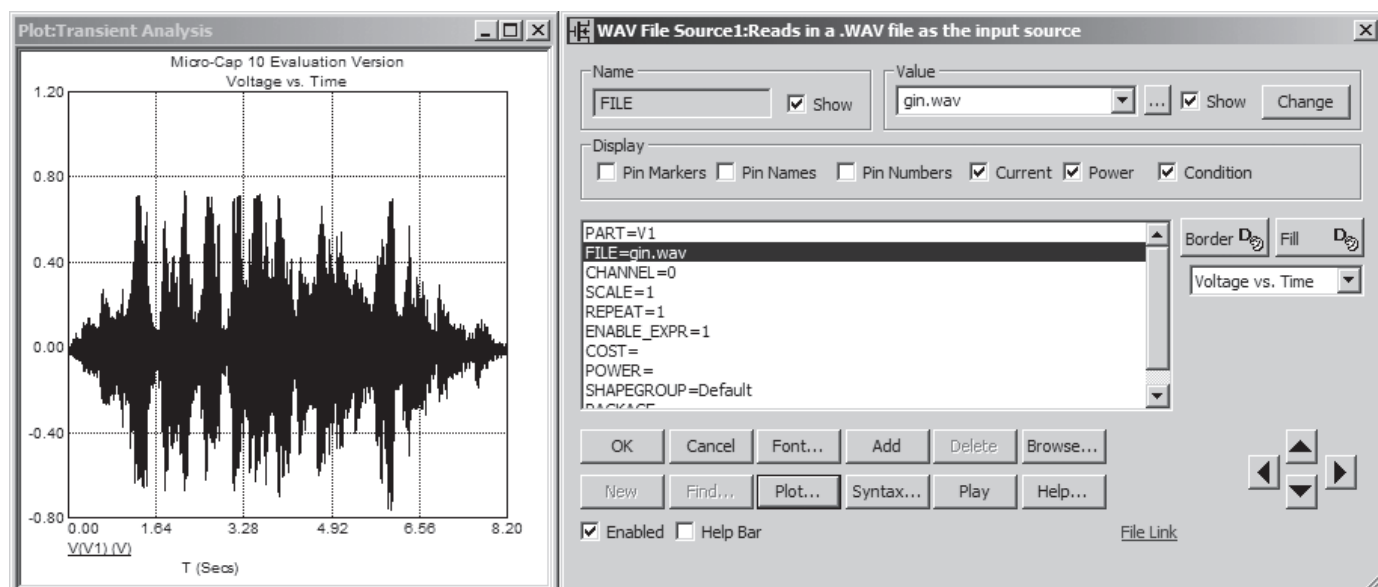


Рис. 5.30. Окно задания параметров источника сигнала WAV-файла

<имя файла> — имя WAV-файла.

<номер канала> — имя канала звукового файла, сигнал которого будет использован в источнике.

<множитель> — масштабный множитель на который умножаются значения WAV-файла для получения необходимого уровня сигнала источника.

<число повторов> — число повторов содержимого WAV-файла.

<логическое выражение> — WAV-файл будет воспроизводиться источником только в том случае, если это выражение истинно.

Во время расчета рабочей точки на постоянном значении сигнала источника равно начальному значению сигнала в WAV-файле.

Кнопка *Play* в окне атрибутов источника может быть использована для проигрывания содержимого файла. Сигнал источника также можно прослушать, находясь в режиме анализа переходных процессов *Transient Analysis/F10 /Save Curves/Play button*.

В качестве примера использования WAV-источника сигнала см. схемы *WAV.CIR*, *WAVSource.cir* из каталога *Components\Sources* (book-mc.rar).

5.3.3. Независимые источники напряжения и тока сложной формы формата SPICE

Независимые источники напряжения (**Voltage Source**) и тока (**Current Source**) позволяют создавать входные воздействия разнообразной формы: импульсные, синусоидальные, экспоненциальные, кусочно-линейные, гармонические с частотной модуляцией и др. Для всех этих сигналов указывается значение на постоянном токе (dcvalue) — необязательный параметр. Кроме того, при расчете частотных характеристик (режим AC) можно задавать амплитуду (magval) и начальную фазу (phaseval) этих сигналов.

Формат SPICE

Ниже приведен синтаксис для источника напряжения, синтаксис источника тока аналогичный, за исключением использования буквы «I» в качестве первого символа имени.

V<имя> <Узел+> <узел-> [[DC] dcvalue] [AC magval [phaseval]]
 + [PULSE v1 v2 [td [tr [tf [pw [per]]]]]] (импульсы с линейными фронтами)
 или [SIN vo va [f0 [td [df [ph]]]] (синусоидальный сигнал)
 или [EXP v1 v2 [td1 [tc1 [td2 [tc2]]]] (импульс с EXP фронтами)
 или [PWL t1 v1 t2 v2 ...[tn , vn]] (кусочно-линейный сигнал)
 или [SFFM vo va f0 [mi [fm]]] (частотно-модулированный синус)
 или [NOISE interval [amplitude [start [end [seed]]]]] (шум)
 или [GAUSSIAN amp tpeak width [period]] (импульс Гаусса)

Примеры:

```
V3 2 0 DC 0 AC 1 0 SIN 0 1 1MEG 100NS 1E6 0 ;voltage-sin
V5 3 0 DC 0 AC 1 0 EXP 0 1 100N 100N 500N 100N ;voltage-exp
I3 4 0 DC 0 AC 1 0 SFFM 0 1 1E6 .5 1E7 ;current-sffm
V1 5 0 DC 1 AC 1 0 NOISE 10N 1 100N 700N 1 ;voltage-noise
```

Формат схем Micro-Cap (рис. 5.32)

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **VALUE**: <список параметров>

В <список параметров> вносится та же информация, что и для соответствующих источников в SPICE, за исключением имени компонента и номеров узлов его подключения.

Примеры:

DC 1 PULSE 0 1MA 12ns 8ns 110ns 240ns 500ns

I22 SPICE 0 DC 0 AC 1 0 SFFM 0 2 2E6 .5 1E7; current-sffm

Уравнения для сигналов и их графическое представление, приведенные ниже, относятся только к режиму анализа переходных процессов. Малосигнальный анализ по переменному току AC использует значения амплитуды и фазы гармонического сигнала, указанного в списке параметров после ключевого слова AC. Они же задаются в окне задания параметров источника сигнала в позициях *AC magnitude*, *AC phase*. Анализ по постоянному току использует значение постоянного напряжения или тока, указанное после ключевого слова DC. Оно же задается в окне задания параметров источника сигнала в позициях *DC*.

Источник импульсного сигнала (PULSE)

Задается параметрами, приведенными в табл. 5.9. Следует обратить внимание, что здесь источник импульсного сигнала напряжения или тока задается другим способом по сравнению с ранее рассмотренным источником импульсного напряжения PULSE формата Micro-Cap. Однако он также формирует периодический импульсный сигнал с линейными фронтом и спадом:

$$V(t) = \begin{cases} V_1, & \text{при } 0 < T \leq T_D \\ V_1 + \frac{V_2 - V_1}{T_R}(T - T_D), & \text{при } T_D < T \leq T_D + T_R \\ V_2, & \text{при } T_D + T_R < T \leq T_D + T_R + P_W \\ V_2 + \frac{V_1 - V_2}{T_F}(T - T_D - T_R - T_W), & \text{при } T_D + T_R + P_W < T \leq T_D + T_R + P_W + T_F \\ V_1, & \text{при } T_D + T_R + P_W + T_F < T < \text{Per}. \end{cases},$$

где $T = \text{Time mod Per}$.

Voltage source Current source

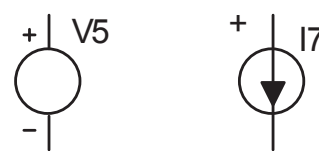


Рис. 5.31. Независимые источники напряжения и тока

Таблица 5.9. Параметры импульсного сигнала независимого источника V (Voltage Source) или I (Current Source)

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
V1	Начальное значение	В или А	—
V2	Максимальное значение	В или А	—
TD	Задержка до начала переднего фронта	С	0
TR	Длительность переднего фронта	С	TSTEP
TF	Длительность заднего фронта	с	TSTEP
PW	Длительность плоской части импульса	с	TSTOP
PER	Период повторения	с	TSTOP

Примечание. TSTEP — шаг вывода на печать; TSTOP — конечное время анализа переходного процесса (параметры TSTEP и TSTOP задаются в директиве .TRAN или в окне *Transient Analysis Limits*).

Ниже (рис. 5.32) приведен вид окна задания параметров импульсного источника V(I).

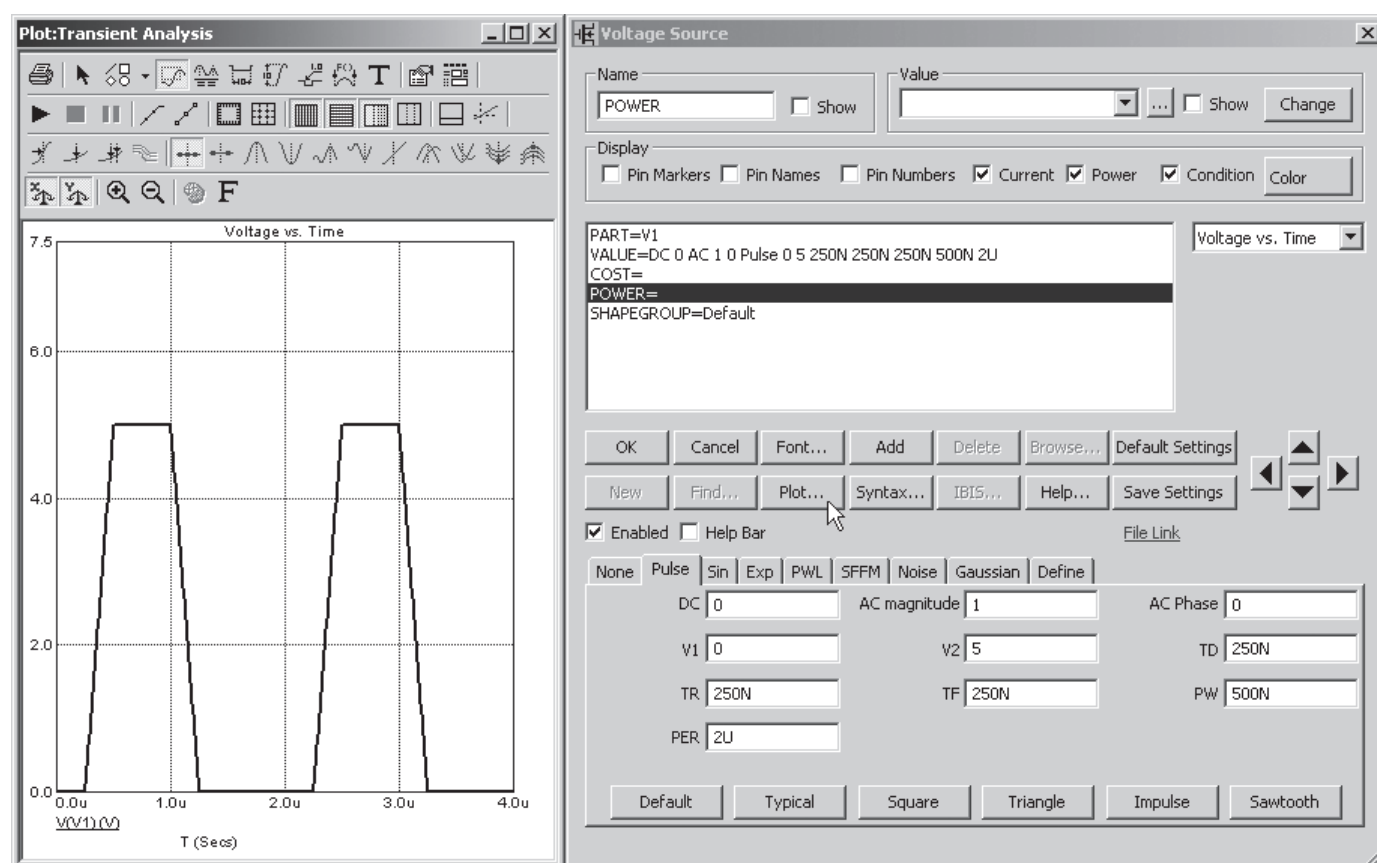


Рис. 5.32. Окно задания параметров независимого источника импульсного сигнала с линейными фронтами PULSE

Источник синусоидального сигнала (SIN)

Задается параметрами, приведенными в табл. 5.10. Выдает сигнал, описываемый следующей формулой:

$$V(t) = \begin{cases} V_0, & \text{при } 0 < Time \leq TD \\ V_0 + VA \cdot e^{-(Time-TD)DF} \sin\left[2\pi\left(F_0(Time-TD) + \frac{PH}{360}\right)\right], & \text{при } Time > TD \end{cases}$$

Окно задания параметров с выведенным в нем графиком приведено на рис. 5.33. Пример задания и график в режиме **TRANSIENT** — в схемном файле *waveform_v.cir* из каталога *Components\Sources* (book-mc.rar).

Таблица 5.10. Параметры гармонического сигнала независимого источника V (Voltage Source) или I (Current Source)

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
V0	Постоянная составляющая	В или А	—
VA	Амплитуда	В или А	—
F0	Частота	Гц	1/TSTOP
TD	Задержка	с	0
DF	Коэффициент затухания	1/с	0
PH	Фаза	град.	0

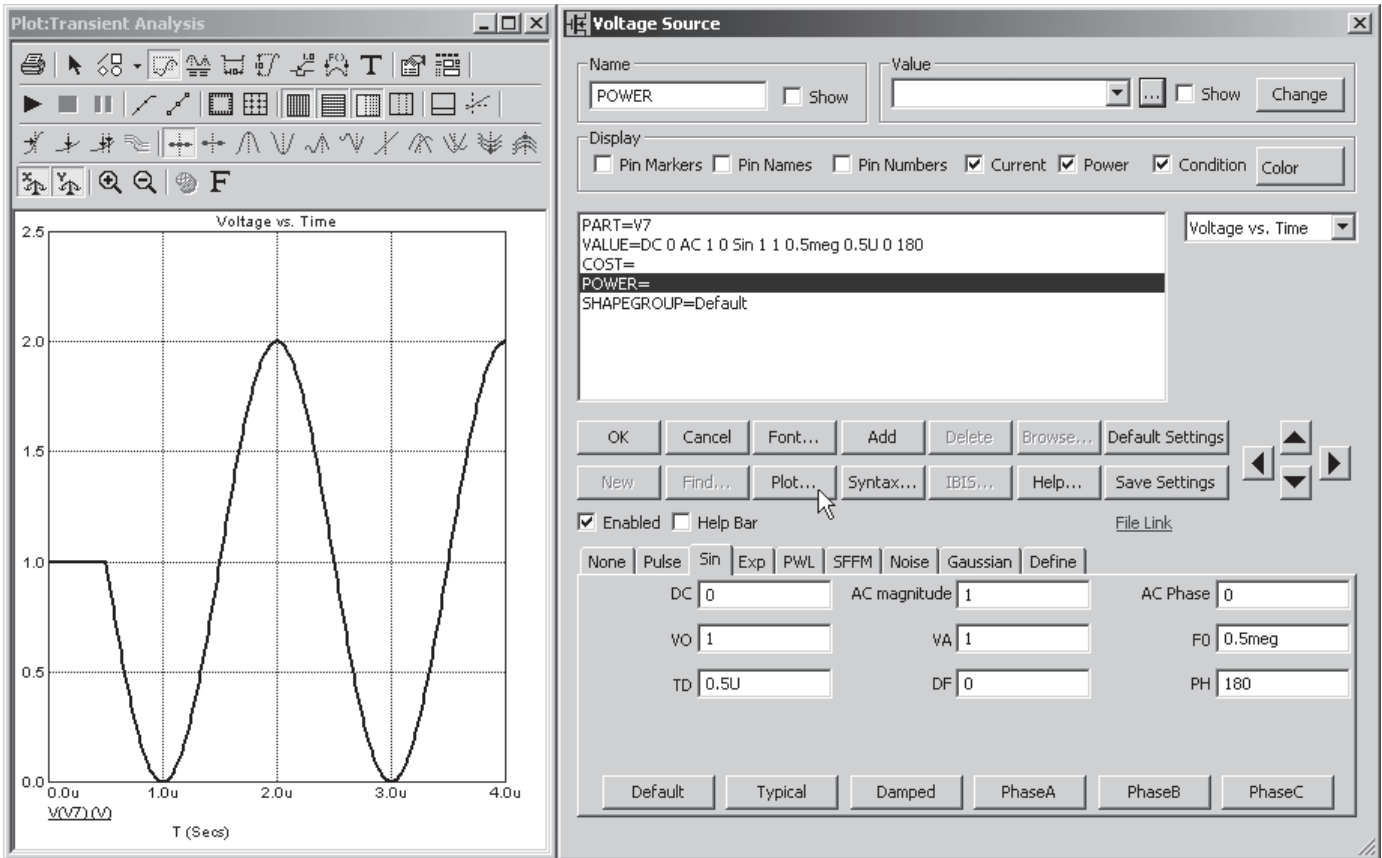


Рис. 5.33. Окно задания параметров независимого источника гармонического сигнала

Источник одиночного импульса с экспоненциальными фронтами (EXP)

Задается параметрами, приведенными в табл. 5.11. и описывается следующей зависимостью от времени:

$$V(t) = \begin{cases} V_1, & \text{при } 0 < \text{Time} \leq \text{TD1} \\ V_1 + (V_2 - V_1) \cdot \left(1 - e^{\frac{-(\text{Time} - \text{TD1})}{\text{TC1}}} \right), & \text{при } \text{TD1} < \text{Time} \leq \text{TD2} \\ V_1 + (V_2 - V_1) \cdot \left[e^{\frac{-(\text{Time} - \text{TD2})}{\text{TC2}}} - e^{\frac{-(\text{Time} - \text{TD1})}{\text{TC1}}} \right], & \text{при } \text{Time} > \text{TD2} \end{cases}$$

Таблица 5.11. Параметры экспоненциального сигнала независимого источника V (Voltage Source) или I (Current Source)

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
V1	Начальное значение	В или А	—
V2	Максимальное значение	В или А	—
TD1	Начало переднего фронта	с	0
TC1	Постоянная времени переднего фронта	с	TSTEP
TD2	Начало заднего фронта	с	TD1+TSTEP
TC2	Постоянная времени заднего фронта	с	TSTEP

Примечание. TSTEP — шаг по времени вывода на печать результатов расчетов переходных процессов (задается в директиве .TRAN и дублируется в окне *Transient Analysis Limits*).

Параметры одиночного импульса с экспоненциальными фронтами иллюстрирует рис. 5.34, а на рис. 5.35 приведено окно задания параметров сигнала для источника тока.

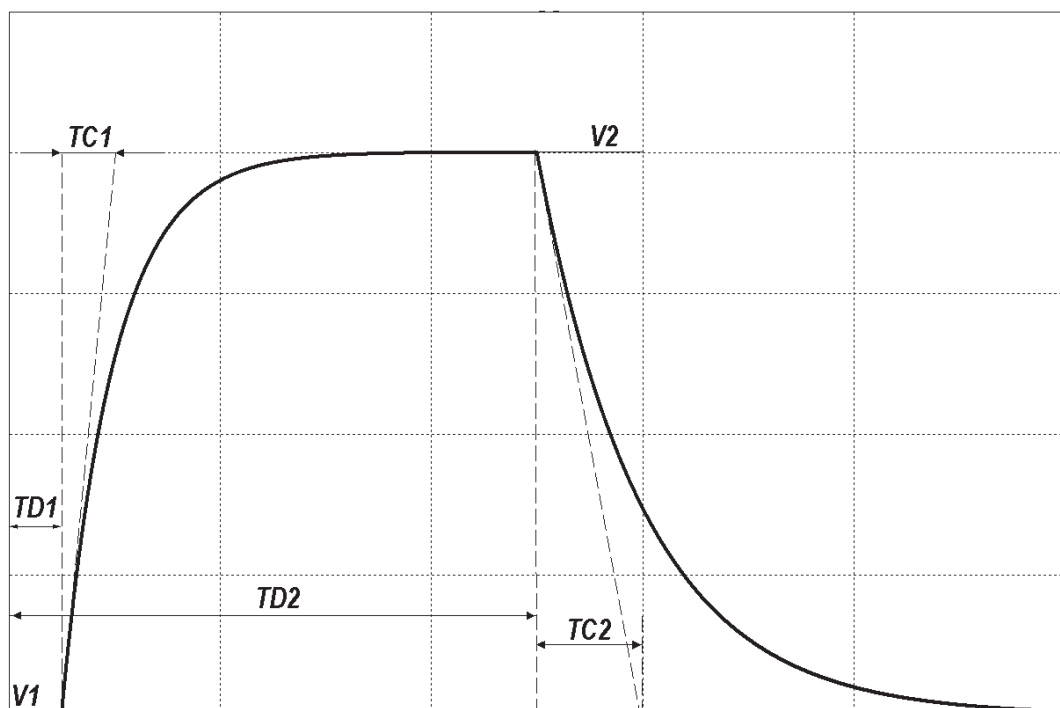


Рис. 5.34. Параметры импульса с экспоненциальными фронтами

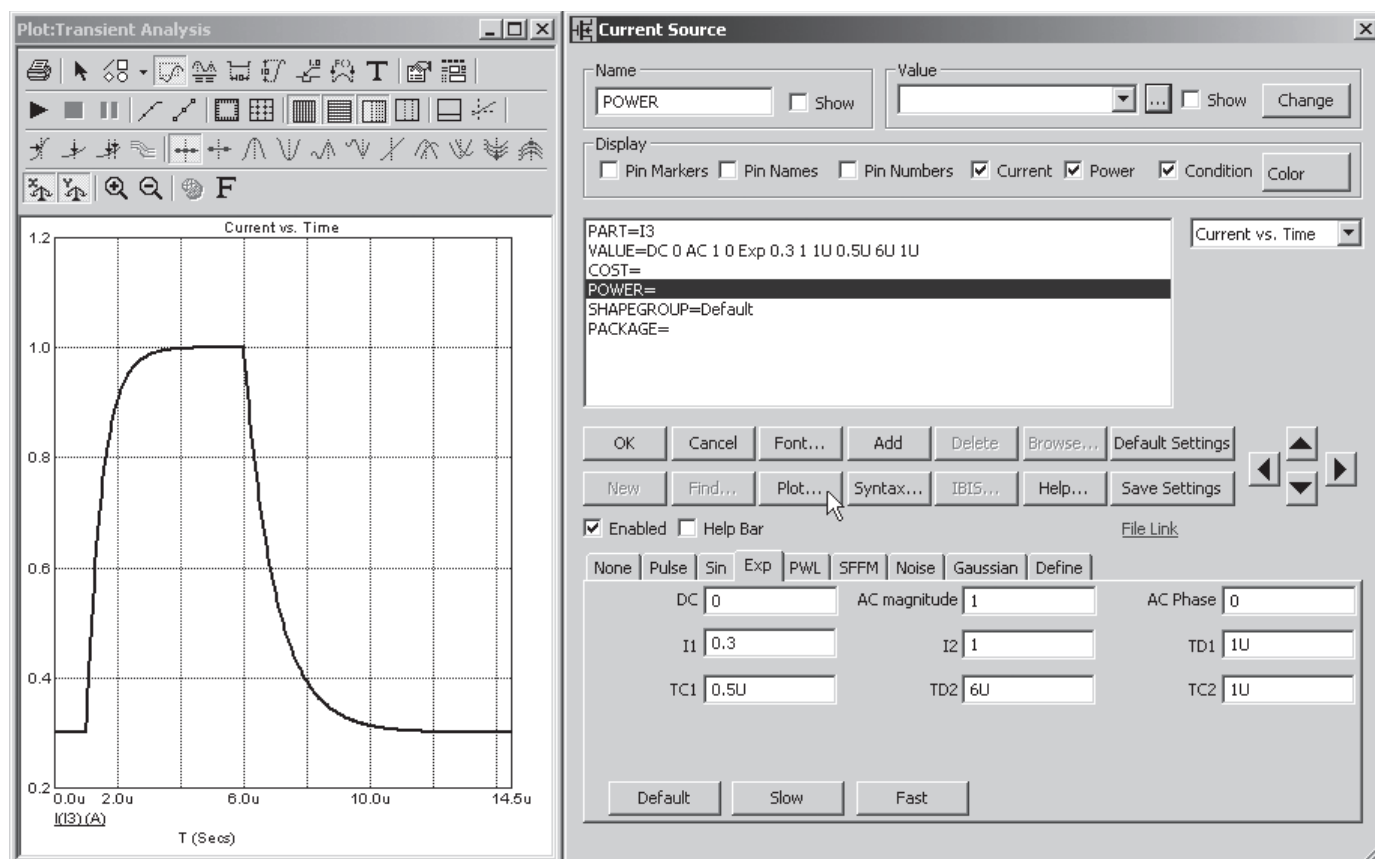


Рис. 5.35. Окно задания параметров независимого источника импульса с экспоненциальными фронтами (для источника тока)

Пример задания и график в режиме **TRANSIENT** находится в схемном файле *waveform_v.cir* из каталога *Components\Sources* (book-mc.rar).

Источник синусоидального сигнала с частотной модуляцией (SFFM)

Задается параметрами, приведенными в табл. 5.12 и описывается следующей функцией времени:

$$V(T) = V0 + VA \cdot \sin[2\pi \cdot F0 \cdot T + MI \cdot \sin(2\pi \cdot FM \cdot T)].$$

Таблица 5.12. Параметры гармонического сигнала с частотной модуляцией независимого источника V (Voltage Source) или I (Current Source)

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
V0	Постоянная составляющая	В или А	—
VA	Амплитуда	В или А	—
F0	Частота несущей	Гц	1/TSTOP
MI	Индекс частотной модуляции	—	0
FM	Частота модуляции	Гц	1/TSTOP

На рис. 5.36 приведено окно задания параметров независимого синусоидального источника напряжения с возможной частотной модуляцией.

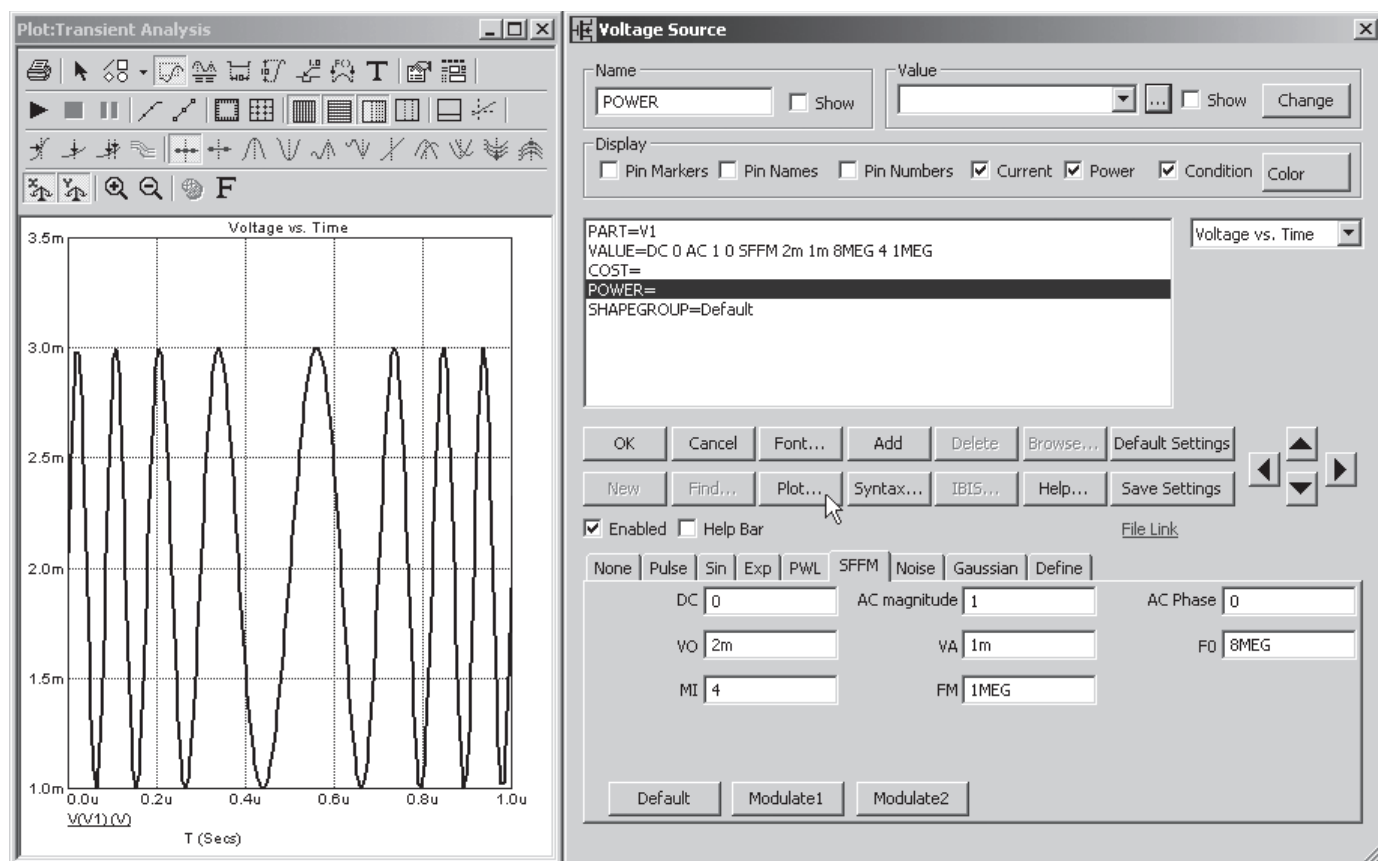


Рис. 5.36. Окно задания параметров независимого источника синусоидального сигнала с частотной модуляцией

Источник кусочно-линейного сигнала (PWL)

Задается координатами точек излома (T_i , V_i), см. окно задания его параметров с выведенным графиком на рис. 5.37.

Общий формат

PWL [TRIGGER=<логическое выражение>]
 +[TIME_SCALE_FACTOR=<значение>]
 +[VALUE_SCALE_FACTOR=<значение>]
 +(пары координат точек полилинии)

Синтаксис (пары координат точек полилинии):
 <значение времени t_{in} >, <величина сигнала i_n >

Если в командной строке указаны масштабные множители по времени (Time_Scale_Factor) и (или) по значению (Value_Scale_Factor), то соответствующие координаты умножаются на масштабные коэффициенты.

Для задания нескольких точек, определяющих ломаную линию сигнала, пары координат перечисляются через знак пробела:

(< t_{in1} >, < i_{n1} >) (< t_{in2} >, < i_{n2} >) ... (< t_{inm} >, < i_{nm} >)

Синтаксис команды, задающий повтор ломаной линии n раз:

REPEAT FOR < n > (пары координат точки полилинии)*
 ENDREPEAT

Синтаксис команды, задающий бесконечный повтор ломаной линии:

REPEAT FOREVER (пары координат точек полилинии)*
 ENDREPEAT

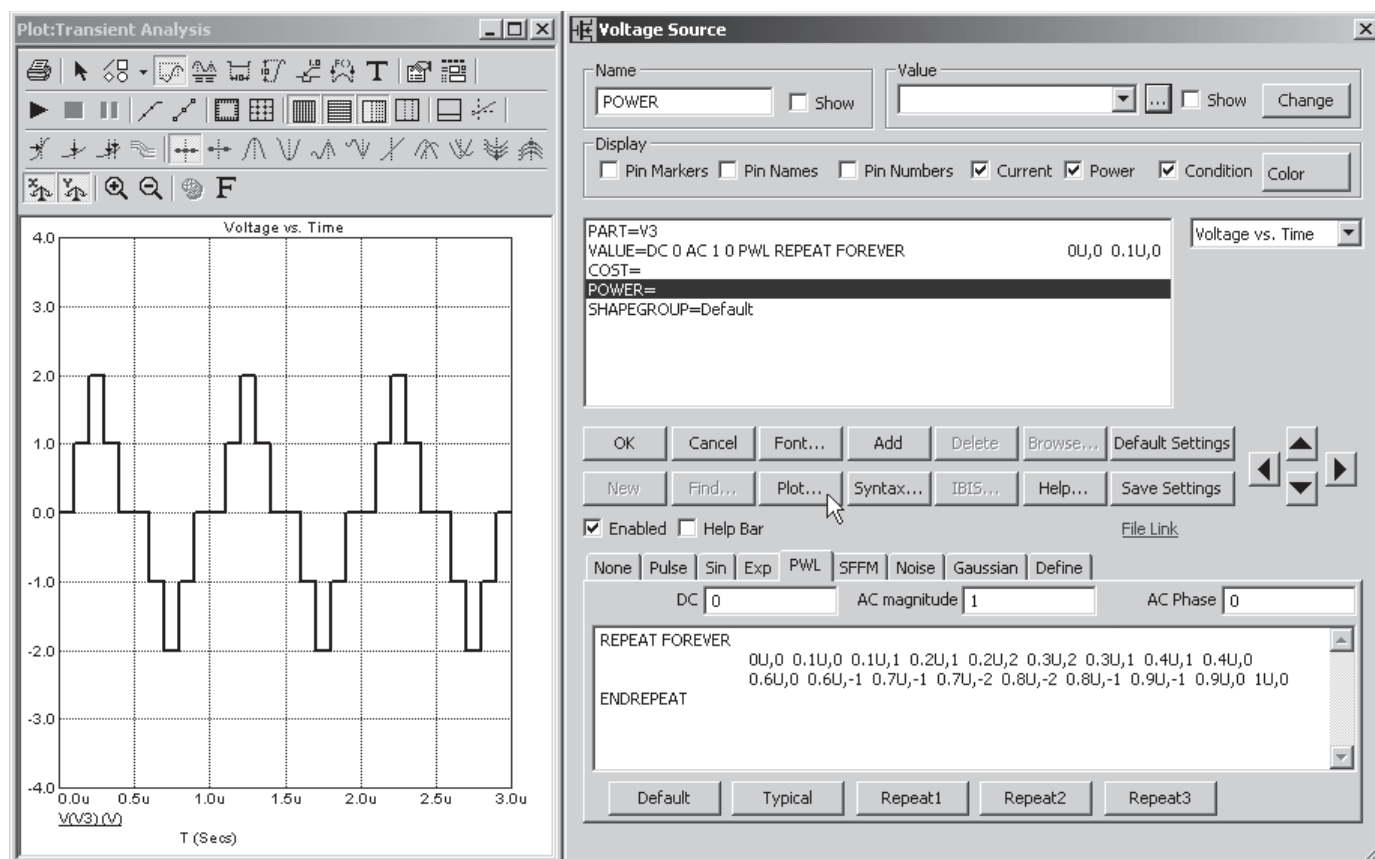


Рис. 5.37. Окно задания независимого источника сигнала в виде кусочно-линейной функции

<Логическое выражение> в поле TRIGGER разрешает выдачу сигнала, если оно истинно и запрещает, если оно ложно.

Примеры:

Одиночный прямоугольный импульс амплитудой 5В, с задержкой 5 нс и длительностью 5нс:

PWL (0,0) (5n,0) (5n,5) (10n,5) (10n,0)

PWL TIME_SCALE_FACTOR=1n (0,0) (5,0) (5,5) (10,5) (10,0)

Аналогичный прямоугольный импульс, повторяющийся 20 раз:

PWL REPEAT FOR 20 (0,0) (5n,0) (5n,5) (10n,5) (10n,0) ENDREPEAT

Аналогичный периодически повторяющийся прямоугольный импульс:

PWL REPEAT FOREVER (0,0) (5n,0) (5n,5) (10n,5) (10n,0) ENDREPEAT

Включаемый (выключаемый) сигнал кусочно-линейной формы:

TRIGGER={ (V(A1)>2) AND (V(A2)>2) } 0,0 100n,3 200n,2 300n,1.5 400n,0

Источник шумового сигнала (NOISE)

Задается параметрами, приведенными в табл. 5.13, окно задания параметров с выведенным графиком представлено на рис. 5.38.

Шумовой сигнал стартует от значения <DC> в момент <start> и далее его значения появляются последовательно через временной интервал <Interval>, находясь при этом в промежутке между $+\text{<amplitude>/2}$ и $-\text{<amplitude>/2}$ относительно базового уровня <DC>. Описанный процесс генерации случайных значений продолжается до момента времени <end>, далее сигнал принимает постоянное значение <DC>. Следует отметить, что первое случайное значе-

ние генерируется в момент времени $T = \langle start \rangle + \langle interval \rangle$, последнее — в момент времени $T = \langle end \rangle - \langle interval \rangle$.

Таблица 5.13. Параметры шумового сигнала NOISE независимого источника V (Voltage Source) или I (Current Source)

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
DC	Постоянная составляющая, на которую накладывается шум	В или А	0
Interval	Интервал между случайными значениями	с	0
Amplitude	Амплитуда шумового сигнала	В или А	0
Start	Стартовое время случайной последовательности	с	0
End	Конечное время случайной последовательности	с	0
Seed	Значение «зерна» для генератора случайных чисел	—	0

Если параметр генератора случайных чисел $seed \geq 1$, случайная последовательность одна и та же при каждом новом запуске. В противном случае последовательности отличаются между собой при каждом новом запуске. Зерно $seed$ инициализируется при каждом новом значении температуры, анализе Монте-Карло или многовариантном анализе (Stepping).

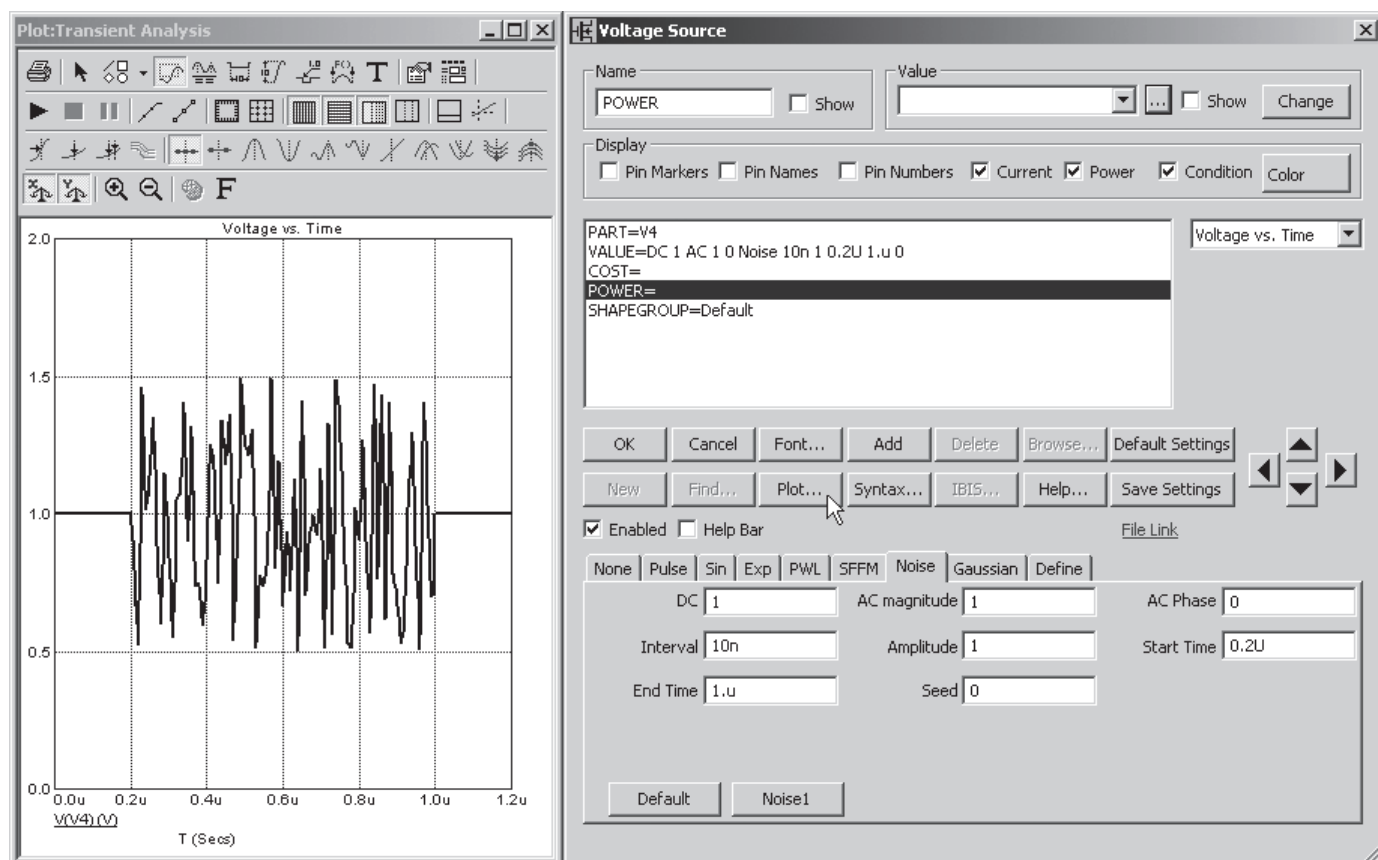


Рис. 5.38. Окно задания независимого источника шумового сигнала

Источник импульсов Гаусса (Gaussian)

Описывается параметрами, приведенными в табл. 5.14 и внутри каждого периода повторения рассчитывается по следующей формуле:

$$V(T) = DC + amp \cdot e^{-\left(\frac{T - T_{peak}}{Width / 1.6652}\right)^2},$$

где $T = Time \bmod Period$, а $Time$ — время, прошедшее от начала процесса моделирования.

Таблица 5.14. Параметры импульсов Гаусса независимого источника V (Voltage Source) или I (Current Source)

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
DC	Значение постоянной составляющей	В или А	0
Amp	Амплитуда импульса	В или А	0
Tpeak	Время достижения амплитудного значения	с	0
Width	Ширина импульса при 50%-ой величине	с	2E-7
Period	Период повторения	с	0

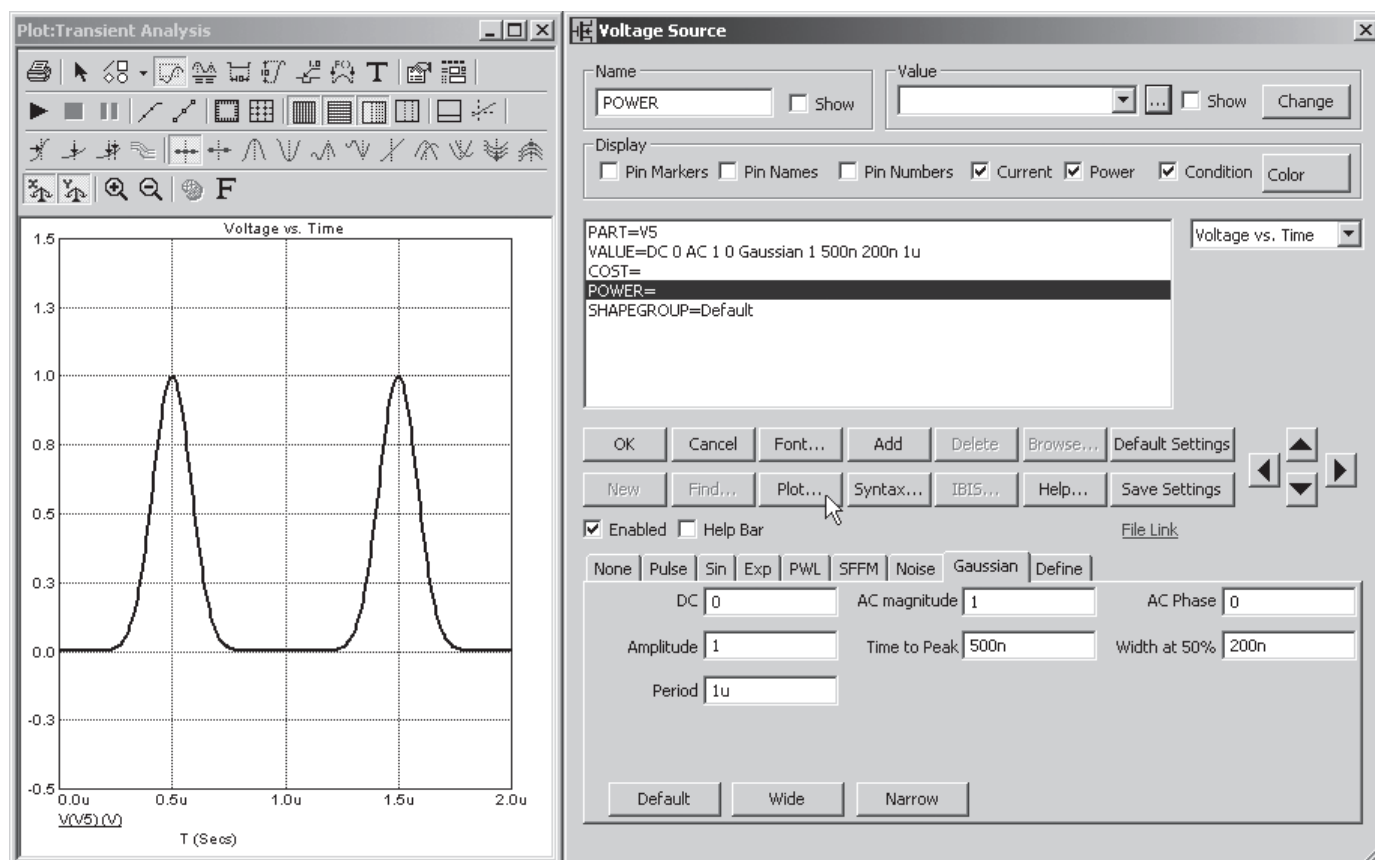


Рис. 5.39. Окно задания независимого источника импульсов Гаусса

Следует отметить, что в последних версиях программы Micro-Cap появилось дополнительное удобство для создания источников сигнала SPICE-

формата. В окне задания параметров сигнала, появились кнопки создания заготовок для сигналов (см. рис. 5.32–5.39).

Для **импульсного сигнала PULSE** это кнопки: *Default* (по умолчанию), *Typical* (типовой сигнал), *Square* (прямоугольный импульс), *Triangle* (треугольный импульс), *Impulse* (импульсная функция Дирака или δ -функция), *Sawtooth* (пилообразный импульс).

Для **гармонического сигнала SIN** это кнопки: *Default* (по умолчанию), *Typical* (типовой сигнал), *Damped* (затухающая синусоида), *PhaseA* (с нулевой начальной фазой), *PhaseB* (с положительной начальной фазой), *PhaseC* (с отрицательной начальной фазой).

Для **экспоненциального сигнала EXP** это кнопки: *Default* (по умолчанию), *Slow* (с пологими фронтами), *Fast* (с крутыми фронтами).

Для **гармонического сигнала с частотной модуляцией SFFM** это кнопки: *Default* (по умолчанию), *Modulate1* (низкий индекс модуляции, несущая частота меньше модулирующей частоты), *Modulate2* (высокий индекс модуляции, несущая частота больше модулирующей частоты).

Для **кусочно-линейного сигнала PWL** это кнопки: *Default* (по умолчанию нулевой сигнал), *Typical* (Типовой кусочно-линейный сигнал), *Repeat1* (5 идущих подряд трапецеидальных импульсов), *Repeat2* (периодические трапецеидальные импульсы), *Repeat3* (последовательность δ -импульсов с увеличивающейся паузой).

Для **импульсов Гаусса GAUSSIAN** это кнопки *Wide* (широкий импульс) и *Narrow* (узкий импульс).

Задание и работу всех рассмотренных в разделе 5.3 независимых источников напряжения (тока) иллюстрируют примеры *waveform sources.cir*, *meandr_exp_rc.cir*, *waveform_v.cir* из каталога *Components\Sources* (book-mc.rar).

5.4. Линейные и нелинейные зависимые источники

5.4.1. Линейные и полиномиальные зависимые источники (рис. 5.40)

Выбираются из раздела меню *Component>Analog Primitives>Dependent Sources*.

Линейные зависимые источники

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **VALUE**: <коэффициент передачи>

В программе Micro-Cap имеются четыре линейных зависимых источника напряжения и тока:

- **VofI** — источник напряжения, управляемый током.

$V_{out}(I_{in}) = \text{<коэффициент передачи>} \times I_{in}$

- **VofV** — источник напряжения, управляемый напряжением.

$V_{out}(V_{in}) = \text{<коэффициент передачи>} \times V_{in}$

- **IofV** — источник тока, управляемый напряжением.

$I_{out}(V_{in}) = \text{<коэффициент передачи>} \times V_{in}$

- **IofI** — источник тока, управляемый током.

$I_{out}(I_{in}) = \text{<коэффициент передачи>} \times I_{in}$

Все эти источники задаются единственным параметром — *<коэффициентом передачи>*.

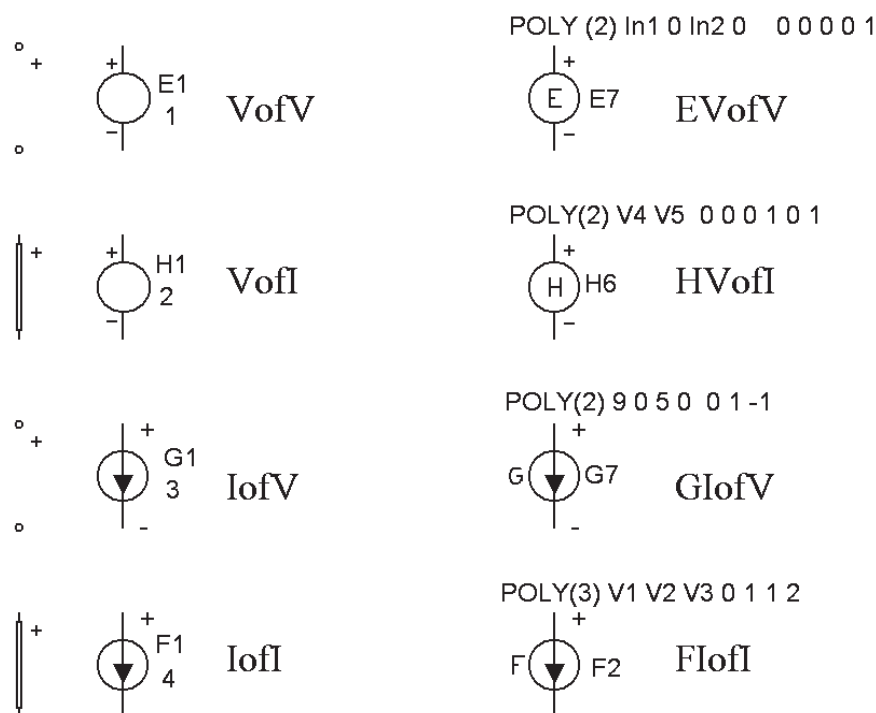


Рис. 5.40. Линейные и полиномиальные зависимые источники

Полиномиальные зависимые источники

Формат SPICE

Источник напряжения, управляемый напряжениями

E<имя> <выходной узел +> <выходной узел -> [POLY(<k>)] n1p n1m
+ [n2p n2m...nkp nkm] p0 [p1...pk] [IC=c1[,c2[,c3...[,ck]]]]

Источник тока, управляемый токами

F<имя> <выходной узел +> <выходной узел -> [POLY(<k>)] v1 [v2...vk]
+ p0 [p1...pk] [IC=c1[,c2[,c3...[,ck]]]]

Источник тока, управляемый напряжениями

G<имя> <выходной узел +> <выходной узел -> [POLY(<k>)]
+n1p n1m [n2p n2m...nkp nkm] p0 [p1...pk] [IC=c1[,c2[,c3...[,ck]]]]

Источник напряжения, управляемый токами

H<имя> <выходной узел +> <выходной узел -> [POLY(<k>)] v1 [v2...vk]
+ p0 [p1...pk] [IC=c1[,c2[,c3...[,ck]]]]

Расширенный формат PSPICE источников, управляемых напряжениями (поддерживается в MC9, MC10)

[E|G]<имя><выходной узел+><выходной узел-> VALUE={<выражение>}

[E|G]<имя> <выходной узел+><выходной узел->TABLE{<выражение>}=
+ <<значение на входе>,<значение на выходе>>*

[E|G]<имя><выходной узел+><выходной узел->LAPLACE{<выражение>}=
+ {<передаточная функция в s-области>}

[E|G]<имя><выходной узел +> <выходной узел -> FREQ

+ {<выражение>} = [KEYWORD]

+<<значение частоты>,<значение амплитуды>,<значение фазы>>*

$n1p$ — первый управляющий узел +.

$n1m$ — первый управляющий узел –.

nkp — k -ый управляющий узел +.

nkm — k -ый управляющий узел –.

$p0$ — первый полиномиальный коэффициент.

pk — k -ый полиномиальный коэффициент.

$v1$ — источник эдс (обычно нулевой величины), ток через который является первой управляющей переменной.

vk — источник эдс (обычно нулевой величины), ток через который является k -ой управляющей переменной.

$c1$ — начальное значение для первой управляющей переменной.

ck — начальное значение для k -ой управляющей переменной.

Примеры SPICE описаний:

E2 7 4 POLY(2) 10 15 20 25 1.0 2.0 10.0 20.0

G2 7 4 POLY(3) 10 15 20 25 30 35 1.0 2.0 3.0 10.0 20.0 30.0

F2 7 4 POLY(2) V1 V2 1.0 2.0 10.0 20.0

H2 7 4 POLY(3) V1 V2 V3 1.0 2.0 3.0 10.0 20.0 30.0

E1 10 20 FREQ {V(1,2)} = (0,0,0) (1K,0,0) (10K,0.001,0)

G1 10 20 TABLE{V(5,6)*V(3)} = (0,0) (1,1) (2,3.5)

E2 10 20 LAPLACE {V(5,6)} = {1/(1+.001*S+1E-8*S*S)}

В программе Micro-Cap имеется четыре типа полиномиальных зависимых источников напряжения и тока:

EVofV — источник напряжения, управляемый напряжениями;

HVofI — источник напряжения, управляемый токами;

GlofV — источник тока, управляемый напряжениями.

FlofI — источник тока, управляемый токами;

Атрибуты моделей полиномиальных зависимых источников подобны атрибутам SPICE-моделей, за исключением номеров узлов подключения источников. Способы задания TABLE, VALUE, LAPLACE, и FREQ не поддерживаются схемными версиями зависимых источников типа E, F, G, и H. Указанные особенности поддерживаются функциональными и лапласовыми источниками Micro-Cap, описываемыми далее (см. 5.4.2, 5.4.3).

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>

Пример:

G1

E7

- Атрибут **VALUE**:

[POLY(< k >)] $n1p$ $n1m$ [$n2p$ $n2m$... nkp nkm] $p0$ [$p1$... pk] [IC= $c1$ [, $c2$ [, $c3$... [, ck]]]]

[POLY(< k >)] $v1$ [$v2$... vk] $p0$ [$p1$... pk] [IC= $c1$ [, $c2$ [, $c3$... [, ck]]]]

Примеры:

POLY(2) 10 15 20 25 1.0 2.0 10.0 20.0 — источник напряжения (тока), управляемый двумя напряжениями V(10,15) и V(20,25), функция $F=1+2 \cdot V(10,15)+10 \cdot V(20,25)+20 \cdot V(10,15)^2$.

POLY(3) 10 15 20 25 30 35 1.0 2.0 3.0 10.0 20.0 30.0 — источник напряжения (тока), управляемый 3-мя напряжениями $V(10,15)$, $V(20,25)$, $V(30,35)$, выходная функция $F=1+2\cdot V(10,15)+3\cdot V(20,25)+10\cdot V(30,35)+20\cdot V(10,15)^2+30\cdot V(10,15)\cdot V(20,25)$.

POLY(2) V1 V2 1.0 2.0 10.0 20.0 — источник напряжения (тока), управляемый 2-мя токами: через источник V1 — $I(V1)$ и через источник V2 — $I(V2)$, выходная функция $F=1+2\cdot I(V1)+10\cdot I(V2)+20\cdot I(V1)^2$.

POLY(3) V1 V2 V3 1.0 2.0 3.0 10.0 20.0 30.0 — источник напряжения (тока), управляемый 3-мя токами: через источник V1 — $I(V1)$, через источник V2 — $I(V2)$, и через источник V3 — $I(V3)$, выходная функция $F=1+2\cdot I(V1)+3\cdot I(V2)+10\cdot I(V3)+20\cdot I(V1)^2+30\cdot I(V1)\cdot I(V2)$.

Если ключевое слово *POLY* не используется, выражение для выходной функции:

$$F = p_0 + p_1 \cdot V_1 + p_2 \cdot V_1^2 + p_3 \cdot V_1^3 + \dots + p_k \cdot V_1^k,$$

где V_1 — независимая переменная (управляющая зависимым источником), $p_0 \dots p_k$ — $(k+1)$ полиномиальных коэффициентов.

Если ключевое слово *POLY* используется, выражение для выходной функции:

$$F = \sum_{j=0}^n p_j \prod_{k=1}^n V_k^{E_k}.$$

Значения показателей степени $E_1, E_2, \dots, E_n$ выбираются из табл. 5.15.

Таблица 5.15. Значения полиномиальных коэффициентов

Коэффициент	Число управляющих переменных									
	1	2		3			4			
	E1	E1	E2	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E4
P0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
P2	2	0	1	0	1	0	0	1	0	0
P3	3	2	0	0	0	1	0	0	1	0
P4	4	1	1	2	0	0	0	0	0	1
P5	5	0	2	1	1	0	2	0	0	0
P6	6	3	0	1	0	1	1	1	0	0
P7	7	2	1	0	2	0	1	0	1	0
P8	8	1	2	0	1	1	1	0	0	1
P9	9	0	3	0	0	2	0	2	0	0
P10	10	4	0	3	0	0	0	1	1	0
P11	11	3	1	2	1	0	0	1	0	1
P12	12	2	2	2	0	1	0	0	2	0
P13	13	1	3	1	2	0	0	0	1	1
P14	14	0	4	1	1	1	0	0	0	2
P15	15	5	0	1	0	2	3	0	0	0
P16	16	4	1	0	3	0	2	1	0	0
P17	17	3	2	0	2	1	2	0	1	0
P18	18	2	3	0	1	2	2	0	0	1
P19	19	1	4	0	0	3	1	2	0	0

Пример построения полиномиальной функции для зависимого источника, зависящего от трех переменных состояния схемы, обозначенных x_1 , x_2 , x_3 :

$$Y = P_0 + P_1x_1 + P_2x_2 + P_3x_3 + P_4x_1^2 + P_5x_1x_2 + P_6x_1x_3 + P_7x_2^2 + P_8x_2x_3 + P_9x_3^2 + P_{10}x_1^3 + P_{11}x_1^2x_2 + P_{12}x_1^2x_3 + P_{13}x_1x_2^2 + P_{14}x_1x_2x_3 + P_{15}x_1x_3^2 + P_{16}x_2^3 + P_{17}x_2^2x_3 + P_{18}x_2x_3^2 + P_{19}x_3^3.$$

Здесь x_1 , x_2 , x_3 — управляющие переменные. Они могут быть токами или разностью потенциалов; одновременное управление током и разностью потенциалов не допускается.

Если управляющие переменные — напряжения, то сразу после ключевого слова POLY, попарно указывается список узлов: <номер (или обозначение) положительного узла первого напряжения> <номер (или обозначение) отрицательного узла первого напряжения>

Если управляющие переменные — токи, то после ключевого слова POLY указывается список источников ЭДС, через которые протекают управляющие токи. Если таковых в схеме нет, то необходимо ввести в соответствующие ветви нулевые источники ЭДС.

Все коэффициенты полинома вводить не обязательно, но вводить их необходимо подряд без пропусков.

Примеры задания и анализа зависимых линейных и полиномиальных источников приведены в схемных файлах *dependent sources.cir*, *dependent sources_poly.cir* из каталога *Components\Sources* (book-mc.rar).

5.4.2. Линейные управляемые источники, задаваемые преобразованием Лапласа и Z-преобразованием

Линейные четырехполюсники могут задаваться передаточными функциями с помощью управляемых источников. Имена таких источников начинаются с символа L (**Laplace Sources**) или Z (**Z Transform Sources**). Передаточные функции задаются с помощью формул — тогда после символа L указывается F — или табличной зависимостью — добавляется символ T (для **Laplace Sources**). Например, **LFVofV** означает задаваемый формулой передаточной функции источник напряжения, управляемый напряжением. **LTlofl** — задаваемый табличной зависимостью комплексного коэффициента передачи от частоты источник тока, управляемый током. **ZVofI** — задаваемый передаточной функцией в z-области источник напряжения, управляемый током. Эти источники используются не только при расчете частотных характеристик, но и проведении всех остальных видов анализа.

В программе Micro-Cap имеются следующие зависимые источники с частотно-зависимой передаточной функцией (табл. 5.16 и рис. 5.41).

Источники, задаваемые преобразованиями Лапласа (Laplace Sources) (рис. 5.41)

Формат схем Micro-Cap (рис. 5.42)

- Атрибут **PART**: <имя>

Примеры:

FIL1

LOW1

- Атрибут **LAPLACE**: $\langle S\text{-выражение} \rangle$ (для источников LFlofl, LFlofV, LFVofV, LFVofl)
Примеры:
 $1/(1+.001*S)$ — ФНЧ первого порядка.
 $1/(1+.001*S+1E-8*S*S)$ — ФНЧ 2-го порядка.
 $\exp(-\text{pow}((C*S*(R+S*L)),.5))$ — передаточная характеристика длинной линии с потерями.
- Атрибут **FREQ**: $\langle (\text{частота}_1, \text{модуль}_1, \text{фаза}_1) (\text{частота}_2, \text{модуль}_2, \text{фаза}_2) \dots (\text{частота}_n, \text{модуль}_n, \text{фаза}_n) \rangle$ (для источников LTlofl, LTlofV, LTVofV, LTVofl)
Примеры:
 $(0.0, 1.0, 0.0)$ $(1\text{Meg}, 0.9, -10)$ $(10\text{Meg}, 0.2, -35)$

Таблица 5.16. Разновидности зависимых источников

Обозначение	Тип зависимого источника	Входная величина	Выходная величина	Позиц. Обозн.
Зависимые источники, задаваемые формулой передаточной функции в s-области				
LFIOFI	управляемый током источник тока	I	I	F
LFVOFI	управляемый током источник напряжения	I	V	H
LFVOFV	управляемый напряжением источник напряжения	V	V	E
LFIOFV	управляемый напряжением источник тока	V	I	G
Зависимые источники, задаваемые табличной зависимостью комплексного коэффициента передачи от частоты				
LTIOFI	управляемый током источник тока	I	I	F
LTVOFI	управляемый током источник напряжения	I	V	H
LTVOFV	управляемый напряжением источник напряжения	V	V	E
LTIOFV	управляемый напряжением источник тока	V	I	G
Зависимые источники, задаваемые формулой передаточной функции в Z-области				
ZIOFI	управляемый током источник тока	I	I	F
ZVOFI	управляемый током источник напряжения	I	V	H
ZVOFV	управляемый напряжением источник напряжения	V	V	E
ZIOFV	управляемый напряжением источник тока	V	I	G

- Атрибут **KEYWORD**: $[[\text{DB} \mid \text{MAG}] [\text{DEG} \mid \text{RAD}]] \mid [\text{R\_I}]$ (для использования совместно с атрибутом **FREQ**)
Входящие в эти определения ключевые слова означают следующее:
DB — модуль передаточной функции задается в децибелах (по умолчанию);
MAG — модуль передаточной функции задается в абсолютных единицах;
DEG — фаза передаточной функции в градусах (по умолчанию);
RAD — фаза передаточной функции в радианах;

R_I — таблица содержит действительные и мнимые части передаточной функции.

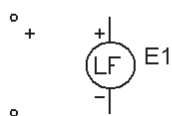
Примеры:

DB RAD

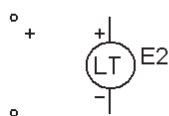
MAG DEG

R_I

$$R/(R*L*C*S*S+L*S+R)$$



$$(0,1,90) (1k,3,120) (3k,2,88)$$



$$0.75*(1+Z)/(0.25+Z)$$

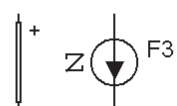
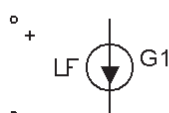
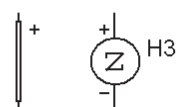
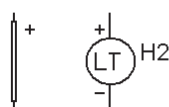
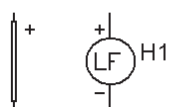
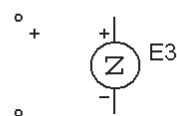


Рис. 5.41. Линейные управляемые источники, задаваемые преобразованиями Лапласа (Laplace Sources) и Z-преобразованиями (Z Transform Sources)

Для источников типа **LFlofV**, **LFlofl**, **LFVofV** и **LFVofl** задается формула передаточной функции комплексной переменной S в поле атрибута **LAPLACE** (рис. 5.42).

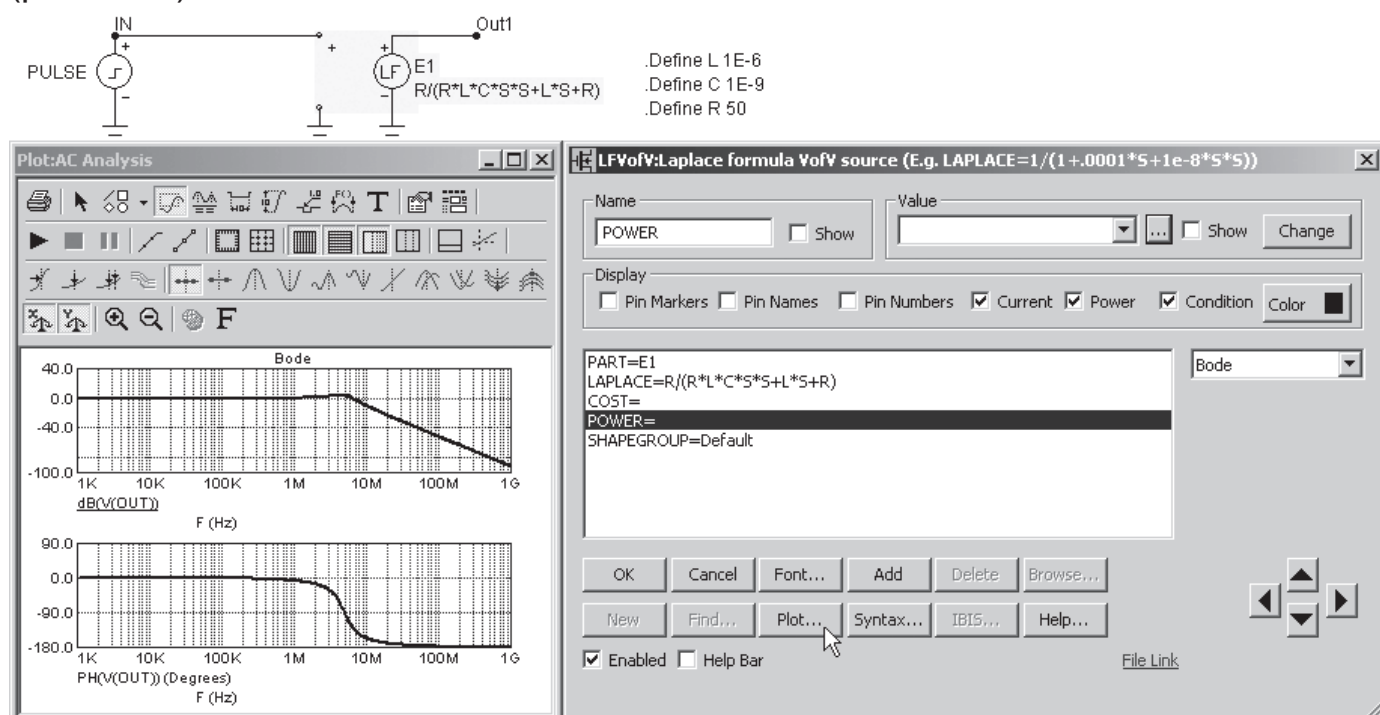


Рис. 5.42. Окно задания параметров зависимого лапласова источника

Для источников типа **LTlofV**, **LTlofl**, **LTVofV** и **LTVofl** задаются значения комплексной передаточной функции для нескольких частот, взятых в *возрастающем* порядке. Значения частоты задается в герцах, модуль передаточной функции в децибелах или абсолютных единицах, фаза в градусах или радианах.

При указании ключевого слова **R_I** вместо модуля и фазы передаточной функции задаются значения ее действительной и мнимой части. Значения передаточной функции указываются в порядке возрастания частоты. Таблица для передаточной функции указывается в поле атрибута **FREQ**. Возможно ее задание в поле указанного атрибута и именем символьной переменной, которая должна быть определена триплетом значений посредством директивы **.DEFINE** (на поле схемы или в текстовой области, см. *Laplace_06.cir*).

Для расчета передаточной функции между опорными точками применяется линейная интерполяция в логарифмическом масштабе. Значения передаточной функции вне заданного диапазона частот полагаются равными их значениям в крайних точках.

При расчете частотных характеристик (режим AC) переменная **S** заменяется на $2 \cdot \pi \cdot j \cdot F$. При расчете режима по постоянному току (режим DC) полагается **S=0**. При расчете переходных процессов (режим Transient analysis) отыскивается импульсная характеристика четырехполюсника путем обратного преобразования Фурье его передаточной функции в *s*-области, затем путем нахождения интеграла свертки импульсной характеристики с входным сигналом отыскивается отклик на выходе.

Точность описанной процедуры ограничена количеством точек импульсной характеристики или по-другому шириной полосы частот передаточной функции. Как правило, на практике используется не более чем 8192 точек по оси времени, рассчитываемых по импульсной характеристике через интеграл свертки. Вообще же реальное количество точек во временной области **N** определяется значением глобального параметра **RELTOL**:

$$N = 2^{6 - \log_{10} (RELTOL)}$$

Например для **RELTOL=.001**, будут рассчитываться 512 точек временной области.

Общей закономерностью является получение большей точности расчета переходных процессов для узкополосных лапласовых передаточных функций. Широкополосные блоки, такие, как например дифференциатор $f(s)=s$, и интегратор $f(s)=1/s$, лучше моделируются при использовании дискретных компонентов. См. примеры макромоделей дифференциатора **DIF.mas** и интегратора **INT.mas** из каталога **LIBRARY**.

Для иллюстрации использования лапласовых источников см. примеры схемных файлов *Laplace_01.cir*, *Laplace_02.cir*, *Laplace_03.cir*, *Laplace_04.cir*, *Laplace_05.cir* и *Laplace_06.cir* из каталога *Components\Sources*.

Линейные управляемые источники, задаваемые Z-преобразованиями (Z Transform Sources)

Графическое обозначение (см. рис. 5.41).

Формат схем Micro-Cap (рис. 5.43)

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **ZEXP**: <Z-выражение>

Пример:

$(.10*(Z+1)*(POW(Z,2)-.70*Z+1))/((Z-.56)*(POW(Z,2)-1.16*Z+.765))$

- Атрибут **CLOCK FREQUENCY**: <частота дискретизации для z-преобразования>

Зависимый источник, заданный передаточной функцией в Z-области ведет себя подобно лапласову зависимому источнику с передаточной функцией, полученной при подстановке вместо переменной $Z=EXP(S/<clock frequency>)$, где $S=j\cdot 2\cdot \pi\cdot F$.

Например, цифровой фильтр нижних частот с передаточной функцией

$$H(z) = \frac{0.10285 \cdot (z+1) \cdot (z^2 - 0.070621 \cdot z + 1)}{(z - 0.55889) \cdot (z^2 - 1.1579 \cdot z + 0.76494)}$$

задается с помощью управляемого источника E1 (рис. 5.43).

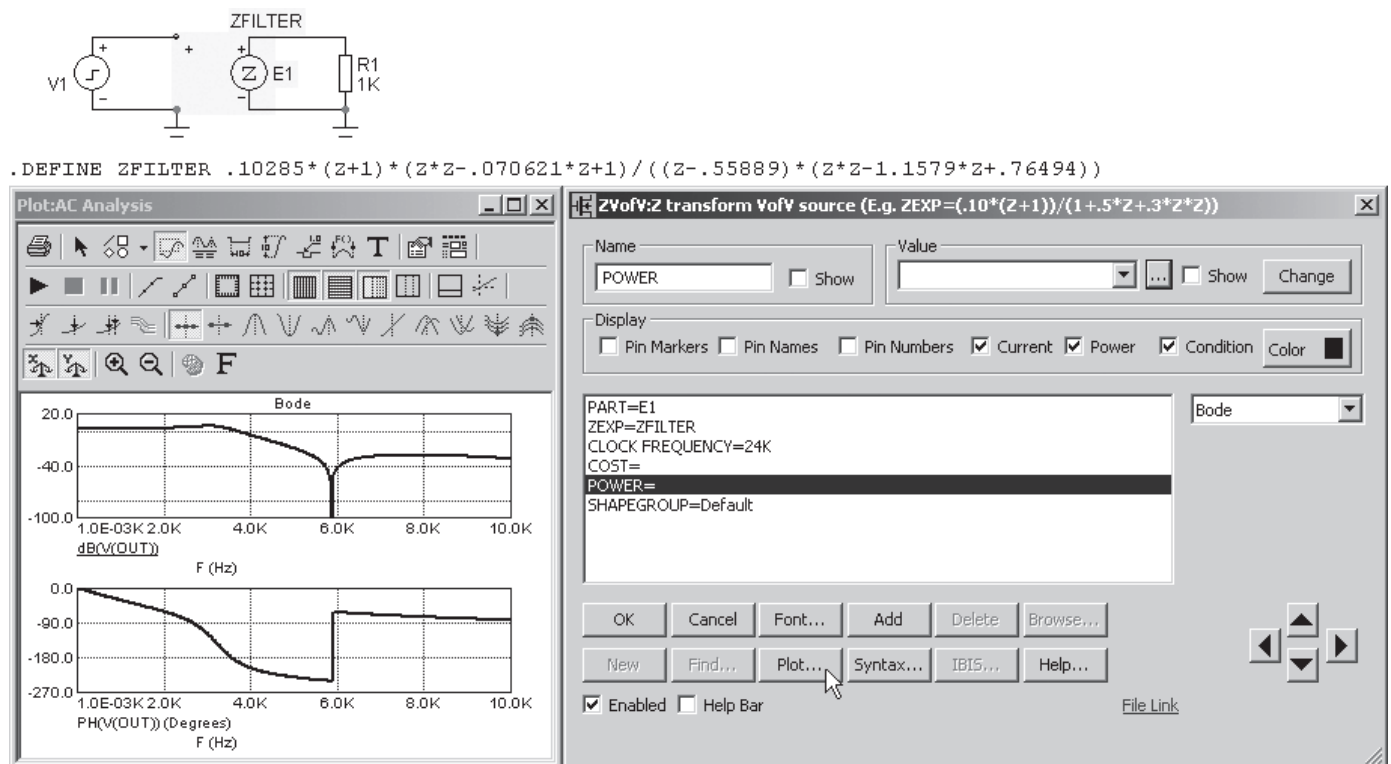


Рис. 5.43. Задание источника Z-TRANSFORM

При схемном вводе атрибуту **ZEXP** присваивается значение в виде переменной ZFILTER, которая в свою очередь определяется с помощью директивы .DEFINE:

`.DEFINE ZFILTER .10285*(Z+1)*(Z*Z-.070621*Z+1)/((Z-.55889)*(Z*Z-1.1579*Z+.76494))`

Частота дискретизации 24 кГц задается с помощью атрибута **CLOCK FREQUENCY=24k**.

Примеры моделирования цифровых фильтров приведены в схемных файлах `z-transform source_01.cir... z-transform source_04.cir` из каталога `Components\Sources (book-mc.rar)`.

5.4.3. Функциональные источники сигналов

Управляемые источники **Function sources**, имена которых начинаются с **N**, задаются функциональными зависимостями во временной области (рис. 5.44).

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **VALUE**: <формула> (для источников NFV и NFI)
Примеры:
 $10 * \sin(2 * \pi * 1E6 * T) * V(3) * I(L1) * \exp(-V(IN)/100NS)$
 $K * \text{POW}((V(\text{Plate}) - V(\text{Cathode}) + \mu * (V(\text{Grid}) - V(\text{Cathode}))), 1.5)$
- Атрибут **FREQ**: [<F-выражение>] (для источников NFV и NFI)
Пример:
 $1200 * (1 + \sqrt{F/1e6})$
- Атрибут **DERIVATIVE**: [<Algebraic> | <Numeric> | <Default>] (для источников NFV и NFI)
Пример:
Algebraic
- Атрибут **NOISE EXPRESSION**: [<N-выражение>] (только для источников NFI)
Пример:
 $1200 * (1 + \sqrt{F/1e6})$
- Атрибут **TABLE**: (<x1>, <y1>) (<x2>, <y2>) ... (<xk>, <yk>) (для источников NTlofI, NTlofV, NTVofV, NTVofI)
Примеры:
 $(-1m, 25) (1m, 25) (2m, 30)$
 $(\{start-1m\}, \{25 * level\}) (end, level) (\{end+3m\}, level2)$

$5 * (V(R3) > 0.5 \text{ and } V(5,4) > 0) + (T - 6E-6) * 1E6 * (T >= 6U)$



NFV - функциональный источник ЭДС (может зависеть от времени, токов и напряжений схемы)



ИНУН
(-0.01,-10) (0.01,10)



ИНУТ
(-6,3) (0,0) (2,2) (5,3)

$1e5 * T * (V(V3) > V(V5)) + I(V1) * V(2) / V(1)$



NFI - функциональный источник тока (может зависеть от времени, токов и напряжений схемы)



ИТУН
(-6,3) (0,0) (2,2) (5,3)



ИТУТ
(-6,3) (0,0) (2,2) (5,3)

Рис. 5.44. Функциональные источники сигналов

Функциональные источники расширяют возможности моделирования переходных процессов в электронных схемах. Они позволяют задавать источники напряжения и тока, имеющие произвольную зависимость от времени, путем задания формулы или таблицы значений (рис. 5.44).

Функциональные источники, задаваемые формулой (NFI, NFV)

Этот тип источников подобен источникам программы SPICE3 B и задается выражением, содержащим переменные, зависящие от времени. В зависимости от выходной величины различаются 2 типа таких источников: **NFI** —

функциональный источник тока, **NFV** — функциональный источник напряжения.

Нелинейные зависимые источники напряжения NFV и тока NFI описываются произвольной функциональной зависимостью от напряжений и токов схемы. Например, функциональный источник NFI для моделирования анодного тока вакуумного триода задается следующим образом:

$K * \text{pow}((V(\text{Plate}) - V(\text{Cathode}) + \text{Mu} * (V(\text{Grid}) - V(\text{Cathode}))), 1.5)$

В версии MC10 в формуле функциональной зависимости можно использовать также магнитные величины, характеризующие состояние магнитного сердечника: индукцию B, напряженность поля H и магнитный поток X.

Если для рассматриваемых функциональных источников указан атрибут **FREQ** в виде <F-выражение>, то он заменяет обычный малосигнальный коэффициент передачи, определенный во время расчета рабочей точки по постоянному току. <F-выражение> может быть числом или выражением, включающим частотно-зависимые переменные. Оно принимается во внимание лишь при проведении малосигнального частотного анализа (AC), когда независимой переменной является частота. Например, предположим, что выражение для атрибута **FREQ** — $1 + V(3) * (1 + 1e6/F)$. В этом выражении F является независимой переменной малосигнального частотного анализа — частотой, а V(3) — малосигнальный комплексный потенциал 3-го узла. Указанная зависимость будет использована лишь при проведении частотного анализа, при проведении анализа переходных процессов для формульного функционального источника будет использовано выражение в позиции атрибута **VALUE**.

Если задан атрибут **NOISE EXPRESSION**, то функциональным источником генерируется шумовой ток, величина спектральной плотности которого задается <N-выражением>. Например, для моделирования фликер-шума можно использовать следующее выражение: $1E-16 * \text{pow}(6.5ma, 1.1)/F$.

Следует отметить, что выражение для атрибута **NOISE EXPRESSION** должно зависеть только от частоты F и может быть использовано только для функциональных источников NFI.

- Атрибут **DERIVATIVE** задает способ вычисления производных в выражениях. Он может быть трех видов:
 - *Algebraic* — производная вычисляется путем правил дифференцирования алгебраических выражений. Это предпочтительный способ вычисления в смысле точности. Однако сложные алгебраические выражения, содержащие большое количество переменных, приводят к громоздким выражениям для производных, которые требуют намного больше времени для расчета, чем простое численное дифференцирование.
 - *Numeric* — численное дифференцирование методом простой пертурбации. Предпочтительно использовать при наличии сложных формул.
 - *Default* — производные вычисляются в соответствии со значением флага NUMERIC_DERIVATIVE в *Global Settings*.

Функциональные источники, задаваемые таблицей (NTVofI, NTlofI, NTlofV, NTVofV)

Эти источники подобны источникам программы SPICE3 A, используют упорядоченную в порядке возрастания аргумента таблицу. Данная таблица

задает функциональную зависимость выходной величины (напряжения, тока) от входной величины (напряжения, тока). В зависимости от вида входной и выходной величины имеются 4 типа табличных функциональных источников (табл. 5.17):

Таблица 5.17. Функциональные источники, задаваемые таблицей

Обозначение	Тип зависимого источника	Входная величина	Выходная величина	Позиц. Обозн.
NTIOFI	управляемый током источник тока	I	I	F
NTVOFI	управляемый током источник напряжения	I	V	H
NTVOFV	управляемый напряжением источник напряжения	V	V	E
NTIOFV	управляемый напряжением источник тока	V	I	G

Зависимые источники **NTVofI**, **NTIofI**, **NTIofV** и **NTVofV** задаются таблицей зависимостей значений выходного сигнала Y_k от значений входного сигнала X_k . Значения отсчетов выходного сигнала Y указываются в порядке возрастания аргумента X . Для расчета выходного сигнала между опорными точками применяется линейная интерполяция. Значения сигнала Y вне заданного диапазона изменения аргумента полагаются равными их значениям в крайних точках. Например, задание табличных пар значений $(-0.01, -10)$ $(0.01, 10)$ для источника **NTVOFV**, описывает идеальный усилитель с коэффициентом передачи 1000 и с уровнями ограничения выходного напряжения $\pm 10V$. Когда входное напряжение $\leq -0.01V$, на выходе будет $-10V$, а когда входное напряжение ≥ 0.01 , на выходе будет $+10V$.

Примеры определения и использования функциональных источников приведены в схемных файлах *function source_01.cir...function source_03.cir*, *function (table) source.cir* из каталога *Components\Sources* (book-mc.rar).

5.5. Специальные компоненты

В раздел **Special Purpose** помещены ключи разного типа (*Switches*), устройство выборки-хранения (*Sample and Hold*), таймер (*Timer*), стрелки (*Arrow*) и контакты (*bubble*).

5.5.1. Ключи типа Switch

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **VALUE**: <[V | T | I] <n1, n2>[,Ron>[,<Roff>]]

Примеры:

V,1,2

I,2ma,3ma

T,1ms,2ms,50,5Meg

I,2ma,3ma,0.01,1MEG

Разновидности ключей типа Switch представлены на рис. 5.45.

При расчете переходных процессов используются ключи, управляемые разностью потенциалов, током (через индуктивность) и коммутируемые в оп-

ределенные моменты времени. Это наиболее старый вид ключей, применяемых в ранних версиях программы Micro-CAP. В последних версиях используются также ключи типа S и W (см. ниже), имеющие более плавный переход между состояниями «включено» и «выключено».

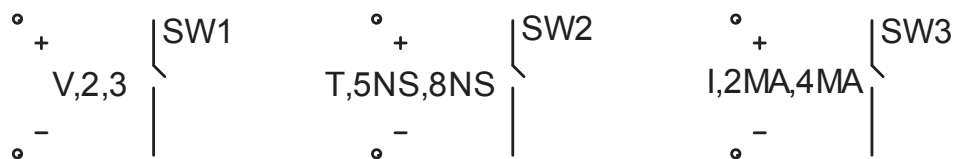


Рис. 5.45. Ключи Switch типа V, T и I

В ключах **SWITCH** приняты обозначения:

V — управление разностью потенциалов;

I — управление током;

T — переключение в определенные моменты времени;

n1, n2 — значения управляющей величины, при которых происходят переключения;

Ron, Roff — сопротивления ключа в замкнутом и разомкнутом состояниях. По умолчанию Ron=1E-3 Ом, Roff=1E9 Ом

Если $n1 < n2$, то ключ замкнут (находится в состоянии ON) при управляющем сигнале $n1 < X < n2$ и разомкнут (находится в состоянии OFF), когда $X < n1$ или $X > n2$.

Если же $n1 > n2$, то ключ разомкнут (OFF) при управляющем сигнале $n1 > X > n2$ и замкнут (OFF), когда $X > n1$ или $X < n2$.

Для ключей типа «V» управляющий сигнал X представляет собой разность потенциалов между управляющими выводами ключа.

Для ключей типа «I» управляющий сигнал X представляет собой ток через индуктивность, включенную между управляющими выводами ключа.

Для ключей типа «T» управляющий сигнал X представляет время, при этом управляющие выводы ключа должны быть заземлены для минимизации общего количества узлов в схеме.

При анализе переходных процессов следует обратить внимание на выбор шага расчета. Если шаг будет слишком большим, ключ может не переключаться. Для переключения ключа хотя бы одна расчетная точка должна попасть внутрь области значений, переводящих ключ в противоположное состояние.

При выполнении расчетов частотных характеристик или режима по постоянному току ключ заменяется постоянным сопротивлением.

Примеры всех указанных видов ключей Switch и графики переходных процессов с их участием см. в схемном файле *switch_01.cir* из каталога *Components\Special Purpose* (book-mc.rar).

5.5.2. S-ключ (V-switch), управляемый напряжением

Формат SPICE

S<имя> <выходной узел+> <выходной узел ->

+<управляющий узел+> <управляющий узел -> <имя модели>

Пример

S1 10 20 30 40 RELAMOD

Формат схем Micro-Cap 9

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **MODEL**: <имя модели>

Формат текстовой директивы модели ключа, управляемого напряжением:

.MODEL <имя модели> **VSWITCH** ([список параметров])

Примеры:

.MODEL S1 VSWITCH (RON=1 ROFF=1K VON=1 VOFF=1.5)

.MODEL S2 VSWITCH (RON=1 ROFF=1K VT=3 VH=1)

Рассматриваемый ключ может работать в двух режимах: плавного переключения и гистерезиса.

Режим плавного переключения. Режим используется, когда не нужен гистерезис для входного сигнала. Данный режим сводит к минимуму проблеме обеспечения сходимости при расчете ключевых схем. В этом режиме задаются VON (напряжение замыкания ключа) и VOFF (напряжение размыкания ключа). Параметры гистерезиса VT и VH игнорируются.

Если $VON > VOFF$, то ключ замкнут при управляющем напряжении $V_{упр} > VON$ и разомкнут при $V_{упр} < VOFF$. На интервале $VOFF < V_{упр} < VON$ сопротивление ключа плавно уменьшается от значения ROFF до RON.

Если $VON < VOFF$, то ключ замкнут при $V_{упр} < VON$ и разомкнут при $V_{упр} > VOFF$. На интервале $VON < V_{упр} < VOFF$ сопротивление ключа плавно увеличивается от значения RON до ROFF.

Гистерезисный режим. Используется, если необходим гистерезис для управляющего сигнала и схема не подвержена проблемам сходимости при расчете. В гистерезисном режиме обязательно должны быть заданы параметры VT и VH. Величины параметров VON и VOFF игнорируются, принимается во внимание соотношение между RON и ROFF. При прохождении нарастающим управляющим сигналом значения VT+VH сопротивление ключа изменяется резким скачком от ROFF до RON, а при прохождении убывающим управляющим сигналом значения VT-VH изменяется скачком от RON до ROFF.

Рассматриваемый ключ управляется напряжением между двумя входными узлами, а меняющееся сопротивление ключа подключено между выходными узлами. Значения RON и ROFF должны быть положительными величинами и по абсолютной величине меньше, чем сопротивление $1/G_{min}$. Не пытайтесь сделать величину $VON - VOFF$ слишком малой, это приведет к увеличению количества расчетных точек при пересечении входным сигналом промежуточной области. Минимально возможная величина этой разности $(REL TOL \cdot (\max(VON, VOFF)) + VNTOL)$.

Пример работы ключа с гистерезисом приведен в схемном файле *Switch_Hyster.cir* каталога *Components\Special Purpose*.

Параметры модели ключа, управляемого напряжением, приведены в табл. 5.18.

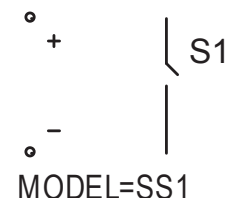


Рис. 5.46.
Ключ S-типа

Таблица 5.18. Параметры модели ключа, управляемого напряжением

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
VON	Напряжение замыкания ключа	В	1
VOFF	Напряжение размыкания ключа	В	0
RON	Сопротивление замкнутого ключа	Ом	1
ROFF	Сопротивление разомкнутого ключа	Ом	1E6
VT	Пороговое напряжение	В	—
VH	Величина гистерезиса	В	—

Уравнения модели ключа, управляемого напряжением

VC — напряжение между управляющими узлами.

$LM = \ln[(RON \cdot ROFF)^{1/2}]$ — логарифм среднего геометрического RON , $ROFF$.

$LR = \ln(ROFF/RON)$.

$VM = (VON + VOFF)/2$.

$VD = VON - VOFF$.

k — постоянная Больцмана.

T — температура анализа.

RS — выходное сопротивление ключа.

Режим плавного переключения (при задании VON и $VOFF$)

1. При $VON > VOFF$

Если $VC \geq VON$, $RS = RON$; если $VC \leq VOFF$, $RS = ROFF$.

При $VOFF < VC < VON$, $RS = e^{\left[LM + \frac{3 \cdot LR \cdot (VC - VM)}{2 \cdot VD} - \frac{2 \cdot LR \cdot (VC - VM)^3}{VD^3} \right]}$.

2. При $VON < VOFF$

Если $VC \leq VON$, $RS = RON$; если $VC \geq VOFF$, $RS = ROFF$

Если $VOFF > VC > VON$, $RS = e^{\left[LM - \frac{3 \cdot LR \cdot (VC - VM)}{2 \cdot VD} + \frac{2 \cdot LR \cdot (VC - VM)^3}{VD^3} \right]}$

Гистерезисный режим (если VON и $VOFF$ не определены)

Если $VC \geq VT + VH$, $RS = RON$

Если $VC \leq VT - VH$, $RS = ROFF$

Иначе RS не меняется

Шумовые эффекты

Шум учитывается как шум резистора, сопротивление которого равно найденному во время расчета рабочей точки по постоянному току. Его тепловой шум определяется по следующей формуле:

$$I = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T}{RS}}.$$

5.5.3. W-ключ (I-switch), управляемый током

Формат SPICE

W<имя> <выходной узел+> <выходной узел->

+<имя источника напряжения в ветви управляющего тока> <имя модели>

Пример:

W1 10 20 V1 IREF

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **REF**: <имя источника напряжения ветви управляющего тока>
- Атрибут **MODEL**: <имя модели>

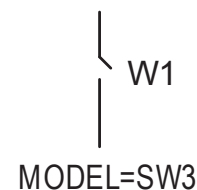


Рис. 5.47. Ключ W-типа

Формат текстовой директивы модели ключа, управляемого током:

.MODEL <имя модели> **ISWITCH** ([список параметров])

Примеры:

.MODEL W1 ISWITCH (RON=1 ROFF=1K ION=1 IOFF=1.5)

.MODEL W2 ISWITCH (RON=1 ROFF=1K IT=1 IH=1.5)

W ключ может работать в двух различных режимах: в режиме плавного переключения (рис. 5.48) и в гистерезисном режиме. Работа в этих двух режимах аналогична работе ранее описанного ключа, управляемого напряжением (см. 5.5.2), за исключением того, что управляющей величиной является ток. Соответственно модельные параметры меняются с VON, VOFF, VT, VH на ION, IOFF, IT, IH. Смысл этих параметров такой же, как для ключа, управляемого напряжением, но только применительно не к напряжению, а к току. Параметр ION по умолчанию равен 1 мА.

Уравнения работы ключа управляемого током можно получить из уравнений ключа управляемого напряжением при замене переменных VOFF на IOFF, VON на ION, VC на IC, VH на IH.

Таблица 5.19. Параметры модели ключа, управляемого током

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
ION	Ток замыкания ключа	А	1E-3
IOFF	Ток размыкания ключа	А	0
RON	Сопротивление замкнутого ключа	Ом	1
ROFF	Сопротивление разомкнутого ключа	Ом	1E6
IT	Пороговый ток	А	—
IH	Величина гистерезиса	А	

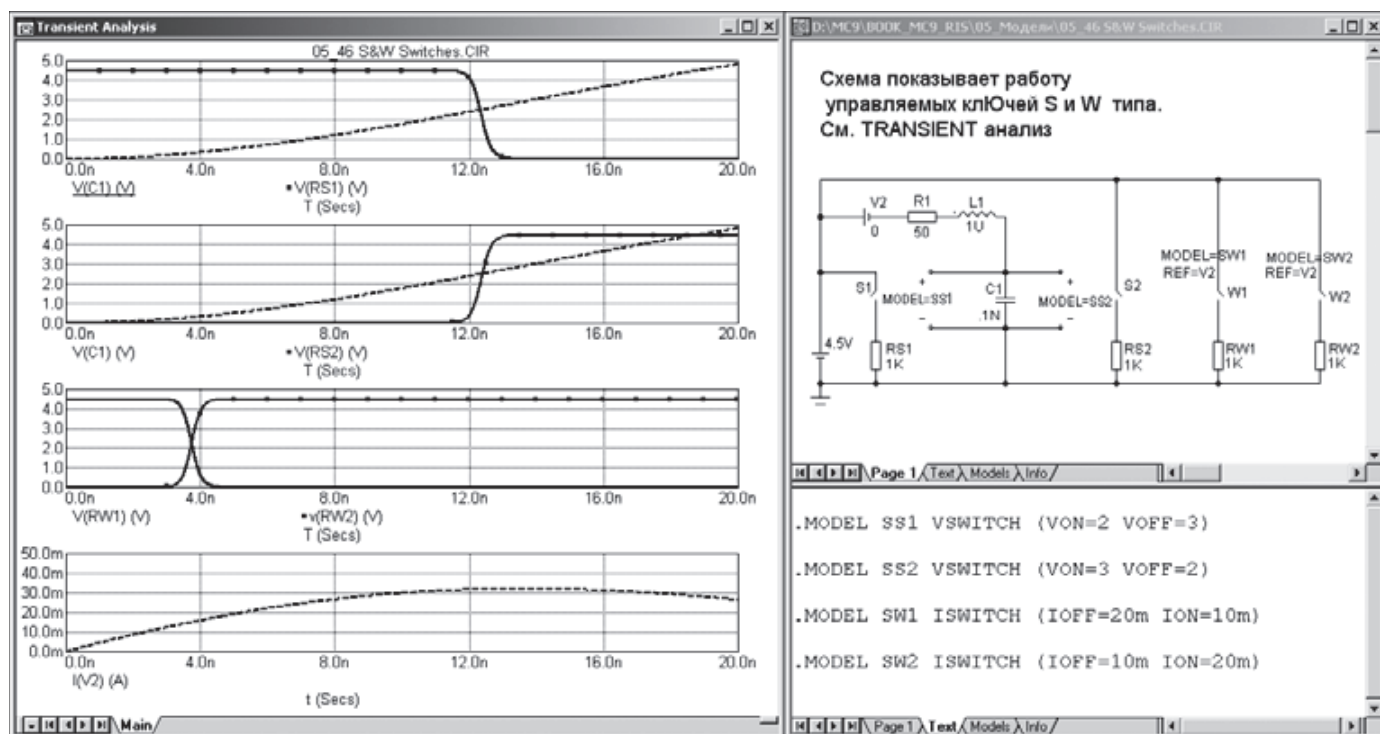


Рис. 5.48. Моделирование ключей, управляемых током и напряжением

Примеры моделирования ключей, управляемых напряжением (S) и током (W) приведены в схемном файле *switch_02.cir* из каталога *Components\Special Purpose* (см. также рис. 5.48).

5.5.4. Устройство выборки-хранения (Sample and Hold)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <ИМЯ>
Примеры:
S1
S10
SA
- Атрибут **INPUT EXPRESSION**: <входное выражение>
Примеры:
V(1,2)
V(10,20)*I(R1)
V(INPUT)
- Атрибут **SAMPLE EXPRESSION**: [<логическое выражение>]
Примеры:
V(1,2)>1.2
V(5)>1.1 AND V(4) >1.2
I(RL)>1e-3
- Атрибут **PERIOD**: <значение периода>
Примеры:
100ns
tmax/100
1U

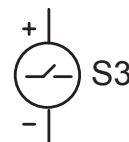


Рис. 5.49. Устройство выборки-хранения

Устройство выборки-хранения представляет собой аналоговое запоминающее устройство, которое запоминает аналоговый сигнал в заданные моменты времени и хранит это значение в течение определенного времени, равного периоду дискретизации.

В поле атрибута **INPUT EXPRESSION** вносится функция напряжений, токов и (возможно) времени, которая будет обрабатываться устройством выборки-хранения. В поле атрибута **SAMPLE EXPRESSION** вносится логическое выражение, при выполнении которого (истинности значения), устройство осуществляет отслеживание входной функции (повторяет во времени функцию, заданную в поле **INPUT EXPRESSION**). При невыполнении этого логического выражения, на выходе устройства — значение, запомненное в момент времени перехода логического выражения из истинного в ложное состояние. Таким образом, при задании поля **SAMPLE EXPRESSION** момент перехода логического выражения из ложного в истинное — это поступление команды на выборку (слежение) за входной функцией; а момент перехода из истинного в ложное — это поступление команды на хранение. В этом случае значение, указанное в поле **PERIOD** игнорируется.

В поле атрибута **PERIOD** указывается интервал времени, через который будут производиться выборки сигнала. На это же время происходит и запоминание выборки. Значение этого атрибута принимается во внимание при анализе, если поле атрибута **SAMPLE EXPRESSION** не заполнено. Примеры работы устройства выборки-хранения см. в схемных файлах *sample and hold_01.cir...sample and hold_04.cir* из каталога *Components\Special Purpose* (рис. 5.50).

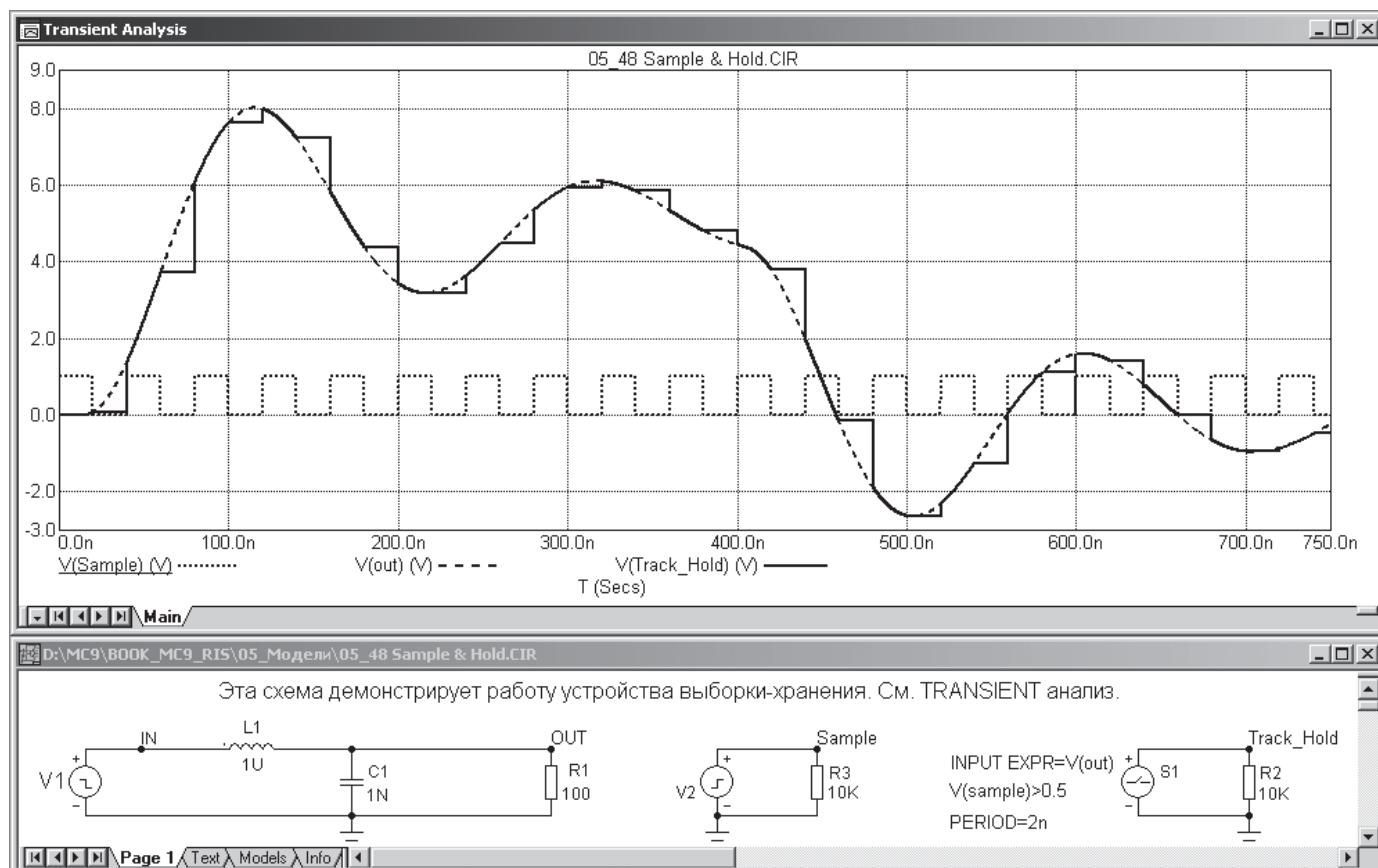


Рис. 5.50. Моделирование устройства выборки-хранения (Sample and Hold)

5.5.5. Таймер (Timer)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
Примеры:
T1
S2
- Атрибут **INPUTEXPR**: <входное выражение>
Примеры:
 $V(1,2) \geq 1.3$
 $I(R1) \geq 1\text{ma}$ AND $I(R1) \leq 5\text{ma}$
 $T > 110\text{ns}$ AND $V(3) > 5$
- Атрибут **ELAPSED_SCALE** <масштабный множитель времени от начала события>
Примеры:
1E6
1
- Атрибут **INCREMENT** <приращение счетчика>
Примеры:
-1
1
- Атрибут **INITIAL** <начальное значение>
Примеры:
0
16384
- Атрибут **MIN** <минимальное значение>
Примеры:
0
-100
- Атрибут **MAX** <максимальное значение>
Примеры:
16384
10

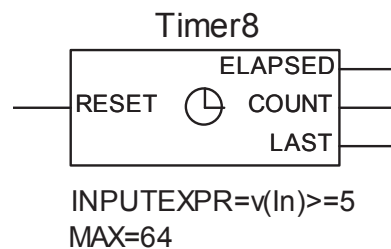


Рис. 5.51. Таймер

Событие начинается, когда <входное выражение> становится истинным (принимает значение равное 1). <Входное выражение>, записываемое в позиции атрибута **INPUTEXPR** представляет собой типовое логическое выражение, определяющее условие возникновения события, например $V(IN) \geq 3.4$. Счетчик Count устанавливается в <начальное значение> либо при начале моделирования, либо когда напряжение на выводе RESET превысит значение 1В. При каждом возникновении события счетчик таймера увеличивается на <приращение счетчика>. Счетчик таймера не может принять значение меньшее <минимального значения> или большее <максимального значения>.

Таймер имеет следующие выходные сигналы:

- **COUNT** — число событий, подсчитанное либо от начального момента времени моделирования либо от конца последнего импульса сброса RESET
- **ELAPSED TIME** — сигнал в виде напряжения, пропорционального времени, прошедшего от начала последнего события.
- **LAST TIME** — сигнал в виде напряжения равного времени в секундах (от момента начала моделирования) до начала последнего события.

Все выходные сигналы являются выходами источников ЭДС, напряжения которых копируют значение времени от начала события (*elapsed time*), числа в счетчике (*count value*), и времени начала последнего события (*last event time*).

Величина напряжения на выходе **ELAPSED TIME** определяется следующим образом:

$$V_{Elapsed\ time} = t_{Elapsed} \cdot \langle Elapsed\ scale \rangle.$$

Величина напряжения на выходе **COUNT** рассчитывается следующим образом:

$$V_{count} = \langle \text{начальное значение} \rangle + (\text{число событий с момента } T=TMIN \text{ или последнего сигнала RESET}) \times \langle \text{приращение счетчика} \rangle.$$

Величина напряжения на выходе **LAST** рассчитывается следующим образом:

$$V_{Last} = \langle \text{время в сек от начала последнего события} \rangle.$$

Следует обратить внимание на то, что сигнал сброса, поступающий на вход таймера RESET, сбрасывает только счетчик таймера, но не воздействует на состояние выводов ELAPSED или LAST. Подробно с работой таймера можно ознакомиться при моделировании схемы *timer.cir* из каталога *Components\Special Purpose* (book-mc.rar).

5.5.6. Стрелки (Arrow) и контакты (Bubble)

Если в графе **Definition** редактора компонентов **Component Editor** выбран тип *Blank* (пустой), то компонент такого типа не имеет электрических свойств, не участвует в моделировании и предназначен лишь для нанесения на схему дополнительной информации.



Рис. 5.52. Стрелки и контакты

К таким компонентам относится **Arrow** — стрелка, указывающая, в частности, направление тока, и **Bubble** — контакт, помеченный текстовой меткой.

5.6. Макромодели

5.6.1. Макромодели в виде схемы формата Micro-Cap (MACRO circuit)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>

Пример:
2N5168

- Атрибут **FILE**: <имя схемы макромодели>

Пример:

SCR

Макромодели (MACRO) представляют собой схемный эквивалент текстовых описаний подсхем на языке SPICE (subcircuits). Как правило, они являются функционально законченными блоками электрических схем, созданными и сохраненными на диске для последующего использования в других схемах.

Создание схемной макромодели

1. Создайте с помощью схемного редактора схему блока. Обозначьте выводы блока текстовыми надписями (с использованием английских букв) для идентификации схемных выводов блока. Если вы хотите при моделировании передавать в макромодель численные значения параметров, используйте для атрибутов численных значений элементов макромодели символические имена и (или) объявите эти символические имена в директиве **.PARAMETERS**. Сохраните схему на диске под выбранным именем как макромодель (с расширением файла MAC).

2. Введите вновь созданный компонент в библиотеку компонентов следующим образом:

- Запустите Component Editor (*Windows>Component Editor*). Выберите группу, в которую вы хотите поместить вашу макромодель. Дайте команду *Add Part* ().
- Введите в поле NAME для появившегося нового компонента имя файла макромодели.
- Выберите подходящее условное графическое обозначение (УГО) для созданной макромодели (с соответствующим количеством выводов), т.е. заполните поле SHAPE.
- Выберите или наберите в поле DEFINITION — *Macro*
- Присвойте выводам УГО имена, кликнув мышью на выводе УГО. Для названия выводов используйте те же текстовые обозначения, которыми были обозначены выводы в схемном файле макромодели (см. п. 1).
- Закройте *Component Editor* с сохранением сделанных изменений.
- Добавьте директиву .MACRO в один из *.LIB файлов для замены длинного списка параметров на более короткий (необязательное действие).

В следующих пунктах описывается постановка в схему и использование созданной макромодели.

3. Находясь в схемном редакторе, выберите из библиотеки компонентов макромодель (*Component...*). Поместите ее в схему, при необходимости введя в окне задания параметров необходимые значения параметров макромодели. Когда схемная макромодель помещается в схему, программа просматривает схемный файл макроопределения, определяет, имеет ли она параметры, и если имеет, то показывает параметры и их значения, заданные по умолчанию в окне задания атрибутов компонента. При необходимости их в этом окне можно отредактировать.

4. При наличии соответствующих директив .MACRO в библиотечном файле (если выполнено последнее необязательное действие при создании макромодели, см. п. 2) можно вызвать нужную разновидность макро по ее псевдониму. При этом подставляется короткое имя-псевдоним, например 2N5168, на место имени файла макроопределения с соответствующим переопределением параметров.

Процесс создания схемной макромодели проиллюстрирован в пункте 2.5.5 главы 2 «Краткий ознакомительный экскурс».

Формат директивы .MACRO

.MACRO <псевдоним> <имя схемного файла макроопределения (список параметров)>

Подобная директива, набранная в библиотечном файле с расширением LIB, позволяет хранить в нем нужные параметры для необходимой разновидности макромодели. Например, в поставляемом варианте программы Micro-Cap, имеются модели различных тиристоров, базирующихся на макромодели SCR.mas. Для этого в файле THY_LIB.LIB записана серия директив .MACRO для различных наименований тиристоров с нужными параметрами для каждого наименования прибора.

Подробности о директивах .MACRO и .PARAMETERS см. в разделе 4.9, посвященном текстовым директивам.

В качестве иллюстрации использования макромодели-схемы Micro-Cap см. схемные файлы *system2.cir* и *oa_ideal.cir* из каталога *Components\Macro* (book-mc.rar).

5.6.2. Макромодели в виде текстовой подсхемы на языке SPICE

Формат SPICE

X<имя> [узел]* <имя подсхемы>
+ [PARAMS: <<имя параметра>=<значение параметра>>*]
+ [TEXT: <<имя текстовой переменной>=<текст>>*]

Примеры:

X1 10 20 AMP

XDIFF 100 200 DIFF PARAMS: GAIN=10

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример:
X1
- Атрибут **NAME** <имя SPICE-подсхемы>
Пример:
FILTER
- Атрибут **FILE** [<имя файла>]
Пример:
MYFILE.MOD
- Атрибут **PARAMS**: [<<имя параметра>=<значение параметра>>*]
Пример:
CENTER=10KHZ BW=1KHZ

- Атрибут **TEXT**: [`<имя текстовой переменной>=<текст>*`]

Пример:

JEDEC="FILENAME"

[*узел*]* — номера или имена узлов, указанных в директиве .SUBCKT. Количество узлов в подсхеме должно быть одинаковым с количеством узлов в директиве .SUBCKT. При вызове подсхемы узлы в вызове заменяют узлы подсхемы причем в том же порядке, в котором они перечислены в директиве объявления подсхемы .SUBCKT.

Любые узлы, определенные в директиве .SUBCKT с ключевым словом OPTIONAL — необязательны к использованию, они обычно перечисляются следом за обязательными узлами. Подмножество этих дополнительных узлов может быть указано, и они могут обозначать внутренние узлы подсхемы. Если они не используются, то просто будут проигнорированы от слова OPTIONAL до конца списка узлов. Указанные опциональные узлы доступны только при определении подсхемы в виде SPICE-текста. Указанная особенность определения узлов очень часто используется в SPICE-тексте библиотеки цифровых компонентов (Digital Library) для указания необязательных выводов питания микросхем.

`<Имя подсхемы>` в SPICE-тексте или атрибут `<имя>` в схемном формате определяют имя подсхемы. Оно должно совпадать с именем, указанным в директиве .SUBCKT.

Атрибут **FILE** задает имя текстового SPICE-файла, в котором находится определение нужной подсхемы, начинающееся с директивы .SUBCKT. Программа Micro-Cap ищет указанную директиву для подсхемы под заданным в поле **NAME** именем в следующих перечисленных местах в той же последовательности:

1. Если создаваемая схема имеет **схемный формат Micro-Cap**
 - В текстовой области схемного файла
 - В файле, заданном в поле атрибута **FILE**
 - В одном или более файлах, перечисленных в директиве .LIB
 - В одном или нескольких файлах, перечисленных в директиве, выполняющейся каждый раз по умолчанию '.LIB NOM.LIB' (фактически в файле NOM.LIB, и во всех файлах, которые в нем указаны с помощью соответствующих директив .LIB)
2. Если создаваемая схема имеет **формат текстового SPICE-файла** (крайне редкий случай при использовании Micro-Cap)
 - В строках текста текущего схемного текстового файла
 - В одном или более файлах, перечисленных в директиве .LIB
 - В одном или нескольких файлах, перечисленных в директиве, выполняющейся каждый раз по умолчанию '.LIB NOM.LIB'

Подсхемы в формате SPICE (subcircuits) используются достаточно часто в библиотеке аналоговых компонентов программы Micro-Cap. Они всегда являются доступными, благодаря использованию умолчательной директивы '.LIB NOM.LIB'.

Атрибут **PARAMS** позволяет избежать перечисления длинного списка параметров подсхемы. `<Имя параметра>` представляет собой имя параметра,

<значение параметра> определяет величину, которая будет присвоена параметру при вызове подсхемы. Например, для следующего определения подсхемы:

.SUBCKT CLIP 1 2 PARAMS: LOW=0 HIGH=10,

любой из нижеприведенных вызовов подсхемы будет корректным:

- X1 10 20 CLIP ;результатирующие значения параметров LOW=0, HIGH=10
- X2 10 20 CLIP PARAMS: LOW=1 HIGH=2; результатирующие значения параметров LOW=1, HIGH=2
- X3 10 20 CLIP PARAMS: HIGH=4 ; результатирующие значения параметров LOW=0, HIGH=4

Атрибут **TEXT** позволяет избежать задания текстовых параметров подсхемы. <Имя текстовой переменной> представляет собой имя текстового параметра, а <текст> определяет текст, который будет присвоен переменной, если параметр не включается в вызов подсхемы. Например, для следующего определения подсхемы:

.SUBCKT STIMULUS 1 2 3 4 TEXT: FILE="T1.STM"

любой из нижеприведенных вызовов будет корректным:

- X1 10 20 30 40 STIMULUS; приведет к взятию информации из текстового файла T1.STM
- X2 10 20 30 40 STIMULUS TEXT:FILE="P.STM"; приведет к взятию информации из текстового файла P.STM

Использование текстовых подсхем в формате SPICE

Использование текстовых подсхем в формате SPICE организовано в программе Micro-Cap достаточно просто. Для этого необходимо ввести подсхему на языке SPICE в библиотеку компонентов, используя редактор компонентов (*Component Editor*). Предварительно тестовый файл или SPICE-библиотеку с описанием подсхемы следует скопировать в директорию MC9\LIBRARY (MC10\LIBRARY) и добавить имя файла, содержащего нужную подсхему в файл pom.lib, находящийся в этой же директории. Далее, находясь в редакторе компонентов, необходимо в выбранной группе создать новый компонент

() и для созданного компонента проделать следующее:

- Задать имя подсхемы (в позиции **Name**). Можно использовать любое уникальное имя. Для того, чтобы не возникла неразбериха лучше ввести имя, использованное в директиве .SUBCKT текстового определения подсхемы (хотя это и не является строго обязательным требованием).
- Задать имя УГО подсхемы (в позиции **Shape**). Можно использовать любое подходящее УГО с соответствующим числом внешних выводов.
- В позиции **Definition** необходимо указать SUBCKT.
- После этого необходимо присвоить имена выводам макромодели. Они обозначаются в том же порядке, в котором следуют в определении подсхемы директивой .SUBCKT. Для того чтобы присвоить обозначение выводу подсхемы, необходимо кликнуть мышью по выводу УГО. При необходимости обозначения выводов (жирные красные точки) могут быть перетянуты мышью *точно* в конец линии вывода.

Можно также воспользоваться мастером импорта компонента из текстового SPICE-файла, запускаемого из редактора компонентов *Component Editor* кликом на пиктограмме *Import Wizard* . Данная команда позволяет включать целые библиотеки, оформленные в виде SPICE-текста. Рассмотрим это на примере импорта компонентов из SPICE-библиотеки *Vendor.Lib*, находящейся в каталоге *Components\Macro* (book-mc.rar).

Сначала рекомендуется скопировать библиотеку в каталог MC9\Library (MC10\Library), при этом рекомендуемое расширение файла — .LIB (хотя и то, и другое не является строго обязательным).

Находясь в редакторе компонентов, выберите группу, в которую вы хотите импортировать модель. Иерархическое дерево компонентов справа повторяет структуру меню компонентов схемного редактора. Двойной клик на имени группы открывает и закрывает ее. Может быть использована иконка *Add Group*  для добавления новой группы в иерархическое дерево. Выделите имя группы, в которой должен оказаться новый компонент. Затем запустите мастер *Import Wizard* путем клика на иконке редактора компонентов .

1. Первая страница мастера *Import Wizard* — файловая страница *File* (рис. 5.53, а). В этой странице задается библиотечный файл, содержащий импортируемые модели. Панель *Browse* позволяет просмотреть структуру жесткого диска для выбора необходимой библиотеки. При установленном флажке опции "*Copy the above file to the library directory*" библиотечный файл копируется в заданную директорию. Опция полезна для автоматического перемещения библиотечного файла в каталог библиотек *Library*, если выбранный файл библиотеки находится в другом каталоге (директории). После выбора библиотечного файла нажмите *Next (Далее)*.

2. Следующее диалоговое окно мастера — окно *Suffix*. В большинстве случаев в использовании суффикса нет необходимости и диалог этого окна может быть пропущен нажатием *Next (Далее)*.

Добавление суффикса может понадобиться в случае, когда импортируемые модели имеют имена, уже использующиеся в библиотеке компонентов. Мастер *Import Wizard* может импортировать только модели с именами, которых нет в библиотеке компонентов и добавление суффикса позволяет разрешить эту проблему.

Суффикс будет добавляться ко всем именам подсхем внутри библиотечного файла. Для добавления суффикса, введите необходимую последовательность символов в поле "*Suffix to Append to SUBCKT names*", а затем кликните по панели *Append*. Это действие перепишет все имена подсхем в библиотечном файле с добавлением указанного суффикса. Отметим, что после клика на *Append*, библиотечный файл модифицируется и сохраняется в таком же виде на жестком диске. Если данная операция мастера позже отменяется, то библиотечный файл все равно будет содержать модифицированные имена подсхем.

3. Следующее окно запускает процедуру импорта уникальных моделей из библиотечного файла (рис. 5.53, б, в). При этом сравниваются компоненты в импортируемой библиотеке с существующими компонентами в редакторе

компонентов. Для SPICE-подсхем сравниваются число внешних выводов новой модели и их имена с соответствующими позициями существующих моделей. В файле `vendor.lib` сделана соответствующая подборка подсхем. В нем представлены 3 возможных ситуации, которые могут иметь место при импорте моделей:

а) При нахождении подходящего компонента, автоматически добавляется в библиотеку компонент с подобным шаблоном. Такая ситуация имеет место при импорте модели быстродействующего операционного усилителя AD827. Для него находится подходящий шаблон `Opamp5` у модели AD645_AD.

б) Если подобных компонентов не нашлось, модель помещается в библиотеку без заполнения шаблона, что потребует от пользователя в дальнейшем дополнительных действий — так происходит с моделью быстродействующего дифференциального приемника AD8145.

в) Если найдено много подходящих компонентов, становится доступным их список, который вызывается на экран, и можно выбрать компонент наиболее подходящий к импортируемой модели. В добавление к списку подходящих шаблонов вызывается второе диалоговое окно, которое показывает SPICE-текст импортируемой модели.

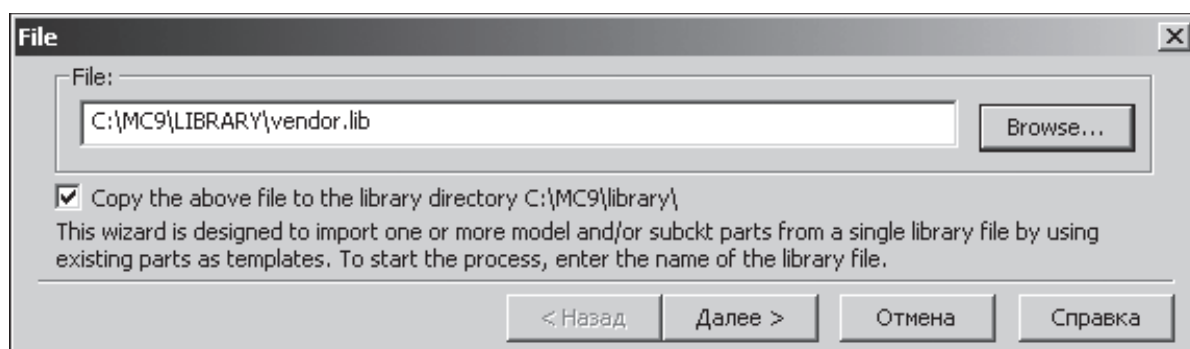
Текстовое описание схемы может понадобиться для выбора из списка подобных шаблонов наиболее подходящего для импортируемой модели. В рассматриваемом примере много подобных компонентов найдено для n-канального МОП-транзистора IRFE330 (см. рис. 5.53, б). Можно выбрать, например, шаблон существующего транзистора 2N6782_IR (DNMOS).

Следует отметить, что сделанный выбор из списка может быть и не окончательным. На последнем этапе импорта при просмотре полей определения компонента, все можно доработать.

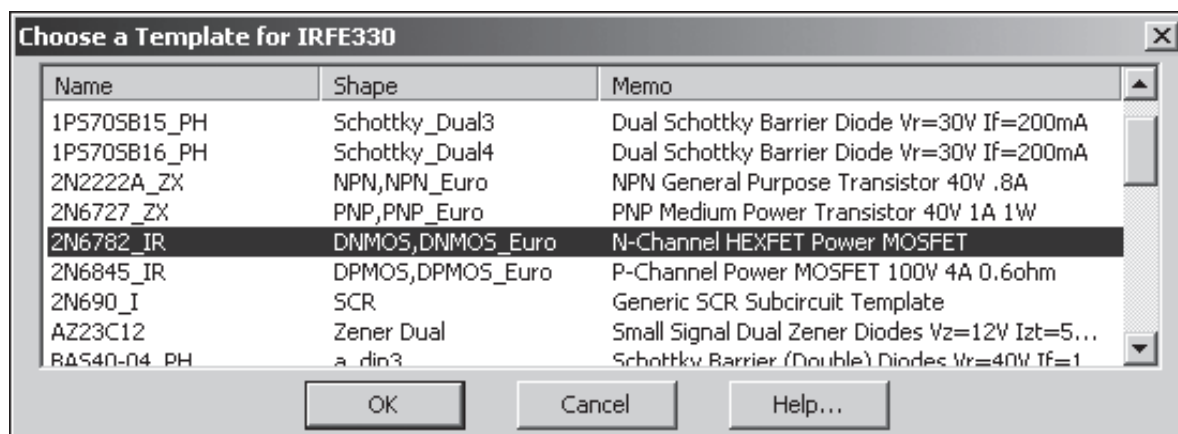
Нажатие *OK* импортирует IRFE330 с использованием того же самого УГО (условного графического обозначения) и конфигурации внешних выводов, что и у транзистора 2N6782_IR, уже существующего в библиотеке компонентов. Нажатие *Cancel* позволит избежать импорта новой модели.

4. Как только все модели в библиотеке будут обработаны, появится окно *Import*, показывающее результаты действий, проделанных мастером импорта компонентов (см. рис. 5.53, г). Верхняя часть статусного окна показывает результаты импорта каждой из 3-х моделей из библиотечного файла `vendor.lib`. Для модели AD827, был найден единственный подобный компонент и модель была импортирована с использованием шаблона `Opamp5`. Для модели AD8145, не было найдено компонентов с подходящими шаблонами и модель импортирована с использованием сгенерированного под нее шаблона. Отметим, что этот компонент помечен меткой *Needs Work* (нужна доработка). Для модели IRFE330, был произведен импорт с использованием шаблона транзистора 2N6782_IR, выбранного из списка подходящих шаблонов в предыдущем диалоге.

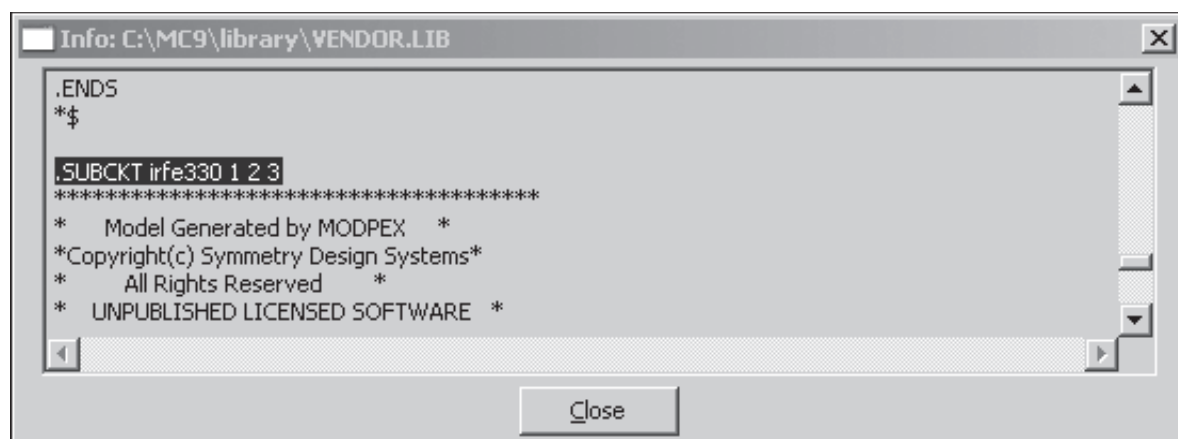
Нижняя часть статусного окна показывает полный результат для библиотеки компонентов. В рассматриваемом случае 3 подсхемы были найдены в файле, и 3 модели были импортированы. Нажмите *Finish* (Готово) для завершения операции импорта.



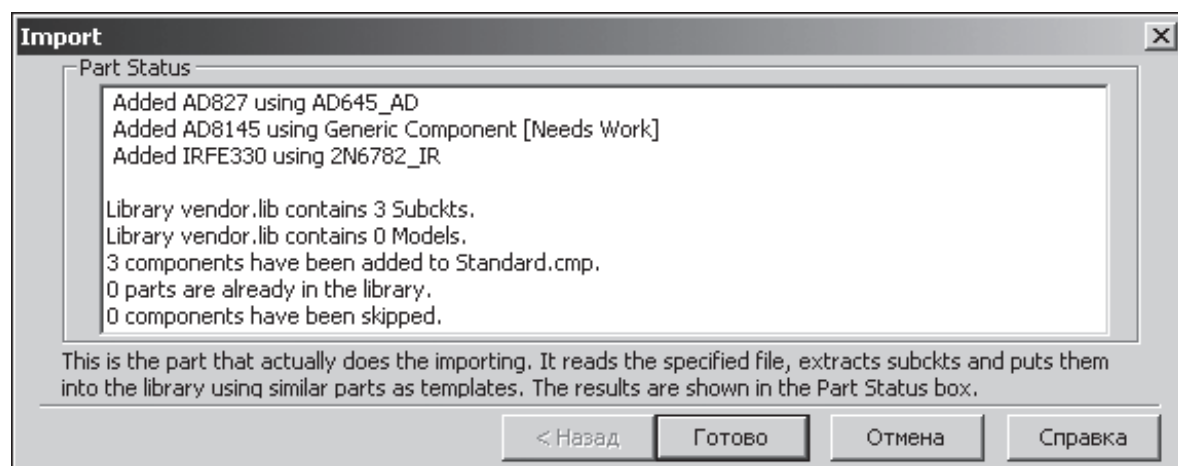
а



б



в



г

Рис. 5.53. Окна мастера *Import Wizard*

5. Новые компоненты теперь доступны в редакторе компонентов внутри группы, выбранной перед запуском мастера. Двойная проверка даст уверенность в том, что УГО и разводка на нем внешних выводов правильна. Выделите компонент, а затем нажмите иконку *Info* на панели инструментов. Это покажет SPICE-текст для компонента, который обычно содержит комментарии по функциональному назначению внешних выводов. Подтяните мышью красные точки на нужные выводы. В этом месте вы редактируете шаблон импортированного компонента точно так, как любого другого, находящегося в библиотеке компонентов. Для рассматриваемого примера модели AD827 и IRFE330 не требуют доработки. Модель AD8145, чей статус «Needs Work», нуждается в определении для него УГО (shape) и разводки на нем внешних выводов микросхемы. Можно выбрать УГО, например, Opamp7d, а затем подтянуть соответствующие точки соединения к концам выводов УГО, завершив тем самым импорт модели AD8145.

После второй проверки и окончательной доработки следует закрыть *Component Editor* с сохранением сделанных изменений.

Макромодель-подсхема помещается в создаваемую схему обычным способом.

В качестве иллюстрации использования макромодели — подсхемы SPICE см. схемные файлы *subckt1.cir* и *pla2.cir* из каталога *Components\Macro*.

5.7. Элементы анимации

Компоненты анимации введены в программу для изображения движения, вращения, изменения цвета индикации, линейных размеров и изображения в ответ на поступление управляющих сигналов или манипуляции пользователя со схемой посредством кликов мыши. В большинстве случаев они имитируют реальный прибор по принципу действия и управлению. Вызываются указанные компоненты с помощью команды *Component>Animation...*

5.7.1. Аналоговая индикаторная линейка (Animated analog bar)

Формат схем *Micro-Cap*

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример:
BAR1
- Атрибут **LOW** <минимальное значение>
- Атрибут **HIGH** <максимальное величина>

Аналоговая индикаторная линейка отображает светящийся столбик, высота которого пропорциональна входному напряжению. Когда напряжение равно <минимальному значению>, высота светящегося столбика минимальна, когда — <максимальному значению>, высота светящегося столбика максимальна. См. схемный файл *animated analog bar.cir* из каталога *Components\Animation*.



Рис. 5.54. Аналоговая индикаторная линейка

5.7.2. Цветные светодиоды (Animated analog LED)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример:
LED2
- Атрибут **COLOR** <цвет свечения>, <напряжение включения>, <ток свечения>, [rs], [cjo]
Пример:
Red,1.7,0.015,250m,30p

Led2



Yellow,2.0,0.015,.5,20p

Рис. 5.55. Светодиодные индикаторы

Анимационные цветные светодиоды — диоды, которые начинают светиться соответствующим цветом, когда к ним приложено прямое напряжение, не меньшее чем <напряжение включения>. При проведении анализа они заменяются электрической моделью обычного диода, прямое падение напряжения на котором и прямой ток свечения определяются параметрами <напряжение включения> и <ток свечения> и модельными параметрами RS=[rs] и CJO=[cjo].

Выбор цвета свечения определяется палитрой, выбираемой пользователем, связанной с параметром <цвет свечения>. Для изменения цвета свечения светодиода сделайте на нем двойной клик мышью, затем кликните один раз на поле атрибута **COLOR**, а после этого — на кнопке **LED Color**. Появится диалоговое окно, которое позволит выбрать светодиод с нужным цветом свечения и при необходимости добавить новые типы. Приведенные ниже типы светодиодов поддерживаются стандартной библиотекой программы Micro-Cap:

YELLOW, 2.0, 15m, 500m, 20pF

GREEN, 2.1, 15m, 500m, 20pF

BLUE, 3.4, 12m, 500m, 20pF

RED, 1.7, 15m, 500m, 20pF

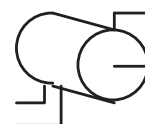
Для иллюстрации см. схемные файлы *anim6.cir*, *animated analog led.cir* из каталога *Components\Animation* (book-mc.rar).

5.7.3. Двигатель постоянного тока (Animated DC motor)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример:
MOTOR1
- Атрибут **RPSPV** <оборотов в секунду на вольт>
Пример: 1
- Атрибут **RMOTOR** <сопротивление двигателя>
- Атрибут **LMOTOR** <индуктивность двигателя>

Motor3



RPSPV=1

Рис. 5.56. Двигатель постоянного тока

Двигатель постоянного тока вращается с угловой скоростью, пропорциональной уровню входного напряжения. Скорость вращения в оборотах в секунду определяется следующим образом:

$$\omega = \langle \text{входное напряжение} \rangle \times \langle \text{оборотов в секунду на вольт} \rangle.$$

Как электрическая схема, мотор представляет собой резистор величиной <сопротивление двигателя>, соединенный последовательно с индуктивностью величиной <индуктивность двигателя>.

Напряжение на выводе *Velocity* представляет собой угловую скорость вращения в оборотах в секунду, выраженную в вольтах.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ. Если скорость вращения ротора слишком высока, то его изображение может пропадать. Величина скорости в 10 об./с является максимальной скоростью, при которой заметно угловое перемещение ротора.

Для иллюстрации использования компонента см. схемный файл *animated dc motor.cir* из каталога *Components\Animation* (book-mc.rar).

5.7.4. Ключи типа DPST, SPDT, SPST

(Animated DPST Switch, Animated SPDT Switch, Animated SPST switch)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **STATE**: <UP | DOWN> (для переключателей SPDT)
- Атрибут **STATE**: <OPEN | CLOSED> (для ключей SPST или DPST)
- Атрибут **RON**: <значение RON>
Пример: .001
- Атрибут **ROFF**: <значение ROFF>
Пример: 1E12
- Атрибут **GROUP**: <<имя группы> | NOT <имя группы>>
Примеры:
Group1
NOT Group22

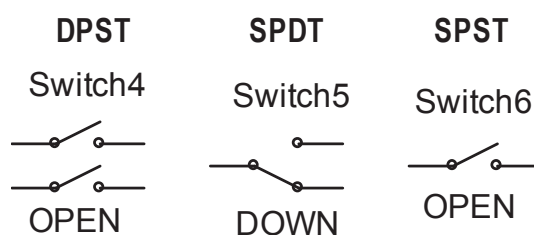


Рис. 5.57. Ключи с «ручным» переключением

Двойной клик мышью на ключах переключает состояние SPST и DPST ключей между разомкнутым (OPEN) и замкнутым (CLOSED); а состояние переключателя SPDT — между верхним (UP) и нижним (DOWN) положением. Все ключи моделируются простым резистором, величина которого во включенном и выключенном состоянии ключа равна соответственно R_{on} (по умолчанию 0.001) и R_{off} (по умолчанию 1E15). Двойной клик мышью рядом с элементом вызывает диалоговое окно установки атрибутов. Двойной клик на ключе, имеющем атрибут **GROUP**, вызывает смену состояния всех других ключей данной группы. Если <имя группы> в поле атрибута **GROUP** предваряется словом NOT, ключ работает противоположно другим ключам данной группы.

Для иллюстрации см. схемный файл *anim5.cir* из каталога *Components\Animation* (book-mc.rar).

5.7.5. Вольтамперметр (Animated meter)

Формат схем Micro-Cap:

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример: METER1
- Атрибут **LOW**: <минимальное значение>
- Атрибут **HIGH**: <максимальное значение>
- Атрибут **SCALE**: < T | MEG | k | m | u | n | p | f >
- Атрибут **AUTOSCALE**: <ON | OFF>
- Атрибут **ANALOG_OR_DIGITAL**: <ANALOG | DIGITAL>
- Атрибут **AMPS_OR_VOLTS**: <AMPS | VOLTS>
- Атрибут **INPUT_RESISTANCE**: <Rin>

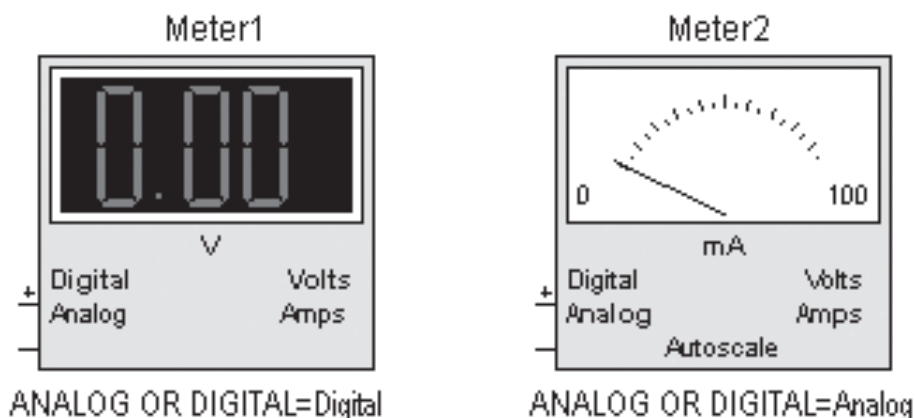


Рис. 5.58. Измерительный прибор

Анимационный измерительный прибор представляет собой либо амперметр, либо вольтметр, который, кроме того, может быть аналоговыми либо цифровыми. Тип прибора (амперметр или вольтметр), а также его вид (аналоговый либо цифровой) устанавливается двойным кликом мыши на соответствующих надписях передней панели его УГО. Двойной клик мыши на надписи «Autoscale» на передней панели аналогового прибора переключает его режимы между двумя состояниями: автоматическим определением предела шкалы и ручным. В режиме ручного определения предела шкалы (manual scaling) нижний предел устанавливается по значению атрибута **LOW**, а верхний — по значению атрибута **HIGH**. Цифровой прибор всегда находится в режиме автоматического определения предела шкалы (autoscaling).

Значение атрибута **SCALE** принимается во внимание только тогда, когда атрибут **AUTOSCALE** выключен (OFF) и выбран аналоговый измерительный прибор. Например, при входном напряжении 8000В, атрибут **SCALE**, равный k, приведет к показанию стрелки вольтметра на цифре 8 при верхнем пределе шкалы 10000 и нижнем 0 (LOW=0 и HIGH=10000), т.е. напряжение показывается в киловольтах.

В модели вольтметра параллельно его входным клеммам включается резистор величиной Rin. Если сопротивление Rin не определено, то оно принимается равным 1/GMIN.

Когда прибор находится в режиме амперметра, его входное сопротивление равно 0.001 Ом.

Для иллюстрации см. схемный файл *animated meter.cir* из каталога *Components\Animation* (book-mc.rar).

5.7.6. Электромагнитное реле (Animated relay)

Формат схем Micro-Cap:

- Атрибут **PART**: <имя>

Пример:

RELAY1

- Атрибут **LIN**: <входная индуктивность>
- Атрибут **RIN**: <входное сопротивление>
- Атрибут **ION**: <входной ток включения>
- Атрибут **IOFF**: <входной ток выключения>
- Атрибут **RON**: <сопротивление во включенном состоянии>
- Атрибут **ROFF**: <сопротивление в выключенном состоянии>
- Атрибут **BIDIRECTIONAL**: <YES | NO>

Relay1

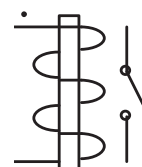


Рис. 5.59.

Электромагнитное реле

Компонент *animated relay* представляет собой SPST-реле, которое реагирует на изменения входного тока. Оно ведет себя подобно токовому W-ключу с плавным переключением. Входная цепь реле моделируется как индуктивность величиной <входная индуктивность> последовательно соединенная с резистором величиной <входное сопротивление>.

Для иллюстрации см. схемный файл *anim7.cir* из каталога *Components\Animation* (book-mc.rar).

Уравнения электрической модели

Если атрибут **BIDIRECTIONAL** равен NO, то управляющий ток IC =(ток, втекающий в плюсовой вывод), иначе $IC=ABS$ (ток, втекающий в плюсовой вывод).

$$LM = \ln \left[\left(\frac{RON}{ROFF} \right)^{1/2} \right]; \quad LR = \ln \left[\frac{RON}{ROFF} \right]; \quad IM = \frac{ION + IOFF}{2};$$

$$ID = ION - IOFF;$$

RS — выходное сопротивление ключа

При $ION > IOFF$

Если $IC \geq ION$, $RS = RON$;

Если $IC \leq IOFF$, $RS = ROFF$;

Если $IOFF < IC < ION$, $RS = e^{\left(LM + \frac{3 \cdot LR \cdot (IC - IM)}{2 \cdot ID} - \frac{2 \cdot LR \cdot (IC - IM)^3}{ID^3} \right)}$.

При $ION < IOFF$

Если $IC \leq ION$, $RS = RON$

Если $IC \geq IOFF$, $RS = ROFF$

Если $IOFF > IC > ION$, $RS = e^{\left(LM - \frac{3 \cdot LR \cdot (IC - IM)}{2 \cdot ID} + \frac{2 \cdot LR \cdot (IC - IM)^3}{ID^3} \right)}$.

5.7.7. Трехцветный индикатор (Animated traffic light)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример: LIGHT1
- Атрибут **TURN-ON VOLTAGES**: <напряжение включения>

Элемент *animated traffic light* моделирует работу светофора (зажигание индикаторов разных цветов). У него есть 3 индикатора разного цвета свечения: красного, желтого и зеленого.

Каждый из трех индикаторов загорается, когда напряжение на его управляющих выводах превышает <напряжение включения>. Для иллюстрации см. схемный файл *anim4.cir* из каталога *Components\Animation* (book-mc.rar).

Light1



Рис. 5.60. Светофор

5.7.8. Цифровой сигнальный ключ (Animated Digital switch)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример: U1
- Атрибут **I/O MODEL**: <имя интерфейсной модели>
Пример: IO_STD
- Атрибут **IO_LEVEL**: <индекс подсхемы интерфейса>
Пример: 1
- Атрибут **POWER NODE**: <цифровой узел питания>
Пример: \$G_DPWR
- Атрибут **GROUND NODE**: <цифровой узел земли>
Пример: \$G_DGND
- Атрибут **STATE**: <выходное состояние>
Пример: 1

Цифровой сигнальный ключ используется для ручного переключения логических уровней. Он может подключать уровень логического нуля и уровень логической единицы. Он имеет один выход, на котором появляется выбранный цифровой сигнал. При выполнении моделирования в режиме анимации или **Dynamic DC** двойным кликом мыши можно менять логический уровень на выходе.

Для иллюстрации см. схемный файл *anim5.cir* из каталога *Components\Animation* (book-mc.rar).

U1



Рис. 5.61. Цифровой сигнальный ключ

5.7.9. Цифровой индикатор (Animated Digital LED)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример: U1
- Атрибут **I/O MODEL**: <имя интерфейсной модели>
Пример: IO_STD
- Атрибут **IO_LEVEL**: <индекс подсхемы интерфейса>
Пример: 1

U2



Рис. 5.62. Цифровой индикатор

- Атрибут **POWER NODE**: <цифровой узел питания>
Пример: \$G_DPWR
- Атрибут **GROUND NODE**: <цифровой узел земли>
Пример: \$G_DGND

Цифровой индикатор светится заданным цветом (по умолчанию красным), когда цифровой сигнал на его входе равен «1», в противном случае он не светится. Компонент необходим, чтобы смоделировать индикаторный светодиод. Имеет только один вход. Цвет УГО цифрового индикатора зависит от состояния его цифрового входа. По умолчанию приняты следующие цвета: черный (при логическом «0» на входе), красный (при логической «1»), серый (при неопределенном логическом состоянии «X»). Цвета УГО цифрового индикаторного светодиода, определяются в закладке **Color/Font** диалогового окна **Properties (F10)**. В ней определен список цифровых состояний, которым ставятся в соответствие цвета индикатора.

5.7.10. Семисегментный индикатор (Animated Seven segment)

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример: U1
- Атрибут **I/O MODEL**: <имя интерфейсной модели>
Пример: IO_STD
- Атрибут **IO_LEVEL**: <индекс подсхемы интерфейса>
Пример: 1
- Атрибут **POWER NODE**: <цифровой узел питания>
Пример: \$G_DPWR
- Атрибут **GROUND NODE**: <цифровой узел земли>
Пример: \$G_DGND
- Атрибут **ON STATE**: <HIGH | LOW>
Пример: HIGH

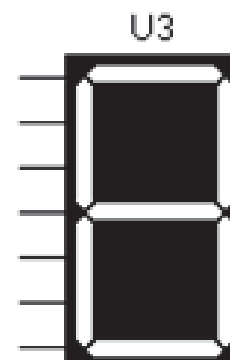


Рис. 5.63.
Семисегментный индикатор

Каждый сегмент индикатора светится, если логический сигнал на его управляющем входе равен уровню, определенному в поле атрибута **ON STATE**, в противном случае сегмент погашен. Атрибут **ON STATE** может быть задан как высоким уровнем (HIGH), так и низким (LOW)

Цифровые анимационные компоненты (ключ, одиночный индикатор, семисегментный индикатор) имеют цифровые модели. Цифровой светодиод и семисегментный индикатор не обладают диодными характеристиками. Они используются только для индикации цифровых состояний. Цифровой ключ представляет собой компонент, который может воздействовать на моделирование путем формирования постоянных логических уровней. Все вышеперечисленные компоненты должны иметь интерфейсную модель, соответствующую цифровым компонентам, с которыми они имеют электрические связи.

5.8. N-полюсники

Линейные многополюсники, заданные в виде частотно-зависимых матриц соответствующих параметров (S, Y, Z, G, H, T или ABCD) вызываются командой *Components>Analog Primitives>N-port...* T и ABCD параметры имеются только в версии Micro-Cap 9.

N-PORT

Формат схем MICRO-CAP 9:

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример: SP1
- Атрибут **FILE** <имя файла>
Пример:
E:\MC10\data\Gg10v20m.s2p

Атрибут **FILE** определяет имя и путь файла с параметрами N-полюсника.

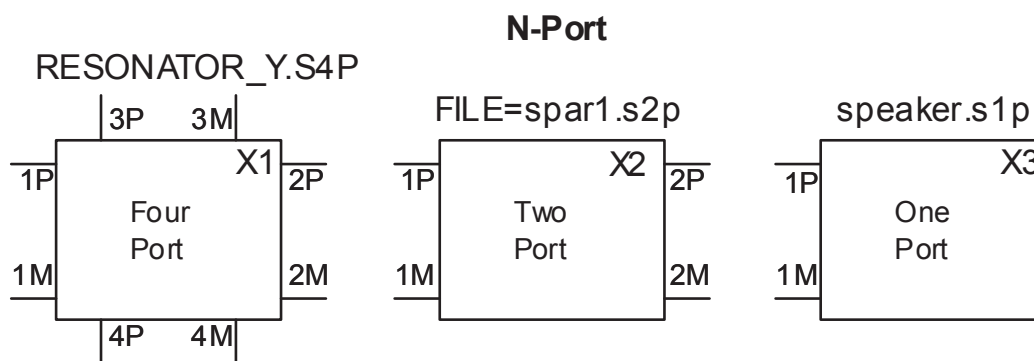


Рис. 5.64. N-полюсник

Компонент **N-полюсник** (или фактически 2N-полюсник) — обобщенная модель компонентов, описываемых S, Y, Z, G, H, T или A-параметрами, содержащимися в стандартном файле данных типа Touchstone.

Обычно эти файлы поставляются производителями компонентов в виде текстового файла с таблицами значений. Ниже приведен пример S-параметров типичного двухпортового компонента:

```
! SIEMENS Small Signal Semiconductors
! BFG194
! Si PNP RF Bipolar Junction Transistor in SOT223
! VCE = -10 V IC = -20 mA
! Common Emitter S-Parameters: August 1996
# GHz S MA R 50
! f      S11      S21      S12      S22
! GHz    MAG ANG  MAG ANG  MAG ANG  MAG ANG
0.010    0.3302 -25.4  35.370 169.9  0.0053 85.3  0.9077 -10.0
0.020    0.3471 -48.2  33.679 161.6  0.0108 77.5  0.8815 -19.8
0.050    0.4525 -95.0  27.726 139.2  0.0226 61.4  0.7258 -43.7
0.100    0.5462 -131.5  19.023 118.7  0.0332 52.2  0.5077 -68.7
0.150    0.5723 -149.4  13.754 106.4  0.0394 49.1  0.3795 -84.8
0.200    0.5925 -159.8  10.787 99.1  0.0443 50.1  0.3068 -95.0
0.250    0.6023 -167.0  8.757 93.4  0.0497 51.2  0.2581 -104.8
0.300    0.6089 -172.2  7.393 89.0  0.0552 52.4  0.2298 -112.2
```

Micro-Cap преобразует эти входные параметры в виде таблицы комплексных величин в Y-параметры и определяет многополюсный компонент как совокупность табличных Лапласовых источников. На рис. 5.65 для примера приведена эквивалентная схема 4-х портового устройства (восьмиполюсника).

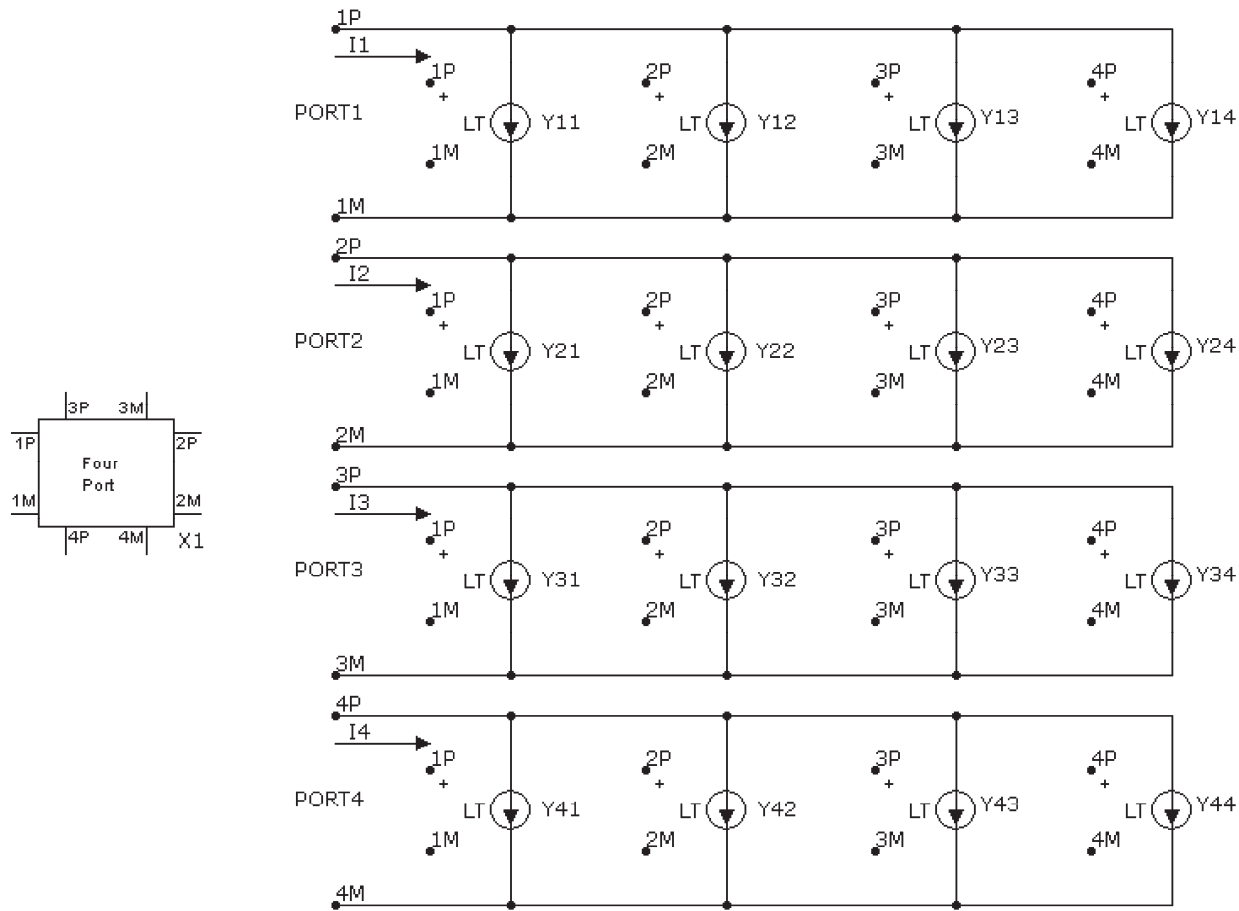


Рис. 5.65. Эквивалентная схема восьмиполюсника

Уравнения этой модели следующие:

$$I1 = Y11*V(1P,1M) + Y12*V(2P,2M) + Y13*V(3P,3M) + Y14*V(4P,4M)$$
$$I2 = Y21*V(1P,1M) + Y22*V(2P,2M) + Y23*V(3P,3M) + Y24*V(4P,4M)$$
$$I3 = Y31*V(1P,1M) + Y32*V(2P,2M) + Y33*V(3P,3M) + Y34*V(4P,4M)$$
$$I4 = Y41*V(1P,1M) + Y42*V(2P,2M) + Y43*V(3P,3M) + Y44*V(4P,4M)$$

Для иллюстрации примера использования N-полюсника см схемный файл *nport4.cir* и *audio3_N_S.cir* из каталога *Components\Nport* (book-mc.rar).

При необходимости табличный файл малосигнальных параметров соответствующего типа можно изготовить самостоятельно, используя текстовый редактор.

Таблица 5.20. Формат 1-ой строки файла TOUCHSTONE

	Единицы частоты	Тип параметров	Формат задания комплексных коэффициентов
#	Hz, mHz, UHz, NHz, kHz, MEGHz, GHz	S, Y, Z, H, G, T, A	MA — модуль амплитуды фаза в градусах RI — действительная часть мнимая часть DB — модуль амплитуды в дБ фаза в градусах

Примечание: S — Scattering, Y — Admittance (проводимость); Z — Impedance (сопротивление); H — Hybrid (гибридные параметры); G — Mixed (смешанные); T — Transmission; ABCD — Cascade

5.9. IBIS-компонент

Имеются модели IBIS для входов и выходов интегральных схем.

Формат схем Micro-Cap 9

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример:
X1
- Атрибут **NAME**: <имя подсхемы>
Пример:
LVC_33_4_MIN

Имеется 4 вида примитивов IBIS (табл. 5.21)

Таблица 5.21. Типы IBIS-компонентов

Тип	Назначение
IBIS_Input1	Для входов микросхем с внутренним источником питания
IBIS_Input3	Для входов микросхем с внешним источником питания
IBIS_Output3	Входные, выходные и разрешающие выводы микросхемы с внутренним источником питания
IBIS_Output5	Входные, выходные и разрешающие выводы микросхемы с внешним источником питания

При постановке IBIS-компонента в схему, Micro-CAP вызывает IBIS-транслятор. Это позволяет выбрать модель входа или выхода из исходного IBIS-файла. Затем Micro-Cap создает эквивалентную подсхему на языке SPICE для выбранного компонента и приглашает диалоговое окно атрибутов, в котором она показывается. Нажатием **OK** IBIS-модель помещается в текущую схему.

Все вышеописанное может быть выполнено вручную путем запуска транслятора IBIS в SPICE файл (IBIS to SPICE Translator), помещением сгенерированной SPICE-подсхемы в схему, и созданием IBIS-компонента посредством редактора компонентов (Component editor). Встроенные IBIS-компоненты и новые подпрограммные модули в Micro-Cap делают этот процесс более простым и удобным.

См. примеры схемных файлов *IBIS3.CIR* (каталог *DATA*) и *IBISParts.cir* (каталог *BOOK-MC\Components\Digital*) как образец использования этих компонентов.

5.10. Встроенные схемные макромодел и подсхемы

Список моделей аналоговых примитивов не ограничивается компонентами, перечисленными в 5.1–5.9. Кроме них в разделе компонентов *Component>Analog Primitives* существуют группы макромоделей **Macros** и **SMPS**. Группа **Macros** содержит макромодел общего назначения, а группа **SMPS** (Switch Mode Power Supplies) ориентирована на использование при моделировании импульсных источников вторичного электропитания. Краткая харак-

теристика этих макромоделей, некоторые из которых базируются на SPICE-подсхемах, приведена в табл. 5.22 и табл. 5.23.

Таблица 5.22. Схемные макромоделли раздела MACROS

Имя макро-модели	Краткое описание	Схемный файл каталога DATA (DATA_RUS)
ABS	Идеальный выпрямитель. Определяет абсолютную величину (модуль) входного напряжения.	System2
AM	Амплитудный модулятор с моделирующей функцией, зависящей от напряжения на входе: FS-несущая частота, VPEAK-амплитуда несущей синусоиды, MODINDEX-индекс модуляции, OFFSET-коэффициент передачи модулятора, TYPE-тип (синусная или косинусная)	Amtest1
AMP	Идеальный усилитель сигнала в виде напряжения с задаваемым коэффициентом передачи: GAIN-коэффициент передачи	A_buckboost
CENTAP	Идеальный трансформатор со средней точкой вторичной обмотки: L1-индуктивность первичной обмотки, L2-индуктивность первой вторичной полуобмотки, L3-индуктивность второй вторичной полуобмотки	Trans
CLIP	Усилитель с ограничением выходного напряжения: LOW-минимальный уровень выходного напряжения, HIGH-максимальный уровень выходного напряжения, GAIN-коэффициент передачи.	System2
Comparator	Компаратор с гистерезисом: VIL-нижний уровень переключения, VIH-верхний уровень переключения, VOL-высокий уровень выхода, VOH-низкий уровень выхода, ROUT-выходное сопротивление, SIGN-тип (инвертирующий, неинвертирующий)	Compdemo
Constant Power	Активная нагрузка с постоянной мощностью: POWER-мощность	Constant Power Load
DELAY	Линия задержки аналогового сигнала: DELAY-задержка в секундах	Delay3
DIAC	Диак (двунаправленный тиристор): RS-последовательное сопротивление, VK-напряжение включения	Diac2
DIF	Дифференциатор: SCALE-масштабный коэффициент	PID controller
DIGPOT	Цифровой потенциометр	DigPotTest
DIV	Делитель сигнала на одном входе на сигнал на другом входе: SCALE-масштабный множитель	—
F	Линейный блок с задаваемой передаточной функцией в S-области	System2
FSK	Частотный манипулятор: WMAG-амплитуда выходного напряжения, NC0-число периодов в нулевом бите, NC1-число периодов в единичном бите, TB-длительность одного бита в секундах	Fsk2
GYRATOR	Гиратор: G-коэффициент преобразования импедансов	GYRTEST
Ideal_Trans2	Идеальный двухобмоточный трансформатор: GAIN-коэффициент трансформации (W2/W1)	idealtrans

Продолжение табл. 5.22

Имя макро-модели	Краткое описание	Схемный файл каталога DATA (DATA_RUS)
Ideal_Trans3	Идеальный трехобмоточный трансформатор: RATIO12-коэффициент трансформации 1-ой вторичной обмотки ($W2/W1$), RATIO13-коэффициент трансформации 2-ой вторичной обмотки ($W3/W1$)	idealtrans
INT	Интегратор: SCALE-масштабный множитель, VINIT-начальное значение выходного напряжения	System1, System1A, System2, System5, PID controller, Lorenz Attractor
INT_RESET	Сбрасываемый интегратор: SCALE-масштабный множитель, VINIT-начальное значение выходного напряжения	inttest
Monostable	Ждущий мультивибратор (одновибратор): PWIDTH-ширина импульса высокого уровня, VLOW-низкий уровень, VHIGH-высокий уровень, THRESH-пороговый уровень напряжения	MONOSTABLE_TEST
MUL	Умножитель двух аналоговых сигналов в виде напряжения: SCALE-масштабный множитель	Modulator Lorenz Attractor
NOISE	Генератор шума: TS-период повторения шумового сигнала, VS-максимальное значение шума	FILTER1
Photodiode	Фотодиод в режиме фотопроводимости: RESPONSIVITY-чувствительность (А/Вт), IDARK-темновой ток, RSERIES-последовательное сопротивление, CJO-емкость рп-перехода, BV-напряжение пробоя перехода, N-коэффициент эмиссии	Photo2
Photodiode_r	Фотодиод в фотогальваническом режиме: RESPONSIVITY-чувствительность (А/Вт), RSHUNT-пошаговое изменение сопротивления диода вблизи нулевого смещения, RSERIES-последовательное сопротивление, CJO-емкость рп-перехода, BV-напряжение пробоя перехода, N-коэффициент эмиссии	Photo1
POT	Потенциометр: Potsize-суммарное сопротивление, Percent-процентное сопротивление верхнего плеча	Potdemo
PSK	Фазовый манипулятор: WMAG-амплитуда выходного сигнала, NC-число периодов в одном бите, TB-длительность бита в секундах	Psk2
PUT	Однопереходной транзистор: IH-ток удержания, IGT-ток базы переключения, TON-время включения, VTMIN-минимальное напряжение анод-катод во включенном состоянии, VDRM-максимальное повторное напряжение в выключенном состоянии, DVDT-критическая скорость нарастания напряжения, TQ-время выключения, K1-фактор ширины для DV/DT, K2-фактор ширины для TQ	THY1, THY2

Продолжение табл. 5.22

Имя макро-модели	Краткое описание	Схемный файл каталога DATA (DATA_RUS)
PWM_T, PWM_NT	Макромодели ШИМ-контроллеров для режима Current Mode UC1842–UC3845: VOFF-напряжение питания при котором регулятор выключается, VON-напряжение включения регулятора	UC1842_BOOST UC1843_BOOST UC1844_BOOST UC1845_BOOST
RELAY1	Электромагнитное реле: RCOIL-сопротивление катушки, LCOIL-индуктивность катушки, RON-сопротивление замкнутого выходного ключа, ROFF-сопротивление разомкнутого ключа, ION-ток замыкания ключа, IOFF-ток удержания замкнутого состояния ключа	Relay, relay1E
RELAY2	Модель реле сдребезгом контактов: RCOIL-сопротивление катушки реле, LCOIL-индуктивность катушки реле, RON-сопротивление замкнутого ключа, ROFF-сопротивление разомкнутого ключа	Relay
RESONANT	Резонансный RLC-контур: LIN-индуктивность, F0-центральная частота, Q0-добротность	RLCtest
SCHMITT	Триггер Шмитта: X1-нижний предел изменения входного напряжения, X2-верхний предел изменения входного напряжения, Y1-низкий уровень выхода, Y2-высокий уровень выхода, ROUT-выходное сопротивление, SIGN-выбор инвертирующего или неинвертирующего вариантов	OSC1
SCR	Тиристор: IH-ток удержания, IGT-ток включения, TON-время включения, VTMIN-минимальное напряжение анод-катод во включенном состоянии, VDRM-максимум повторного напряжения в состоянии выключено, DVDT-критическая скорость нарастания напряжения выключения, TQ-время выключения, K1-фактор ширины для DV/DT, K2-фактор ширины для TQ	THY1
SLIP	Усилитель с зоной нечувствительности в окрестности нуля: DX-ширина мертвой зоны, MAX-максимальное выходное напряжение	System2
SNUBBER	Демпферная диодная цепь: CSNUB-параллельная емкость, RSNUB-параллельное сопротивление.	rectifier_6_pulse rmstest2
SPARKGAP	Искровой разрядник: VTHRES- напряжение зажигания, VARC-напряжение на включенном разряднике, ISUS-ток гашения дуги, RNEG-отрицательное сопротивление дугового разряда, LPL-индуктивность выводов, RPL-поток рассеяния из-за индуктивности LPL, CPAR-емкость разрядного промежутка, CARC-емкость дугового разряда	spark
SUB	Вычитатель двух напряжений: КА-множитель канала А, KB-множитель канала В	System2 PID controller Lorenz Attractor
SUM	Сумматор двух напряжений: КА-множитель канала А, KB-множитель канала В	System2 Modulator Phase_Margin4

Окончание табл. 5.22

Имя макро-модели	Краткое описание	Схемный файл каталога DATA (DATA_RUS)
SUM3	Сумматор трех напряжений: КА-множитель канала А, KB-множитель канала В, KC-множитель канала С	System1 PID controller
TRIAC	Триак: IH-ток удержания, IGT-ток включения, TON-время включения, VTMIN-минимальное напряжение анод-катод во включенном состоянии, VDRM-максимальное повторное напряжение в состоянии выключено, DVDТ-критическая скорость нарастания анодного напряжения в выключенном состоянии, TQ-время выключения, K1-фактор ширины для эффекта DV/DT, K2-фактор ширины для TQ	THY1
TRIGGER6	Управляемый тиристор	rectifier_45 Rectifier_ Controlled_0-180
TRIODE	Вакуумный триод: К-постоянная лампы k, MU-постоянная лампы μ i, CGP-емкость сетка-анод, CGC-емкость сетка-катод, CPC-емкость анод-катод	F4
VCO	Генератор, управляемый напряжением (частотный модулятор): VP-максимальная амплитуда выходного сигнала, F0-центральная частота, KF-коэффициент передачи по частоте в Hz/Volt	F1
WIDEBAND	Широкополосная малосигнальная модель трансформатора: RS-последовательное сопротивление первичной обмотки, N-коэффициент трансформации, FL-нижняя частота среза, FH-верхняя частота среза	BROAD2
XTAL	Кварцевый резонатор: F0-центральная частота, R-сопротивление, Q-добротность	XTAL1
555	Таймер 555 (KP1006BI1):	555mono 555ASTAB

Таблица 5.23. Макромодели раздела SMPS

Имя макро-модели	Краткое описание	Схемный файл каталога DATA (DATA_RUS)
Обобщенные ШИМ-контроллеры		
<i>Для ШИМ-регулирования с местной обратной связью по току (Current Mode CM)</i>		
2SWITCHCM	Для сдвоенного однотактного конвертера (косого полумоста)	S_2FLY_CM S_2FOR_CM
FULL_CM	Для мостового двухтактного конвертера	S_FULL_CM
HALF_CM	Для полумостового двухтактного конвертера	S_HALF_CM
PUSH_CM	Для двухтактного со средней точкой (пушпульного) конвертера	S_FULL_XFMR S_HALF_XFMR S_PUSH_CM

Продолжение табл. 5.23

Имя макро-модели	Краткое описание	Схемный файл каталога DATA (DATA_RUS)
PWMCM, PWMCM2	Для одноконтных одноконтчевых конвертеров	S_BOOST_CM S_BUCK_CM S_BUCK_SYN2 S_buckboost_cm S_Forward_CM Constant Power Load
<i>Для простого ШИМ-регулирования (Voltage Mode VM)</i>		
FULL_VM	Для мостового двухтактного конвертера	S_FULL_VM
HALF_VM	Для полумостового двухтактного конвертера	S_HALF_VM
PUSH_VM	Для двухтактного со средней точкой (пушпульного) конвертера	S_PUSH_VM
PWMVM PWMVM2	Для одноконтных одноконтчевых конвертеров	S_BOOST_VM S_BUCK_SYN S_BUCK_VM S_Buckboost_vm S_Flyback_CM S_FLYBACK_VM S_Forward_VM
NCP1200	Модель ШИМ-контроллера NCP1200 фирмы Motorola	S_ncp
TL494	Модель ШИМ-контроллера TL 494 (Амелины)	TL494_Test_1 TL494_Test_2 TL494_Test_3
UC1846 *	Модель ШИМ-контроллера UC1846	Forward using UC1846
<i>Формирователи мертвого времени для конвертеров с синхронным выпрямлением</i>		
DEADDRV	Для синхронного выпрямления с NMOS-транзистором в нижнем плече, и с PMOS-транзистором в верхнем плече. Для использования совместно с ШИМ-контроллерами UC384X	—
DEADSYNC	Для синхронного выпрямления с NMOS-транзистором в нижнем плече, и с PMOS-транзистором в верхнем плече	S_BUCK_SYN S_BUCK_SYN2
DEADTIME	Для полумостового конвертера с синхронным выпрямлением: в верхнем плече NMOS-транзистор с «плавающим затвором», в нижнем также NMOS.	—
<i>Вспомогательные элементы для построения имитационных моделей импульсных стабилизаторов напряжения</i>		
MOC8101	Диодно-транзисторная оптопара MOC8101 (используется для организации обратной связи в импульсных стабилизаторах)	A_FLYBACK A_ncp A_RESO_OL S_ncp
Opto	Обобщенная модель диодно-транзисторной оптопары	—

Продолжение табл. 5.23

Имя макро-модели	Краткое описание	Схемный файл каталога DATA (DATA_RUS)
TFFLOP	Статический RS-триггер	—
TL431	Модель микросхемы параллельного стабилизатора TL431, часто используемого в SMPS в качестве усилителя рассогласования и коррекции цепи обратной связи (совместно с диодно-транзисторной оптопарой)	A_FLYBACK A_RESO_OL
XFMR1	Идеальный двухобмоточный трансформатор	S_2FLY_CM... S_Forward_CM Схемы, начинающиеся с S_
XFMR2	Идеальный трехобмоточный трансформатор	S_Flyback_CM S_Flyback_VM
XFMR-TAP	Идеальный трехобмоточный трансформатор (вторичная обмотка имеет отвод от средней точки)	S_PUSH_CM S_PUSH_VM
COMP2	Компаратор напряжения	—
INV	Логический инвертор	S_BUCK_SYN S_BUCK_SYN2
TOGGLE	Синхронный динамический D-триггер тактируемый фронтом (6-элементный триггер)	—
Непрерывные усредненные модели конвертеров для большого и малого сигналов (нелинеаризованные и линеаризованные)		
<i>Непрерывные усредненные модели конвертеров Сэма Бен-Якова</i>		
Для режима Current Mode (CM)		
BOOSTCM	Повышающего регулятора (Boost)	—
BUCKCM	Понижающего регулятора (Buck)	—
FLYBACKCM	Инвертирующего регулятора (BuckBoost) и обратногоходового конвертера (Flyback)	—
ForwardCM	Прямоходового конвертера (Forward)	—
SEPICCM	Конвертера SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter)	—
Для режима Voltage Mode (VM)		
BOOSTVM	Повышающего регулятора (Boost)	A_BOOST_VM
BUCKVM	Понижающего регулятора (Buck)	A_FORWARD A_BUCK_VM
Для режима Voltage Mode (VM)		
FLYBACKVM	Инвертирующего регулятора (BuckBoost) и обратногоходового конвертера (Flyback)	A_FLYBACK
ForwardVM	Прямоходового конвертера (Forward)	—
SEPICVM	Конвертера SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter)	A_SEPIC
SERIPA SERPA	Резонансного последовательно-параллельного конвертера	A_RESO_DC A_RESO_OL

Продолжение табл. 5.23

Имя макро-модели	Краткое описание	Схемный файл каталога DATA (DATA_RUS)
<i>Непрерывные малосигнальные модели конвертеров Раймонда Ридли</i>		
PWMCCM	Малосигнальная модель двухключевой ШИМ-структуры в режиме непрерывных токов (CCM)	—
PWMDCM	Малосигнальная модель двухключевой ШИМ-структуры в режиме разрывных токов (DCM)	—
BOOSTCCM	Малосигнальная модель повышающего регулятора (boost) в режиме непрерывных токов для CM и VM	A_Boost_CM_OL A_boost_cm_zout
BOOSTDCM	Малосигнальная модель повышающего регулятора (boost) в режиме разрывных токов для CM и VM	—
BUCKCCM	Малосигнальная модель понижающего регулятора (buck) в режиме непрерывных токов для CM и VM	A_BUCK_CM
BUCKDCM	Малосигнальная модель понижающего регулятора (buck) в режиме разрывных токов для CM и VM	—
FlybackCCM	Малосигнальная модель инвертирующего регулятора или обратноходового преобразователя в режиме непрерывных токов для CM и VM	A_BUCKBOOST
FlybackDCM	Малосигнальная модель инвертирующего регулятора или обратноходового преобразователя в режиме разрывных токов для CM и VM	—
FWDCCM	Малосигнальная модель прямоходового преобразователя (forward) в режиме непрерывных токов для CM и VM	—
FWDDCM	Малосигнальная модель прямоходового преобразователя (forward) в режиме разрывных токов для CM и VM	—
<i>Непрерывные модели ключевых ШИМ-структур Эриксона-Максимовича (CoPEC, [7])</i>		
CCM-DCM1 *	Непрерывная модель двухключевой структуры с ШИМ для режима непрерывных и прерывистых токов дросселя, предназначенная для анализа конвертеров без трансформаторной развязки в режиме VM.	Boost VM Buck CPM Buck VM Buck-Boost VM Non-Isolated CUK Sepic VM
CCM-DCM2 *	Непрерывная модель двухключевой структуры с ШИМ для режима непрерывных и прерывистых токов дросселя, предназначенная для анализа конвертеров с трансформаторной развязкой в режиме VM.	Flyback VM Isolated CUK VM (каталог CoPEC SMPS)
CPM *	Непрерывная модель ШИМ-контроллера с программированием тока	Buck CPM

Окончание табл. 5.23

Имя макро-модели	Краткое описание	Схемный файл каталога DATA (DATA_RUS)
<i>Непрерывные модели ключевых ШИМ-структур В. Ворпериана [10]</i>		
PWMVM_Avg *	Непрерывная модель двухключевой структуры с ШИМ для режима непрерывных и прерывистых токов дросселя, предназначенная для анализа конвертеров в режиме VM.	Схемы каталогов PWM Switch FeedBack Loops Small Signal SMPS
PWMCM_Avg *	Непрерывная модель двухключевой структуры с ШИМ для режима непрерывных и прерывистых токов дросселя, предназначенная для анализа конвертеров в режиме CM.	Схемы каталогов PWM Switch FeedBack Loops Small Signal SMPS
PWMCMX *	Непрерывная модель двухключевой структуры с ШИМ для режима непрерывных и прерывистых токов дросселя, предназначенная для анализа конвертеров в режиме CM.	Buck CM k factor tran
<i>Линейные модели компонентов для моделирования частотных характеристик SMPS</i>		
308PWMX7 608PWM	Линейная модель ШИМ-контроллера MC44608	A_FLYBACK
NCP1200_AV	Линейная модель ШИМ-контроллера NCP1200	A_ncp.cir
AMPSIMP	Обобщенный усилитель ошибки	A_FORWARD
ERRAMP	Обобщенный усилитель ошибки	A_BOOST_VM A_BUCK_VM
* Схемные файлы, использующие отмеченные макромоделли, введены начиная с подверсии Micro-Cap 9.0.5 и находятся в отдельных подкаталогах каталога DATA.		

Следует отметить, что начиная с подверсии Micro-Cap 9.0.5 [3] библиотеки для моделирования SMPS значительно расширены. Ввиду появления большого числа макромоделей для моделирования импульсных источников питания как во временной, так и в частотной области, даже краткое их рассмотрение выходит за рамки данной книги. Планируется, что подробному описанию моделирования импульсных источников питания и использующихся при этом моделей, макромоделей и подсхем будет посвящена следующая публикация авторов.

6. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

После того, как нарисована принципиальная схема, можно перейти к расчету ее характеристик. Micro-Cap позволяет выполнить следующие виды анализа электронных схем (меню **Analysis**):

Transient (Alt+1) — расчет переходных процессов;

AC (Alt+2) — расчет частотных характеристик;

DC (Alt+3) — расчет передаточных функций по постоянному току (при вариации постоянной составляющей одного или двух источников сигналов, вариации температуры или параметров моделей компонентов);

Dynamic DC (Alt+4) — расчет режима по постоянному току и динамическое отображение на схеме узловых потенциалов, токов ветвей и рассеиваемой мощности;

Dynamic AC (Alt+5) — расчет малосигнальных характеристик при заданных списком значениях частот и их динамическое отображение на узлах схемы при изменении значений компонентов;

Sensitivity (Alt+6) — расчет чувствительностей режима по постоянному току.

Transfer Function (Alt+7) — расчет малосигнальных передаточных функций в режиме по постоянному току;

Distortion в MC9 и **Harmonic Distortion** в MC10 (**Alt+8**) — расчет нелинейных искажений усилительных схем с использованием математического аппарата спектрального Фурье-анализа.

INTERMODULATION DISTORTION (Alt+9) в MC10 — расчет интермодуляционных искажений усилительных схем по одной из 3-х встроенных методик по выбору: SMPTE, CCIF, DIN.

6.1. Анализ переходных процессов

Вызывается командой **Analysis>Transient** или **Alt+1**

6.1.1. Краткие теоретические сведения

Анализ переходных процессов позволяет рассмотреть поведение схем во временной области. Он позволяет ответить на вопрос, что произойдет, если к собранной схеме подключить источники питания и источники сигналов. Полученные диаграммы позволяют просматривать процессы в моделируемой схеме так же, как это в реальности делается при помощи осциллографа или логического анализатора. При проведении анализа предполагается, что схема в общем случае нелинейна, хотя возможно рассчитывать и частный случай — поведение линейных схем во временной области.

При анализе переходных процессов следует помнить, что процесс вычислений начинается с составления программой системы нелинейных дифференциальных уравнений относительно переменных состояния схемы, зависящих от времени. Затем решение этой системы выполняется в 3 стадии:

- Присвоение начальных значений переменным состояния
- Возможный (но необязательный) расчет режима по постоянному току
- Собственно расчет переходных процессов (Transient analysis)

Начальные значения переменных состояния могут быть нулевыми, взятыми из предыдущего расчета, либо из файла (где сохранены предваритель-

но). Процесс присвоения начальных значений переменным состояниям будет рассмотрен ниже. Напомним только, что переменные состояния схемы — это узловые напряжения, токи в индуктивных компонентах и состояния цифровых узлов.

Цель расчета режима по постоянному току — установить начальные значения переменных состояний для нулевого момента времени. Расчет выполняется при формальном удалении из схемы всех конденсаторов и закорачивании катушек индуктивности. Используя нелинейные модели компонентов, программа линеаризует схему в окрестности последних значений переменных состояний. Линеаризация означает замену нелинейных моделей совокупностью констант, которые выражают линейные связи между токами и напряжениями приборов. Эти константы обычно получаются путем дифференцирования управляемых переменных по управляющим переменным. Такая модель существует только в течение интервала времени одной итерации. Таким образом, вычисляются приращения токов и напряжений в схеме. Эти приращения добавляются к значениям переменных до начала итерации и производится проверка установления процесса или сходимости (по относительному изменению переменных состояний). Если сходимость не достигнута, строится новая линейная система для новых значений переменных состояний и повторяется ее решение относительно приращений. Когда переменные состояния сошлись к некоторым значениям, процесс расчета рабочей точки считается завершенным и программа начинает собственно анализ переходных процессов, используя полученные данные в качестве начальных значений переменным состояниям.

Расчет переходных процессов

Основной анализ начинается со значений переменных состояний в рабочей точке по постоянному току (если проводился расчет по постоянному току) или начальных значений, заданных тем или иным способом, если такого расчета не производилось. Используя нелинейные модели составляющих схему компонентов, программа линеаризует их для последних значений переменных состояний. Далее производится решение системы линейных уравнений для определения приращения переменных состояний на текущем шаге. Эти линейные приращения добавляются к исходным значениям напряжений и токов схемы и производится проверка на сходимость. Когда переменные состояния стабилизируются, сходимость в данной точке расчета считается достигнутой и для полученных данных производится оценка погрешности расчета *local truncation error* (LTE). Если эта ошибка приемлема, то расчет для данного момента времени считается завершенным и рассчитанные данные добавляются на график. Затем время инкрементируется и процесс решения повторяется для следующего момента времени. Если локальная ошибка округления имеет неприемлемое значение, рассчитанные данные отбрасываются, шаг по времени уменьшается и рассчитываются новые значения переменных состояний. Описанный процесс продолжается, пока время не достигнет значения $T_{\max}$.

Суммируя сказанное, основная последовательность шагов, выполняемая в процессе анализа переходных процессов следующая:

1. Присвоение начальных значений переменным состояниям схемы.
2. Необязательный расчет режима по постоянному току.
3. Установка следующих значений $T_{\text{last}} = \text{Time} = t_{\min}$ и $DT = \text{maximum time step}$.

4. Решение системы для всех приращений переменных состояния для нового момента времени $\text{Time} + \text{DT}$.
5. Если процесс решения сошелся перейти к шагу 6, в противном случае идти к шагу 4.
6. Если ошибка расчета (LTE) переменных состояния на данном шаге имеет приемлемое значение идти к шагу 8.
7. Отбросить полученные значения переменных состояния и уменьшить шаг $\text{DT} = \text{DT}/2$, установить $\text{Time} = \text{Tlast}$, и перейти к шагу 4.
8. Установить $\text{Time} = \text{Time} + \text{DT}$, $\text{Tlast} = \text{Time}$. Вывести на график или в таблицу численного вывода значения интересующих переменных для текущего момента Time .
9. Если $\text{Time} = \text{tmax}$, завершить процесс.
10. $\text{DT} = \text{maximum time step}$.
11. Идти к шагу 4.

6.1.2. Задание параметров моделирования **Transient Analysis Limits**

При запуске анализа переходных процессов из режима построения схемы или после иных видов анализа командой **Analysis>Transient** программа проверяет правильность составления схемы. При наличии ошибок выводится информационное сообщение. При отсутствии ошибок в схеме программа составляет ее топологическое описание, выполняет подготовку к численному расчету переходных процессов и открывает окно задания параметров моделирования **Transient Analysis Limits** (рис. 6.1, а). В последующем это окно можно вызывать командой **Transient>Limits**, клавишей **F9** или пиктограммой .

В окне задания параметров расчета переходных процессов (рис. 6.1, а), имеются следующие разделы.

Команды окна *Transient Analysis Limits*

Run — запуск расчета (щелчок на пиктограмме  в строке инструментов или нажатие **F2** также запускает процесс выполнения моделирования). Расчет может быть остановлен в любой момент нажатием на пиктограмму  или клавишу **Esc**. Последовательные нажатия на пиктограмму  прерывают и затем продолжают моделирование.

Add — добавление еще одной строки задания вывода результатов на графики. Добавляется после строки, отмеченной курсором. В этой строке устанавливается способ отображения результатов и аналитические выражения для построения графиков. При наличии большого количества строк, не уместящихся на экране, появляется линейка прокрутки.

Delete — удаление строки задания вывода результатов, отмеченной курсором.

Expand — открытие дополнительного окна для ввода текста большого размера при расположении курсора в одной из граф, содержащих выражения, например *Y Expression*.

PSS — открытие окна установки параметров нахождения стационарного режима. Подробности см. в разделе 7.5 (только в MC10).

Stepping — открытие диалогового окна задания вариации параметров.

Properties — открытие одноименного диалогового окна (также открывается по F10 или после двойного клика в окне графиков). Окно имеет 8 закладок (рис. 6.1, в):

- *Plot* — управление выводом графиков на экран и графическими окнами;
- *Scales and Formats* — выбор масштабов по осям координат, форматов чисел;
- *Colors, Fonts and Lines* — выбор цвета объектов, параметров шрифта и типа линий;
- *Scope* — управление отображением координатной сетки, курсора, расчетных точек и меток графиков;
- *FFT* — задание параметров быстрого преобразования Фурье для спектрального анализа;
- *Header* — нанесение заголовков в файл выходных числовых данных;
- *Numeric Output* — данные, включаемые в текстовый файл-протокол анализа <имя схемы>.tno;
- *Save Curves* — выбор одной или нескольких переменных для сохранения в пользовательских файлах *.usr или *.csv (рис. 6.1, в);
- *Tool Bar* — нанесение пиктограмм команд на панель инструментов.

Help — вызов раздела *Transient Analysis Limits* системы помощи.

Числовые параметры окна *Transient Analysis Limits*

Time Range — конечное и начальное время расчета переходных процессов (по формату Tmax[,Tmin]). По умолчанию назначается Tmin=0 (отрицательные значения моментов времени недопустимы).

Например, спецификация "1.2ms,0.4ms" задает интервал моделирования от 0,4 до 1,2 мс. В большинстве случаев Tmin не задается.

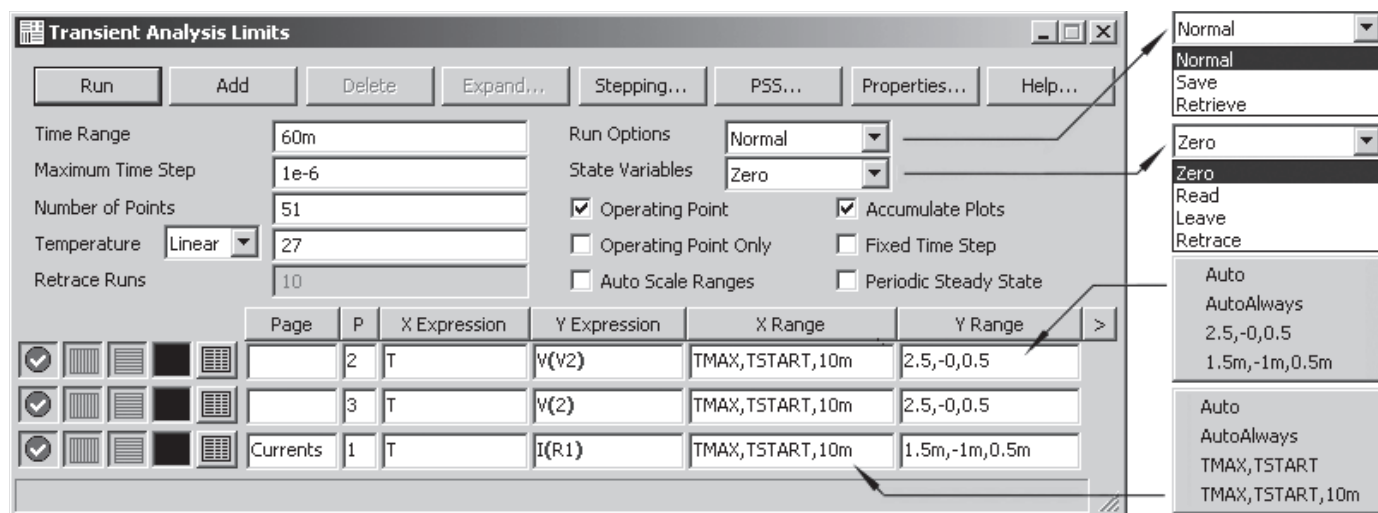
В версии MC10 изменена интерпретация диапазона анализа **Time Range** с TMAX, TMIN на TMAX, TSTART. Анализ всегда начинается с нулевого момента времени T=0, но точки данных до момента времени TSTART не выводятся на график.

Maximum Time Step — максимальный шаг расчета. Расчет переходных процессов ведется с переменным шагом, величина которого определяется автоматически исходя из допустимой относительной ошибки RELTOL и коэффициента для LTE — TRTOL. Максимальная величина шага расчета равна заданному значению. Если этот шаг не задан (или задан равным нулю), то максимальный шаг расчета полагается равным (Tmax–Tmin)/50. Задание малой (ненулевой) величины этого параметра может существенно увеличить время расчета, но зато графики получатся более гладкими (точными).

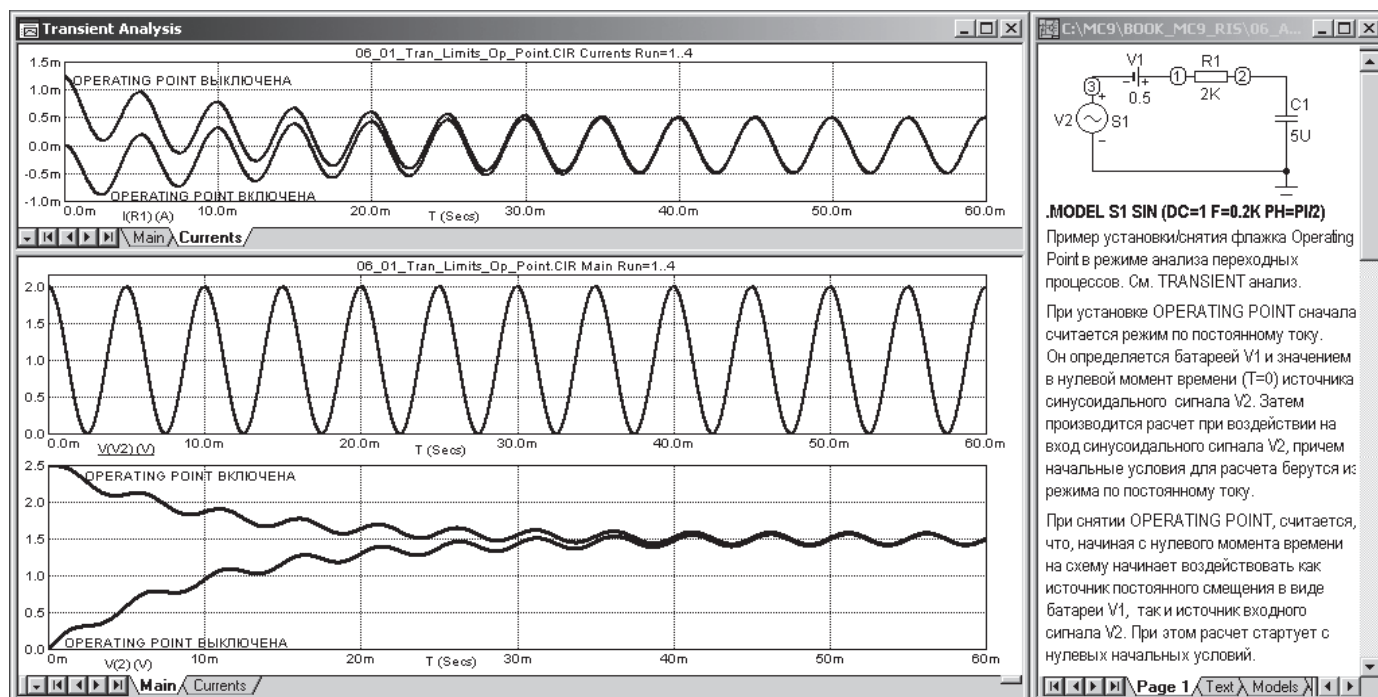
Number of Points — число точек, выводимых в таблицы, т. е. число строк в таблице вывода результатов, по умолчанию принимается равным 51. Если заданные моменты времени не совпадают со значениями, при которых проводился численный расчет, то производится интерполяция. Если задано нулевое значение, то численный вывод производится для минимального количества точек, равного 5. Интервал вывода данных определяется формулой:

$$(Tmax - Tmin) / (<Number of Points> - 1).$$

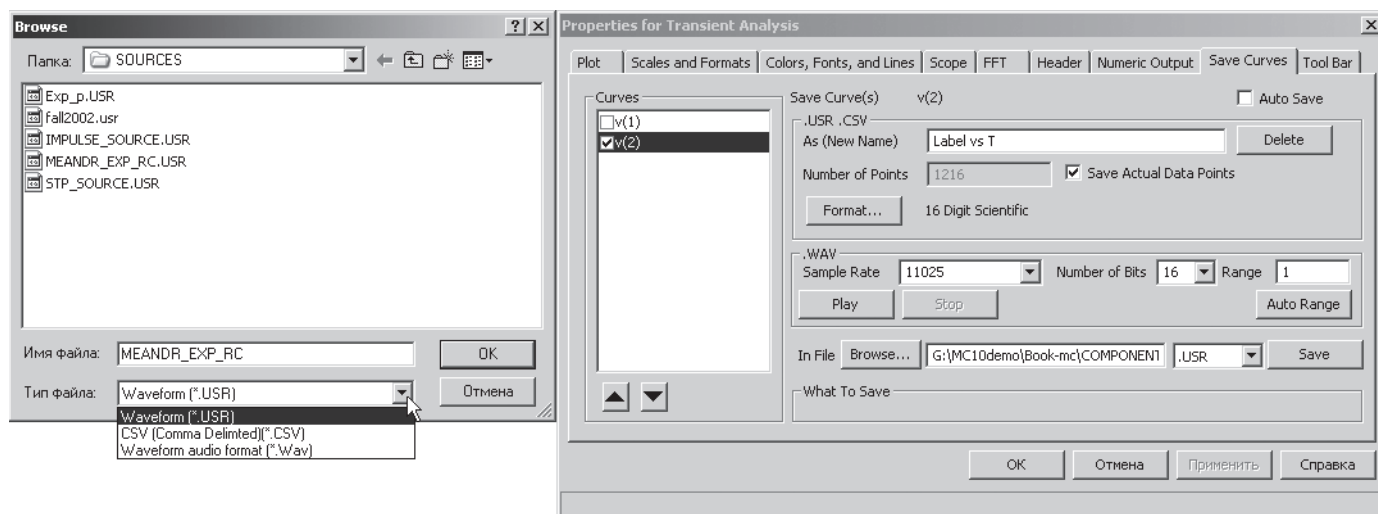
Эта опция доступна, если нажатием на одну из пиктограмм  выбран вывод переменных в текстовый выходной файл (Numeric Output).



a



б



в

Рис. 6.1. Задание параметров расчета переходных процессов

Temperature — диапазон изменения температуры в градусах Цельсия; при выборе параметра **Linear** имеет формат High[,Low[,Step]]; если параметр

Step (шаг) опущен, то выполняется анализ при двух значениях температуры Low (минимальной) и High (максимальной), если опущены оба параметра Low и Step, то расчет проводится при единственной температуре, равной High; при выборе параметра **List** указывается список температур, разделяемых запятыми. При изменении температуры изменяются параметры компонентов, имеющие ненулевые температурные коэффициенты ТС, а также ряд параметров полупроводниковых приборов. Значение установленной здесь температуры может использоваться в различных выражениях, она обозначается как переменная TEMP.

Retrace Runs — определяет число запусков *Transient* анализа, которое будет выполнено, если выбрана установка **Retrace** в списке **State Variables**. При первом запуске используется нормальная инициализация и если требуется, рассчитывается рабочая точка по постоянному току. При последующих запусках (по **F2** или если **Retrace Runs** установлено больше 1) в качестве начальных значений для переменных состояния берутся значения, достигнутые в конце предыдущего запуска.

Способ вывода результатов моделирования

Ниже раздела «Числовые параметры» и слева от раздела «Выражения» расположена группа пиктограмм. Они влияют на отображение результатов расчета. Имеются следующие возможности:



Save and Plot — сохранить расчетные точки графика и построить его в графическом окне.



Save and Don't Plot — сохранить расчетные точки графика и не рисовать его в графическом окне.



Don't Save or Plot — не сохранять расчетные точки графика и не рисовать его в графическом окне.

Указанные 3 варианта вывода и сохранения действуют только в версии MC10.



X Log/Linear Scale — переключение между логарифмической и линейной шкалой по оси X. При выборе логарифмической шкалы диапазон изменения переменной должен быть положительным.



Y Log/Linear Scale — переключение между логарифмической и линейной шкалой по оси Y. При выборе логарифмической шкалы диапазон изменения переменной должен быть положительным.



Color — вызов меню для выбора одного из 64 цветов для окрашивания графиков. График окрашивается в цвет кнопки.



Numeric Output — при нажатии этой кнопки в текстовый выходной файл заносится таблица отсчетов функции, заданной в графе *Y Expression*. Запись производится в файл <имя схемы>.tno. Таблица просматривается в

окне *Numeric Output* (открывается нажатием клавиши **F5** или кнопки ). Количество отсчетов функции (число строк в таблице) задается параметром *Number of Points* в разделе **Числовые параметры**.

Plot Page — в графе указываются имена страниц графических окон, что позволяет группировать графики и увеличивать общее число графических окон свыше 9. Так в примере рис. 6.1 используется дополнительная графическая страница с именем “Currents”. В ней выводится график тока в цепи. Одновременный вывод графиков из различных графических страниц осуществляется командой *Windows>Split Horizontal (Vertical)* или путем манипуляций с разделителями окон (см. рис. 3.1).

Plot Group — в графе **P** числом от 1 до 9 указывается номер графического окна, в котором должна быть построена данная функция. Все функции, помеченные одним и тем же номером, выводятся в одном окне. Если это поле пусто, график функции не строится.

Выражения окна *Transient Analysis Limits*

X Expression — имя переменной или математическое выражение, откладываемое по оси X. Обычно при анализе переходных процессов по этой оси откладывается время (переменная T). Но при расчете спектра сигнала с помощью преобразования Фурье (FFT) по оси X откладывается частота — переменная F, (рис. 6.2), а при расчете петли гистерезиса ферромагнетика — напряженность магнитного поля, например HSI(L4) (рис. 6.3).

Значения полей графы **X Expression** можно не только задавать, но и выбирать (полностью или фрагментарно) из окна меню *Variables List*, открывающегося после щелчка правой кнопки мыши по любому из полей.

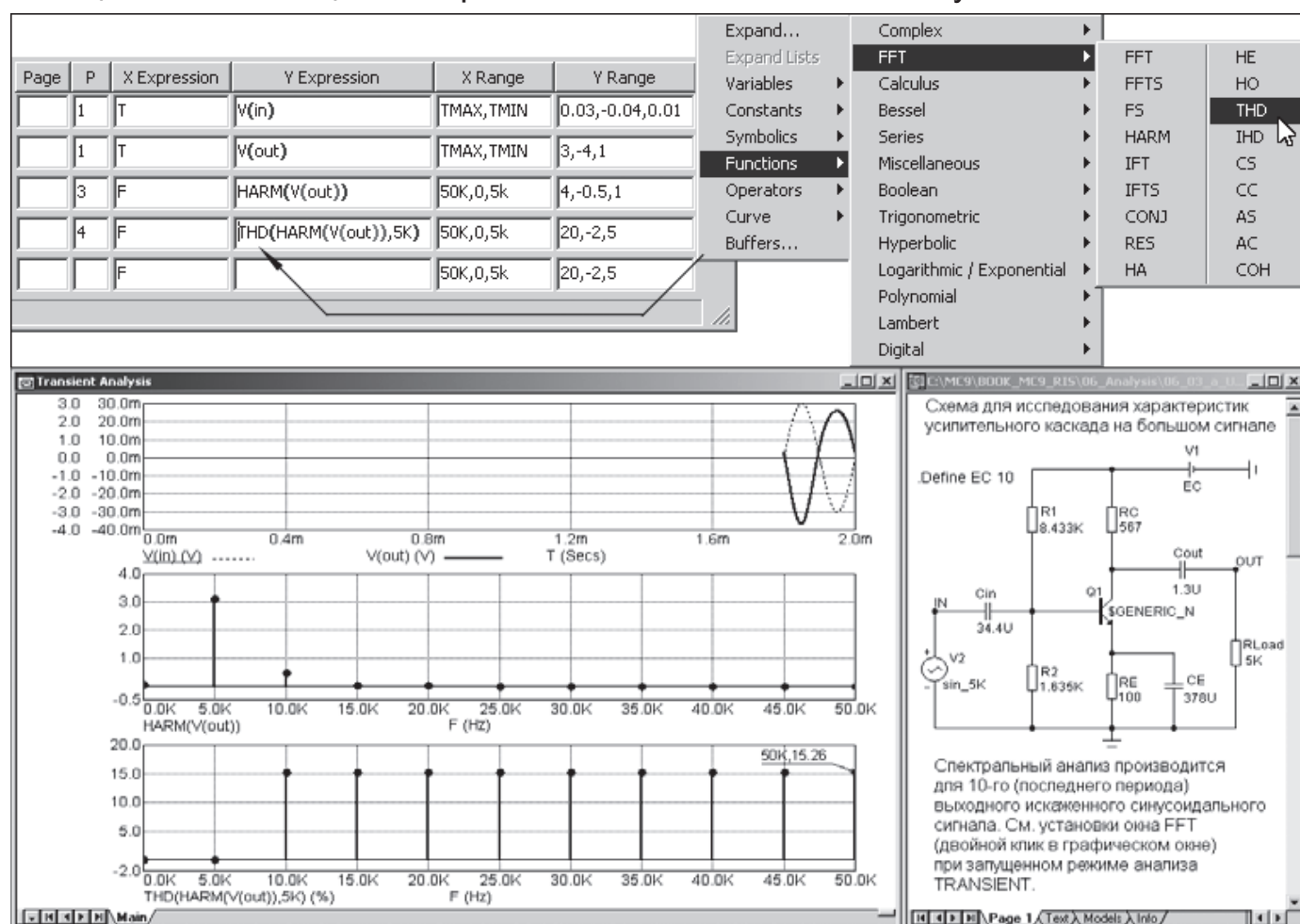


Рис. 6.2. Пример спектрального анализа в режиме переходных процессов

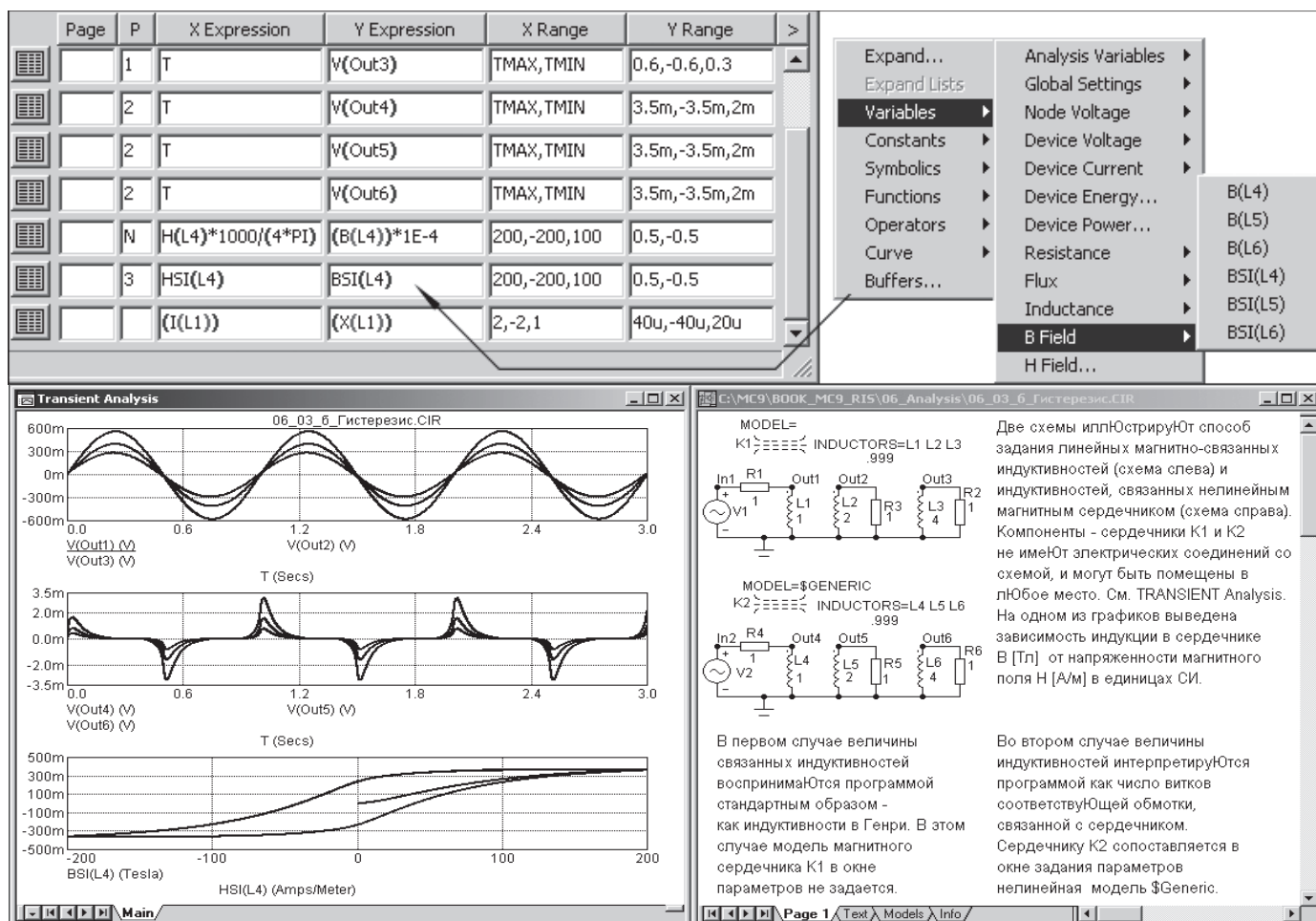


Рис. 6.3. Пример вывода кривой B(H) сердечника в режиме переходных процессов

Y Expression — математическое выражение для переменной, откладываемой по оси Y. Это может быть простая переменная, например, напряжение в узле V(5), падение напряжения на двухполюсном компоненте V(L1), ток ветви I(2,3), I(L1) или математическое выражение, например $V(VCC) \cdot I(VCC)$.

Значение поля *Y Expression* также можно не только задавать вручную, но и выбирать (полностью или фрагментарно) в меню *Variables List*, открывающегося после щелчка правой кнопки мыши по любому из полей графы *Y Expression*.

На рис. 6.2 и 6.3 приведены примеры этого всплывающего меню, позволяющего выбрать из предлагаемых списков переменные, константы, функции, операторы, кривые из буфера графиков, размещаемые в этих графах или расширить поле для ввода длинной формулы (*Expand*).

В графе *Y Expression* можно также использовать шаблон для вывода множества однотипных выражений, например: V([@]) — графики напряжений на всех компонентах схемы (подробнее см. раздел 4.4).

X Range — задает максимальное и минимальное значение переменной X на графике, а также расстояние между линиями координатной сетки. Если минимальное значение не указано, то оно считается равным нулю.

Y Range — задает максимальное и минимальное значение переменной Y на графике, а также расстояние между линиями координатной сетки. Если минимальное значение не указано, то оно считается равным нулю.

Полный формат указания масштабов **X Range** и **Y Range** следующий:
`<high> [, <low>] [, <grid spacing>] [, <bold grid spacing>]`

<high> — максимальное значение переменной (обязательный параметр).

<low> — минимальное значение переменной (необязательный параметр).

По умолчанию устанавливается в нулевое значение.

[,<grid spacing>] — устанавливает расстояние между линиями координатной сетки (необязательный параметр).

[,<bld grid spacing>] — устанавливает расстояние между утолщенными линиями координатной сетки (необязательный параметр).

Два последних параметра используются только на линейных шкалах. Логарифмическая шкала по умолчанию использует расстояние между линиями дополнительной сетки, равное 1/9 расстояния между линиями основной.

Кроме числовых значений в поле *X range* можно установить *Auto*, *AutoAlways* или *TMAX,TMIN*, а в поле *Y range* можно установить *Auto* или *AutoAlways*. Эти значения выбираются из дополнительного меню, вызываемого нажатием правой клавишей мыши в каждом из полей или левой клавишей мыши в заголовке колонки полей. В последнем случае выбранное значение устанавливается сразу во всех полях соответствующей колонки.

Установка **Auto** в позиции *X range* (*Y range*) приводит к автоматическому масштабированию по соответствующей оси. В этом случае сначала выполняется моделирование, в процессе которого графики строятся в стандартном масштабе, а затем эти графики автоматически перестраиваются. Полученные значения масштаба заносятся программой в соответствующие поля *X range* (*Y range*) и при последующих расчетах автоматического обновления больше не происходит.

Установка **AutoAlways** в позиции *X range* (*Y range*) приводит к автоматическому масштабированию по соответствующей оси каждый раз при повторении расчета. Аналогичный результат дает установка флага *Auto Scale Ranges* в окне *Transient Analysis Limits*. В этом случае поля *X range* и *Y range* можно вообще не заполнять — это сделает программа. Установка этого флага приводит к автоматическому расчету масштабов всех графиков по всем осям и соответствующему обновлению полей *X Range* и *Y Range* при каждом повторении расчета.

Установка **TMAX,TMIN** использует в качестве значения поля *X range* параметры, установленные ранее в поле **Time Range**.

В версии MC10 в соответствии с изменением интерпретации поля **Time Range** изменен и встроенный масштаб **TMAX, TMIN** по оси абсцисс на **TMAX, TSTART**. Анализ всегда начинается с нулевого момента времени $T=0$, но точки данных до момента времени *TSTART* не выводятся на график.

Подогнать масштаб полученных графиков можно не только до их построения, но и после. Для этого используется команда *Scope>Auto Scale* (или

F6, ). Она приводит к автомасштабированию всех построенных графиков без изменения параметров масштаба в окне выражений. Команда **Ctrl+Home** восстанавливает масштаб графиков, указанный в окне выражений. Команда *Scope>Auto Scale* использует количество делений координатной сетки, указанное в окне *Properties (F10)* по следующему адресу *Scales and Formats>Auto/Static Grids*.

Следует обратить внимание, что есть возможность автоматической постановки параметров сразу во всех полях граф *X Expression*, *Y Expression*,

X Range и *Y Range*. Для этого необходимые установки нужно выбрать из окна меню, появляющегося при нажатии левой клавишей мыши на заголовке соответствующего столбца. Эта функция особенно удобна для задания автоматических диапазонов *X Range* и *Y Range* сразу для всех выражений.

Опции окна *Transient Analysis Limits*

Run Options — опции сохранения результатов расчетов:

- *Normal* — результаты расчетов не сохраняются,
- *Save* — сохранение результатов расчетов в бинарном файле <имя схемы>.tsa,
- *Retrieve* — считывание последних результатов расчета из файла <имя схемы>.tsa, созданного ранее. При этом производится построение графиков и таблиц переходных процессов, как после обычного расчета.

State Variables — установка начальных условий:

- *Zero* — установка нулевых начальных условий для потенциалов всех аналоговых узлов и токов через индуктивности и нулевых или неопределенных логических состояний «X» для цифровых узлов,
- *Read* — чтение начальных условий из бинарного файла <имя схемы>.top, созданного с помощью *State Variables Editor*, перед каждым новым запуском анализа, а также при изменении температуры или другого параметра,
- *Leave* — установка в качестве начальных условий значений, полученных при окончании предыдущего сеанса расчета. При первом запуске анализа они полагаются нулевыми. При следующих сеансах расчета (без возврата в схемный редактор) они равны конечным значениям в предыдущем сеансе. Если в предыдущем сеансе рассчитывался только режим по постоянному току, то в качестве начальных значений будут приняты параметры этого режима.
- *Retrace* — запуск анализа N раз, где N — число, указанное в позиции *Retrace Runs*. При первом запуске используется нормальная инициализация и если требуется, рассчитывается рабочая точка по постоянному току. При последующих запусках (по **F2** или если *Retrace Runs* установлено большим 1) в качестве начальных значений для переменных состояния берутся значения, достигнутые в конце предыдущего запуска анализа.

Operating Point — выполнение расчета режима по постоянному току перед началом каждого расчета переходных процессов. Данные этого режима заменяют значения всех начальных условий, если они были установлены (сравните на рис. 6.1 результаты анализа при установленной и сброшенной опции *Operating Point*). См. также схемные файлы *Tran_Op_Point_01*, *Tran_Op_Point_02* из каталога *Book-mc\Analysis\Transient*.

Operating Point Only — расчет только режима по постоянному току (расчет переходных процессов не производится).

Auto Scale Ranges — присвоение признака автоматического масштабирования «Auto» по осям X и Y для каждого нового варианта расчетов. Если эта опция выключена, то принимаются во внимание масштабы, указанные в графах *X Range*, *Y Range*.

Accumulate Plots — накопление графиков в графических окнах при редактировании схемы в одновременно открытом окне схемного редактора, при регулировке параметров с помощью движков, а также при изменении опций окна

Analysis Limits. Команда **Clear Accumulated Plots**  приведет к очистке графических окон от накопленных кривых при последующем запуске анализа. В примере рис. 6.1 при включенной опции *Accumulate Plots* проводилось два запуска анализа (один — при установленном, другой — при снятом флажке *Operating Point*). Оба варианта показаны в графических окнах (см. рис. 6.1).

Fixed Time Step (только в MC10) — устанавливает фиксированный шаг расчета, равный шагу, указанному в графе *Maximum Time Step*. Эта опция введена для возможности изучения теории методов расчета и в обычных случаях анализа не используется. Обычный алгоритм с автоматическим выбором шага, основанный на допустимой величине LTE (*local truncation error*) намного более эффективен.

Periodic Steady State (только в MC10) — использование так называемого «серийного» метода для устранения переходных процессов при периодических воздействиях и нахождения стационарного режима. Такая разновидность анализа переходных процессов с поиском стационарного режима необходима при анализе коэффициента нелинейных и интермодуляционных искажений в усилителях, для анализа схем с периодической коммутацией (например ИИВЭП, схем на переключаемых конденсаторах), и радиотехнических устройств. Если выбрана эта опция, то программа выполняет несколько серий обычного расчета переходных процессов, и выбирает из них ту итерацию (обычно последнюю), которая соответствует стационарному режиму. Во время проведения такого анализа можно увидеть на экране графики всех серий расчета, а в информационной строке — ошибку на текущей итерации. В конце текстовой страницы схемного файла *Info* после запуска анализа всегда перечисляются итерации PSS и их ошибка. Более подробно об опции PSS см. 7.5. Пример нахождения стационарного режима цепи с использованием PSS см. в схемном файле *Tran_Op_Point_02_PSS(MC10)* из каталога *Book-mc\Analysis\Transient*.

Изменение размеров окна *Analysis Limits*

Автомасштабирование диалогового окна осуществляется нажатием на кнопку . Приводит к установке размеров диалогового окна в соответствии с длиной математических выражений.

Ручное масштабирование окна осуществляется стандартным способом — протяжкой мышью правого нижнего угла окна, а также изменением размера полей в поле графиков путем протяжки левой клавишей мыши разделителей между полями *Page*, *P*, *X Expression*, *Y Expression*, *X Range*, *Y Range*.

6.1.3. Меню режимов расчета переходных процессов *Transient*

После перехода в режим расчета переходных процессов в верхней строке главного окна появляется новое меню **Transient** (рис. 6.4), содержащее пункты *RUN*, *Limits*, *Stepping*, *Optimize*, *Analysis Window*, *Watch*, *Breakpoints*, *Operating Point Methods*, *3D Windows*, *Performance Windows*, *FFT Windows*,

Slider, Numeric Output, State Variables Editor, Reduce Data Points. Состав этих команд одинаков для всех видов анализа.

Назначение пунктов меню *Transient*

Run (F2, ) — запускает анализ.

Limits (F9, ) — открывает диалоговое окно *Analysis Limits*.

Stepping (F11, ) — открывает диалоговое окно многовариантного анализа *Stepping*.

Optimize (CTRL+F11, ) — открывает окно задания параметров оптимизации.

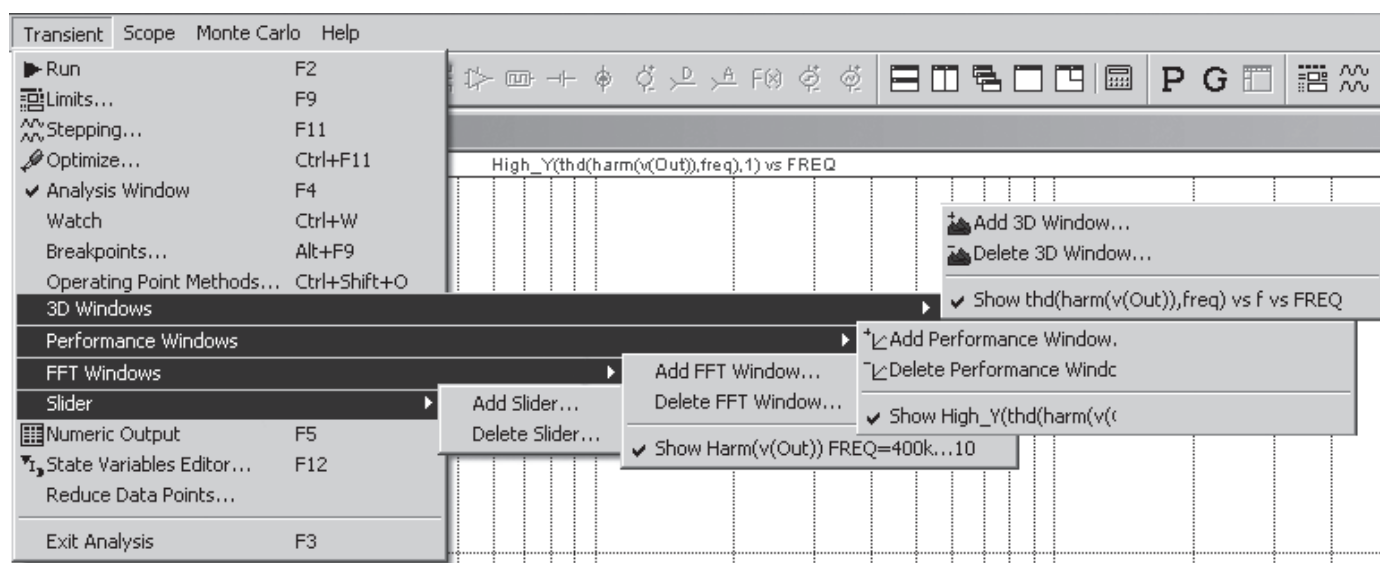


Рис. 6.4. Пункты меню *Transient*

Analysis Window (F4, ) — приводит к показу построенных графиков на экране. Включается автоматически после запуска анализа.

Watch (CTRL+W) — приводит к открыванию окна *Watch*, где можно определить выражения и переменные, выводимые в этом окне при нажатой кнопке  и введенных точках останова *breakpoints*.

Breakpoints (ALT+F9) — открывает диалоговое окно установки точек останова расчета *Breakpoints*. Точки разрыва представляют собой булевы выражения, которые переводят программу в режим расчета одной точки на каждый запуск при нажатии  (**CTRL+Space**), так чтобы при нажатой кнопке  можно было наблюдать значения заданных переменных и выражений.

Примеры:

$V(A) \geq 1 \text{ AND } V(A) \leq 1.5$

$V(OUT) > 5.5$.

Пример использования двух рассмотренных пунктов меню можно посмотреть в схемном файле *BreakPoints_Watch.cir* каталога *Analysis\Transient*.

Operating Point Methods (CTRL+SHIFT+O) — позволяет выбрать один из пяти численных методов расчета рабочей точки на постоянном токе и после-

довательность их применения в порядке понижения приоритетов (более подробно будут рассмотрены в пункте 6.1.7).

3D Windows (, ) — позволяет добавить или удалить трехмерный график в окне. Команда доступна только при построении более одного варианта графика.

Performance Windows (, ) — позволяет добавить или удалить окно графиков дополнительных функций *Performance*, применяемых к ранее построенным в режиме основного анализа графикам. Команда доступна только при построении более одного варианта графика.

Для режима анализа переходных процессов *Transient* специфичным является пункт меню *FFT Windows*.

FFT Windows — открытие окна построения функций, использующих **Fast Fourier Transform** (FFT) — быстрое преобразование Фурье. В свойствах окна на закладке FFT задаются границы интервала времени (*Upper Time Limit*, *Lower Time Limit*) и количество отсчетов *Number of Points* (должно быть в точности равно степени числа 2 в интервале от $8=2^3$ до $1048576=2^{20}$) для расчета гармоник указанного сигнала с помощью функции HARM.

Эти данные необходимы для того, чтобы при расчете спектров периодических процессов выделить на участке установившегося режима интервал времени, равный целому числу периодов первой гармоники сигнала. Следует отметить, что это окно можно не использовать, т.к. с его помощью можно рассчитать только комплексные величины гармоник сигнала (остальные функции спектрального анализа в этом окне недоступны). Вообще же весь необходимый расчет гармоник сигнала (и их производных функций) можно задавать в окне *Transient Analysis Limits* с помощью FFT-функций. В этом случае для задания границ интервала времени, который определяет, что Фурье-анализ сигнала будет проводиться на участке, когда переходные процессы в схеме уже закончились, могут быть использованы параметры закладки FFT окна *Properties* (см. пример *fft7.cir* из каталога *Analysis\Fourie*). Более подробно спектральный анализ рассмотрен в разделе 7.4.

Slider — позволяет добавить или удалить движок, управляющий изменением какого либо параметра схемы.

Numeric Output (F5, ) — выводит результаты расчета в виде таблиц значений.

State Variables editor (F12, ) — вызывает редактор начальных значений переменных состояния *State Variables editor*.

Reduce Data Points — вызывает окно уменьшения числа выводимых на график точек данных. Позволяет выводить на график лишь каждую N-ую точку рассчитанных данных. Это полезно, когда для достижения точности устанавливается очень маленький шаг, что затрудняет быструю прорисовку графиков. Удаленные точки в этом же сеансе расчета не могут быть восстановлены.

Exit Analysis (F3) — выход из режима анализа.

6.1.4. Задание начальных значений и редактирование переменных состояния

Инициализация

Значения переменных состояния определяют состояние системы в любой момент времени. Для того, чтобы начать процесс решения системы им должны быть присвоены начальные значения. Ниже приведена информация о последовательных шагах инициализации переменных состояния схемы.

1. Начальная инициализация. Когда производится выбор любого вида анализа, все переменные состояния устанавливаются в нулевое значение, а все цифровые состояния принимаются неопределенными, т.е. имеющими цифровое состояние «X». Подобная инициализация называется *начальной инициализацией*.

2. Расчетная инициализация. Каждый новый запуск расчета при любом виде анализа вызывает инициализацию переменных состояния, базирующуюся на опции *State Variables* в диалоговом окне анализа. Новый запуск —

это запуск расчета по команде *RUN (F2, *), запуск при каждом новом значении варьируемого параметра в режиме *Stepping*, *Монте-Карло* или при каждой новой *вариации температуры*. В этом случае существуют 3 возможных варианта *расчётной инициализации*:

- **Zero.** Аналоговые узловые напряжения, токи индуктивных компонентов устанавливаются в нулевое значение. Цифровые состояния обычно принимаются неопределенными для комбинационных схем, для выходов триггеров — 0, 1 или X в зависимости от значения переменной DIGINITSTATE в окне *Global Settings*. При запуске DC анализа используется только такая разновидность инициализации.
- **Read.** Программа считывает значения переменных состояния из файла <имя схемы>.top. Указанный файл заранее создается командой **Write** диалогового окна редактора начальных условий *State Variables editor*.
- **Leave.** Программа не выполняет никаких действий по изменению значений переменных состояния. Они просто остаются равным текущим значениям переменных состояния. Здесь существуют 3 варианта:

Первый запуск анализа. Переменные состояния не меняются, остаются просто равными значениям из операции начальной инициализации (т.е. нулевым значениям).

Последующие запуски анализа. Если значения переменных состояния не редактируются с помощью редактора начальных условий, они остаются равными значениям в конечной точке расчета предыдущего сеанса.

Редактирование значений переменных состояния. Если переменные редактируются, то в качестве начальных условий для нового сеанса расчета будут взяты их текущие значения, которые отображаются в данный момент (после редактирования) в окне редактора начальных условий.

- **Retrace.** Программа запускает расчет *N* раз, где *N* — число, указанное в позиции *Retrace Runs*. При первом запуске используется нормальная инициализация и если требуется, рассчитывается рабочая точка на постоянном токе. При последующих запусках (по **F2, **, или если *Retrace Runs*

установлено больше 1), в качестве начальных значений для переменных состояния берутся значения, достигнутые в конце предыдущего сеанса расчета. В этом случае при последующих запусках программа не выполняет никаких действий по изменению значений переменных состояния в первой расчетной точке. Они просто остаются равным текущим значениям переменных состояния.

3. Инициализация отдельных компонентов, ветвей, узлов. Всегда производится и при первом запуске анализа и при последующих сеансах расчета, если не выбрана опция *Retrace*. После обработки опции *State Variables*, программа обрабатывает директивы *.IC*. Начальные значения напряжений (токов) для отдельных емкостных (индуктивных) компонентов, задаваемые значением *IC* в атрибуте *VALUE*, имеют приоритет перед директивами *.IC* для всей схемы. Т.е., если директивы *.IC* конфликтуют со значениями *IC* конденсаторов и катушек индуктивности, то в качестве начальных условий устанавливаются последние.

Напомним, что директивы *.IC* указывают значения, которые будут присвоены переменным состояния на время расчета рабочей точки по постоянному току. Условия, задаваемые директивой *.IC* более жесткие, чем обычные начальные значения, которые, как правило, изменяются после первой итерации расчета режима по постоянному току. Они удерживаются в течение всего процесса расчета рабочей точки.

Используя начальные условия, установленные после выполнения трёх последовательных шагов инициализации, производится расчет режима по постоянному току при включении источников питания (если включена опция *Operating Point*, см. 6.1.2), начальные условия переопределяются и затем рассчитываются переходные процессы при включении источников переменных сигналов. Если же опция *Operating Point* выключена, то переходные процессы рассчитываются с начальными условиями, заданными в процессе выполнения 3-х шагов инициализации. Если установлена опция *Operating point only* значения переменных состояния примут значения, полученные после расчета режима по постоянному току, и отобразятся в окне *State Variables Editor*.

Редактор значений переменных состояния (*State Variables Editor*)

Редактор начальных значений переменных состояния вызывается командой ***Transient>State Variables Editor***, клавишей ***F12*** или пиктограммой



. Окно редактора приведено на рис. 6.5. В трех колонках располагаются значения узловых потенциалов *Node Voltages*, токов через катушки индуктивностей *Inductor Currents* и логических состояний цифровых узлов *Node Levels*. Узловые потенциалы помечаются именами или номерами узлов, токи через катушки индуктивностей — их позиционными обозначениями, логические состояния цифровых узлов (если они имеются в схеме) — именами или номерами узлов. В начальный момент времени эти переменные полагаются равными нулю или состоянию неопределенности «X». После окончания моделирования в этом окне показываются конечные значения переменных состояния. Обычно редактировать эти значения не требуется.

Однако, это можно сделать, подводя курсор мыши в нужную строку или нажимая <Tab> для перевода курсора в следующую строку.

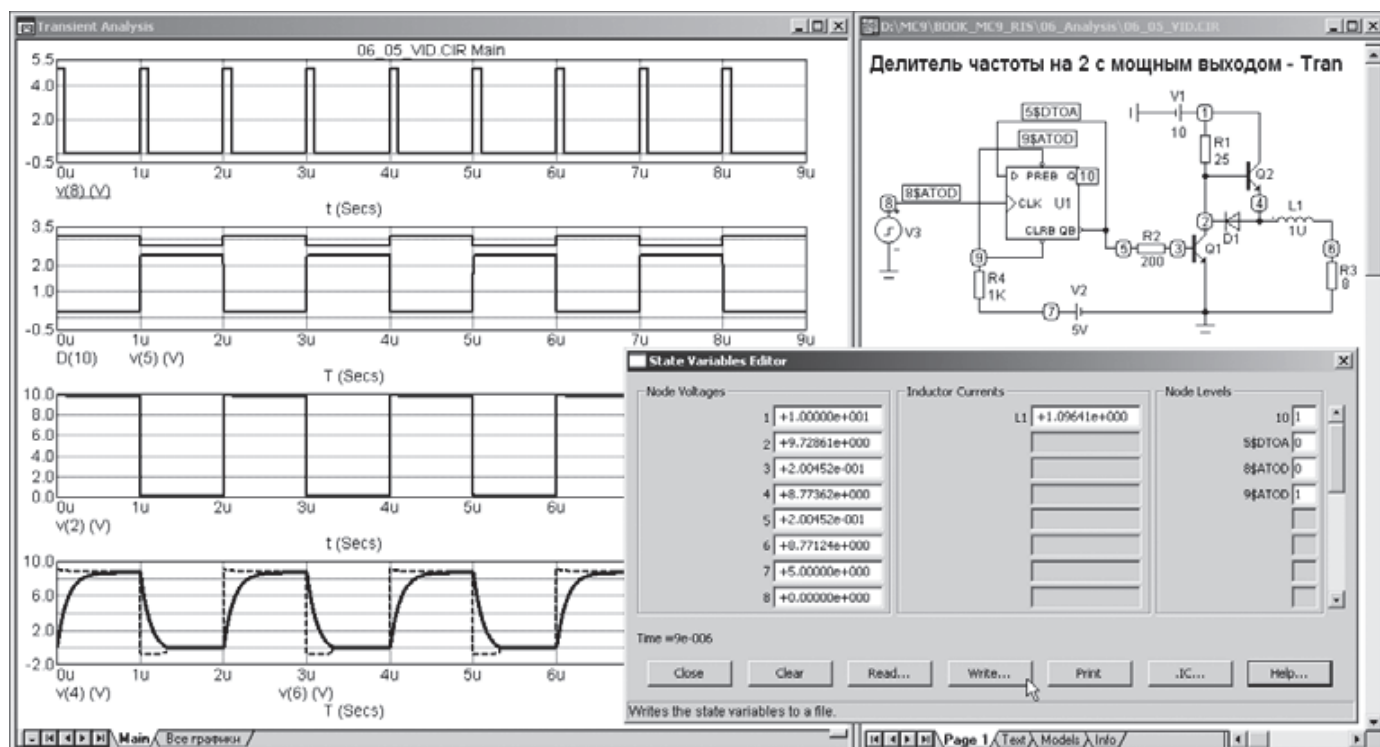


Рис. 6.5. Редактор переменных состояния State Variables Editor

В нижней части экрана расположены кнопки команд:

Close — закрытие диалогового окна;

Clear — присвоение нулевых значений всем аналоговым переменным состояния, состояния 'X' — всем цифровым узлам;

Format — установка числового формата, используемого в командах Write, Print, и .IC (MC10).

Read — чтение переменных состояния из файла <имя схемы>.top (создается заранее по команде Write);

Write — запись значений переменных состояний в бинарный дисковый файл <имя схемы>.top. Файл создается для последующего использования при установленной опции Read в списке State Variables;

Print — запись значений переменных состояний в текстовый файл <имя схемы>.svv, содержание которого при этом выводится в текстовое окно;

.IC — трансляция текущих значений переменных состояния в серию директив .IC, которые затем записываются в текстовую область схемного файла;

Help — вызов раздела State Variables Editor системы помощи.

6.1.5. Использование команды печати данных (P)

Во время выполнения анализа можно наблюдать за величинами выражений и переменных, выводимых на график. Для этого следует включить режим печати данных (P, ) . Нажатие этой клавиши (пиктограммы) последовательно включает/отключает режим печати значений выражений, выводимых на графики. Подобный вывод может сильно замедлить процесс моделирования, поэтому использовать его следует кратковременно для оценки числовых результатов. Возвращение в обычный режим осуществляется повторным нажатием 'P'.

6.1.6. Использование числового (табличного) вывода данных

Результаты расчета схемы по постоянному току и таблицы отсчетов переменных, отмеченных нажатием кнопок  в соответствующих строках окна *Transient Analysis Limits*, заносятся в текстовый файл <имя схемы>.tno. Просмотр его содержания выполняется нажатием на пиктограмму  или по команде *Numeric Output (F5)* в меню *Transient*. Содержимое файла с числовыми данными будет зависеть от установок закладки *Numeric output* диалогового окна *Properties (F10)*. На закладке имеются следующие разделы:

Curves — секция определяет кривые, координаты точек которых будут выводиться в файл и возможные псевдонимы (alias) для них. Для числового вывода против соответствующей кривой ставится галочка.

Show — выбор соответствующих разделов данных об анализе для включения в файл числового вывода.

• **Include Numeric Output** — разрешает создание файла числового вывода. Нижеперечисленные опции определяют его содержание.

- **Include Main Header** — вывод основного заголовка.
- **Include Analysis Limits** — вывод установок окна *Analysis Limits*.
- **Include Branch Headers** — вывод подзаголовков, идентифицирующих вариант многовариантного анализа (Stepping или Monte Carlo).
- **Include Model Parameters** — вывод модельных параметров.
 - **Include Zero Parameters** — вывод параметров, имеющих нулевые значения.
 - **Include Undefined Parameters** — вывод параметров, значения которых равны значениям, принятым по умолчанию.
- **Include Operating Point Values** — вывод параметров режима по постоянному току (Operating Point). Выводятся узловые потенциалы, токи через индуктивности, логические состояния цифровых узлов, состояния р-п-переходов, параметры линейных моделей диодов и транзисторов, рассчитанные в режиме по постоянному току (проводимости, коэффициенты передачи по току, емкости и др. параметры).
- **Include Noise** — вывод вклада отдельных компонентов в общий шум схемы. Можно установить только при проведении АС-анализа.
- **Include Waveform Values** — вывод координат точек выбранных графиков в файл. Также для вывода данных в файл должна быть нажата пиктограмма числового вывода  в окне задания параметров *Analysis Limits*.
 - **Include Waveform Headers** — вывод заголовка для каждой колонки числовых данных.
 - **Begin Printing At** — значение независимой переменной (времени), начиная с которого будет организован вывод в файл.
 - **End Printing At** — значение независимой переменной (времени), до которого данные будут выводиться в файл.
 - **Table Formats** — устанавливает формат таблицы выводимых данных. *Horizontal* — стандартный формат, в строке сначала печатается значение независимой переменной, затем Y-координаты кривых, для которых задан числовой вывод. *Vertical*

— сначала выводится столбец значений независимой переменной, затем друг за другом по вертикали — столбцы соответствующих значений Y заданных кривых. *Vertical X,Y Alternate* — столбцы X и Y -координат заданных кривых располагаются последовательно по вертикали, причем столбцу Y для каждой кривой предшествует вертикальный столбец значений независимой переменной. *Vertical X,Y Pairs* — таблицы X,Y -координат точек заданных кривых располагаются последовательно друг за другом по вертикали. В строке таблицы располагается значение независимой переменной и Y -координата точки соответствующей кривой.

В заключение отметим, что примеры, иллюстрирующие анализ переходных процессов, в том числе и продемонстрированные в 6.1, находятся в подкаталоге *Analysis\Transient*.

6.1.7. Методы расчета режима по постоянному току (Operating Point Methods)

Методы расчета режима схемы по постоянному току и порядок их применения задаются в диалоговом окне *Operating Point Methods* (рис. 6.6). Данное окно вызывается из большинства режимов анализа электронных схем (*Transient*, *AC*, *DC*, *Dynamic DC*, *Dynamic AC*, *Distortion*).

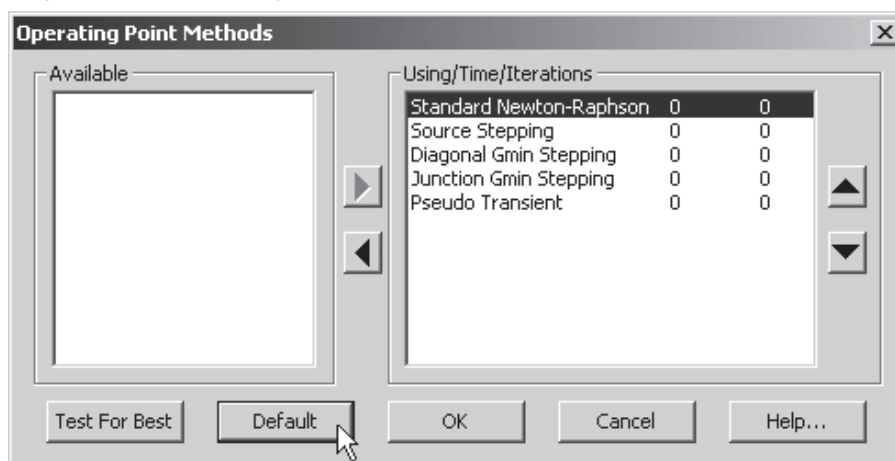


Рис. 6.6. Диалоговое окно *Operating Point Methods*

Существуют 5 основных методов расчета рабочей точки на постоянном токе.

Standard Newton-Raphson (*Стандартный метод Ньютона-Рафсона*).

Это наиболее простой и наиболее эффективный метод расчета схемы по постоянному току (численный метод решения системы нелинейных алгебраических уравнений).

Source Stepping (*Метод пошагового изменения источников энергии*).

Это первый из многостадийных методов. Он пытается установить управляющий параметр такой величины, при которой легко достигается решение системы, а затем указанный параметр постепенно изменяется по направлению к достижению 100% значения. В этом методе указанный параметр — масштабный коэффициент, на который умножаются все источники эдс. Он начинает изменяться от малого значения, и если сходимость достигается, то постепенно увеличивается до тех пор пока сходимость не будет достигнута при единичном значении коэффициента.

Diagonal Gmin Stepping (*Пошаговое изменение величины диагональных элементов матрицы проводимостей на Gmin*). Данный метод добавляет небольшую проводимость на диагональ решаемой матрицы и когда сходимость достигается снижает ее значение, до тех пор, пока сходимость не будет достигнута при нулевом значении добавочной проводимости.

Junction Gmin Stepping (*Пошаговое изменение проводимости между любыми двумя узлами схемы*): Gmin — это проводимость, которая обычно добавляется между любыми двумя узлами электронной схемы. Данный метод сначала устанавливает значение Gmin большой величины. Если сходимость при решении достигается величина Gmin уменьшается до тех пор, пока сходимость не будет достигнута при значении Gmin, соответствующем установкам диалогового окна *Global Settings*.

Pseudo Transient (*Псевдовременной анализ*): В этом методе источники, изменяющиеся во времени устанавливаются в значения при $T=0$, и к каждому узлу относительно земли добавляются конденсаторы фиксированной емкости. Затем запускается анализ переходных процессов, до тех пор, пока значения переменных состояния схемы не стабилизируются. Найденный вектор узловых потенциалов считается найденным режимом по постоянному току. Данный метод работает медленно, но позволяет достигнуть сходимости в большинстве нелинейных схем. Обычно он не работает с неустойчивыми или генераторными схемами.

Рассматриваемое диалоговое окно позволяет выбрать используемые методы расчета схемы по постоянному току и порядок в котором они будут применяться. Метод, расположенный сверху будет применяться первым, а последующими будут применяться методы, расположенные вниз по списку. Диалоговое окно также предоставляет возможность протестировать различные методы расчета и в соответствии с результатами установить требуемый порядок их применения. Оно обеспечивает следующие опции:

-  — передвигает выбранный метод на одну позицию вверх списка.
-  — передвигает выбранный метод на одну позицию вниз списка.
-  — убирает выбранный метод из списка используемых и помещает его в другой список (Available list), деактивируя метод.
-  — перемещает метод из неактивного списка (Available list) в список используемых (Using list), активируя метод.
- **Test for Best** (*Тестирование на наилучший метод*). При этом производится испытание всех пяти методов и они выстраиваются в списке от самого быстрого к самому медленному. Если при тестировании метода сходимость не достигается, об этом выдается сообщение и метод помещается в конец списка.
- **Default** (*По умолчанию*). Устанавливает расположение методов в списке в порядке, принятом по умолчанию. Это установки, которые обеспечивают наиболее быстрый расчет большинства тестовых схем.
- **OK**. Принять все изменения, сделанные в диалоговом окне.

- **Cancel.** Игнорировать все изменения, сделанные в диалоговом окне.
- **Help.** Вызвать подсказку по установкам диалогового окна.

6.1.8. Использование при моделировании движковых регуляторов (Sliders)

Программа Micro-Cap имеет в своем составе средства наглядной визуализации производимых в схеме изменений. К таким средствам относятся движковые регуляторы (Sliders), позволяющие организовать изменение параметров компонентов схемы даже при закрытом окне схемного редактора.

Для того, чтобы вывести слайдер, необходимо выполнить соответствующую команду меню анализа (*Slider>Add Slider*). После этого откроется окно (рис. 6.7). Слайдер можно задать для изменения параметра компонента (Component), модели (Model) или символьной переменной (Symbolic). При установке соответствующей опции вверху окна задания слайдера появляются раскрывающиеся списки, позволяющие выбрать изменяемую величину.

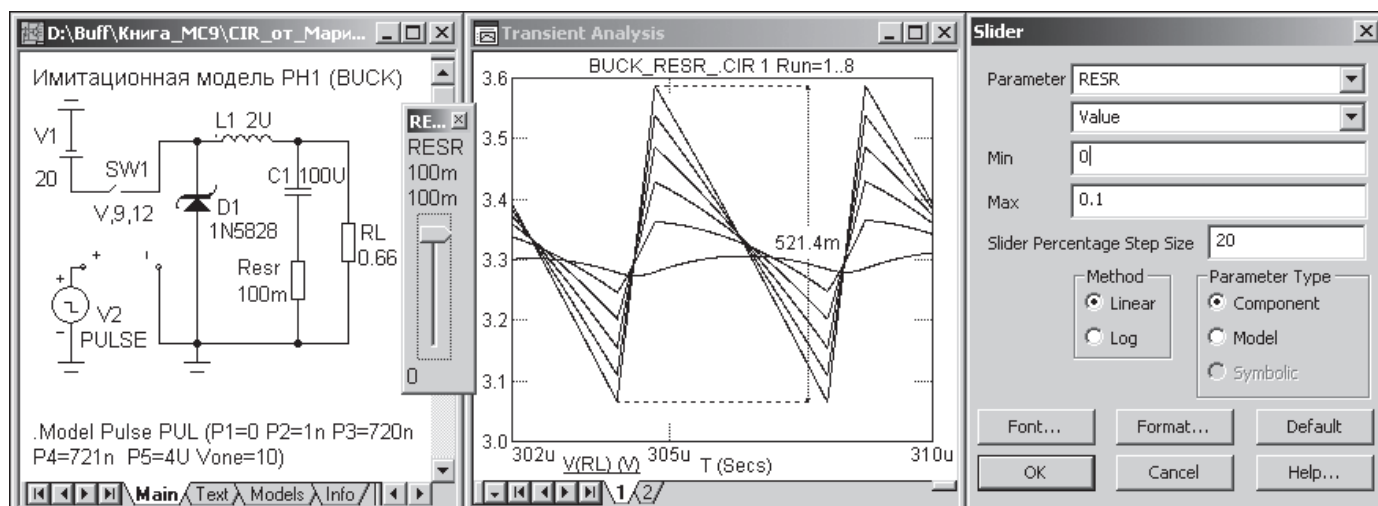


Рис. 6.7. Использование движков (sliders) при моделировании

Ниже этих списков располагаются строки для задания минимального *Min* и максимального *Max* значения изменяемого параметра, а также процентного шага его изменения *Slider Percentage Step Size*. Следом идет панель выбора логарифмического или линейного изменения. Нажатие на кнопки *Font* и *Format* приводит к открытию окон, в которых можно выбрать параметры шрифта оформления слайдера и формат выводимых на него значений изменяемого параметра. Кнопка *Default* позволяет выбрать диапазон и шаг изменения, используемый по умолчанию.

Схемный файл *Buck_Resr.cir* (рис. 6.7) демонстрирует использование слайдера для исследования зависимости удвоенной амплитуды пульсаций выходного напряжения в понижающем (buck) регуляторе от последовательного сопротивления фильтрующего конденсатора. Для автоматизации процесса измерения на графике используется динамический Performance-тэг (см. рис. 6.7 и пункт 8.4.2).

Еще один тип слайдеров MC9, MC10 будет рассмотрен в разделе 6.4.

6.2. Анализ по переменному току на малом сигнале

Вызывается командой **Analysis>AC** или **Alt+2**

6.2.1. Краткие теоретические сведения

АС анализ — это малосигнальный или линейный анализ. При этом все переменные состояния схемы связаны между собой линейными зависимостями. Это значит, что, скажем, удвоение некоторого напряжения в схеме приводит к удвоению всех величин в схеме связанных с ним. При АС-анализе программа использует для всех компонентов схемы их малосигнальные линеаризованные модели — таким образом получается малосигнальная линеаризованная схема замещения всего устройства. Линеаризованная схема замещения описывается системой линейных алгебраических уравнений с комплексными (зависящими от частоты) коэффициентами. Наличие комплексных коэффициентов обусловлено инерционными компонентами, которые для электронных устройств представляют собой реактивные — емкостные и индуктивные элементы. При выполнении анализа программа решает указанную систему для всех частот в пределах заданного диапазона и выводит на экран зависимость заданных переменных состояния схемы от частоты.

Линеаризованные модели всех компонентов получаются путем линеаризации нелинейных моделей в окрестности режима по постоянному току. Как правило, режим по постоянному току, получается при расчете рабочей точки по постоянному току при закорачивании всех катушек и удалении из схемы всех конденсаторов. Однако возможны варианты, когда этот режим считывается из предварительно сохраненных на диск значений переменных состояния или получается редактированием переменных состояния с помощью редактора начальных условий (*State Variables editor*). Линеаризация означает замену всех нелинейных зависимостей постоянными коэффициентами, которые устанавливают линейную связь между токами и напряжениями компонента и всего устройства в целом. Корректное использование линеаризованной модели возможно для малых изменений переменных состояния в окрестности режима по постоянному току, т.е. в окрестности точки линеаризации.

Правила составления линеаризованных малосигнальных моделей

1. При линеаризации цифровые компоненты считаются разомкнутой цепью.
2. Модели для линейных резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности эквивалентны их моделям во временной области при воздействии на них гармонических возмущений. Это означает, что модель резистора не изменяется, конденсатор представляется комплексным частотно-зависимым сопротивлением величиной $X_C = \frac{1}{j \cdot 2\pi f \cdot C}$, катушка — комплексным частотно-зависимым сопротивлением $X_L = j \cdot 2\pi f \cdot L$.

3. Модели нелинейных пассивных компонентов, величина которых зависит от режима по постоянному току, получаются путем линеаризации их комплексного сопротивления в окрестности рабочей точки на постоянном токе. Например, пусть величина резистора задана следующей зависимостью, набранной в поле атрибута VALUE: $1+2 \cdot V(10)$. $V(10)$ представляет собой напря-

жение в узле 10 во временной области. Если при расчете рабочей точки на постоянном токе получено $V(10)=2B$, то это означает, что величина резистора во время частотного анализа будет $1+2*2=5$ Ом.

4. Обычно во время проведения АС анализа сопротивления, емкости и индуктивности соответствующих компонентов не изменяются. Однако, если заполнен атрибут FREQ, то тогда при частотном анализе величина соответствующего пассивного компонента берется из выражения, стоящего в позиции этого атрибута. Как правило, в нем задается зависимость величины пассивного компонента от частоты. Характерным примером может явиться зависимость величины емкости электролитического конденсатора от частоты. Для уяснения особенностей использования атрибута FREQ в моделях резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, нелинейных функциональных источников NFV и NFI см. пункты 5.2.1–5.2.3, 5.4.3 и пример в схемном файле *Cap_Freq.cir* из каталога *Analysis\AC*.

5. Модели нелинейных активных компонентов, таких как диоды, биполярные и полевые транзисторы, МОП-транзисторы, получаются следующим образом. Нелинейные зависимости для их коэффициентов передачи по току, передаточных проводимостей, междуэлектродных емкостей дифференцируются в окрестности режима по постоянному току. При этом определяются все частные производные по тем переменным состояниям схемы, от которых зависит нелинейная величина. Величины этих частных производных и используются при составлении малосигнальной линейной схемы замещения полупроводникового прибора. Они не меняются во время проведения малосигнального частотного анализа. Для реактивных компонентов имеется в виду, что не меняется величина емкости и индуктивности, комплексные же сопротивления реактивных компонентов, конечно же, зависят от частоты. См. примеры *AC_01.cir*, *AC_02.cir* из каталога *Analysis\AC*.

6. Компонентами, чья передаточная функция или величина меняется во время частотного анализа являются Лапласовы зависимые источники (Laplace function sources и Laplace table sources), источники Z transform, и при определенном атрибуте FREQ пассивные R, L, C элементы и функциональные источники напряжения NFV и тока NFI. Z transform и Лапласовы источники используют переменную в виде комплексной частоты $S=(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{frequency})$ в своих передаточных функциях, следовательно, их передаточная функция меняется с изменением частоты при проведении анализа.

7. Источники сигнала различной формы.

- Для источников сигнала сложной формы (V и I формата SPICE) малосигнальная модель получается просто использованием величины AC из их SPICE-определения или значения AC из атрибута VALUE при использовании схемного формата. Например, источник напряжения SPICE Voltage Source, имеющий в строке атрибута VALUE следующий текст "DC 5.5 AC 2.0" будет заменен при проведении АС анализа источником напряжения с комплексной амплитудой равной 2В.
- Источники импульсного и синусоидального сигнала Pulse Source и Sine Source имеют модель для АС анализа в виде источника напряжения с комплексной амплитудой равной 1В.

- Пользовательские источники User Source имеют модель для АС-анализа с действительной и мнимой частями, записанной в соответствующих пользовательских файлах.
- Функциональные источники Function Source создают сигнал в режиме АС-анализа, только в том случае, если определен атрибут FREQ.

Поскольку АС анализ представляет собой линейный анализ, то для его проведения все равно воздействует ли на вход схемы источник с амплитудой 1В или 500В. Если пользователя интересует коэффициент передачи сигнала из одной части схемы в другую, тогда необходимо строить график $V(OUT)/V(IN)$. Это отношение будет одним и тем же независимо от величины $V(IN)$. Если $V(IN)=1$, то нет необходимости строить на графике отношение величин, т.к. $V(OUT)/V(IN)=V(OUT)/1=V(OUT)$. Однако, если в схеме более чем один источник с ненулевой комплексной амплитудой, то нельзя с уверенностью судить о передаче сигнала из одной части схемы в другую.

Последовательность вычислений по команде RUN

1. Рассчитывается режим работы схемы по постоянному току, исходя из величин постоянных источников напряжения и тока в схеме (Battery, Isource) а также значений источников сигнала схемы в нулевой момент времени. При этом учитываются значения параметров модели DC, A, PH для SINE SOURCE, VZERO для PULSE SOURCE.

2. Составляется линейная эквивалентная схема замещения каждого прибора на переменном токе в окрестности рассчитанного режима по постоянному току.

3. Составляется полная линеаризованная схема замещения анализируемой схемы по переменному току в окрестности рассчитанного режима по постоянному току (ей соответствует система линейных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами).

4. Все источники сигнала схемы принимаются синусоидальными с частотой $f=fmin$, амплитудой $A=1$ и с нулевой начальной фазой (это не относится к источникам сигнала V и I в формате SPICE, для них значение амплитуды и фазы задается в атрибутах AC MAGNITUDE и AC PHASE).

5. Анализируется схема и находятся отклики в виде комплексных величин узловых потенциалов и токов схемы для линеаризованной схемы на заданной частоте.

6. Для заданной переменной и для заданных величин (Re, Im, Mag, PHASE, и пр.) на графике(ax) строятся точки и (или) выводятся численные значения в файл.

7. Увеличивается частота f на заданный шаг.

8. Проверяется условие: превысила ли частота f значение $fmax$? Если да, то завершить расчет, в противном случае — осуществляется переход к п. 5.

6.2.2. Правила составления задания для частотного анализа

В режиме АС сначала рассчитывается режим схемы по постоянному току, затем линеаризуются все нелинейные компоненты (пассивные компоненты с нелинейными параметрами, диоды, транзисторы, нелинейные управляемые источники) и выполняется расчет комплексных амплитуд узловых потенциалов и токов ветвей. При линеаризации цифровые компоненты заменяются их

входными и выходными комплексными сопротивлениями, передача сигналов через них не рассматривается.

Ко входу схемы должен быть подключен источник синусоидального (Sine Source) или импульсного (Pulse Source) сигнала или источник сигнала SPICE-формата (Voltage Source, Current Source). Источники *Sine Source* или *Pulse Source* в данном режиме (AC) задают место подключения гармонического возмущения с единичной амплитудой, нулевой начальной фазой и меняющейся частотой. При подключении независимых источников напряжения или тока в формате SPICE при частотном AC анализе используются заданные значения амплитуды и фазы (поля атрибута VALUE: AC magnitude и AC phase).

При расчете частотных характеристик частота меняется в пределах, задаваемых в меню *AC Analysis Limits*.

Если имеется один источник сигнала, то выходные напряжения будут совпадать с частотными характеристиками устройства. Если же источников сигнала несколько, то отклики от каждого сигнала будут складываться как комплексные величины (см. соответствующий пример *ac_func_1.cir* из каталога *Analysis\AC*).

После перехода в режим анализа частотных характеристик программа проверяет правильность составления схемы. При отсутствии ошибок в схеме программа составляет ее топологическое описание, выполняет подготовку к численному решению системы нелинейных алгебраических уравнений для нахождения режима по постоянному току и открывает окно задания параметров моделирования *AC Analysis Limits* (рис. 6.8). В нем необходимо задать частотный диапазон анализа, выражения, которые будут выводиться на графики, масштабы по вертикальным и горизонтальным осям. После этого анализ запускается командой RUN. См. пример анализа пассивного телефонного фильтра *phone_filter.cir* из каталога *Analysis\AC*, параметры задания на моделирование и результаты частотного анализа которого представлены на рис. 6.8.

6.2.3. Задание параметров моделирования AC Analysis Limits

При выполнении команды **Analysis>AC** сразу открывается окно задания параметров моделирования. В последующем это окно можно вызвать командой **AC>Limits**, клавишей **F9** или пиктограммой . В этом окне, показанном на рис. 6.8, имеются следующие разделы.

Команды

Run — начало моделирования. Щелчок на пиктограмме  в строке инструментов или нажатие **F2** также запускает процесс расчета. Моделирование может быть остановлено в любой момент нажатием на пиктограмму  или клавишу **Esc**. Последовательные нажатия на пиктограмму  прерывают и затем продолжают моделирование.

Add — добавление еще одной строки задания вывода результатов на графики после строки, отмеченной курсором. На этой строке устанавливается способ отображения результатов и аналитические выражения для построе-

ния графиков. При наличии большого количества строк, не уместящихся на экране, появляется линейка прокрутки.

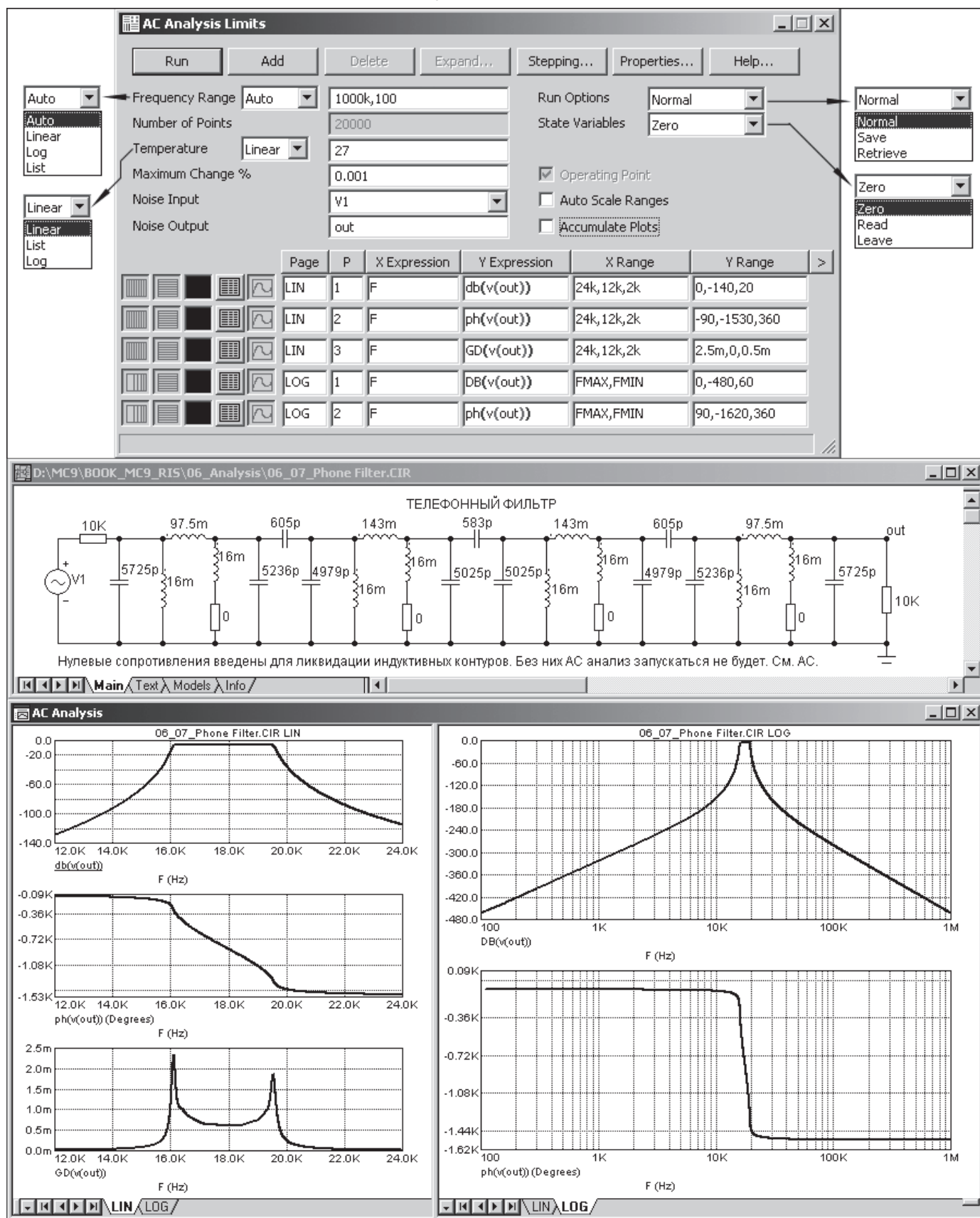


Рис. 6.8. Пример частотного анализа пассивного фильтра

Delete — удаление строки задания вывода результатов на графики, отмеченной курсором.

Expand — открытие дополнительного окна для ввода текста большого размера при расположении курсора в одной из граф, содержащих выражения, например Y Expression.

Stepping — открытие диалогового окна задания вариации (пошагового изменения) параметров.

Properties — открытие диалогового окна задания параметров вывода (окон графиков, текстовых надписей, толщины и цвета линий и др.). См. пункт 6.1.2, раздел 8.3.

Help — вызов раздела помощи AC Analysis Limits.

Числовые параметры окна AC Analysis Limits

Frequency Range — выбор способа изменения частоты (выпадающий список) и частотного диапазона (поле ввода), как правило, по формату Fmax, Fmin (исключение см. ниже). Отрицательные значения частоты не допускаются. Обязательно должны быть указаны оба параметра (Fmax, Fmin) иначе расчет не производится.

Из списка можно выбрать следующие способы изменения частоты:

- *Auto* — автоматический подбор шага по частоте на основе контроля максимального приращения функции первого графика. Если при изменении частоты от точки к соседней точке первый график получает процентное изменение большее, чем указанное в строке *Maximum change %*, то шаг по частоте уменьшается, в противном случае наоборот — увеличивается. Автоматический подбор шага является стандартным выбором и используется наиболее часто.
- *Linear* — расчет с постоянным линейным шагом по частоте. Здесь на каждом шаге расчета частота получает одинаковое приращение путем добавления постоянной величины шага. Шаг по частоте выбирается исходя из заданного количества расчетных точек *Number of Points*.
- *Log* — расчет с постоянным шагом на логарифмической шкале частоты. Здесь на каждом шаге расчета частота умножается на одно и то же значение, в результате чего между точками расчета будут одинаковые расстояния на логарифмической шкале. Шаг по частоте выбирается исходя из заданного количества расчетных точек *Number of Points*.
- *List* — расчет для значений частот, перечисленных списком через запятую в поле частотного диапазона (например, 1E8,1E7,5E6). В этом случае, в отличие от остальных способов, в поле частотного диапазона можно (и, как правило, нужно) указывать более двух значений частоты, а не только Fmax и Fmin.

Number of Points — определяет число строк в таблице файла числового вывода <имя схемы>.apo и число точек по частоте (N_F), в которых производится расчет частотных характеристик при выборе изменения частоты *Linear* и *Log*. Если используется шаг по частоте *Auto*, истинное число расчетных точек определяется величиной <Maximum change %>. В этом случае для набора требуемого числа точек (по умолчанию 51) используется интерполяция.

Если выбран линейный шаг (*Linear*), то шаг приращения частоты определяется как:

$$\Delta F = F_{K+1} - F_K = (F_{MAX} - F_{MIN}) / (N_F - 1).$$

Если выбран логарифмический масштаб (*Log*), то отношение соседних частот расчета определяется следующим образом:

$$\frac{F_{K+1}}{F_K} = \left(\frac{F_{MAX}}{F_{MIN}} \right)^{\frac{1}{N_F - 1}}.$$

Temperature — диапазон изменения температуры в градусах Цельсия. При выборе параметров *Linear* или *Log* имеет формат High[,Low[,Step]]; если при этом параметр Step (шаг) опущен, то выполняется анализ при двух значениях температуры Low (минимальной) и High (максимальной), если опущены оба параметра Low и Step, то расчет проводится при единственной температуре, равной High. При вариации температуры, первый расчет осуществляется при TEMP=<Low>, а каждый следующий — либо при увеличении температуры на <Step> (режиме *Linear*), либо при умножении температуры на <Step> (режиме *Log*). Так будет происходить до тех пор, пока температура не достигнет величины <High>. При выборе параметра *List* указывается список температур, разделяемых запятыми.

При изменении температуры изменяются параметры компонентов, имеющие ненулевые температурные коэффициенты ТС, а также ряд параметров полупроводниковых приборов. Значение установленной здесь температуры может использоваться в различных выражениях, она обозначается как переменная TEMP.

Maximum Change, % — максимально допустимое приращение графика первой функции на интервале шага по частоте (в процентах от полной шкалы). Принимается во внимание только при выборе опции изменения частоты *Auto*. Если график функции изменяется сильнее, то шаг приращения частоты автоматически уменьшается.

Noise Input — имя входного источника сигнала, используемого при расчете шумовых параметров. Если переменные INOISE и ONOISE не используются в полях выражений, то значение этого поля игнорируется.

При указании переменной INOISE в графе *Y expression* выводится график спектральной плотности напряжения или тока внутренних шумов схемы, пересчитанной к узлам подсоединения указанного источника. Если в качестве источника входного сигнала включается источник напряжения, то на вход пересчитывается спектральная плотность напряжения, а если — источник тока, то спектральная плотность тока.

Noise Output — номера (или имена) узлов выходных зажимов цепи, в которых вычисляется спектральная плотность напряжения выходного шума схемы. Если переменные INOISE и ONOISE не используются в полях выражений, то значение этого поля игнорируется. Формат: узел 1[,узел2].

В версии MC10 клик правой клавиши на этом поле открывает список возможных выходных узлов для анализа шумов.

Способ вывода результатов моделирования

Ниже раздела «Числовые параметры» и слева от раздела «Выражения» расположена группа пиктограмм. Нажатие каждой пиктограммы определяет

характер вывода данных, задаваемых в той же строке. Имеются следующие возможности:



X Log/Linear Scale — переключение между логарифмической и линейной шкалой по оси X. При выборе логарифмической шкалы диапазон изменения переменной должен быть положительным. Логарифмическая шкала по частоте используется когда анализ проводится в широком частотном диапазоне (две и более декад). Так в примере рис. 6.8 логарифмическая шкала используется на графической странице LOG, где изображаются диаграммы Бode во всем анализируемом диапазоне частот $10^2 \dots 10^6$ Гц (4 декады). На графической странице LIN, где строятся диаграммы Бode для узкого частотного диапазона (12кГц–24кГц), нет необходимости использовать логарифмический масштаб и поэтому используется линейный.



Y Log/Linear Scale — переключение между логарифмической и линейной шкалой по оси Y. При выборе логарифмической шкалы диапазон изменения переменной должен быть положительным. Чаще всего при частотном анализе при выводе графиков амплитуд используется разновидность логарифмического масштаба с единицами децибелами, организуемая путем использования функции $DB=20 \cdot \log_{10}(Y)$. При этом по оси Y задается линейный масштаб (см. рис. 6.8).



Color — вызов меню для выбора одного из 64 цветов для окрашивания графиков. График окрашивается в цвет кнопки.



Numeric Output — при нажатии этой кнопки в текстовый выходной файл заносится таблица отсчетов функции, заданной в графе Y Expression. Запись производится в файл <имя схемы>.apo. Таблица просматривается в окне **Numeric Output** (открывается нажатием клавиши **F5**). Число отсчетов функции (число строк в таблице) задается параметром *Number of Points*.



Rectangular — вывод графиков в прямоугольной (декартовой) системе координат,



Polar — вывод графиков в полярной системе координат;



Smith chart plot — вывод графиков на круговой диаграмме (диаграмме Смита);

Кроме того в MC10 имеются возможности задания сохранения и вывода кривых:



Save and Plot — сохранить расчетные точки графика и построить его в графическом окне.



Save and Don't Plot — сохранить расчетные точки графика и не рисовать его в графическом окне.



Don't Save or Plot — не сохранять расчетные точки графика и не рисовать его в графическом окне.

Page — в графе указывается имя страницы графических окон, что позволяет группировать графики и увеличивать общее число графических окон свыше 9. Так в примере рис. 6.8 используются две графические страницы с именами «LIN» и «LOG» соответственно, на которых выводятся диаграммы

Боде коэффициента передачи в узком и широком частотном диапазонах. Одновременный вывод графиков из различных графических страниц осуществляется командой *Windows>Split Horizontal (Vertical)* или путем манипуляций с разделителями окон (см. рис. 3.1).

Plot Group — в графе P числами от 1 до 9 указывается номер графического окна, в котором должна быть построена данная функция. Все функции, помеченные одним и тем же номером, выводятся в одном окне. Если это поле пусто, график функции не строится.

Поля выражений окна AC Analysis Limits

X Expression — имя переменной, откладываемой по оси X. Обычно при анализе переходных процессов по этой оси откладывается частота (переменная F). Но при расчете импульсной характеристики с помощью преобразования Фурье по этой оси откладывается время (переменная T), а при построении годографа для анализа устойчивости по методу Найквиста — действительная часть комплексного сигнала (см. примеры *FFT4.cir*, *Nyquist.cir*).

Значение этого поля можно не только задавать, но и выбирать из списка меню, открывающегося при нажатии правой клавишей мыши в соответствующем поле.

Y Expression — математическое выражение для переменной, откладываемой по оси Y. Это может быть простая переменная типа напряжения в узле V(5), падение напряжения на двухполюсном компоненте V(L1) или ток ветви I(2,3), I(L1), произведения комплексных величин, например V(VCC)*I(VCC), фаза комплексной величины PH(V(Out)), групповая задержка GD(V(Out)) и другие выражения (см. 4.4–4.7). Для построения стандартной АЧХ в этом поле надо задать выражение для коэффициента усиления в dB — $\text{db}(V(\text{out})/V(\text{in}))$, где out и in — номера (или имена) выходного и входного узлов. Входной — это узел, к которому присоединен источник сигнала. Если такой источник в схеме один, то часто можно просто записать $\text{db}(V(\text{out}))$. Для построения ФЧХ — соответственно $\text{ph}(V(\text{out})/V(\text{in}))$ или $\text{ph}(V(\text{out}))$.

Для расчета уровня внутреннего шума в графе Y Expression помещают имена переменных ONOISE, INOISE; при этом графики других переменных нельзя одновременно выводить на экран.

В графе Y Expression можно также использовать шаблон для вывода множества однотипных переменных (выражений). Примеры задания подобного вывода были рассмотрены в 4.4.

Щелчок правой клавишей мыши на поле Y expression вызывает окно со списками различных математических выражений. Эти списки для заполнения соответствующего поля позволяют выбрать: переменные (Variables), константы (Constant), функции (Functions), операторы (Operators), кривые из буфера графиков (Buffers) или расширить поле для редактирования слишком длинного выражения (Expand).

В рассмотренных выше полях выражения *всегда трактуются как комплексные*. По этой причине на графики (если нет специальных обозначений типа Phase, Real, Imag) всегда выводятся зависимости амплитудных значений. Например, если в качестве Y Expression используется выражение $V(3)/V(2)$, то программа рассматривает его как комплексное и выводит на

график зависимость амплитуды отношения от X -переменной. Такие правила используются из-за невозможности построения зависимости комплексной переменной от частоты на одном графике.

Можно построить зависимость мнимой части выражения от его действительной части (диаграмма Найквиста) или зависимость амплитуды и аргумента от частоты и мнимой и действительной части от частоты (диаграммы Боде).

Далее в таблице выражений следуют графы для указания масштабов вывода графиков по оси X ($X\ range$) и по оси Y ($Y\ range$).

Общий формат указания масштабов при АС анализе следующий:

`<high> ,<low> [,<grid spacing>] [,<bold grid spacing>]`

`<high>` — максимальное значение переменной (обязательный параметр);

`<low>` — минимальное значение переменной (обязательный параметр);

`[,<grid spacing>]` — расстояние между линиями координатной сетки (необязательный параметр).

`[,<bold grid spacing>]` — расстояние между утолщенными линиями координатной сетки (необязательный параметр).

Последних 2 необязательных параметра масштаба графиков принимаются во внимание только при выборе линейного масштаба по соответствующей оси. При выборе логарифмического масштаба используется подсетка в тонких линиях, шаг которой равен $1/9$ шага основной сетки, рисуемой утолщенными линиями.

Кроме числовых значений в позиции $X\ range$ можно установить *Auto*, *AutoAlways* или *FMAX,FMIN*, а в позиции $Y\ range$ — *Auto* или *AutoAlways*. Эти установки выбираются из дополнительного меню, вызываемого нажатием правой клавишей мыши в каждом из полей или левой клавишей мыши в заголовке колонки полей. В последнем случае выбранное значение устанавливается сразу во всех полях соответствующей колонки.

Указание **Auto** в позиции $X\ range$ ($Y\ range$) приводит к автоматическому масштабированию по соответствующей оси. В этом случае сначала выполняется моделирование, в процессе которого графики строятся в стандартном масштабе, а затем автоматически перестраиваются. Полученные значения масштаба заносятся программой в соответствующие поля $X\ range$ ($Y\ range$) и при последующих расчетах автоматического обновления больше не происходит.

Установка **AutoAlways** в позиции $X\ range$ ($Y\ range$) приводит к автоматическому масштабированию по соответствующей оси каждый раз при повторении расчета. Аналогичный результат дает установка флага *Auto Scale Ranges* в окне *AC Analysis Limits*. В этом случае поля $X\ range$ и $Y\ range$ можно вообще не заполнять — это сделает программа. Установка этого флага приводит к автоматическому расчету масштабов всех графиков по всем осям и соответствующему обновлению полей $X\ Range$ и $Y\ Range$ при каждом повторении расчета.

Установка **FMAX, FMIN** использует в качестве значения поля $X\ range$ параметры, установленные ранее в поле *Frequency Range*.

Подогнать масштаб полученных графиков можно не только до их построения, но и после. Для этого используется команда *Scope>Auto Scale* ($F6$

или ) . Она приводит к автомасштабированию всех построенных графиков без изменения параметров масштаба в окне выражений. Команда *Scope>Restore Limits Scale* (**Ctrl+Home**) восстанавливает масштаб графиков,

указанный в окне выражений. Команда *Auto Scale* использует количество делений координатной сетки, указанное в окне *Properties dialog box (F10)* по следующему адресу *Scales and Formats>Auto/Static Grids*.

Опции окна *AC Analysis Limits*

Run Options — управление выдачей результатов расчетов:

- *Normal* — запуск моделирования без сохранения результатов на диске;
- *Save* — сохранение результатов расчетов в бинарном дисковом файле <имя схемы>.ASA,
- *Retrieve* — считывание последних результатов расчета из дискового файла <имя схемы>.ASA, созданного ранее. При этом производится построение графиков и таблиц, как после обычного расчета;

State Variables — определяют какие значения присвоить переменным состояния схемы перед возможным (но не обязательным) расчетом режима схемы по постоянному току.

- *Zero* — присвоение всем переменным состояния схемы (узловым потенциалам, токам в катушках) нулевых значений перед выполнением расчета рабочей точки по постоянному току. При выборе этой опции режим по постоянному току всегда рассчитывается перед построением линеаризованной модели.
- *Read* — считывание предварительно сохраненных на диске значений для переменных состояния схемы и использование их в качестве начальных условий. Если при этом флаг *Operating Point* установлен, то считанные значения будут использоваться в качестве начального приближения при расчете режима по постоянному току. В противном случае линеаризованная модель будет построена для считанных значений переменных состояния схемы. См. пример *Converg.cir* из каталога *Analysis\AC*.
- *Leave* — работает аналогично опции *Read*, только значения переменных состояния берутся из их текущих значений, содержащихся в позициях редактора начальных условий (*State Variable Editor*), которые равны значениям предыдущего сеанса расчета.

Operating Point — выполнение расчета схемы по постоянному току перед построением малосигнальной линеаризованной модели для расчета в частотной области. Если этот флаг установлен, результаты малосигнального анализа не будут зависеть от опции, установленной в графе *State Variables*. В противном случае малосигнальная модель будет строиться по значениям переменных состояния, которые в каждом отдельном случае могут быть различными, и, следовательно, будут воздействовать на результат АС анализа.

Auto Scale Ranges — присвоение признака автоматического масштабирования «Auto» по осям X, Y для всех графиков во всех окнах для каждого нового варианта расчета. Если эта опция выключена, то вывод графиков проводится согласно масштабам, указанным в графах *X Range*, *Y Range*.

Примечание. При включении опции *Auto Scale Ranges* и выборе *Frequency Step=Auto*, масштаб графиков выбирается автоматически совершенно правильно, но при перестроении графиков после определения масштаба шаг по частоте выбирается слишком крупным и графики строятся грубо. Поэтому в этом случае приходится проводить моделирование несколько раз повторно при включенной опции *Auto Scale Ranges* до тех пор, пока графики перестанут иметь изломы.

Accumulate Plots — накопление графиков в графических окнах при редактировании схемы в одновременно открытом окне схемного редактора, при регулировке параметров с помощью движков. Команда **Clear Accumulated Plots**  приведет к очистке графических окон от накопленных кривых при последующем запуске анализа.

Изменение размеров окна *AC Analysis Limits*

Размеры диалогового окна *AC Analysis Limits* могут быть изменены точно такими же способами, как и окна *Transient Analysis Limits* (см. 6.1).

6.2.4. Меню режимов расчета частотных характеристик AC

Меню режимов для **AC** анализа полностью аналогично меню режимов *Transient*-анализа (см. рис. 6.4).

Run (F2, ) — Запускает анализ.

Limits (F9, ) — Открывает диалоговое окно **Analysis Limits**.

Stepping (F11, ) — открывает диалоговое окно многовариантного анализа *Stepping*.

Optimize (CTRL+F11, ) — открывает окно задания параметров оптимизации.

Analysis Window (F4, ) — приводит к показу построенных графиков на экране. Включается автоматически после запуска анализа.

Watch (CTRL+W) — приводит к открыванию окна **Watch**, где можно определить выражения для переменных, выводимых в этом окне при нажатой кнопке .

Breakpoints (ALT+F9) — открывает диалоговое окно установки точек останова расчета *Breakpoints*. Точки разрыва представляют собой булевы выражения, которые переводят программу в режим расчета одной точки на каждое нажатие  или *Ctrl+Space*, так чтобы можно было при нажатой кнопке  наблюдать значения заданных переменных и выражений.

Пример: $V(A) \geq 1 \text{ AND } V(A) \leq 1.5, V(OUT) > 5.5$.

Operating Point Methods (CTRL+SHIFT+O) — позволяет выбрать один из пяти численных методов расчета рабочей точки по постоянному току и последовательность их применения в порядке понижения приоритетов. См. 6.1.7.

3D Windows (, ) — позволяет добавить или удалить трехмерный график в окне. Команда доступна при построении более одного варианта графика.

Performance Windows (, ) — позволяет добавить или удалить окно графиков дополнительных функций *Performance*, применяемых к ранее построенным в режиме основного анализа графикам. Команда доступна только при построении более одного варианта графика.

Slider — позволяет добавить или удалить движок, управляющий изменением какого либо параметра схемы.

Numeric Output (F5, ) — выводит результаты расчета в виде таблиц значений.

State Variables editor (F12, ) — вызывает редактор начальных значений переменных состояния *State Variables editor*.

Reduce Data Points — вызывает окно уменьшения числа выводимых на график точек данных. Позволяет выводить на график лишь каждую N-ую точку рассчитанных данных. Это полезно, когда для достижения точности устанавливается очень маленький шаг, что затрудняет быструю прорисовку графиков. Удаленные точки в этом же сеансе расчета не могут быть восстановлены.

Exit Analysis (F3) — выход из режима анализа.

Использование команды печати данных (**P, **) в данном режиме анализа не имеет никаких особенностей по сравнению с режимом Transient (см. 6.1.5).

В сущности то же самое можно сказать и о режиме табличного вывода данных Numeric Output (см. 6.1.6). Единственным отличием является то, что в управлении численным выводом на закладке *Numeric Output* диалогового окна **Properties** активизируется опция **Include Noise**, позволяющая включить в распечатку подробный отчет о вкладе каждого компонента в общий шум схемы для каждой частоты шумового анализа.

Примеры использования АС анализа см. в схемных файлах из каталога *Analysis\AC*.

6.2.5. Расчет уровня внутреннего шума

В математических моделях компонентов, принятых в программе Micro-CAP, так же как и в программе PSPICE, учитываются тепловые, дробовые и низкочастотные фликкер-шумы (подробности см. в [14–16]). Следует отметить, что шумовая модель используется исключительно в АС-анализе и визуализировать шумы в режиме *Transient* не представляется возможным.

Тепловой шум (или Джонсоновский шум), возникающий в результате неупорядоченного теплового движения электронов, всегда присущ резистивным компонентам. Отдельные резисторы и паразитные сопротивления активных полупроводниковых приборов вносят свой вклад в общий тепловой шум. Эквивалентная схема замещения резистора для анализа шума показана на рис. 6.9.

Спектральная плотность теплового шумового тока, генерируемого резистором сопротивлением R определяется как:

$$i_{RШ} = \sqrt{\frac{4kT}{R}} \cdot \left[\frac{A}{\sqrt{\Gamma_{\mathcal{U}}}} \right]$$

Спектральная плотность напряжения шума, генерируемого на зажимах резистора с сопротивлением R определяется как:

$$u_{RШ} = \sqrt{\frac{4kT}{R}} \cdot R = \sqrt{4kTR} \cdot \left[\frac{B}{\sqrt{\Gamma_{\mathcal{U}}}} \right]$$

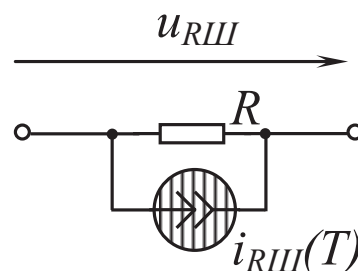


Рис. 6.9

Эффективное значение напряжения шума, генерируемого резистором в полосе частот:

$$U_{RШэфф} = \sqrt{4kTRB},$$

где $B=f_2-f_1$ — полоса частот оценки шума.

Дробовой шум вызывается случайными флуктуациями токов инжекции и рекомбинации в активных полупроводниковых приборах в результате конечного значения заряда частицы, переносящей ток (электрона). Поэтому, как правило, наличие источников такого шума, связывается с зависимыми источниками тока, обязательно присутствующими в моделях полупроводниковых приборов. Все полупроводниковые приборы генерируют дробовой шум. Схема замещения зависимых источников тока для учета такого шума представлена на рис. 6.10.

Спектральная плотность тока дробового шума, генерируемого зависимым источником тока активного полупроводникового прибора определяется как:

$$i_{SH} = \sqrt{2q \cdot I} \cdot \left[\frac{A}{\sqrt{\Gamma_{\mathcal{U}}}} \right],$$

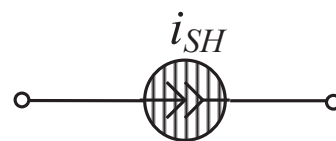


Рис. 6.10

где q — заряд электрона; I — величина тока зависимого источника в рабочей точке по постоянному току (DC operating point).

Эффективное значение тока дробового шума, генерируемого зависимым источником в полосе частот:

$$I_{SHэфф} = \sqrt{2qIB},$$

где $B=f_2-f_1$ — полоса частот оценки шума.

Как и резистивный шум Джонсона, так и дробовой представляют собой гауссовский белый шум. Белый шум — это шум, имеющий во всем частотном диапазоне одинаковую спектральную плотность. Определение гауссовский означает, что амплитуда шума, являясь случайной величиной, подчиняется распределению Гаусса.

Дробовой и тепловой шум — это неуменьшаемые виды шума, возникающие в соответствии с законами физики. Самый дорогой и тщательно изготовленный резистор имеет тот же тепловой шум, что и дешевый углеродный резистор с тем же сопротивлением. Реальные устройства, кроме того, имеют различные источники «избыточных шумов».

Фликкер-шум порождается различными источниками. В биполярных транзисторах, например, он вызван наличием ловушек, поверхностных состояний и других дефектов кристаллической решетки полупроводниковой структуры, порождающих случайную генерацию и рекомбинацию носителей электрического заряда.

Это шум имеет спектр, примерно описываемый зависимостью $1/f$ и иногда называется «розовым шумом». Примерами таких шумов являются шум тока базы у транзистора и шум катодного тока в электронных лампах.

Спектральная плотность тока фликкер-шума, генерируемого зависимым источником тока активного полупроводникового прибора, определяется как:

$$i_F = \sqrt{\frac{K_F \cdot I^{A_F}}{f}}, \quad \left[\frac{A}{\sqrt{\Gamma_{\mathcal{U}}}} \right],$$

где K_F — линейный коэффициент спектральной плотности фликкер-шума; I — величина тока зависимого источника в рабочей точке по постоянному току; A_F — экспоненциальный коэффициент спектральной плотности фликкер-шума, f — частота.

Эффективное значение тока фликкер-шума, генерируемого зависимым источником в полосе частот:

$$I_{F\text{эфф}} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} \frac{K_F \cdot I^{A_F}}{f} df} = \sqrt{K_F \cdot I^{A_F} \cdot \ln f \Big|_{f_1}^{f_2}} = \sqrt{K_F \cdot I^{A_F} \cdot \ln[f_2 / f_1]},$$

где $f_2 - f_1$ — полоса частот оценки шума.

Эквивалентная схема замещения для анализа шумов такая же, как и для дробового шума (см. рис. 6.10), с тем лишь отличием, что его спектральная плотность обратно пропорциональна частоте. Обычно при построении шумовой модели активных полупроводниковых приборов в Micro-CAP для зависимых источников используется один общий источник шума, квадрат которого равен сумме квадратов спектральных плотностей фликкер-шума и дробового шума (у биполярных транзисторов, диодов, МОП-транзисторов); или сумме квадратов спектральных плотностей токов фликкер и теплового шумов (у полевых транзисторов и ламп).

Вообще же общий шум нескольких некоррелированных источников (а вернее его спектральная плотность) представляет собой геометрическую сумму составляющих шумов (корень квадратный из суммы квадратов отдельных составляющих спектральных плотностей).

В программах на платформе SPICE (в том числе и в Micro-CAP) анализ шумов выполняется следующим образом.

Анализ шума основан на измерении суммарного вклада всех источников, проявляющегося в виде шума на входе и выходе схемы. Входной шум рассчитывается относительно одного из источников сигналов, который выбирается из раскрывающегося списка *Noise input* окна *AC Analysis Limits*. Выходной шум рассчитывается для узла(ов) схемы, указанного в поле *Noise output*. При этом для построения графика его спектральной плотности, зависящей от частоты, в графе *Y expressions* указывается переменная *ONoise*.

Входной шум рассчитывается на первом этапе так же, как и выходной, но затем приводится к входным узлам делением на частотно-зависимый коэффициент передачи от входа (заданного в поле *Noise input*) к выходу (заданному в поле *Noise output*). При этом для построения графика его спектральной плотности, зависящей от частоты, в графе *Y expressions* указывается переменная *INoise*.

Поскольку уравнения для шумов получаются на основе другой эквивалентной малосигнальной схемы цепи, включающей источники шума, нельзя в одном и том же сеансе анализа одновременно с шумовыми характеристиками выводить обычные переменные состояния схемы, такие как токи и напряжения. Если попытаться сделать это, программа выдаст сообщение об ошибке.

Поскольку шум является случайным процессом, информация о фазе шумового сигнала является бессмысленной. Спектральная плотность мощности шума определяется как среднеквадратическая величина напряжения или тока, имеющая размерность $V^2/\text{Гц}$ или $A^2/\text{Гц}$, поэтому информация о фазе (PH) и групповой задержке (GD) для него не используется. Спектральная плотность напряжения шума измеряется в $[V/\sqrt{\text{Гц}}]$, спектральная плотность тока шума — в $[A/\sqrt{\text{Гц}}]$.

При проведении анализа шума (как было сказано ранее) квадраты спектральных плотностей шума (фактически спектральные плотности мощности шумов) от отдельных источников суммируются. В качестве спектральной плотности мощности выходного шума (размерность $V^2/\text{Гц}$) рассчитывается спектральная плотность квадрата напряжения между узлами схемы, указанных в поле *Noise Output*. Если в качестве источника входного сигнала включается источник напряжения, то на вход пересчитывается спектральная плотность напряжения, а если источник тока — то спектральная плотность тока. В результате расчета уровня шума на графиках и в таблицах выводятся значения квадратного корня из спектральной плотности квадрата напряжения шума (размерность $V/\sqrt{\text{Гц}}$) или корня квадратного из квадрата спектральной плотности тока шума (размерность $A/\sqrt{\text{Гц}}$). Примеры анализа шумовых характеристик см. в схемных файлах каталога *Book-mc\Analysis\Noise*.

Следует сказать несколько слов относительно расчета отношения сигнал-шум (SNR — signal to noise ratio) в усилительных схемах. Это отношение имеет смысл лишь для определенной полосы частот и определяется формулами:

$$SNR_U = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{U_c^2}{U_{ш}^2} \right] = 0.5 \cdot DB \left[\frac{U_{cm}^2}{2U_{ш}^2} \right], \text{ для сигналов в виде напряжения;}$$

$$SNR_I = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{I_c^2}{I_{ш}^2} \right] = 0.5 \cdot DB \left[\frac{I_{cm}^2}{2I_{ш}^2} \right], \text{ для сигналов в виде тока.}$$

где U_c^2 и I_c^2 — это квадраты действующих значений полезного сигнала в виде напряжения и тока соответственно; U_{cm} , I_{cm} — амплитудные значения входных гармонических сигналов; $U_{ш}^2$ и $I_{ш}^2$ — квадраты эффективных напряжения и тока шума в заданной полосе частот, определяемые в общем случае (при наличии различных видов шумов) по формулам:

$$U_{ш}^2 = \int_{f_1}^{f_2} u_{ш}^2(f) df; \quad I_{ш}^2 = \int_{f_1}^{f_2} i_{ш}^2(f) df, \quad (6.1)$$

где $u_{ш}^2$, $i_{ш}^2$ — квадраты спектральных плотностей шумового напряжения и шумового тока соответственно.

Понятно, что отношение сигнал-шум будет зависеть как от действующего значения сигнала (чем оно больше, тем лучше SNR), так и от полосы оценки шумов (чем она шире, тем SNR хуже, дальше смотрим — больше видим).

Для расчета SNR усилительной схемы при частотном (AC) анализе в среде Micro-CAP, необходимо проинтегрировать по заданной полосе частот квадрат

спектральной плотности шума, приведенного ко входу (INOISE). Таким образом, рассчитываются выражения в знаменателе вышеприведенных формул для оценки SNR. Вместо числителей подставляется квадрат действующего значения входного сигнала в виде напряжения и тока соответственно.

Что касается полосы частот оценки шума, то может быть использована полоса частот усилителя (оцениваемая ориентировочно по уровням -3 дБ относительно максимального коэффициента передачи) и определяемая из предварительного обычного анализа коэффициента передачи усилителя в частотной области.

Итак, окончательные формулы для расчета отношения сигнал-шум в децибелах (SNR) усилителей в Micro-CAP:

$$SNR_U = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{U_{inc}^2}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} inoise^2(f) df} \right] = 0.5 \cdot DB \left[\frac{U_{incm}^2}{2 \cdot SD(inoise^2)} \right] \text{ [дБ]} \quad (6.2),$$

$$SNR_I = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{I_{inc}^2}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} inoise^2(f) df} \right] = 0.5 \cdot DB \left[\frac{I_{incm}^2}{2 \cdot SD(inoise^2)} \right] \text{ [дБ]} \quad (6.3),$$

где SD — функция интегрирования заданного выражения (в данном случае по частоте) в диапазоне от FMIN до FMAX. Таким образом, в конечной точке частотной оси (последняя точка кривой) указанного графика будет содержаться искомое отношение сигнал-шум в децибелах (SNR [дБ]) для полосы пропускания усилителя.

Ниже рассмотрен пример анализа шумов в однокаскадном транзисторном усилителе (рис. 6.11).

На первом этапе необходимо определить полосу усиления каскада. Для этого используется обычный АС анализ в широкой полосе частот, например 1–1E10 Гц. На график выводится амплитуда комплексного напряжения в выходном узле V(out) (рис. 6.11, а). Фактически это АЧХ коэффициента передачи каскада по напряжению. Нижняя и верхняя граничные частоты каскада определяются по уровню 0.707 (-3 дБ) от максимального значения коэффициента передачи. В рассматриваемом примере $F_{н.гр.}=120$ Гц, $F_{в.гр.}=25$ мГц.

На этом этапе полезно сохранить АЧХ каскада в буфере графиков. Для этого необходимо сделать правый клик на имени графика V(out) и в открывшемся контекстном меню выбрать команду *Add to Buffer*. После этого откроется окно *Waveform Buffer Add*, в котором будет показан сохраняемый график. Для его сохранения следует нажать кнопку ОК. Сохранение в буфере можно выполнить и другим способом. Сначала выполнить команду

Scope>Waveform Buffer>Save a Waveform to the Buffer () *>Save Waveform to the Buffer*), а затем из списка выбрать сохраняемый график.

25meg,120	Run Options	Normal
1001	State Variables	Zero
27		
0.01	☒ Operating Point	
HA	☐ Auto Scale Ranges	
Out	☐ Accumulate Plots	

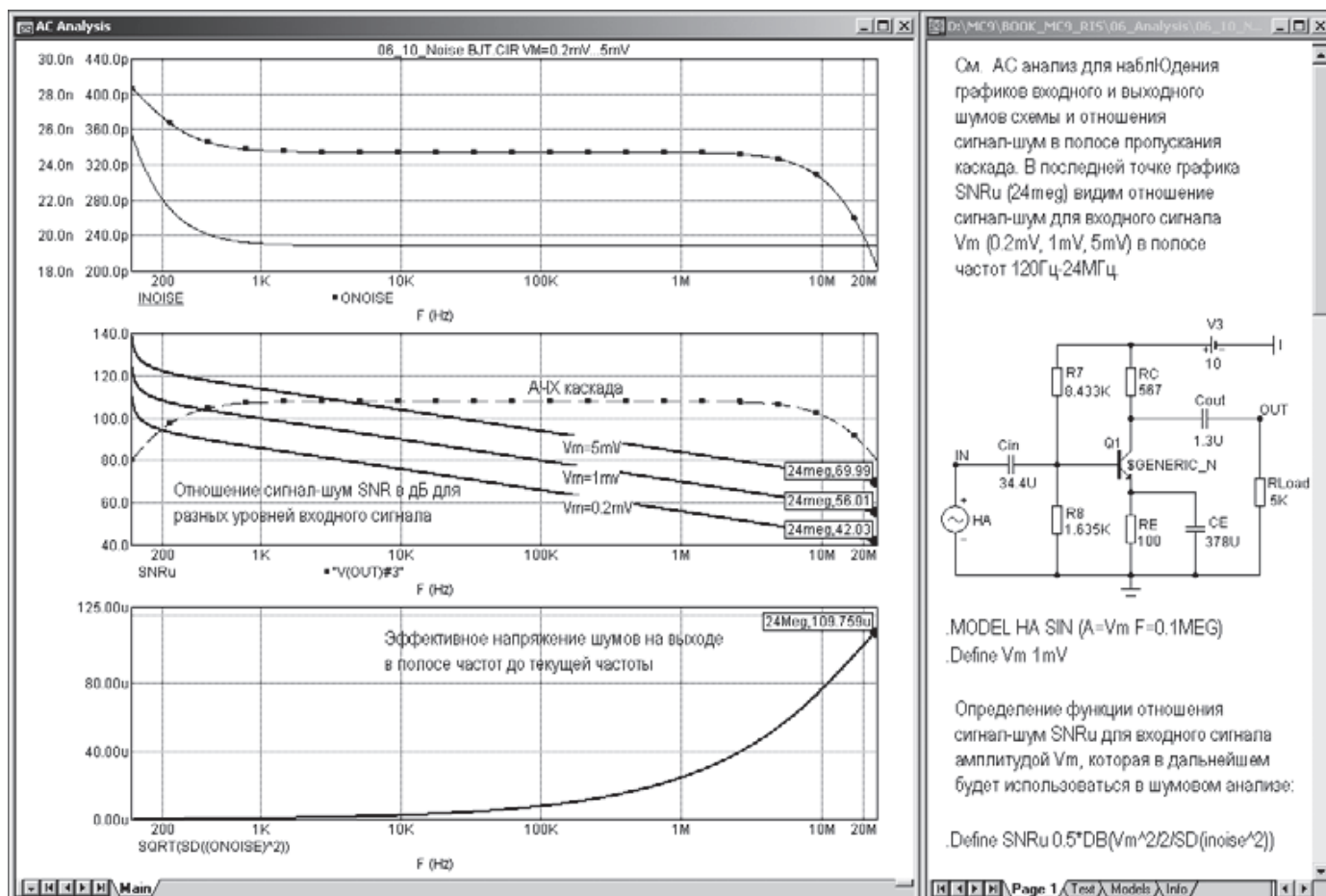
P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range
None	F	INOISE	FMAX,FMIN	440p,200p,40p
None	F	ONoise	FMAX,FMIN	30n,18n,2n
None	F	SNRu	FMAX,FMIN	140,40,20
None	F	SQRT(SD((ONoise)^2))	FMAX,FMIN	125u,0,40u
1	F	V(OUT)	FMAX,FMIN	AutoAlways
None	F	Buffer("V(OUT) vs. F#3")	FMAX,FMIN	140,40,20

а

25meg,120	Run Options	Normal
1001	State Variables	Zero
27		
0.01	☒ Operating Point	
HA	☐ Auto Scale Ranges	
Out	☐ Accumulate Plots	

P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range
1	F	INOISE	FMAX,FMIN	440p,200p,40p
1	F	ONoise	FMAX,FMIN	30n,18n,2n
2	F	SNRu	FMAX,FMIN	140,40,20
3	F	SQRT(SD((ONoise)^2))	FMAX,FMIN	125u,0,40u
N	F	V(OUT)	FMAX,FMIN	AutoAlways
2	F	Buffer("V(OUT) vs. F#3")	FMAX,FMIN	140,40,20

б



в

Рис. 6.11. Анализ шумов в усилительном каскаде

Второй этап — это собственно и есть анализ шумов. Для этого в окне задания параметров анализа для вывода на график задаются исключительно выражения, содержащие INOISE и ONOISE, а в качестве граничных частот Fmin, Fmax задаются граничные частоты усиления Fгр.н., Fгр.в. (рис. 6.11, б). Зададим вывод спектральных плотностей шума на входе и выходе схемы (INOISE, ONOISE); функции отношения сигнал-шум в дБ SNRu (6.2), действующего напряжения шума на выходе схемы (6.1). Следует отметить, что функция SNRu определена директивой .Define на поле схемы (рис. 6.11, в). В окне задания параметров многовариантного анализа Stepping зададим спи-

ском изменение амплитуды входного сигнала V_m : 0.2mV, 1mV, 5mV. После этого можно запустить анализ. Далее необходимо определить отношение сигнал-шум для заданных 3-х значений амплитуд входного сигнала. Для этого надо найти значение функции SNR_u на частоте F_{max} . Выполним команду *Scope>Label Frequency Points...* В открывшемся окне указываем верхнюю частоту 25Meg, устанавливаем опции *On* и *Label Value* и нажимаем ОК. Наблюдаем на графике 3 значения SNR в дБ для разных амплитуд входного сигнала (рис. 6.11, в).

Для наглядности полезно показать АЧХ каскада, ранее сохраненную в буфере. Для этого выполняется команда *Scope>Waveform Buffer...*

(**Ctrl+Shift+B**, ) следом за этим из списка выбирается необходимый график и нажимается *Plot Now*. График появится в новом 4-м графическом окне, для его перемещения, скажем, во второе окно, следует отредактировать установки *AC Analysis Limits* (рис. 6.11, б).

Вычислить отношение сигнал-шум можно и другим способом. Определяется эффективное напряжение шума на выходе в полосе частот 0– $F_{в.гр}$ (3-ий график рис. 6.11, в). Далее вычисление выполняется по формуле:

$$SNR_U = DB \left[\frac{U_{out\ cm}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{SD(onoise^2)}} \right] = DB \left[\frac{U_{in\ cm} \cdot K_U}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{SD(onoise^2)}} \right]. \quad (6.4)$$

Так для входного сигнала амплитудой $V_m=1mV$ получаем:

$$SNR_U = 20 \cdot \log_{10} \left[\frac{1E - 3 \cdot 108,2}{\sqrt{2} \cdot 109,759E - 6} \right] = 56,86 \text{ дБ.}$$

Примеры анализа шумовых характеристик см. в схемных файлах каталога *Analysis\Noise*.

6.2.6. Дополнительная информация по проведению АС анализа

Здесь приведены примеры выражений, а также рекомендации и предостережения, касающиеся проведения АС анализа.

Вывод графиков амплитуды выражений, указанных в графе Y Expression

Для данного метода анализа напряжения и токи имеют комплексные величины. Поэтому, если, к примеру, задано построение графика напряжения $V(OUT)$, будет получен следующий результат:

- 1) Если $IM(V(OUT))=0$, то будет построен график $RE(V(OUT))$;
- 2) Если $IM(V(OUT)) \neq 0$, то будет построен график $MAG(V(OUT))$ (амплитуды комплексного напряжения в узле OUT).

Построение частотных зависимостей комплексных мощностей

Выражения для мощности, используемые в АС анализе, приводят к построению графиков частотнозависимых комплексных мощностей компонентов. Например:

PD(R1) — модуль комплексной мощности, рассеиваемой в резисторе R1;
PS(C1) — модуль комплексной мощности, запасаемой в конденсаторе C1;
PS(D1) — модуль комплексной мощности, запасаемой в диоде D1;
PD(D1) — модуль комплексной мощности, рассеиваемой в диоде D1;
PG(V1) — модуль комплексной мощности, генерируемой источником V1;
PGT — модуль комплексной полной генерируемой мощности;
PST — модуль комплексной полной запасаемой мощности;
PDT — модуль комплексной полной рассеиваемой мощности.

Можно также задать построение графиков мощности в малосигнальной линейной схеме, используя фундаментальные выражения. Например, для построения графика мощности, запасаемой конденсатором C1 и катушкой L1, можно задать $V(C1)*I(C1)$ и $V(L1)*I(L1)$ соответственно. Для построения графика мощности, подводимой к входным узлам A и B четырехполюсника можно задать выражение $(V(A,B))*I(V1)$, где V1 — источник напряжения с нулевой ЭДС, включенный последовательно одному из входных зажимов.

Необходимость расчета статического режима (Operating point)

Если получаются явно неадекватные результаты, убедитесь, что используются корректные начальные условия. Для этого должен быть установлен флажок *Operating point*. Можно посоветовать никогда не отключать данный флаг в рассматриваемом режиме анализа, поскольку расчет малосигнальных параметров имеет смысл лишь после нахождения статического режима, а при произвольно заданных значениях переменных состояния схемы могут получиться неадекватные результаты.

Нулевой результат

Нулевой результат для токов и напряжений схемы может явиться следствием отсутствия источника гармонического сигнала с переменной частотой или, если он все же имеется, то нулевого значения его амплитуды. Необходимо учитывать, что только источники типа PULSE и SINE sources по умолчанию имеют единичную амплитуду гармонического сигнала для данного режима анализа. Функциональные источники (Function sources) генерируют гармоническое возмущение, заданное частотнозависимым выражением в поле атрибута FREQ. Другие источники не подразумевают выдачу гармонического сигнала в данном виде анализа, или имеют нулевую амплитуду, принятую по умолчанию. Таким образом, для указания места приложения гармонического возмущения, чаще всего используется подключение к соответствующим узлам схемы источника PULSE или SINE.

Одновременное задание автоматического шага по частоте (Auto Frequency step) и автомасштабирования (Auto Scale Ranges)

В этом случае первое построение графика будет весьма грубым (график будет изображен в виде ломаной линии). Это происходит потому, что заранее неизвестен масштаб по оси Y, и программа ищет некое весьма грубое приближенное решение, не производя автоматический выбор шага, поскольку максимум шкалы в момент расчета еще неизвестен. Привести графики в надлежащий вид можно двумя способами:

1. Повторно перезапускать анализ, не производя изменений в его параметрах, до тех пор, пока графики не станут достаточно точными;
2. После первого пробного запуска снять флажок *Auto Scale Ranges* и перезапустить анализ.

Плоские характеристики при анализе режекторных и полосовых фильтров

Такой результат получается, если шаг по частоте слишком велик, что приводит в процессе изменения частоты к пропуску сравнительно узкой области подавления (пропускания). Таким образом, на результирующем графике она не будет видна. Обычно такое происходит, когда анализируемый диапазон частот намного (на несколько порядков) превышает протяженность области подавления (пропускания). Для того чтобы избавиться от подобных ложных результатов, необходимо либо приблизить начальную частоту анализа (F_{min}) ближе к предполагаемой области, либо использовать фиксированный шаг расчета. Во втором случае величина шага обязана быть меньше ширины области подавления (пропускания). Это достигается либо увеличением параметра *Number of Points*, либо сужением частотного диапазона, посередине которого должна располагаться область избирательности фильтра. См. пример *ACsample.cir* из каталога *Analysis\AC*.

6.3. Анализ передаточных функций по постоянному току

Вызывается командой ***ANALYSIS>DC*** или ***Alt+3***

Общие положения

В режиме *DC* рассчитываются передаточные характеристики по постоянному току. Ко входам цепи подключаются один или два независимых источника постоянного напряжения или тока. В качестве выходного сигнала может рассматриваться разность узловых потенциалов или ток через ветвь, в которую включен резистор. При расчете режима *DC* программа *закорачивает индуктивности, исключает из схемы конденсаторы и затем рассчитывает режим по постоянному току* при нескольких значениях входных сигналов. Например, при подключении одного источника постоянного напряжения может рассчитываться передаточная функция усилителя, а при подключении двух источников — семейство статических выходных характеристик транзистора. Как правило, режим анализа *DC* и используется в основном для этих двух целей: построения вольтамперных характеристик полупроводниковых и электронных приборов (см. каталог схем *Analysis\DC\BAXu* приборов и схемный файл *IGBT.cir* из каталога *Analysis\DC*) и снятия передаточных характеристик усилителей постоянного тока, не содержащих реактивных компонентов (см. схемы *diffamp.cir*, *MOSdiff.cir*, *UA741.cir*, *UA709.cir*, *RCA3040.cir* из каталога *Analysis\DC*).

После перехода в режим *DC*, программа *Micro-Cap* проверяет правильность построения схемы. При отсутствии ошибок составляется топологическое описание, выполняется подготовка к численному расчету нелинейных

уравнений итерационным методом Ньютона-Рафсона и открывается окно задания параметров моделирования *DC Analysis Limits*.

6.3.1. Задание параметров моделирования DC Analysis Limits

В окне задания параметров расчета передаточных характеристик по постоянному току, показанном на рис. 6.12, имеются следующие разделы:

Команды окна DC Analysis Limits

Run — запуск моделирования. Щелчок на пиктограмме  в строке инструментов или нажатие **F2** также начинает процесс расчета. Моделирование может быть остановлено в любой момент времени нажатием на пиктограмму  или клавишу **Esc**. Последовательные нажатия на пиктограмму  прерывают и затем продолжают моделирование;

Add — добавление еще одной строки спецификации вывода результатов после строки, отмеченной курсором. На этой строке устанавливается способ отображения результатов и аналитические выражения для построения графиков. При наличии большого количества строк, не уместящихся на экране, появляется линейка прокрутки.

Delete — удаление строки спецификации вывода результатов, отмеченной курсором.

Expand — открытие дополнительного окна для ввода строки большого размера при расположении курсора в одной из граф, содержащих выражения, например *Y Expression*;

Stepping — открытие диалогового окна задания вариации параметров;

Properties — открытие диалогового окна задания параметров вывода результатов моделирования (окон графиков, текстовых надписей, толщины и цвета линий и др.);

Help — вызов системы помощи раздела *DC Analysis*.

Числовые параметры окна DC Analysis Limits

Variable 1 — задание первой варьируемой переменной.

В графе *Method* выбирается метод варьирования переменной:

Auto — выбираемый автоматически с целью достижения изменения от точки к точке графика в % не более, чем в указано в позиции *Maximum Change*.

Linear — линейный, задаваемый в графе *Range* по формату $\langle \text{end} \rangle [, \langle \text{start} \rangle [, \langle \text{step} \rangle]]$. Если опустить параметр *Step* (шаг), то шаг будет принят равным $(\text{start} - \text{end})/50$. Если опустить параметр *Start*, то начальное значение будет приравнено к нулю. Переменная *Variable 1* начинает изменяться от значения *start*. Последующие значения указанной переменной рассчитываются добавлением шага *step* и так до тех пор, пока не будет достигнуто конечное значение *end*.

Log — логарифмический, задаваемый в графе *Range* по формату $\langle \text{end} \rangle [, \langle \text{start} \rangle [, \langle \text{step} \rangle]]$. По умолчанию *Start* принимается $\text{end}/10$, *Step* — $\exp(\ln(\text{end}/\text{start})/10) = (\text{end}/\text{start})^{1/10}$. Переменная *Variable 1* начинает изменяться от значения *start*. Последующие значения указанной переменной рассчиты-

ваются умножением на *step* и так до тех пор, пока не будет достигнуто конечное значение *end*.

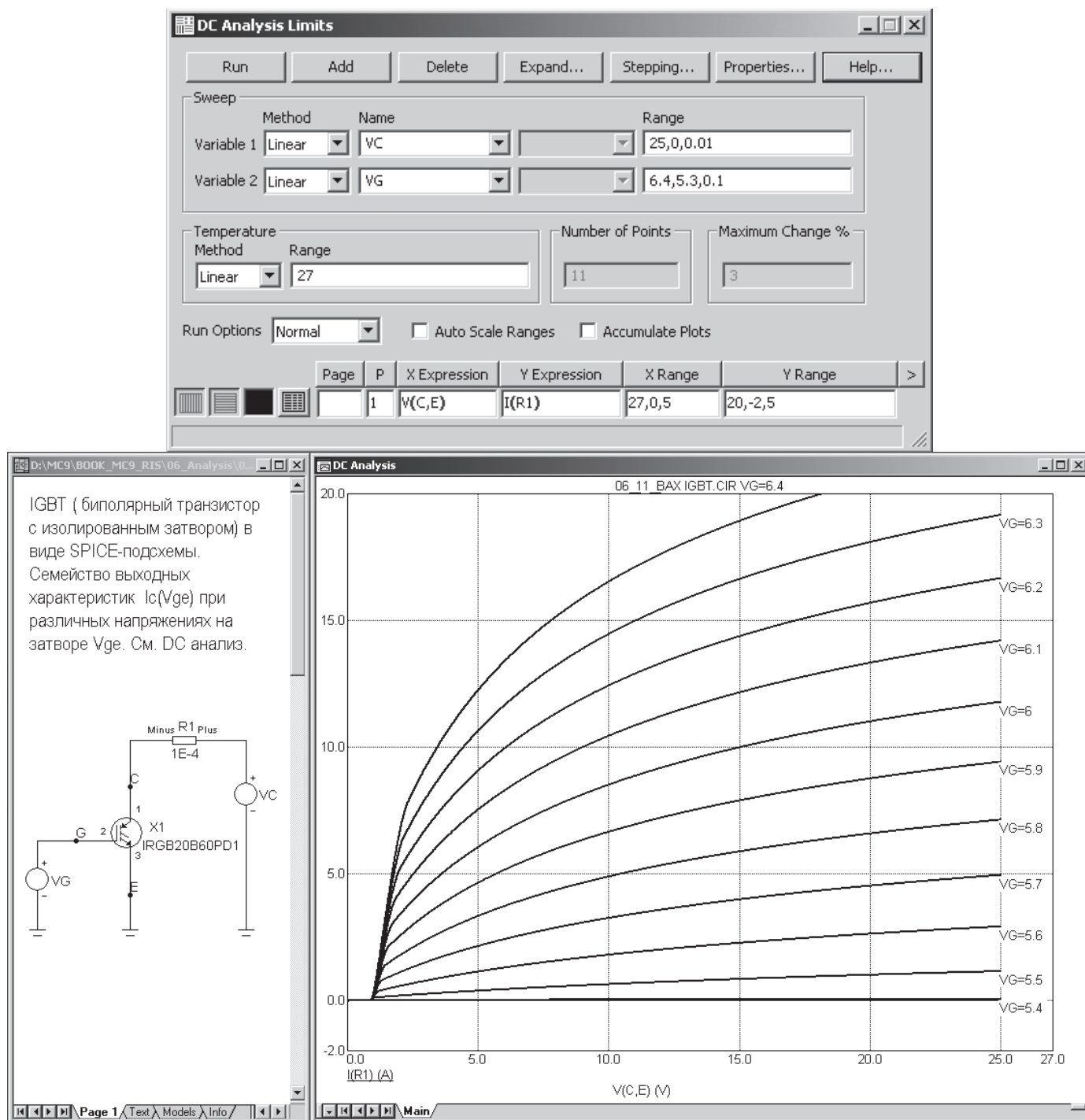


Рис. 6.12. Задание параметров расчета в режиме DC

List — в виде списка значений, разделяемых запятыми по следующему формату: $\langle v1 \rangle [, \langle v2 \rangle [, \langle v3 \rangle] \dots [, \langle vN \rangle]]$. В этом случае переменная просто последовательно принимает значения из списка.

Name. Это поле указывает имя варьируемой переменной *Variable 1*. Это могут быть: величины источника постоянного напряжения или тока; температура; значения одного из параметров модели компонентов, имеющих математические модели; значения символической переменной (определенной директивой .Define). Имя варьируемой переменной может выбираться из списка, открываемого нажатием на кнопку . Если выбирается компонент, имеющий

математическую модель, в следующем открывающемся справа списке выбирается нужный параметр модели.

Range указывает диапазон изменения переменной и шаг, зависящий от метода изменения переменной: линейного или логарифмического (см. выше).

Variable 2. Эта строка определяет поля *Method*, *Name*, и *Range* для второй варьируемой переменной. Для значений, указываемых в этих полях, используются те же правила, что и перечисленные выше для переменной *Variable 1*, за исключением опций в списке *Method*. Здесь исключена опция *auto*, но появилась и дополнительная опция *None*, выбираемая в том случае, если изменяется только одна переменная. По умолчанию шаг *Step* принимается равным $(end - start) / 10$. Каждое значение переменной *Variable 2* приводит к построению отдельного графика.

Для того, чтобы построить семейство вольтамперных характеристик полупроводникового прибора, необходимо подсоединить к выходным узлам (коллектору, стоку) источник напряжения и организовать его изменение в графе *Variable 1*. К затвору (базе) полевого (биполярного) транзистора необходимо также подсоединить источник напряжения (тока) и задать его изменение в поле *Variable 2*. На рис. 6.12. приведен пример построения семейства выходных характеристик биполярного транзистора с изолированным затвором IGBT.

В версии программы MC10 в качестве изменяемых переменных (*Variable 1*, *Variable 2*) могут выступать также и сопротивления резисторов.

Temperature — диапазон изменения температуры в градусах Цельсия. Имеет поля *Method* и *Range*.

Method: Указывает один из методов изменения температуры: линейный (*Linear*), логарифмический (*Log*) и список (*List*).

Range: При выборе линейного (*Linear*) и логарифмического (*Log*) методов изменения имеет формат *High[,Low[,Step]]*. Если параметр *Low* пропущен, то он принимается равным *High*. Если параметр *Step* (шаг) пропущен, то по умолчанию он принимается равным $(high - low)$ в линейном и $high/low$ в логарифмическом режимах изменения. Изменение температуры начинается от значения *Low*, затем увеличивается на значение *Step* в линейном и умножается на значение *Step* в логарифмических режимах, и так до тех пор, пока не будет достигнуто значение температуры равное *High*.

При выборе метода *List* указывается список температур, разделяемых запятыми: $\langle t1 \rangle [, \langle t2 \rangle [, \langle t3 \rangle [, \dots]]$, где $t1, t2, \dots$ — отдельные значения температуры.

При изменении температуры изменяются параметры компонентов, имеющие ненулевые температурные коэффициенты ТС, а также ряд параметров полупроводниковых приборов. Кроме того, значение установленной здесь температуры может использоваться в различных выражениях, она обозначается как переменная TEMP. Анализ, проведенный для одного значения температуры, приводит к построению отдельного графика (семейства графиков). Когда температура выбирается в качестве одного из варьируемых параметров (*Variable1*, *Variable2*), поле изменения *Range* недоступно.

Number of Points — количество точек данных, по которым осуществляется интерполяция при построении графиков, или количество строк в таблице вывода результатов (*numeric output*). По умолчанию устанавливается равным

11 и всегда устанавливается нечетным, для того чтобы получалось четное количество интервалов. Ширина интервала печати определяется исходя из начального и конечного значения первой переменной как $(\langle final1 \rangle - \langle initial1 \rangle) / (\langle Number of points \rangle - 1)$. Количество расчетных точек равное $\langle Number of points \rangle$ печатается в файл числового вывода (numeric output) для каждого значения переменной *Variable 2*.

Maximum change, %. Действует только при выборе метода *auto* изменения переменной *Variable1*. Представляет собой максимально допустимое приращение графика первой функции на одном шаге (в процентах от полной шкалы). Если график функции изменяется быстрее, то шаг приращения первой переменной автоматически уменьшается.

Опции окна *DC Analysis Limits*

Run Options — управление выдачей результатов расчетов:

Normal — результаты расчетов не сохраняются на диске.

Save — сохранение результатов расчетов в бинарном дисковом файле $\langle \text{имя схемы} \rangle .dsa$,

Retrieve — считывание последних результатов расчета из дискового файла $\langle \text{имя схемы} \rangle .dsa$, созданного ранее. При этом производится построение графиков и таблиц, как после обычного расчета.

Auto Scale Ranges — присвоение признака автоматического масштабирования "Auto" по осям X, Y для каждого нового варианта расчетов. Если эта опция выключена, то принимаются во внимание масштабы, указанные в графах *X Range*, *Y Range*.

Accumulate Plots — накопление графиков в графических окнах при редактировании схемы в одновременно открытом окне схемного редактора, при регулировке параметров с помощью движков (Sliders). Выполнение команды

Clear Accumulated Plots  приведет к очистке графических окон от накопленных кривых при последующем запуске анализа.

Параметры вывода результатов моделирования

Ниже раздела «Числовые параметры» и слева от раздела «Выражения» расположена группа пиктограмм. Нажатие каждой пиктограммы определяет характер вывода данных, задаваемых в той же строке. Имеются следующие возможности:

  **X Log/Linear Scale** — переключение между логарифмической и линейной шкалой по оси X. При выборе логарифмической шкалы диапазон изменения переменной должен быть положительным.

  **Y Log/Linear Scale** — переключение между логарифмической и линейной шкалой по оси Y. При выборе логарифмической шкалы диапазон изменения переменной должен быть положительным.

 **Color** — вызов меню для выбора одного из 64 цветов для окрашивания графиков. График окрашивается в цвет кнопки;

 **Numeric Output** — при нажатии этой кнопки в текстовый выходной файл заносится таблица отсчетов функции, заданной в графе *Y Expression*.

Запись производится в файл <имя схемы>.dno. Таблицу можно просмотреть в окне *Numeric Output* (открывается нажатием клавиши **F5**). Число отсчетов функции (число строк в таблице) задается параметром *Number of Points* в разделе «Числовые параметры»;

Кроме того в MC10 имеются возможности задания сохранения и вывода кривых:



Save and Plot — сохранить расчетные точки графика и построить его в графическом окне.



Save and Don't Plot — сохранить расчетные точки графика и не рисовать его в графическом окне.



Don't Save or Plot — не сохранять расчетные точки графика и не рисовать его в графическом окне.

Page — в графе указывается имя страницы графических окон, что позволяет группировать графики и увеличивать общее число графических окон свыше 9. Одновременный вывод графиков из различных графических страниц осуществляется командой *Windows>Split Horizontal (Vertical)* или путем манипуляций с разделителями окон (см. рис. 3.1).

Plot Group — в графе **P** числом от 1 до 9 указывается номер графического окна, в котором должна быть построена данная функция. Все функции, помеченные одним и тем же номером, выводятся в одном окне. Если это поле пусто, график функции не строится.

Форматы выражений для DC анализа

Поля используются для спецификации масштабов и переменных, откладываемых по горизонтальной (X) и вертикальной (Y) осям.

X Expression — математическое выражение переменной, откладываемой по оси X.

Y Expression — математическое выражение переменной, откладываемой по оси Y.

X Range — масштаб по горизонтальной оси (оси X).

Y Range — масштаб по вертикальной оси (оси Y).

Формат указания масштабов **range** следующий:

<high> [, <low>] [, <grid spacing>] [, <bold grid spacing>]

<low> по умолчанию устанавливается в нулевое значение.

[, <grid spacing>] — устанавливает расстояние между линиями координатной сетки (необязательный параметр).

[, <bold grid spacing>] — устанавливает расстояние между утолщенными линиями координатной сетки (необязательный параметр).

Два последних параметра используются только на линейных шкалах. Логарифмическая шкала использует расстояние между линиями дополнительной сетки, равное 1/9 от основной.

Указание *Auto* в позиции *X range* (*Y range*) приводит к однократному автоматическому масштабированию по соответствующей оси и заполнения полей полученными значениями масштабов. Установка флага *Auto Scale Ranges* приводит к автоматическому расчету масштабов всех графиков по

всем осям при каждом повторении расчетов и соответствующему обновлению полей *X Range* и *Y Range*.

Команда *Auto Scale* (**F6**, ) приводит к автомасштабированию всех построенных графиков без изменения параметров масштаба в окне выражений. Команда *Auto Scale* использует количество делений координатной сетки, указанное в окне *Properties* (**F10**), которое вызывается командой *Properties>Scales and Formats>Auto/Static Grids*. Команда *Scope>Restore Limit Scales* (**CTRL+HOME**) восстанавливает масштаб графиков, указанный в окне выражений.

Щелчок правой клавишей мыши на поле *Y expression* вызывает списки различных математических выражений. Эти списки позволяют выбрать для заполнения соответствующего поля: переменные (*Variables*), константы (*Constant*), функции (*Functions*), операторы (*Operators*), кривые из буфера графиков (*Buffer*) или расширить поле для редактирования слишком длинного выражения (*Expand*).

Изменение размеров окна *DC Analysis Limits*

Аutomасштабирование диалогового окна осуществляется нажатием на кнопку . Приводит к установке размеров диалогового окна в соответствии с длиной математических выражений.

Ручное масштабирование окна осуществляется стандартным способом — протяжкой мышью правого нижнего угла окна, а также изменением размера полей в поле графиков путем протяжки левой клавишей мыши разделителей между полями *Page*, *P*, *X Expression*, *Y Expression*, *X Range*, *Y Range*.

6.3.2. Меню режимов расчета передаточных функций DC

После перехода в режим расчета передаточных функций в строке меню появляется новое меню **DC**, содержащее пункты *RUN*, *Limits*, *Stepping*, *Optimize*, *Analysis Window*, *Watch*, *Breakpoints*, *Operating Point Methods*, *3D Windows*, *Performance Windows*, *Slider*, *Numeric Output*, *State Variables Editor*, *Reduce Data Points*, *Exit*. Состав этих команд одинаков для всех видов анализа.

Меню DC

Run (**F2**, ) — запускает анализ.

Limits (**F9**, ) — открывает диалоговое окно **Analysis Limits**.

Stepping (**F11**, ) — открывает диалоговое окно многовариантного анализа **Stepping**.

Optimize (**CTRL+F11**, ) — открывает окно задания параметров оптимизации.

Analysis Window (**F4**, ) — приводит к показу построенных графиков на экране. Включается автоматически после запуска анализа.

Watch (CTRL+W) — приводит к открыванию окна *Watch*, где можно определить выражения для переменных, выводимых в этом окне при нажатой кнопке , при задании точек останова или анимации.

Breakpoints (ALT+F9) — открывает диалоговое окно установки точек останова расчета *Breakpoints*. Точки разрыва представляют собой булевы выражения, которые переводят программу в режим расчета одной точки на каждый запуск при нажатии , так чтобы при нажатой кнопке  можно было наблюдать значения заданных переменных и выражений.

Примеры: $V(A) \geq 1 \text{ AND } V(A) \leq 1.5$, $V(OUT) > 5.5$.

Operating Point Methods (CTRL+SHIFT+O) — позволяет выбрать один из пяти численных методов расчета схемы по постоянному току и последовательность их применения в порядке понижения приоритетов. См. 6.1.7.

3D Windows (, ) — позволяет добавить или удалить 3-мерный график в окне. Команда доступна, когда построено более одного варианта графика.

Performance Windows (, ) — открывает окно графиков дополнительных функций *Performance*, применяемых к ранее построенным в режиме основного анализа графикам. Команда доступна только при построении более одного варианта графика.

Slider — позволяет добавить или удалить движок, управляющий изменением какого либо параметра схемы.

Numeric Output (, **F5**) — показывает окно результатов расчета в виде таблиц значений.

State Variables editor (F12, ) — вызывает редактор начальных значений переменных состояния *State Variables editor*.

Reduce Data Points — открывает окно уменьшения числа выводимых на график точек данных. Позволяет выводить на график лишь каждую N-ую точку рассчитанных данных. Это полезно, когда для достижения точности устанавливается очень маленький шаг, что затрудняет быструю прорисовку графиков. Удаленные точки в этом же сеансе расчета не могут быть восстановлены.

Exit Analysis (F3) — выход из режима анализа *DC*.

6.3.3. Использование табличного вывода данных

Таблицы числовых данных могут быть получены для любого графика, если для него активизировать пиктограмму  в левой части панели вывода результатов моделирования. Таблицы числового вывода сохраняются в текстовом файле <имя схемы>.dno и могут быть выведены в окне *Numeric Output*, которое доступно из меню *DC* анализа, а также при нажатии кнопки  или клавиши **F5**. Содержимое файла с числовыми данными будет зависеть от установок закладки *Numeric output* диалогового окна *Properties (F10)*.

Подробности управления числовым выводом рассмотрены в 6.1.6.

6.3.4. Проблемы сходимости

Анализ по постоянному току (*DC*) является наиболее проблемным с точки зрения сходимости методов расчета. Это происходит потому, что в этом случае отсутствуют инерционные компоненты (катушки индуктивности и конденсаторы), которые способствуют сходимости алгоритмов расчета, как, например, происходит в режиме анализа *Transient*. Если возникают подобные расчетные проблемы, можно попробовать изменить начальное значение переменной или шаг, чтобы выйти за пределы области, где алгоритм расчета расходится.

Можно также попробовать изменить численный метод расчета схемы по постоянному току с помощью команды *DC>Operating Points Methods* (см. 6.1.7). Следует отметить, что выбор метода, отличного от стандартного метода Ньютона-Рафсона (*Standard Newton-Rafson*), приведет к значительному возрастанию времени расчета.

6.4. Динамический анализ режима по постоянному току

Вызывается командой ***Analysis>Dynamic DC*** или ***Alt+4***.

Анализ *Dynamic DC* — представляет собой интерактивный процесс, в ходе которого пользователь модифицирует схему, а программа сразу же вслед за этим рассчитывает результат и отображает его на схеме. Процесс состоит из следующих этапов:

- Пользователь модифицирует схему;
- Программа Micro-Cap выполняет анализ схемы по постоянному току;
- Режим по постоянному току сразу отображается на схеме.

Для отображения текущего режима схемы по постоянному току имеются 4 кнопки. Каждая кнопка может включать/отключать отображения на схеме соответствующих величин:



— напряжений в узлах схемы;



— токов выводов компонентов;



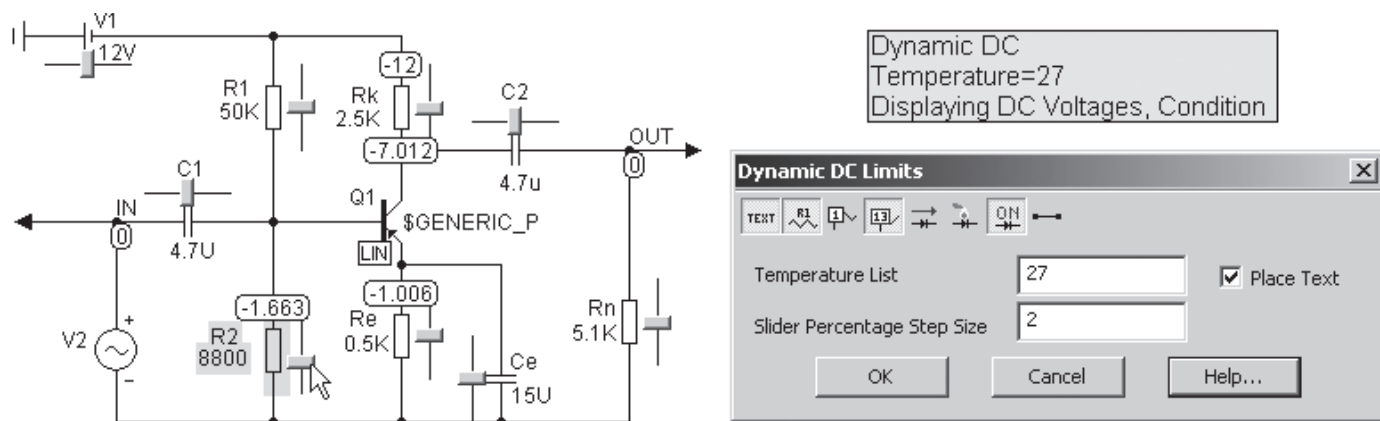
— мощностей, рассеиваемых на компонентах;



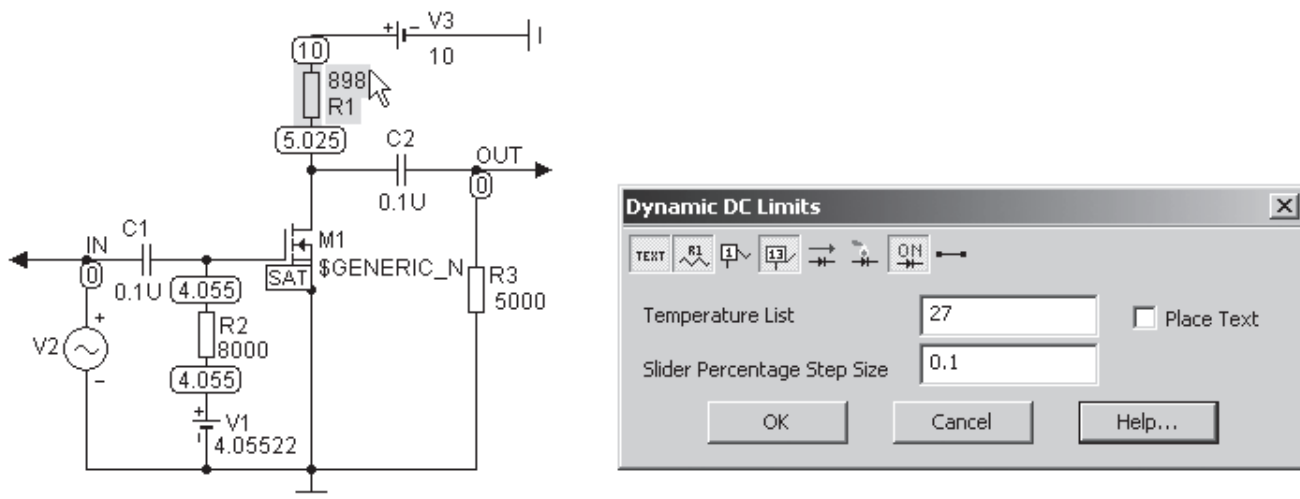
— состояний полупроводниковых приборов (ON, OFF, SAT, LIN, и т.д.).

Эти пиктограммы выведены по умолчанию на панель инструментов схемы, однако при анализе *Dynamic DC* они появляются и в окне *Dynamic DC Limits* (рис. 6.13).

После запуска режима анализа *Dynamic DC*, по умолчанию активизируется кнопка показа узловых потенциалов . Для отображения на схеме других желаемых величин включаются/отключаются соответствующие кнопки. После запуска анализа и закрытия окна *Dynamic DC Limits* можно производить любые изменения в схеме. Можно добавлять/удалять соединительные проводники, компоненты, изменять значения параметров компонентов и др. Программа в ответ будет рассчитывать новый режим по постоянному току и отображать на схеме величины, его характеризующие.



а)



б)

Рис. 6.13. Отображение результатов расчета режима по постоянному току в режиме Dynamic DC

Напряжения батарей, источников напряжения, токи источников тока, сопротивления резисторов могут изменяться при проведении анализа Dynamic DC одним из двух способов:

- Путем выбора компонента и протяжки мышью движка регулировки его величины (slider). Показ движковых регуляторов может быть разрешен/запрещен флажком *Show Slider* закладки *Slider* диалогового окна *Preferences* (**SHIFT+CTRL+P, P**). По умолчанию показ движков выключен. Эти слайдеры – еще один тип слайдеров MC9, MC10 (первый тип был рассмотрен в пункте 6.1.8). Минимальные и максимальные величины регулируемых параметров компонентов для этого типа слайдеров не задаются. Перемещение движков может вызвать установку значений, при которых численный алгоритм расчета расходится. Например, по неосторожности можно установить отрицательные значения активных сопротивлений.
- Путем выбора компонента и использования клавиш $\downarrow$ (*Down*) и $\uparrow$ (*Up*) дополнительной клавиатуры для уменьшения и увеличения величины компонента соответственно. При этом способе регулировки, можно синхронно регулировать величины параметров выделенной группы компонентов на фиксированное изменение в процентах (которое задается в поле *Slider Percentage Step Size*) при каждом нажатии соответствующей клавиши.

Следует также отметить, что перемещение компонента на свободное поле, обычно вызывает диагностическое сообщение об отсутствии пути по постоянному току на землю («*No DC path to ground*»). Поскольку такое перемещение компонентов типично для данного вида анализа, программа автоматически устанавливает флаг *Add DC Path to Ground* на всё время его проведения. После окончания данного вида анализа исходное значение данной опции восстанавливается.

6.4.1. Особенности использования кнопок отображения режима по постоянному току в Transient, AC и DC анализе

Отметим, что кнопки, перечисленные выше, включают индикацию соответствующих величин не только для режима анализа *Dynamic DC*. После окончания режима анализа переходных процессов (*Transient*) индицируемые величины по умолчанию представляют собой значения в конечной точке расчета переходных процессов ($T=T_{max}$), которая, как правило, не является режимом по постоянному току, за исключением случая, когда в окне *Transient Analysis Limits* установлен флаг *Operating Point Only*. Кроме того в MC9, MC10 имеется возможность выбора показа  последних (last), среднеквадратических (RMS), средних (Average) и амплитудных (Peak) значений при установке их вычислений на закладке *View* окна *Properties* принципиальной схемы (см. также 3.3.7 и схемный файл *FFT7.cir* из каталога *Analysis\Transient*).

После окончания AC анализа по умолчанию индицируются результаты последнего расчета рабочей точки на постоянном токе, если таковой имел место. После окончания режима DC анализа индицируются величины, соответствующие последнему рассчитанному режиму по постоянному току (последняя точка DC анализа).

6.4.2. Окно Dynamic DC Limits

После запуска режима *Dynamic DC* появляется окно *Dynamic DC Limits* (см. рис. 6.13). Оно содержит следующие разделы:

Кнопки индикации, управляющие составом выводимой на экран информации о текущем режиме по постоянному току:

-  — показ текста на схемном поле;
-  — показ позиционных обозначений и номиналов компонентов;
-  — показ номеров узлов;
-  — показ напряжений аналоговых узлов или логических состояний цифровых узлов;
-  — показ токов ветвей;
-  — показ мощностей, рассеиваемых в ветвях;
-  — показ состояний p-n переходов: *LIN* — линейный режим, *ON* — переход открыт, *OFF* — переход закрыт, *ZENER* — переход в состоянии пробоя; *SAT* — находится в режиме насыщения, *HOT* — перегрев, превышена допустимая рассеиваемая мощность;

-  — показ соединений между выводами компонентов.

Temperature list. В этой строке указывается температура, при которой выполняется анализ.

Slider Percentage Step Size — процентное изменение величины компонента при каждом нажатии клавиш ↑(Up Arrow) или ↓(Down Arrow)

Place Text — разрешение вывода на свободное поле текстового блока с основными параметрами анализа.

Командные кнопки:

- **OK:** Заккрытие диалогового окна с переходом к выполнению анализа в соответствии с текущими установками окна.
- **Cancel:** Заккрытие диалогового окна с переходом к выполнению анализа, при этом все изменения установок диалогового окна игнорируются.
- **Help:** Вызов подсказки по диалоговому окну.

Величины на схеме, характеризующие режим по постоянному току, при анализе *Dynamic DC* показываются внутри неокрашенных прямоугольников (4.75), для того, чтобы отличать от анализа *Dynamic AC*, в котором величины индицируются внутри окрашенных (серым) прямоугольников (2.389m, 69.9).

По команде *Analysis>Dynamic DC* производится расчет режима по постоянному току и его отображение на чертеже схемы. Причем если на закладке *Slider* окна *Preferences* () включен параметр *Show Slider*, то на схеме у УГО компонентов размещаются движковые регуляторы — при их перемещении движением курсора изменяются номинальные значения этих компонентов, и на схеме отображаются новые значения режима по постоянному току, как показано на рис. 6.13. Процентное изменение параметра резистора (батареи) в динамическом режиме при перемещении движка мышью устанавливается в окне *Dynamic DC Limits* в позиции *Slider Percentage Step Size* (см. рис. 6.13).

Объем выводимой на схему информации определяется нажатием пиктограмм кнопок индикации. При выполнении команды *Analysis>Dynamic DC* по

умолчанию нажата пиктограмма , остальные пиктограммы пользователи включают по мере надобности. Так в примерах рис. 6.13 дополнительно на-

жата кнопка  для отображения состояния транзисторов.

Данный режим (*Dynamic DC*) может быть очень полезен для настройки режима по постоянному току усилительного каскада (или многокаскадных усилителей), т.к. позволяет легко менять положение рабочей точки, контролируя при этом токи, напряжения, мощности и состояния полупроводниковых приборов. Так в примерах рис. 6.13 изменением параметров схемы добиваются усилительного режима транзистора и напряжения на выходе каскада в диапазоне 1/3...2/3 от напряжения питания. Приведенные примеры использования режима *Dynamic DC* находятся в схемных файлах *us_bjt_оэ_настройка.cir*, *us_nmos_оу_настройка.cir* из каталога *Analysis\Dynamic DC*.

В первом примере каскад в исходном состоянии не обладает необходимыми усилительными свойствами, в чем можно убедиться, запустив режим анализа *Transient* — каскад будет искажать синусоидальный сигнал, ограни-

чивая его с одной стороны. Настройка производится изменением величины резистора R2 движком в режиме *Dynamic DC* при включенной дополнительно кнопке , до тех пор, пока транзистор не окажется в усилительном режиме (*LIN*, *HOT*) и напряжение на коллекторе не будет приблизительно равно половине напряжения питания (см. рис. 6.13, а). После этого можно снова запустить *Transient* анализ и убедиться в надлежащей работе усилительного каскада.

Во 2-м примере (рис. 6.13, б) все делается аналогично, только настройка каскада выполняется изменением сопротивления резистора R1 в цепи стока или смещения на затворе — напряжения батареи V1. Следует отметить, что при настройке усилительных каскадов на МОП транзисторах (NMOS, PMOS) и полевых транзисторах с управляющим переходом (NJFET, PJFET), для нормальных усилительных свойств каскада следует добиваться нахождения транзистора в режиме насыщения (*SAT*) или небольшого перегрева (*HOT*). Это связано с терминологией описания работы полевого транзистора. Пологий участок выходных характеристик транзисторов данного типа называется участком *насыщения* тока стока. Этот участок и соответствует нахождению прибора в нормальном усилительном режиме. Однако он по принятой терминологии называется участком насыщения *Saturation* (*SAT*), а крутой участок — линейным режимом *Linear* (*LIN*). Т.е. усилительный и ключевой режимы биплярного и полевого транзистора имеют противоположные обозначения состояний в программе Micro-Cap.

В заключение следует отметить, что в рассматриваемом режиме анализа выводимая информация часто загромождает чертеж схемы, создавая неудобства для восприятия результатов. В этом случае можно посоветовать отключать текстовые атрибуты компонентов  и схемный текст , а также использовать управление форматом выводимых величин. Формат числовых данных, выводимых на схему в режиме *Dynamic DC*, задается в позиции *Schematic Voltages/Current/Power* на закладке *Format* окна *Preferences* .

6.5. Динамический анализ малосигнальных передаточных функций в частотной области

Вызывается командой ***Analysis>Dynamic AC*** или ***Alt+5***. Позволяет проводить расчет малосигнальных передаточных функций при ряде значений частот и изменении параметров схемы.

Этот режим во многом похож на режим *Dynamic DC*. Отличие состоит в том, что при изменении значений компонентов схемы (*R*, *L*, *C*, *Battery*) в ее узлах динамически отображаются малосигнальные коэффициенты передачи по напряжению в размах (или децибелах) по отношению к входному узлу (узлу, к которому подключен источник сигнала). В этом режиме через диалоговое окно *Dynamic AC Limits* (рис. 6.14) может быть дополнительно включено отображение передач по току и мощности. Также для динамического отображения малосигнальных характеристик может быть задан ряд частот (в списке *Frequency List*) и ряд температур (*Temperature List*). В этом случае переход к следующей частоте (температуре) в списке осуществляется с помощью кно-

пок диалогового окна *AC Analysis Limits* — *Start*, *Next*. Изменение схемных параметров для данной точки расчета может быть осуществлено после закрытия окна *Dynamic AC Limits* нажатием на кнопку *OK*. Снова включить его можно через главное меню *Dynamic AC* или нажатием *F9*.

6.5.1. Установки диалогового окна *Dynamic AC Limits*

В этом режиме программа запускает малосигнальный частотный анализ для заданного списка частот и отображает на схеме комплексные значения напряжений, токов, мощностей. При запуске данного вида анализа на экране появляется окно *Dynamic AC Limits* (рис. 6.14), позволяющее выполнить ряд установок для проведения анализа.

Диалоговое окно содержит следующие разделы:

Кнопки индикации, управляющие отображением на поле схемы различной информации:



— показ текстовой информации, набранной в режиме Text Mode;



— показ текстовых атрибутов параметров компонента;



— показ номеров узлов схемы;



— показ узловых потенциалов;



— показ токов выводов компонентов



— показ мощностей компонентов схемы



— показ концов выводов компонентов (для проверки правильности соединений)

Каждая кнопка имеет независимое управление, так, что можно установить любой желаемый набор для индикации на схеме. После закрытия диалогового окна можно управлять информацией, выводимой на схему с помощью аналогичных кнопок, находящихся на панели инструментов.

Параметры схемы (величины емкостей *C3* и *C4*) оптимизируются для получения максимальной мощности в нагрузке на частоте 4 GHz. См. AC и Dynamic AC анализ и последующую оптимизацию. Ответ должен быть *C3* = 3.3pF and *C4* = 1.89pF.

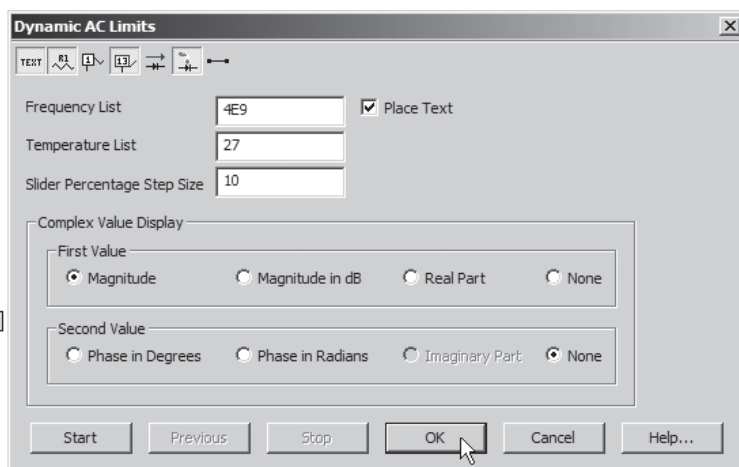
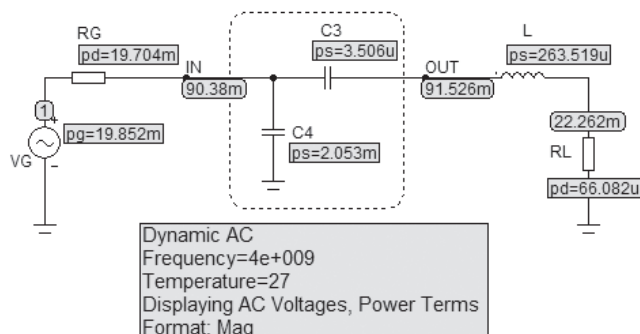


Рис. 6.14. Использование режима *Dynamic AC* для оптимизации мощности в активной нагрузке

Frequency List — список значений частоты для проведения ряда расчетов схемы по переменному току на малом сигнале. Анализ *Dynamic AC* всегда использует фиксированный список значений частоты, а не изменяющийся по

линейному или логарифмическому закону в заданном диапазоне как в обычном АС анализе.

Temperature — значение температур, при которых выполняется анализ.

Slider Percentage Step Size — процентное изменение величин компонентов (сопротивлений резисторов, напряжений батарей, токов источников, индуктивностей катушек, емкостей конденсаторов и пр.) при каждом нажатии клавиш $\uparrow$, $\downarrow$ дополнительной клавиатуры или перемещении движков.

Complex Value Display — совокупность двух вспомогательных панелей, определяющих способ индикации величины на схеме. Как известно результаты анализа линеаризованной схемы по переменному току представляют собой комплексные величины. Их значение, как правило, состоит из двух частей, например, действительная и мнимая часть или модуль и аргумент в виде угла. В соответствии с этим каждая из дополнительных панелей управляет отображением соответствующей части комплексной величины:

First Value. Позволяет выбрать, какую величину выводить на индикацию в качестве первой части комплексного числа. Можно вывести:

- *Magnitude* — амплитуду комплексной величины $Mag = \sqrt{Re^2 + Im^2}$.
- *Magnitude in dB* — значение амплитуды комплексного числа, выраженное в дБ. $Mag_{dB} = 20 \cdot \log_{10}(Mag)$.
- *Real Part* — действительную часть комплексной величины.
- *None* — отсутствие отображения первой части комплексной величины в любых видах.

Second Value. Позволяет выбрать, какую величину выводить на индикацию в качестве второй части комплексного числа. Можно вывести:

- *Phase in Degrees* — фазу (аргумент) комплексной величины в градусах.
- *Phase in Radians* — фазу (аргумент) комплексной величины в радианах.
- *Imaginary Part* — мнимую часть комплексной величины.
- *None* — отсутствие индикации второй части комплексной величины в любых видах.

Place Text: Установка этого флага помещает на поле схемного редактора текстовую информацию, содержащую текущие параметры анализа: частоту, температуру, формат комплексных чисел.

Start. Запуск анализа *Dynamic AC*. Нажатие на эту кнопку запускает анализ по переменному току для первой частоты в списке. После первого нажатия кнопка исчезает, зато появляются две других кнопки: **Previous** (предыдущее значение частоты) и **Next** (следующее значение частоты).

Previous. Нажатие на эту кнопку запускает анализ по переменному току для предыдущего (по отношению к текущему) значения частоты в списке.

Stop. Останавливает анализ, на схеме остается индикация рассчитанных комплексных величин для последнего значения частоты (перед нажатием кнопки). При этом кнопка **Previous** перестает быть активной, а кнопка **Next** трансформируется в кнопку **Start**.

OK: Выход из диалогового окна *Dynamic AC Limits*. После этого действия возможно изменение значений компонентов схемы с динамическим отображением режима по переменному току для текущего значения частоты из списка.

Cancel: Выход из диалогового окна *Dynamic AC Limits* без сохранения установок, сделанных в текущем сеансе. При этом выбранный режим анализа остается активным, при изменении значений компонентов схемы происходит динамическое отображение режима по переменному току для текущего значения частоты из списка.

Help: Вызов информации об установках диалогового окна.

Суммируя сказанное, можно сказать следующее. Пока диалоговое окно *Dynamic AC Limits* отображается на экране, каждое нажатие на кнопки **Start/Next** или **Previous** приводит к выполнению анализа по переменному току для соответствующего значения частоты с отображением рассчитанных комплексных величин на схеме. После закрытия диалогового окна, осуществляемого нажатием кнопки **OK**, программа реагирует на любые изменения в схеме, выполняя после каждого изменения анализ по переменному току для текущего значения частоты и отображая его результаты на измененной схеме. Менять можно и топологию схемы (удаляя компоненты и добавляя новые), и величины компонентов с помощью движковых регуляторов (Sliders) и с помощью клавиш $\downarrow$, $\uparrow$ дополнительной клавиатуры.

Отображение комплексных величин на схеме в данном режиме имеет одну особенность. Прямоугольники, внутри которых находится комплексная величина, имеют заливку (по умолчанию серым цветом) $(2.389m, 69.9)$ для отличия от отображения величин в режиме *Dynamic DC*, в котором прямоугольниками с числами не имеют заливки (4.75) .

На рис. 6.14 показан пример максимизации мощности в активной нагрузке RL на частоте 4 ГГц путем подбора емкостей конденсаторов C3, C4 (схемный файл *opt3.cir* из каталога *Analysis\Dynamic AC*). При этом из режима *Dynamic AC* вызывается оптимизатор командой *Dynamic AC>Optimize* (**Ctrl+F11**, ). Оптимизации будет посвящен отдельный раздел, здесь кратко опишем процесс задания параметров. Окно оптимизатора (рис. 6.15) содержит следующие панели:

- **Find** — здесь задаются оптимизируемые параметры. В нашем примере — это емкости конденсаторов C3, C4. В столбцах Low, High задаются верхний ($1E-15F$) и нижний ($1E-9$) пределы их изменения.
- **That** — здесь задается то, чего требуется достигнуть в процессе оптимизации (или целевая функция). В рассматриваемом примере требуется получить максимальную мощность в нагрузке Pd(RL).
- **Settings** — здесь выбирается метод проведения оптимизации. В MC10 (рис. 6.15) возможно использование 4-х методов оптимизации, в MC9 — только двух.

После нажатия кнопки **Optimize** запускается процесс оптимизации. После его останова в графе **Optimized** можно увидеть подобранные значения емкостей. Для их переноса в схему следует нажать кнопку **Apply**, а следом за этим — **Close**.

Теперь можно запустить обычный малосигнальный анализ в частотной области AC и убедиться в правильности подобранных параметров для достижения заданной цели (рис. 6.16).

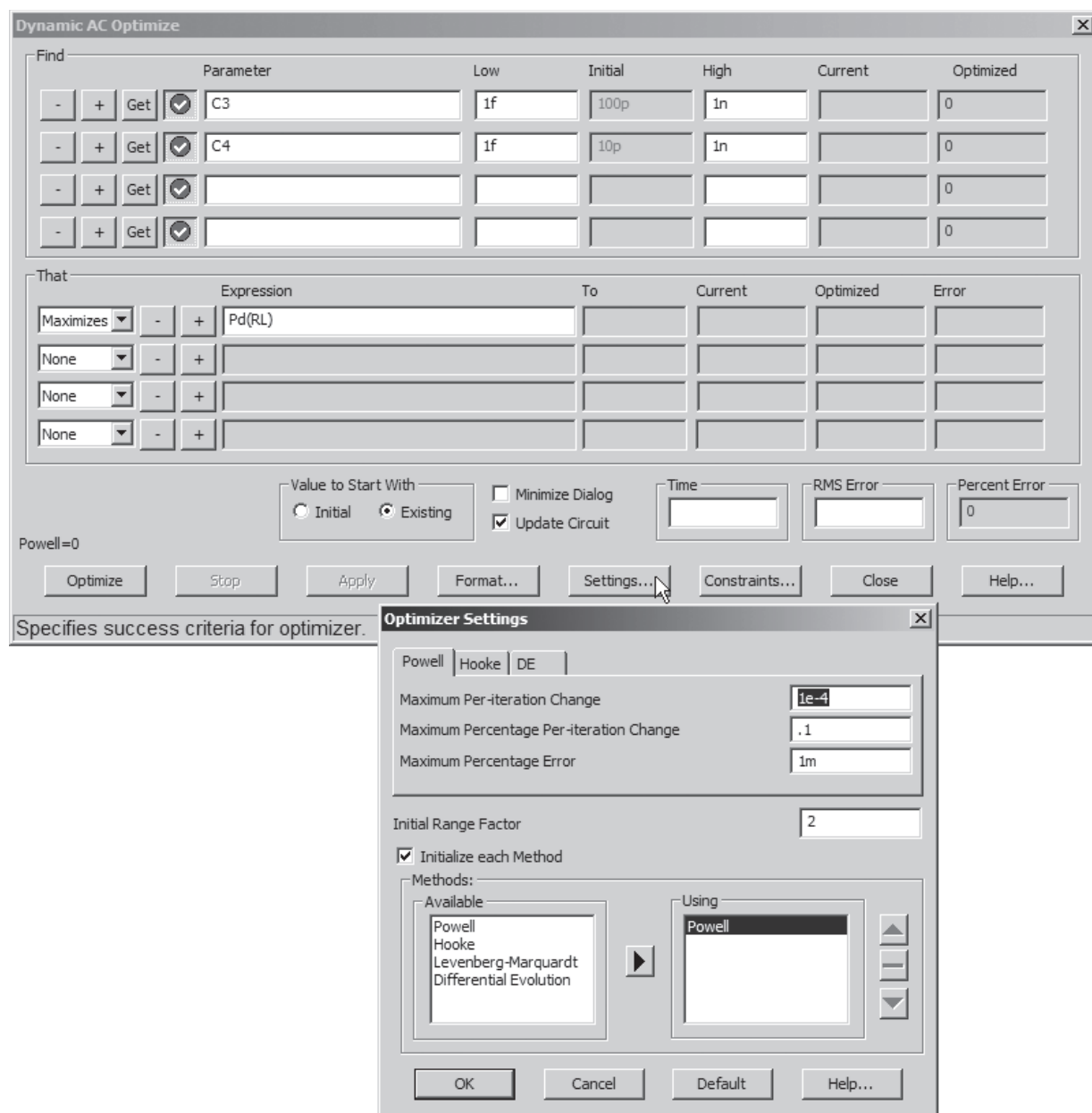


Рис. 6.15. Оптимизация в режиме Dynamic AC

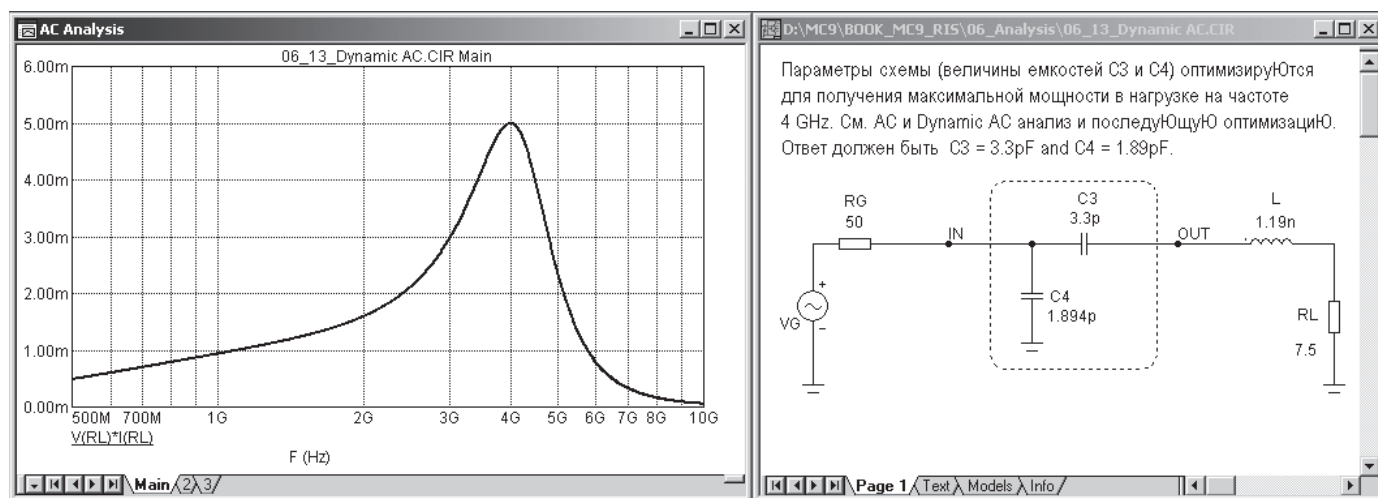


Рис. 6.16. Частотный анализ схемы после проведения оптимизации

Следует отметить, что при использовании оптимизации в режиме анализа *Dynamic AC* она осуществляется для последних заданных списками значений частоты и температуры.

6.6. Анализ чувствительностей на постоянном токе

Вызывается командой **Analysis>Sensitivity** или **Alt+6**

Анализ *Sensitivity* вычисляет малосигнальные чувствительности на постоянном токе одного или нескольких выходных выражений к изменению одной или нескольких входных переменных. Чувствительность определяется как отношение:

$$\text{Чувствительность} = \frac{\text{Изменение вых. выражения}}{\text{Малое изменение вх. переменной}} = \frac{\partial(\text{output expression})}{\partial(\text{input expression})}.$$

Малое изменение в знаменателе является принципиальным, поскольку ищется приближенное значение частной производной выходного выражения по входной переменной в рабочей точке по постоянному току. При проведении расчета используется отклонение входной величины, равное 1E-6 от ее значения в рабочей точке по постоянному току, если же это значение равно нулю, то используется абсолютное значение отклонения, равное 1E-6.

Количество выходных данных (значений чувствительностей) зависит от того, какие были произведены установки в диалоговом окне *Sensitivity analysis* (рис. 6.17). Можно выбрать одну входную переменную или несколько. В последнем случае при установке опции *All on*, программа может запустить длительный расчет большого количества частных производных, результатом которого явится объемная таблица выходных значений. Так, например, при установке опций *All On* и *Model*, каждый МОП-транзистор с моделью уровня 3 потребует расчет 51 частной производной в рабочей точке по постоянному току, а модель МОП-транзистора 5 уровня — несколько сотен.

6.6.1. Установки диалогового окна *Sensitivity Analysis*

Диалоговое окно анализа чувствительностей (рис. 6.17) на постоянном токе *Sensitivity Analysis* имеет следующие разделы:

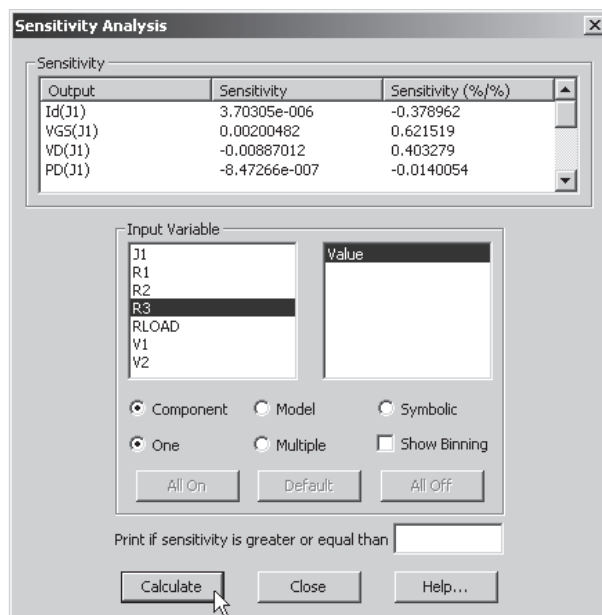
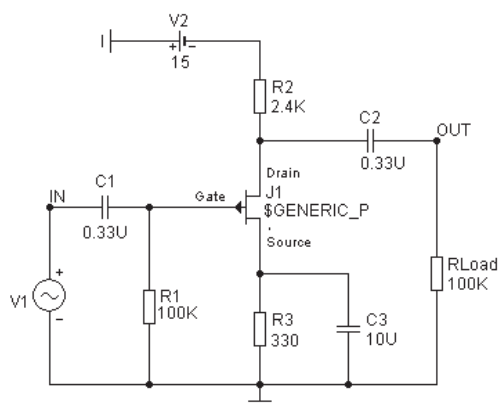
Таблица чувствительностей *Sensitivity*. Здесь указываются желаемые выходные выражения. Сюда же возвращаются рассчитанные значения чувствительностей. Таблица содержит 3 колонки:

- *Output* — столбец, в котором указываются одно или более выходных выражений. Каждое выражение помещается на новую строку. Для редактирования списка выражений достаточно щелкнуть на нем мышью. Для добавления нового выражения, необходимо щелкнуть мышью на пустой строке и набрать новое выражение.
- *Sensitivity*. В эту колонку помещаются значения чувствительностей, вычисленные как обычное отношение (частные производные выходного выражения по входной переменной в рабочей точке по постоянному току).
- *Sensitivity (%/%)*: В эту колонку помещаются значения чувствительностей, выраженных как отношение процентного отклонения выходного выражения к вызвавшему это отклонение процентному отклонению входной переменной.

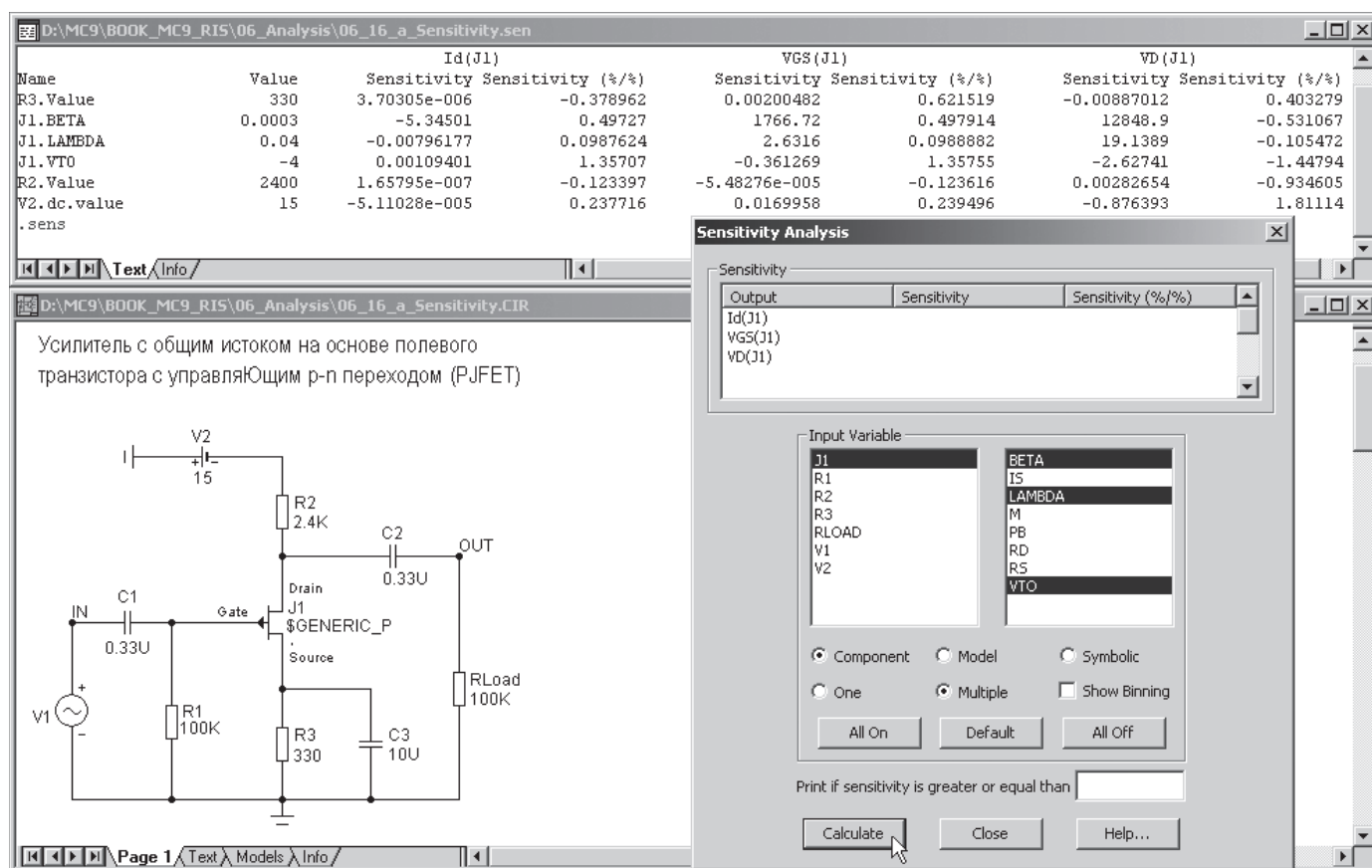
Оба варианта вычисленных чувствительностей выводятся в колонках рассматриваемой таблицы, если используется только одна входная переменная (рис. 6.17, а). Если указано более одной входной переменной результаты

расчета будут помещаться в текстовый файл <имя схемы>.sen, содержимое которого будет также показано и после нажатия кнопки *Calculate* (рис. 6.17, б).

Усилитель с общим истоком на основе полевого транзистора с управляющим р-п переходом (PJFET)



а



б

Рис. 6.17. Анализ чувствительностей в усилителе с общим истоком

Группа входных переменных Input Variable: Используется для указания совокупности входных переменных. Опции этой панели полностью аналогичны опциям диалогового окна *Stepping*.

- *Component* — указывает на простой выбор одного из параметров компонента в качестве входной переменной.

- *Model* — указывает параметр модели компонента в качестве входной переменной, вариация затрагивает все компоненты, имеющие такую же модель.
- *Symbolic* — указывает в качестве входной символическую переменную, определенную директивой *.Define*.
- *One* — выбирает единственный параметр в качестве входной переменной.
- *Multiple* — выбирает множество параметров в качестве входных переменных. Точнее, указывает в качестве входных переменных те параметры, которые выделены в группе входных переменных (рис. 6.17, б).

Для определения того, какие параметры будут варьироваться из множества параметров (*Multiple*) используются следующие командные кнопки:

- *All On* — позволяет выбрать в качестве входных переменных все параметры всех компонентов, что обычно ведет к созданию выходного файла большого размера.
- *Default* — выбирает в качестве входных параметров специальный набор параметров для всех компонентов или если выбрана опция *Model* — то набор параметров всех моделей. Набор устанавливается таким, чтобы он соответствовал наиболее частому использованию.
- *All Off* — отменяет выбор всех параметров компонентов в качестве входных переменных. Результат выполнения этой операции соответствует полному отсутствию входных переменных. После выполнения этой команды нужные параметры можно выбрать вручную щелчком левой клавиши мыши при нажатой клавише **CTRL**.

Calculate — запускает расчет всех указанных чувствительностей.

Close — закрывает диалоговое окно анализа чувствительности.

6.6.2. Пример использования анализа чувствительности

Рассмотрим пример: два варианта анализа чувствительности схемы усилителя с общим стоком на полевом транзисторе (см. рис. 6.17 и схемный файл *US_JFET_OI.cir* из каталога *Analysis\DC Transfer Sensitivity*).

Анализ чувствительности по постоянному току запускается по команде **Analysis>Sensitivity**. В графе *Output* указывается одно или несколько выражений для выходных переменных, каждое выражение на отдельной строке, в рассматриваемом примере: $I_D(J1)$, $V_{GS}(J1)$, $V_D(J1)$, $P_D(J1)$. В окне *Input Variable* в первом варианте (рис. 6.17, а) выбирается один входной параметр, например, величина сопротивления в цепи стока R3. Результаты расчета чувствительности, в приведенном примере это

после нажатия на панель *Calculate* помещаются в графу *Sensitivity*. В графе *Sensitivity %/%* помещаются значение приращения выходной переменной в процентах, разделенное на изменение входного параметра в процентах (см. рис. 6.17, а). Во втором варианте расчета чувствительности устанавливается флаг *Multiple* и выбирается множество параметров в качестве входных переменных: R3, J1.Beta, J1.Lambda, J1.VTO, R2, V2 (см. рис. 6.17, б). В этом случае после нажатия кнопки *Calculate* результаты расчета будут помещены не в таблицу диалогового окна, а в текстовый выходной файл *US_JFET_OI.sen*, который по завершению расчетов выведется на экран (см. рис. 6.17, б).

6.7. Анализ малосигнальных передаточных функций на постоянном токе

Вызывается командой **Analysis>Transfer Function** или **Alt+7**

Анализ *Transfer Function* позволяет рассчитать малосигнальную передаточную функцию по постоянному току для указанного выходного выражения по отношению к указанному входному источнику. В зависимости от вида входного источника и выходного выражения производится расчет следующих малосигнальных параметров:

- Коэффициента передачи по напряжению, если входной источник — источник напряжения, выходное выражение — напряжение между узлами.
- Коэффициента передачи по току, если входной источник — источник тока, выходное выражение — ток ветви;
- Передаточной проводимости (Transconductance), если входной источник — источник напряжения, выходное выражение — ток ветви;
- Передаточного сопротивления (Transadmittance), если входной источник — источник тока, выходное выражение — напряжение между узлами.

При проведении данного вида анализа автоматически рассчитываются также малосигнальные входные и выходные сопротивления схемы на постоянном токе.

Для измерения передаточных функций программа дает очень малое приращение величине напряжения (тока) входного источника и измеряет вызванное этим возмущением изменение выходного выражения. Затем вычисляет отношение этих двух приращений. Вычисленная величина и есть малосигнальная передаточная функция по постоянному току.

Для измерения входного сопротивления также дается небольшое приращение величине напряжения (тока) входного источника и измеряется соответствующее изменение входного тока (напряжения). Отношение указанных приращений представляет собой величину малосигнального входного сопротивления.

Для измерения выходного сопротивления подключается тестовый источник напряжения к узлам, которые указаны в поле в *Output Expression* (рис. 6.18). Например, если в строке *Output Expression* записано выражение $V(10,20)$, то это приведет к подключению тестового источника напряжения между узлами 10 и 20 схемы.

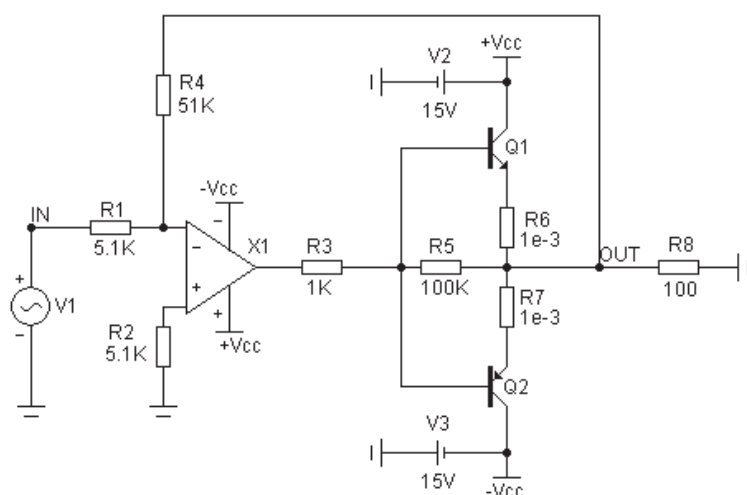
Если в *Output Expression* не записано никаких узлов, а содержится выражение типа "IB(Q1)", выходное сопротивление не будет рассчитываться и в графе результата будет напечатано N/A (значение недоступно). Если узлы, указанные в этом выражении, подсоединены к батарее, катушке индуктивности или другим компонентам, напряжение на которых предопределено, в графе результата будет напечатано 0.0, поскольку сопротивления указанных компонентов постоянному току равны нулю. На заключительном этапе дается малое приращение тестовому источнику напряжения и измеряется изменение тока через него. Отношение приращений будет представлять собой выходное сопротивление.

6.7.1. Диалоговое окно анализа Transfer Function

По команде **Analysis>Transfer Function** выполняется расчет малосигнальных передаточных функций на постоянном токе. Задание на расчет составляется в диалоговом окне, показанном на рис. 6.18 (см. также схемный файл *UM_01.cir* из каталога *Analysis\DC Transfer Sensitivity*). В строке **Output Expression** указывается выражение для выходной переменной, в строке **Input Source Name** — имя входного источника (напряжения или тока). В качестве выходной переменной может использоваться любая переменная или функция, имеющая смысл при анализе режима по постоянному току, например, напряжение между узлами A и B — $V(A,B)$ или ток в резисторе R1 — $I(R1)$. В качестве входной переменной может быть использовано напряжение или ток источника напряжения или тока, например, VIN . Расчет производится после нажатия на кнопку **Calculate**.

Двухтактный усилитель мощности.

См. Transient, AC, DC, Transfer, Sensitivity.



```
Output Expression = V(OUT)
Input Source Name = V1
Transfer Function = -9.99853
Input Impedance = 5100.68
Output Impedance = 0.0115895
```

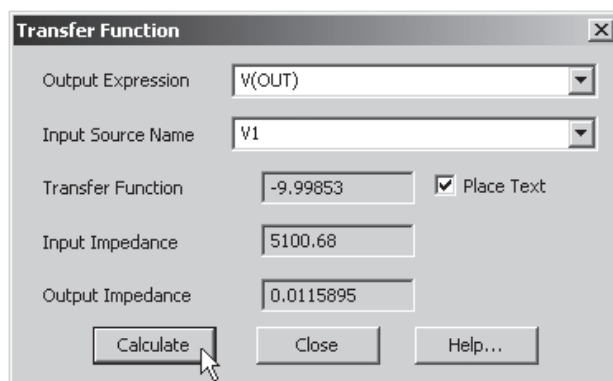


Рис. 6.18. Диалоговое окно **Transfer Function** и текстовая информация о результатах расчетов

Результаты расчета передаточной функции, например $d\{V(A,B)\}/d\{V_{IN}\}$, выводятся в строке **Transfer Function**. Кроме того, в строках **Input (Output) Impedance** указываются значения входного (выходного) сопротивлений. При выборе опции **Place Text** результаты расчета помещаются в виде текстового блока непосредственно на схему (рис. 6.18).

Резюме. Все перечисленные выше в 6.3, 6.4, 6.6, 6.7 режимы анализа являются разновидностями анализа по постоянному току и выполняются *при исключении из схемы конденсаторов и закорачивании катушек индуктивности*.

6.8. Анализ нелинейных искажений в MC9

Запускается командой **Analysis>Distortion** или **Alt+8**.

Анализ искажений (**Distortion**) представляет собой разновидность анализа переходных процессов. При этом виде анализа ко входам схемы подключается источник синусоидального напряжения (тока), а на выходе измеряются его искажения путем использования функций спектрального анализа, например IHD (Individual Harmonic Distortion).

Когда сигнал идеальной синусоидальной формы прикладывается к входу линейной схемы, сигнал на выходе тоже будет представлять идеальную синусоиду с той же частотой. Спектральные составы сигналов на входе и на выходе в этом случае одинаковы, за исключением, возможно, значений амплитуд и фаз. Случай прохождения гармонического сигнала и сигнала сложной формы через линейную схему соответствует отсутствию нелинейных искажений.

Если схема не является абсолютно линейной, на выходе появятся сигналы с частотами, кратными частоте входного синусоидального сигнала. В результате выходной сигнал обогатится высшими гармониками. Это и есть проявление нелинейных искажений, вносимых схемой в передаваемый сигнал. Функция спектрального анализа *IHD* (Individual Harmonic Distortion, см. 4.7.6) рассчитывает отношение в процентах амплитуды указанной высшей гармоники к амплитуде первой гармоники, т.е. определяет вклад каждой гармоники в общий коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник).

Данный вид анализа предоставляет пользователю дополнительные возможности при анализе усилительных схем на предмет нелинейных искажений. Отметим, что все функции, доступные при использовании этого вида анализа, могут быть запрограммированы в режиме *Transient* с помощью опций **FFT** и функций спектрального анализа (см. 4.7.6, 6.1.2, 7.4). Однако их правильный ввод и установка опций **FFT** требуют специальных знаний и развитых навыков работы с программой Micro-Cap.

Для проведения анализа искажений ко входу схемы обязательно должен быть подключен источник синусоидального сигнала (*Sine Source* или *SPICE*-источники *Voltage Source*, *Current Source*). Все параметры источника входного сигнала устанавливать необязательно, поскольку амплитуда и частота выбираются в диалоговом окне *Distortion Analysis Limits*.

Отдельного вида анализа для расчета интермодуляционных искажений в MC9 нет, но эти искажения могут быть рассчитаны при совместном использовании функций *FFT* и функций *Performance* (см. пример *Demo11.cir* и 2.5.11).

Задание параметров моделирования *Distortion Analysis Limits*

Для демонстрации и объяснения установок данного вида анализа рассмотрим пример расчета искажений двухтактного усилителя мощности (рис. 6.19).

Диалоговое окно *Distortion Analysis Limits* имеет следующие поля для ввода исходных данных.

Fundamental Frequency. Это частота гармонического сигнала, используемая при анализе искажений. Согласно этому значению устанавливается частота входного синусоидального источника при выполнении анализа.

Input Source Name: имя источника входного сигнала (в качестве которого могут выступать независимые источники *Sine*, *Voltage Source* или *Current Source* синусоидальной формы. Его присутствие в схеме на входе схемы обязательно для данного вида анализа.

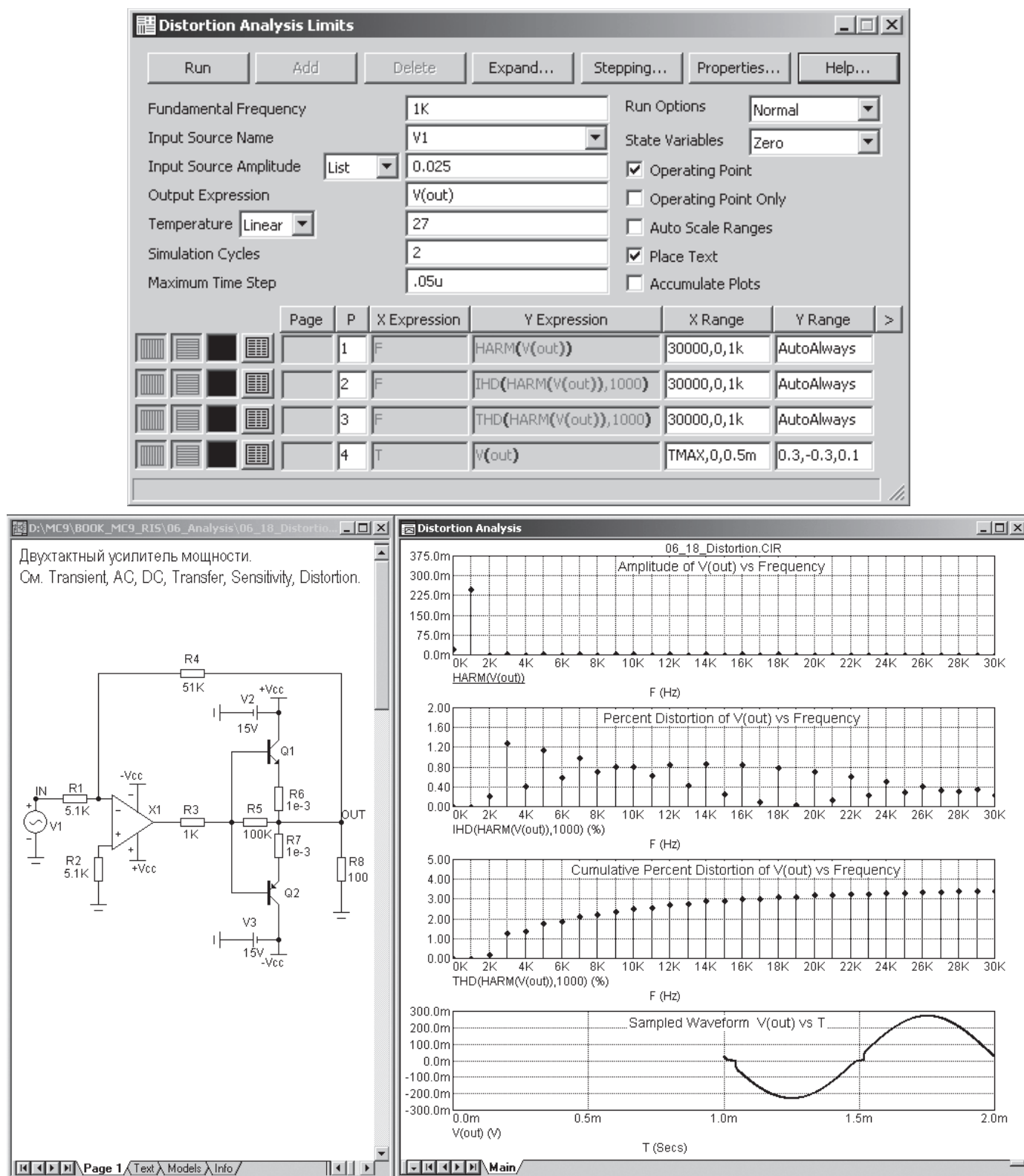


Рис. 6.19. Анализ нелинейных искажений усилителя в режиме DISTORTION

Input Source Amplitude — диапазон или список значений амплитуд сигнала входного источника, при которых будет производиться анализ искажений.

- **List.** Список значений амплитуд, в котором перечисление ведется через запятую, например 100mv,10mv, 1mv.
- **Linear.** Задание линейного диапазона изменения амплитуды с определенным шагом End, Start, Step. Пример: 1.0, 0.5, 0.1.
- **Log.** Задание логарифмического диапазона изменения амплитуды с шагом: End, Start, Multiplier. Пример: 1.0, 0.01, 10

Для всех перечисленных способов ввода значений амплитуды соблюдается общий формат задания варьируемых параметров. Если необходимо в дополнение варьировать другой параметр, можно сделать соответствующие установки в диалоговом окне *Stepping*.

Output expression: выходная функция, анализируемая на искажения. Обычно это простое выражение типа $V(out)$. Однако в принципе оно может иметь любой вид. Так, например, можно анализировать на искажения активную мощность, выделяемую на нагрузке $PD(RLOAD)$ и пр.

Temperature: Задаёт значения температуры, при которых производится анализ согласно принятому в программе формату варьирования параметров.

Simulation Cycles — число периодов входного гармонического сигнала основной частоты, в течение которых выполняется расчет переходных процессов. Этого времени должно быть достаточно для выхода схемы на установившийся режим. Для усилителей без емкостных связей (как в рассмотренном примере) обычно достаточно 1–3 периодов сигнала основной гармоники. Для усилителей с емкостными связями (см. рис. 6.17) для повышения точности может понадобиться и большее количество периодов (10–20). Для обоих случаев для минимизации времени переходных процессов рекомендуется устанавливать опцию *Operating Point*.

Следует отметить, что хотя расчет переходных процессов выполняется в течение заданного количества периодов гармонического воздействия, спектральный анализ производится для последнего периода сигнала. Например, если задана фундаментальная частота $F_0=1\text{кГц}$ и 2 периода, Micro-Cap выполнит моделирование переходных процессов до момента времени $T_{\max}=2/F_0=2/1\text{к}=2*1\text{мс}=2\text{мс}$. Затем для проведения спектрального анализа нелинейных искажений будет использован последний период расчета, т.е. промежуток времени от конца 1-го периода до конца 2-го периода, т.е. от 1мс до 2мс. Эта часть сигнала в виде одного периода искаженной синусоиды и будет выведена на соответствующем графике (*Sampled Waveform*) для выходного сигнала (см. рис. 6.19).

Maximum Time Step: Максимальная величина шага по времени при расчете переходных процессов. Обычно устанавливается в пределах от 0.001 до 0.01 от периода входного сигнала для достаточной точности расчета отклика на выходе и его быстрого преобразования Фурье.

Ряд функций спектрального анализа для характеристики искажений ограничен 3-мя функциями, которые уже имеются в окне графиков и не могут быть изменены пользователем:

HARM(u) — расчет гармоник сигнала u ;

THD(S,F) — коэффициент нелинейных искажений спектра S , в процентах относительно уровня составляющей на частоте F ;

IHD(S,F) — коэффициент нелинейных искажений отдельных составляющих спектра S , в процентах относительно уровня составляющей на частоте F .

Пример анализа искажений в двухтактном усилителе мощности показан на рис. 6.19 (схемный файл *UM_01.cir* из каталога *Analysis\Distortion*).

В рассмотренном примере на вход схемы подается синусоида частотой 1кГц и амплитудой 25мВ от источника $V1$, в качестве которого используется

синусоидальный источник напряжения Sine Source. Анализ производится в течение 2 периодов (2 мс), выходное напряжение V(Out) подвергается спектральному анализу на интервале от 1 мс до 2 мс. На график выводятся амплитуды гармоник выходного напряжения (функция HARM), коэффициент нелинейных искажений отдельных составляющих спектра (IHD), суммарный коэффициент гармоник (THD).

Графики показывают что искажения типа ступенька двухтактного усилителя мощности имеют сложный гармонический состав. Четные и нечетные гармоники имеют разные огибающие. Присутствие четных гармоник обусловлено неотбалансированностью ОУ. Полный коэффициент гармоник составляет величину 3,7% для входного сигнала 25мВ.

Особенности моделирования

Как уже отмечалось, выбор функций спектрального анализа в этом режиме моделирования ограничен, а их параметры определяются основной частотой. Поэтому пользователь не может вносить изменения в поля *Y Expressions*. Можно лишь менять набор FFT-функций, запрещая или разрешая их в графе P. Можно также редактировать масштабы в графах X range, Y range, что и выполнено в приведенном примере (рис. 6.19). Однако после сохранения и перезагрузки схемы исходные данные в позиции X range для FFT-функций восстанавливаются в соответствии с заданной основной частотой, т.е. верхняя граница устанавливается равным ее десятикратному значению (10000 в примере рис. 6.19).

Искажения имеют сильную зависимость от начальных условий анализа. Данная зависимость особенно сильно проявляется при недостаточно большом количестве периодов основной частоты. Убедиться в этом можно, запустив анализ искажений усилителя с емкостными связями при установленном и сброшенном флажке *Operating Point* (см. пример *US_JFET_OI.cir*). Для этого примера сильное расхождение результатов при сброшенном и установленном флажке *Operating Point* наблюдается даже при числе периодов равном 20.

Кроме того, *искажения сильно зависят от уровня входного сигнала* из-за нелинейности передаточных характеристик схем. Например, для усилителей класса А, при возрастании амплитуды входного сигнала, они увеличиваются. Для усилителей класса В (АВ) при возрастании входного сигнала искажения сначала уменьшаются (из-за уменьшения относительного размера «ступеньки»), затем увеличиваются из-за ограничения выходного сигнала (см. пример *UM_02.cir* из каталога *Analysis\Distortion*).

6.9. Анализ искажений в MC10

Анализ нелинейных искажений (HarmonicDistortion) основан на расчете гармонических составляющих выходного сигнала с частотами в целое число раз большими частоты входного синусоидального воздействия. Данная разновидность анализа искажений подобна анализу DISTORTION в MC9, однако предоставляет многие дополнительные возможности и удобства, отсутствовавшие в предыдущих версиях.

Анализ интермодуляционных искажений (Intermodulation Distortion) также основан на расчете гармонических составляющих выходного сигнала. Но в

этом случае анализируются так называемые комбинационные составляющие, частоты которых являются суммой или разностью частот, кратных частоте каждого из двух входных гармонических воздействий.

Для анализа интермодуляционных искажений на вход схемы подается сигнал в виде суммы двух синусоид с частотами f_1 и f_2 . Значения частот и амплитуд этих синусоид определяются используемой методикой измерения IMD (все-го их три). При этом комбинационные составляющие первого порядка — это гармоники выходного сигнала с частотами f_1 и f_2 , комбинационные (интермодуляционные) составляющие второго порядка — гармоники выходного сигнала с частотами (f_1+f_2) и $(f_1 - f_2)$, а комбинационные составляющие третьего порядка — гармоники с частотами $(2f_1+f_2)$, $(2f_1-f_2)$, (f_1+2f_2) , и (f_1-2f_2) .

Комбинационные гармоники 2-го порядка обычно значительно отличаются по частоте от входных синусоидальных сигналов, тогда как частоты комбинационных составляющих 3-го порядка обычно близки к этим частотам.

Анализ интермодуляционных искажений (Intermodulation Distortion) — новый вид анализа в программе MC10. Он обеспечивает построение графиков сигналов H1 (первой гармоники каждого из входных сигналов), IM2 (интермодуляционных составляющих второго порядка), и IM3 (интермодуляционных составляющих 3-го порядка) в зависимости от уровней входного сигнала (VIN), выходного сигнала (VOUT), входной мощности PIN, или выходной мощности POUT.

При проведении обоих видов анализа, можно строить графики напряжений или мощностей в абсолютных единицах, в процентах, в dB, что соответствует общепринятым методам анализа радиотехнических и аудио-устройств.

Оба указанных типа анализа вызываются из меню **Analysis**.

6.9.1. Анализ гармонических искажений **Harmonic Distortion**

Все ранее сказанное об анализе нелинейных искажений DISTORTION в версии MC9 (см. 6.8) относится и к этому виду анализа в MC10.

Некоторые виды анализа гармонических искажений доступны в ходе проведения анализа переходных процессов Transient. Но это можно сделать только с использованием вспомогательных функций Фурье-анализа (FFT). Использование *Harmonic Distortion* упрощает начальную установку параметров анализа (это делается автоматически) и получение необходимых графиков, характеризующих нелинейные искажения схемы (без использования вспомогательных функций из раздела PERFORMANCE).

Для проведения анализа искажений (Harmonic Distortion), к входу схемы должен быть подключен источник синусоидального напряжения или тока (Sine source, Voltage Source или Current Source типов SIN). Частота и амплитуда его сигнала устанавливаются в окне задания параметров данного вида анализа (Harmonic Distortion Analysis Limits).

Диалоговое окно *Harmonic Distortion Analysis Limits*

В качестве примера демонстрации возможностей анализа рассмотрена схема PSS2 из каталога *Analysis\DISTORTION\MC10* (рис. 6.20), представляющая собой усилитель мощности звуковой частоты. При запуске в меню *Analysis* пункта *Harmonic Distortion* появляется диалоговое окно задания параметров этого вида анализа (рис. 6.20). Оно содержит следующие поля:

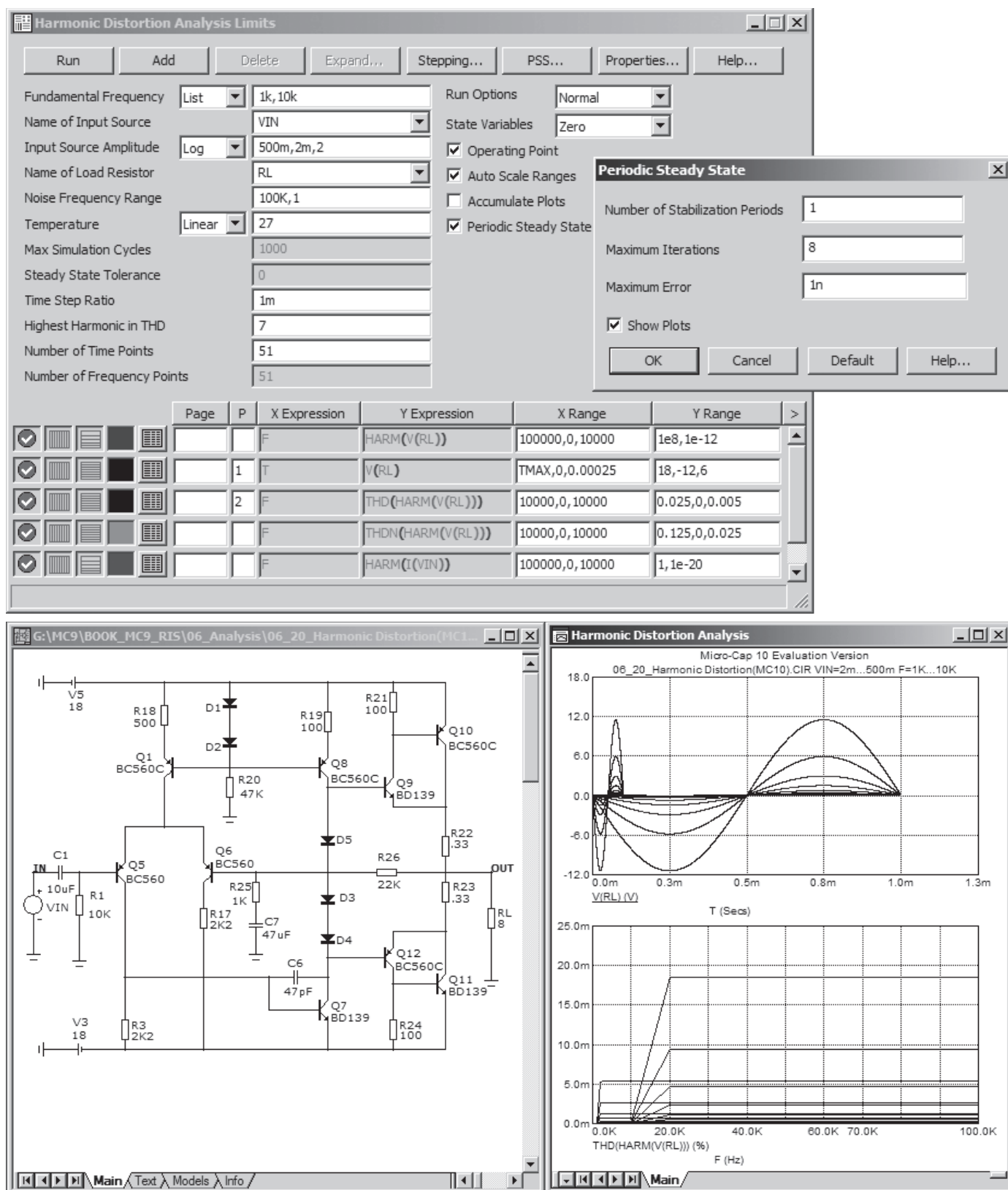


Рис. 6.20. Окно задания параметров анализа Harmonic Distortion в MC10

Fundamental Frequency. Установка основной частоты (частоты первой гармоники) входного сигнала F_0 . Такую частоту будет иметь сигнал синусоидального источника, подключенного ко входу схемы (заданного в графе *Name of Input Source*).

Расчет может быть выполнен не только для одного значения частоты входного сигнала, но и для нескольких. При этом частоты можно задать тремя способами: списком (**List**), диапазоном с линейным шагом (**Linear**) и диапазоном с логарифмическим шагом (**Log**).

- **List.** Задается список частот, значения в котором разделяются запятыми, например 1K,5K,10K
- **Linear.** Имеет формат *End, Start, Step* (начальное, конечное, шаг). Например 5K, 1K, 1K. При этом анализ будет выполняться при следующих частотах: 1K, 2K, 3K, 4K, 5K.
- **Log.** Имеет формат *End, Start, Multiplier* (начальное, конечное, множитель). Например 8K, 1K, 2. При этом анализ будет выполняться при следующих частотах: 1K, 2K, 4K, 8K.

Name of Input Source. Задаёт имя источника, используемого в качестве источника входного сигнала. Это может как источник *Sine Source* формата Micro-Cap, так и источники *Voltage Source* и *Current Source* типа SIN формата SPICE. Для запуска данного вида анализа в схеме должен присутствовать хотя бы один из источников указанных типов.

Input Source Amplitude. Задаёт амплитуду входного гармонического воздействия. Можно задать несколько значений амплитуд (вариации), для которых будет проводиться расчет. Формат задания – такой же, как и для частот.

Name of Load Resistor. Задаёт позиционное обозначение выходного нагрузочного резистора. По мощности или напряжению на этом резисторе будут измеряться нелинейные искажения. Пример задания: RL, RLOAD, R23.

Noise Frequency Range. Диапазон частот, в котором будет измеряться мощность (среднеквадратическое напряжение) шума. Шум измеряется путем запуска вспомогательного малосигнального частотного анализа AC и расчета величины $\text{SQRT}(\text{SUM}(\text{ONOISE} * \text{ONOISE}))$ с пределами интегрирования по частоте для функции SUM, заданными в этом поле окна. Рассчитанное значение шума используется только в следующих функциях анализа искажений: THDN (коэффициент гармоник с учетом шумов THD+NOISE), SINAD (отношение сигнал-шум с учетом гармоник 1/THDN), SNR (отношение сигнал-шум).

Temperature. Температура, при которой будет проводиться анализ искажений. Поддерживаются обычные форматы вариации: списком, линейный, логарифмический, как и для частоты и амплитуды входного источника.

Следующие два поля используются только при *неустановленной* опции поиска стационарного режима **PSS**.

Max Simulation Cycles. Задаёт число периодов входного сигнала фундаментальной частоты, в течение которого будет производиться каждая вариация анализа. Длительность этого временного интервала должна быть достаточной для окончания всех начальных переходных процессов. Подходящим значением для большинства схем является 50-1000. Отметим, что хотя симуляция запускается на заданное число периодов, функции спектрального анализа для расчета быстрого преобразования Фурье используют только последний период. Например, если задана частота первой гармоники 1kHz и 50 периодов, MC10 запустит анализ переходных процессов с конечным временем $t_{\text{max}} = 50/F_0 = 50/1\text{K} = 50\text{mS}$. Затем при использовании быстрого преобразования Фурье будет взята часть сигнала между концом 49-го периода (49mS) и концом 50-го периода (50mS). Т.е. фактически для анализа Harmonic Distortion используется только часть графика переходных процессов в диапазоне $T_{\text{max}} = 50/F_0$, $T_{\text{start}} = (50-1)/F_0$. Это усечение анализируемого сигнала можно

увидеть на графике с меткой $V(RL)$, если RL — позиционное обозначение нагрузочного резистора.

Steady State Tolerance. Устанавливает относительную погрешность накапливающегося коэффициента гармоник THD, при которой программа будет завершать анализ, не выполнив расчет полного числа периодов, заданного в графе *Max Simulation Cycles*. Рекомендуется устанавливать ее равной нулю, если необходимо, чтобы были пройдены все заданные циклы.

Time Step Ratio. Задаёт максимальный шаг по временной оси, используемый в анализе. Эта величина обычно устанавливается в диапазоне $1E-3 \dots 1E-2$. Величина максимального шага анализа переходных процессов рассчитывается по формуле $(\text{Time Step Ratio})/F_0$, где F_0 — фундаментальная частота.

Highest Harmonic in THD. Устанавливает наивысший номер гармоники, используемой при расчете коэффициента нелинейных искажений THD. Редко существует необходимость установки его выше 7.

Number of Time Points. Задаёт число расчетных точек, выводимых в файл числового вывода для каждого варианта анализа переходных процессов. Числовой вывод для каждого гармонического сигнала определяется установками окна *Properties* (F10). Общее число точек будет равно произведению этого значения на число заданных частот и число заданных амплитуд входного источника.

Number of Frequency Points. Задаёт число расчетных точек в каждом варианте АС анализа, используемого для анализа шумовых характеристик схемы. Оно также используется для численного вывода графиков, использующих в качестве независимой переменной частоту F , как например $HARM(V(RL))$.

Панели **Run**, **Add**, **Delete**, **Expand**, **Stepping**, **PSS**, **Properties**, и **Help** имеют такое же назначение, как и в анализе переходных процессов. То же относится и к опциям **Run**, **State Variables**, **Operating Point**, **Auto Scale Ranges**, **Periodic Steady State**, и **Accumulate Plots**.

Выражения для построения графиков автоматически устанавливаются в соответствующей позиции спецификации вывода. Можно их дополнить своими выражениями, используя панель **Add** или запретить некоторые из встроенных (управлением полем **P** — Plot Number).

Для вычисления гармонических искажений необходимо, чтобы анализируемая схема находилась в стационарном режиме работы. В MC10 стационарный режим можно получить двумя способами:

- Установить в графе *Maximum simulation cycles* такое число циклов, при котором к началу последнего цикла переходные процессы полностью затухают. Этот способ работает надежно, если амплитуда входного сигнала небольшая, соответствующие величины искажений небольшие, а также в случае, когда процессы в схеме имеют малое время установления.
- Выбрать опцию **Periodic Steady State (PSS)** — определение стационарного режима при периодическом воздействии). При этом программа совершает серию последовательных Transient-анализов, с каждой последующей итерацией все более приближающейся к стационарному режиму. Каждая итерация выводится на график, а разница начального и конечного значений,

позволяющая судить о степени близости к стационарному режиму, выводится в информационной строке.

Опция PSS обычно является наилучшим выбором для решения проблемы нахождения истинного стационарного режима, особенно если схема анализируется в широком диапазоне амплитуд и частот входного сигнала. Она почти всегда дает точные результаты за минимально возможное время.

Диалоговое окно *Analysis Limits*, в спецификации вывода содержит встроенные установки для вывода следующих графиков:

HARM(V(RL)) — график амплитуд гармоник выходного напряжения V(RL).

DB(HARMN(V(RL))) — график амплитуд гармоник выходного напряжения, отнесенных к амплитуде первой гармоники и выраженных в децибелах.

THD(HARM(V(RL))) — график накапливающегося коэффициента гармоник (коэффициента нелинейных искажений) напряжения на нагрузочном резисторе V(RL).

THDN(HARM(V(RL))) — график накапливающегося коэффициента гармоник с учетом шумов на нагрузочном резисторе V(RL).

V(RL) — график зависимости напряжения на нагрузочном резисторе V(RL) от времени.

Любой из перечисленных встроенных графиков может быть запрещен установкой пробела (N) в поле *plot number* (P) спецификации вывода. В примере рис. 6.20 оставлены лишь 2 графика: выходное напряжения и коэффициент гармоник этого напряжения.

В рассматриваемом примере ко входу схемы прикладывается синусоидальное напряжение амплитудой 2mV и частотой 1kHz от источника сигнала с позиционным обозначением VIN, затем запускается анализ с установленной опцией поиска стационарного режима PSS. После окончания данного варианта анализа амплитуда входного источника увеличивается в 2 раза и снова проводится анализ и построение всех заданных графиков и так до тех пор пока амплитуда входного сигнала не достигнет значения 500 mV. Затем описанный процесс будет повторен для частоты 10 kHz. Если разрешено распараллеливание процессов (threading), то на график выводится одновременно 2 точки (или более, в зависимости от количества процессорных ядер в компьютерной системе), что уменьшает общее время анализа.

Для запуска анализа следует нажать F2 или RUN. Результаты будут выглядеть как показано на рис. 6.20, справа.

Этим возможности анализа нелинейных искажений в программе Micro-Cap 10 не ограничиваются. Можно построить множество сложных (опосредованных) зависимостей. Для этого следует выполнить команду меню *Harmonic Distortion>Harmonic Distortion Windows>Add Harmonic Distortion Window*. Команда приведет к появлению многозакладочного окна *Properties for Harmonic Distortion* (рис. 6.21). В нем и происходит задание вывода графиков опосредованных зависимостей. Рассмотрим это окно подробнее.

Диалоговое окно *Properties for Harmonic Distortion*

Plot. Закладка задания графиков опосредованных зависимостей.

- **Curves** — Можно добавить/удалить или скрыть/показать график до или после запуска всего анализа. Нажатие *Add* добавляет кривую на график.

Галочка в списке Curves разрешает вывод выбранного графика в графическое окно.

- **Title** — позволяет присвоить графику имя. Если в ней выбрана опция *Auto*, название присваивается автоматически согласно выбранному для построения графику.
- **X Axis** — Здесь можно выбрать переменную, откладываемую по оси X.

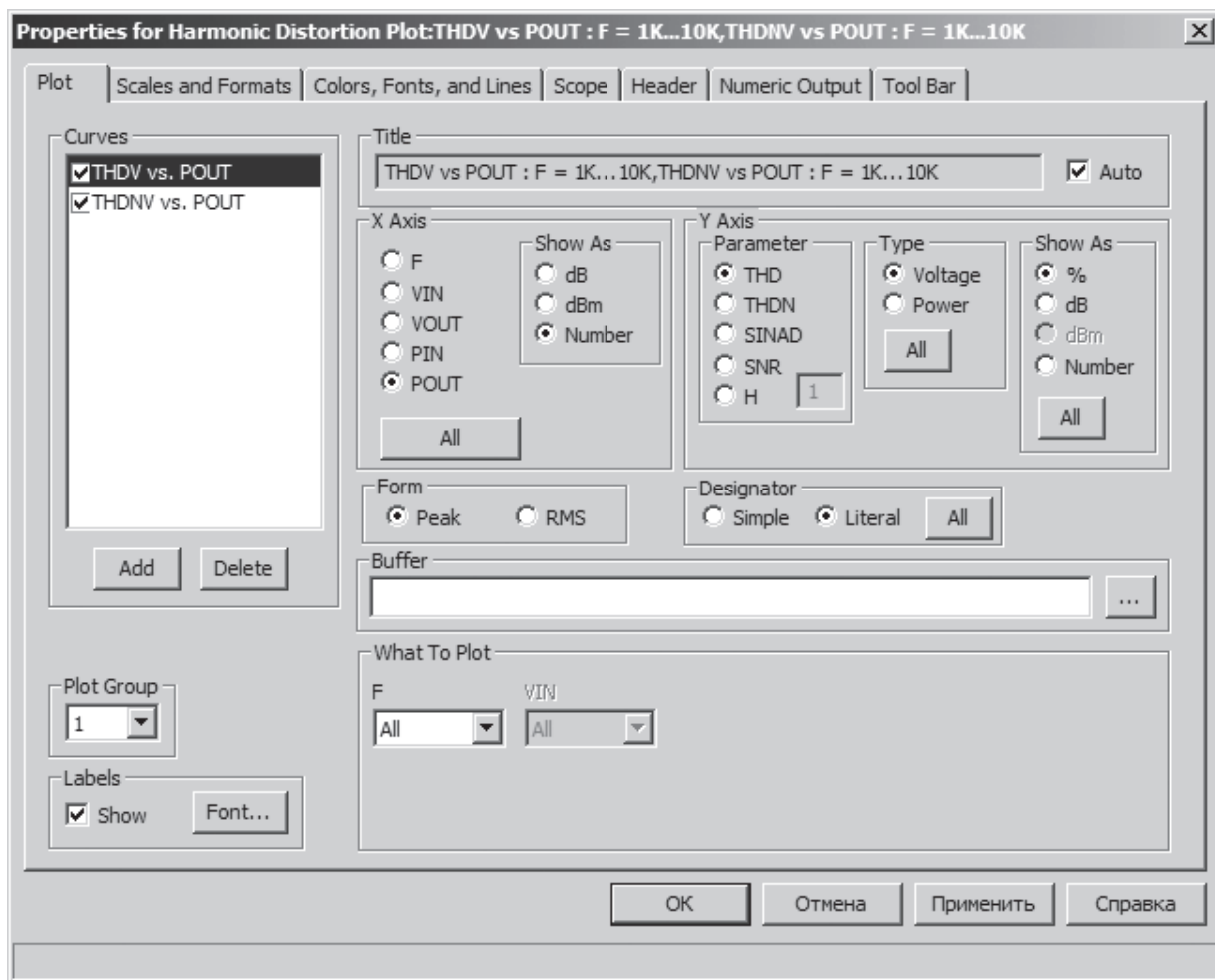


Рис. 6.21. Диалоговое окно Harmonic Distortion Properties

Имеются следующие варианты:

- **F** — частота первой гармоники
- **VIN** — уровень входного сигнала в вольтах
- **VOUT** — уровень выходного сигнала в вольтах
- **PIN** — уровень входной мощности
- **POUT** — уровень выходной мощности

Show As — обеспечивает следующие возможности вывода:

- **dB** — использование по оси X переменной в логарифмических единицах dB. Если выбрано напряжение (voltage), то по оси X откладывается $20 * \text{LOG}_{10}(\text{voltage})$. Если выбрана мощность, то по оси X откладывается $10 * \text{LOG}_{10}(\text{Power})$.
- **dBm** — использование по оси X переменной в логарифмических единицах dBm. Доступна только при расчете мощности (power). В этом случае при выборе опции по оси X откладывается $10 * \text{LOG}_{10}(\text{Power}/1\text{E}-3)$.

- **Number** — использование по оси X переменной в обычных абсолютных единицах.
- **Form** — позволяет выбирать амплитудное (*Peak*) или среднеквадратическое (*RMS*) значения. Опция работает как для переменных, откладываемых по оси X, так и для переменных, откладываемых по оси Y. Среднеквадратическое (*RMS*) значение напряжения связано с амплитудным (*peak*) значением формулой $RMS=Peak/\sqrt{2}$. Среднеквадратическое (*RMS*) значение мощности связано с амплитудным (*peak*) значением формулой $RMS=Peak/2$. Это правило применимо только для единственной Y-переменной H. Остальные переменные являются коэффициентами и этому правилу не подчиняются.
- **Y Axis** — позволяет выбрать переменную, откладываемую по оси Y для выбранного графика.

Parameter — здесь выбирается один из 5 вариантов:

- **THD** — полный (накапливающийся) коэффициент гармоник
- **THDN** — полный коэффициент гармоник с учетом шума
- **SINAD** — отношение сигнал-шум с учетом и гармоник, и шума $1/THDN$
- **SNR** — отношение сигнал-шум с учетом только шума
- **H** — величина гармоники с номером N

Type — выбор выходной величины (напряжение или мощность).

- **Voltage** — строится график отношения напряжений или напряжения в случае H.
- **Power** — строится график отношения мощностей, или мощности в Вт в случае H.

Show As — обеспечивает следующие возможности:

- **%** — построение выбранной величины в % относительно первой гармоники H1.
- **dB** — построение выбранной величины в логарифмических единицах dB. Если выбрано напряжение (*voltage*), то строится график $20*LOG_{10}(voltage)$. Если выбрана мощность, то строится график $10*LOG_{10}(Power)$.
- **dBm** — построение выбранной величины в логарифмических единицах dBm. Доступна только при расчете мощности (*power*). В этом случае при выборе опции строится график $10*LOG_{10}(Power/1E-3)$.
- **Number** — строится график выбранной величины в обычных абсолютных единицах (Вольтах или Ваттах).

- **Designator** — выбор обозначения

Simple — выбирается простое обозначение, такое как THD or SNR.

Literal — выбирается более сложное обозначение графиков, такое как THDV(%V/V). Поскольку коэффициенты могут быть измерены различными способами (по напряжению или мощности) это обозначение однозначно говорит о том, как коэффициент был вычислен.

- **Buffer** — организует доступ к буферу графиков. Позволяет вызвать ранее сохраненный график искажений. Графики могут быть сохранены в буфере посредством клика правой кнопкой мыши на выбранной кривой, затем выбора из раскрывающегося списка команды *Add to Buffer*.

- **What to Plot** — если выполнялась вариация более чем одной переменной (например TEMPERATURE, F0, VIN), данный раскрывающийся список выбирает конкретную реализацию для построения графика. Выбор конкретной (всех) реализации относится только к выбранному графику. Выбор *All* приведет к построению графиков всех вариантов.
- **Plot Group** — можно объединять выводимые графики в графические окна (группы) выбором номера группы в этом поле.
- **Labels** — галочка в этом поле приводит к выводу меток для выбранного графика. При пустом поле метки не выводятся. Кнопка *Font* позволяет выбрать шрифт для меток.

Остальные закладки описываемого окна имеют стандартное название.

На рис. 6.21 в диалоговом окне представлены установки для вывода графиков зависимости нелинейных искажений THDV и нелинейных искажений с шумом THDNV от уровня выходной мощности в Вт (рис. 6.22, а).

Scales and Format — устанавливает числовые форматы выводимых графиков.

Colors, Fonts, and Lines — устанавливает цвет, шрифт и тип рисовки линии графика.

Scope — обеспечивает обычные возможности управления выводом графиков для более детального просмотра.

Header — обеспечивает управление заголовочным блоком файла числового вывода.

Numeric Output — обеспечивает управление числовым выводом для графиков искажений. В числовой вывод может быть включена любая переменная, вне зависимости от того была ли она выведена на график или нет. Для этого следует установить галочку против соответствующей переменной в списке *Variables to Print* и нажать кнопку *Create*. При этом создается файл с именем <имя схемного файла>.HDNO. Следует отметить, что числовой вывод для графиков искажений отличается от числового вывода для графиков анализа (временных зависимостей). Можно создать оба файла, или не создавать ни одного.

Tool Bar — Закладка служит для управления кнопками панели инструментов графического окна (группы).

Построение графиков опосредованных зависимостей, характеризующих нелинейные искажения и шумы схемы

В рассмотренном выше примере PSS2 задан вывод трех семейств зависимостей (в трех окнах):

- THDV vs POUT: F = 1K...10K, THDNV vs POUT: F = 1K...10K
- H1P vs POUT: F = 1K...10K, H2P vs POUT: F = 1K...10K, H3P vs POUT: F = 1K...10K
- SNR vs POUT_RMS: F = 1K...10K

На рис. 6.21 было представлено окно для задания первой зависимости (THDV vs POUT). Остальные две зависимости задаются аналогично. Окна для этих зависимостей можно посмотреть, в примере *PSS2.cir* из каталога *Analysis\DISTORTION\MC10*.

Графики этих зависимостей выводятся в трех дополнительных графических окнах (рис. 6.22). Для повторного вызова заранее заданного окна опосредованных зависимостей следует выполнить команду меню *Harmonic Distortion>Harmonic Distortion Windows>Show...* (если конечно же окна не появятся сами сразу же после окончания анализа). При включении закладок окон (*Options>Window Tabs*), можно просто кликнуть на закладке.

Графики на рис. 6.22, а — это зависимости нелинейных искажений THD от выходной мощности при двух значениях частоты. Масштаб логарифмический по обеим осям.

Графики на рис. 6.22, б — представляют собой зависимости величины 3-х первых гармоник H1 H2, H3 (по мощности) от выходной мощности при двух значениях частоты. Обе оси градуируются в dB.

График на рис. 6.22, в — представляет собой зависимость отношения сигнал-шум в dB от уровня выходной мощности в Ваттах.

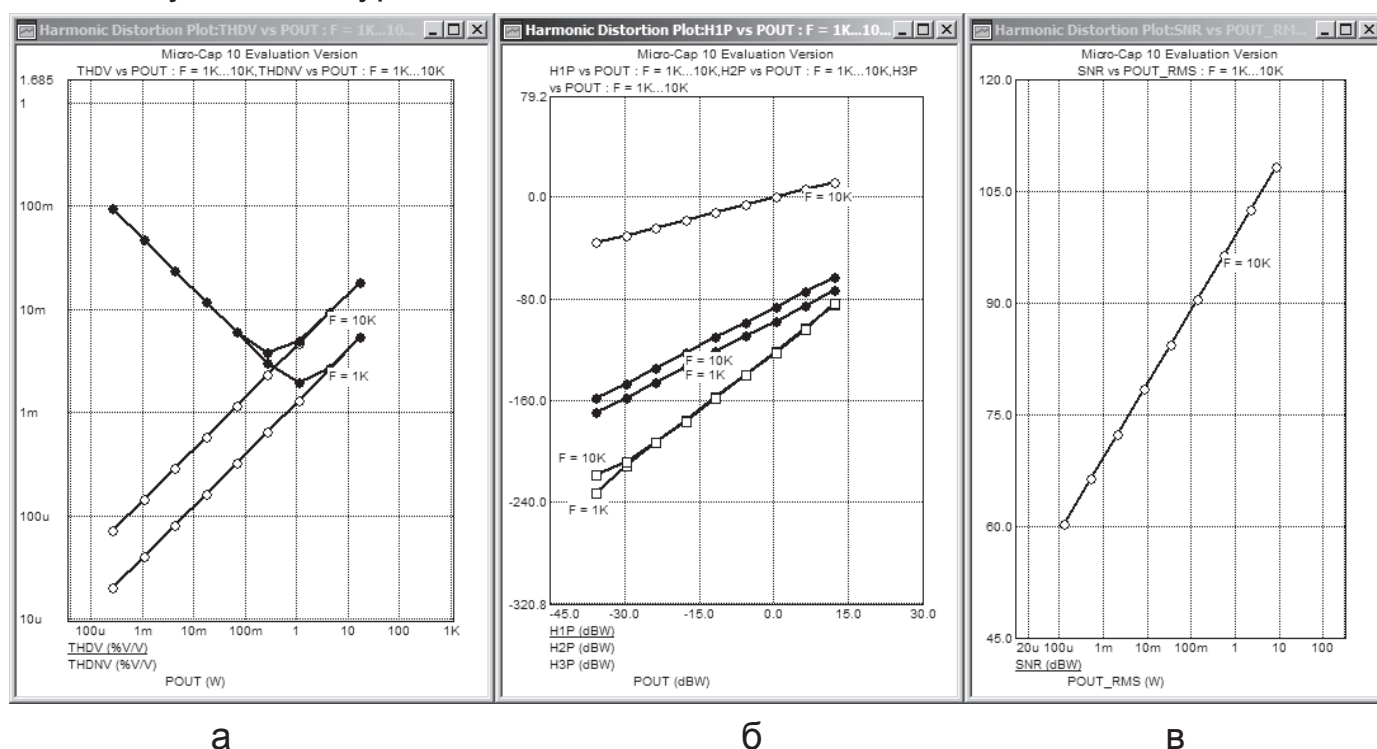


Рис. 6.22. Графики коэффициента нелинейных искажений THD, первых трех гармоник H и отношения сигнал-шум SNR в зависимости от выходной мощности

Основные рекомендации по анализу нелинейных искажений

- Точность анализа искажений в значительной степени зависит от наличия переходных процессов на участке анализа. Поэтому, если не используется PSS, то необходимо убедиться, что переходной процесс завершился, а только потом проводить анализ нелинейных искажений. Для этого в окне *Harmonic Distortion Analysis Limits* в позиции *Max Simulation Cycles* следует задавать максимально возможное число циклов. Но при этом не следует забывать, что слишком большое число циклов может существенно увеличить время расчета. Начинать следует с задания 10 циклов, а затем увеличивать его, пока выходные графики перестанут меняться.
- Точность анализа искажений зависит также от заданного максимального шага (*maximum time step*): Иногда бывает достаточным использование шага, превосходящего значение $.01/F_0$, но часто требуется его значение

.001/F0 для построения точной зависимости коэффициента нелинейных искажений THD.

- Если анализируется схема с сильными нелинейными искажениями, которые обычно возникают при большом уровне входного сигнала, то можно использовать большой шаг по временной оси для ускорения процесса вычислений. Чем больше коэффициент гармоник THD, тем меньше относительная ошибка.

Формулы и определения, используемые при расчете нелинейных искажений в режиме *Harmonic Distortion*

Определения:

A — масштабный множитель для логарифмических единиц

D — амплитуда искажений

H_n — амплитуда гармоники с номером n

I_{IN} — амплитуда входного тока

M — максимальный номер гармоники, используемой при расчете нелинейных искажений THD и THDN

N — среднеквадратическое напряжение шума

S_n — амплитуда гармоники как коэффициент ряда Фурье.

$SUM(ONOISE^2) = \int_{f_{MIN}}^{f_{MAX}} ONOISE^2 df$ — интеграл от $ONOISE^2$ с пределами, заданными в графе *Noise Frequency Range*

данными в графе *Noise Frequency Range*

V_{IN} — амплитуда входного напряжения

V_1 — амплитуда первой гармоники (фундаментальная частота)

V_2 — амплитуда 2-ой гармоники

V_3 — амплитуда 3-ей гармоники

V_n — амплитуда гармоники с номером n

Таблица 6.1. Основные выходные параметры анализа нелинейных искажений MC10

Обозначение	%	dB	абс. единицы
THD	$\frac{100 \cdot D}{S_1}$	$A \cdot \log\left(\frac{D}{S_1}\right)$	$\frac{D}{S_1}$
THDN	$\frac{100 \cdot (D + N)}{S_1}$	$A \cdot \log\left(\frac{D + N}{S_1}\right)$	$\frac{D + N}{S_1}$
SINAD	$\frac{100 \cdot S_1}{D + N}$	$A \cdot \log\left(\frac{S_1}{D + N}\right)$	$\frac{S_1}{D + N}$
SNR	$\frac{100 \cdot S_1}{N}$	$A \cdot \log\left(\frac{S_1}{N}\right)$	$\frac{S_1}{N}$
Hn	$\frac{100 \cdot S_n}{S_1}$	$A \cdot \log\left(\frac{S_n}{S_1}\right)$	S_n

Таблица 6.2. Основные промежуточные переменные и коэффициенты анализа нелинейных искажений MC10

Переменная	Напряжение	Мощность
A	20	10
Sn	V_n	$\frac{V_n^2}{R_L}$
D	$\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots V_M^2}$	$\frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots V_M^2}}{R_L}$
N	$\sqrt{\int_{f_{MIN}}^{f_{MAX}} ONOISE^2 df}$	$\frac{\int_{f_{MIN}}^{f_{MAX}} ONOISE^2 df}{R_L}$
D+N	$\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots V_M^2 + N^2}$	$\frac{V_2^2 + V_3^2 + \dots V_M^2 + N^2}{R_L}$
VOUT	$\sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots V_M^2}$	—
POUT	$\frac{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots V_M^2}{R_L}$	—
PIN	$V_{IN} \cdot I_{IN}$	—

6.9.2. Анализ интермодуляционных искажений Intermodulation Distortion

Анализ интермодуляционных искажений (*Intermodulation Distortion*) фактически является разновидностью анализа переходных процессов. При его проведении на вход схемы подаются 2 синусоидальных сигнала с заданными пользователем частотами и амплитудами, а затем измеряются результирующие искажения на выходе с использованием математического аппарата спектрального Фурье-анализа.

Для проведения анализа интермодуляционных искажений (*Intermodulation Distortion*), к входу схемы необходимо подключить источник синусоидального напряжения или источник синусоидального тока (Sine source, Voltage Source или Current Source типов SIN). При этом параметры этого источника никакой роли не играют и в расчете не участвуют (также, как и при проведении частотного анализа AC). Фактически этот источник лишь определяет узел, который считается входом схемы. Параметры входных синусоидальных сигналов, которые используются при анализе, устанавливаются в окне задания параметров *Intermodulation Distortion Analysis Limits* или подставляются автоматически при выборе одной из 3-х стандартных методик SMPTE, DIN, CCIF.

Для анализа интермодуляционных искажений MC10 запускает расчет переходных процессов на период времени, равный целому числу периодов обоих входных сигналов разных частот. Это необходимо для правильной работы функций спектрального анализа, основанных на быстром преобразовании Фурье (FFT). Этот период времени вычисляется автоматически исходя из заданных частот. Окно задания параметров переходных процессов вообще не появляется.

В зависимости от того, какие используются частоты входных сигналов, время расчета может оказаться очень большим. Например, согласно методике CCIF, измерения интермодуляционных искажений проводятся при частотах входных сигналов $F1=13$ кГц и $F2=14$ кГц. Это требует запуска анализа переходных процессов на время 1 мс, поскольку в этом интервале помещаются 13 целых периодов сигнала с частотой $F1$ и 14 целых периодов сигнала с частотой $F2$. При использовании методики SMPTE частоты сигналов следующие: $F1=60$ Гц, $F2=7$ кГц. При этом потребуется время анализа 50ms, в котором укладываются 350 периодов сигнала с частотой $F2$ и 3 периода сигнала с частотой $F1$.

Если время расчета получается слишком большим, то в некоторых случаях его можно существенно уменьшить, практически не снижая точность расчетов небольшим изменением одной из частот. Например, можно вместо $F1=60$ Гц и $F2=7$ кГц использовать частоты $F1=70$ Гц и $F2=7$ кГц. В этом случае потребуется только $1/70 \approx 14.3$ мс для 1 полного периода сигнала частотой 70Hz и 100 полных периодов сигнала частотой 7 кГц. Вряд ли появится существенная погрешность при измерении интермодуляционных искажений, если частота одного из входных сигналов увеличится с 60 до 70 Гц, зато при этом время анализа уменьшится в 3,5 раза.

Для радиочастотных смесителей частоты входных сигналов должны быть близки по значению, т.е. их отношение близко к 1. При этом для правильной работы функций спектрального анализа потребуется очень большое число циклов. Например при $F1=920$ МГц и $F2=921$ МГц, потребуется $t_{\max}=1$ мкс,

для того, чтобы в этом временном интервале уложились 920 полных периодов сигнала частотой F1 и 921 полный период сигнала частотой F2. Это осуществимо, однако если изменить частоту F2 до 920.99 МГц, то требуемое значение $t_{\max}$ увеличится до 0.1 мс, что потребует более чем $1E8$ шагов при расчете переходных процессов. Практический предел отношения двух частот F1 и F2 должен быть не более чем 0.999.

При выборе опции PSS время расчета оказывается в разы больше значения, рассчитанного на основании заданных частот входных сигналов. Это связано с тем, что расчет повторяется несколько раз, пока схема не войдет в стационарный режим. Но все равно, это лучший способ точного анализа искажений. PSS не используется только в случае, когда при этом возникает ошибка сходимости (convergence problem), что случается крайне редко.

Если опция PSS не установлена, то время анализа переходных процессов представляет собой произведение минимального временного интервала (рассчитанного на основе частот входных сигналов) на количество циклов анализа Transient (число, заданное в позиции *Max Simulation Cycles*). Количество циклов выбирается исходя из установления переходных процессов к моменту начала последнего цикла в серии. Поскольку необходимо целое число периодов для каждого из синусоидальных входных сигналов, минимально необходимое время расчета почти всегда очень велико, поэтому параметр анализа *Max Simulation Cycles* не следует брать таким большим, как при анализе обычных нелинейных искажений (Harmonic Distortion).

Диалоговое окно установки параметров анализа интермодуляционных искажений *Intermodulation Distortion Analysis Limits*

В качестве примера анализа интермодуляционных искажений в усилителях низкой частоты рассмотрим схемный файл усилителя мощности *DIST_DEMO1* из каталога *Analysis\DISTORTION\MC10* (рис. 6.23). Если выбрать пункт **Intermodulation Distortion** в меню *Analysis*, то откроется диалоговое окно *Analysis Limits*. Оно имеет следующие поля:

F1 Frequency. Установка меньшей частоты входного сигнала.

F2 Frequency. Установка большей частоты входного сигнала.

Полный входной сигнал представляет собой сумму двух синусоидальных сигналов с частотами F1 и F2, причем $F1 < F2$.

Name of LO Source. Задание позиционного обозначения генератора радиочастоты. Используется в радиотехнических схемах (преобразователях частоты) для задания сигнала гетеродина. Частота этого генератора может образовывать комбинации с 1-ой гармоникой полезного сигнала на выходе H1, а также с интермодуляционными составляющими 2-го (IM2) и 3-го (IM3) порядков. Расчет составляющих с суммарными или разностными частотами дополнительно указывается в окне *Intermodulation Properties* (F10).

Name of Input Source. В этой позиции задается позиционное обозначение источника входных сигналов. Это может быть как источник *Sine Source* формата Micro-Cap, так и источники *Voltage Source* и *Current Source* типа SIN формата SPICE. Для запуска данного вида анализа в схеме должен присутствовать хотя бы один из источников указанных типов.

F1/F2 Level Ratio. Установка отношения амплитуд синусоидального сигнала меньшей частоты (F1) к амплитуде входного синусоидального сигнала большей частоты (F2).

F2 Level — амплитуда синусоидального сигнала большей частоты.

Name of Source Resistor — позиционное обозначение нагрузочного резистора входной части устройства. Его сопротивление (RSOURCE) используется при анализе радиотехнических схем для расчета входной мощности по формуле $PIN = (V_{in}/2) \cdot (V_{in}/2) / R_{SOURCE}$. Если в данной позиции выбирается None, тогда используется обычное соглашение для входной мощности, принятое для аудио-устройств $PIN = V_{IN} \cdot I_{IN}$.

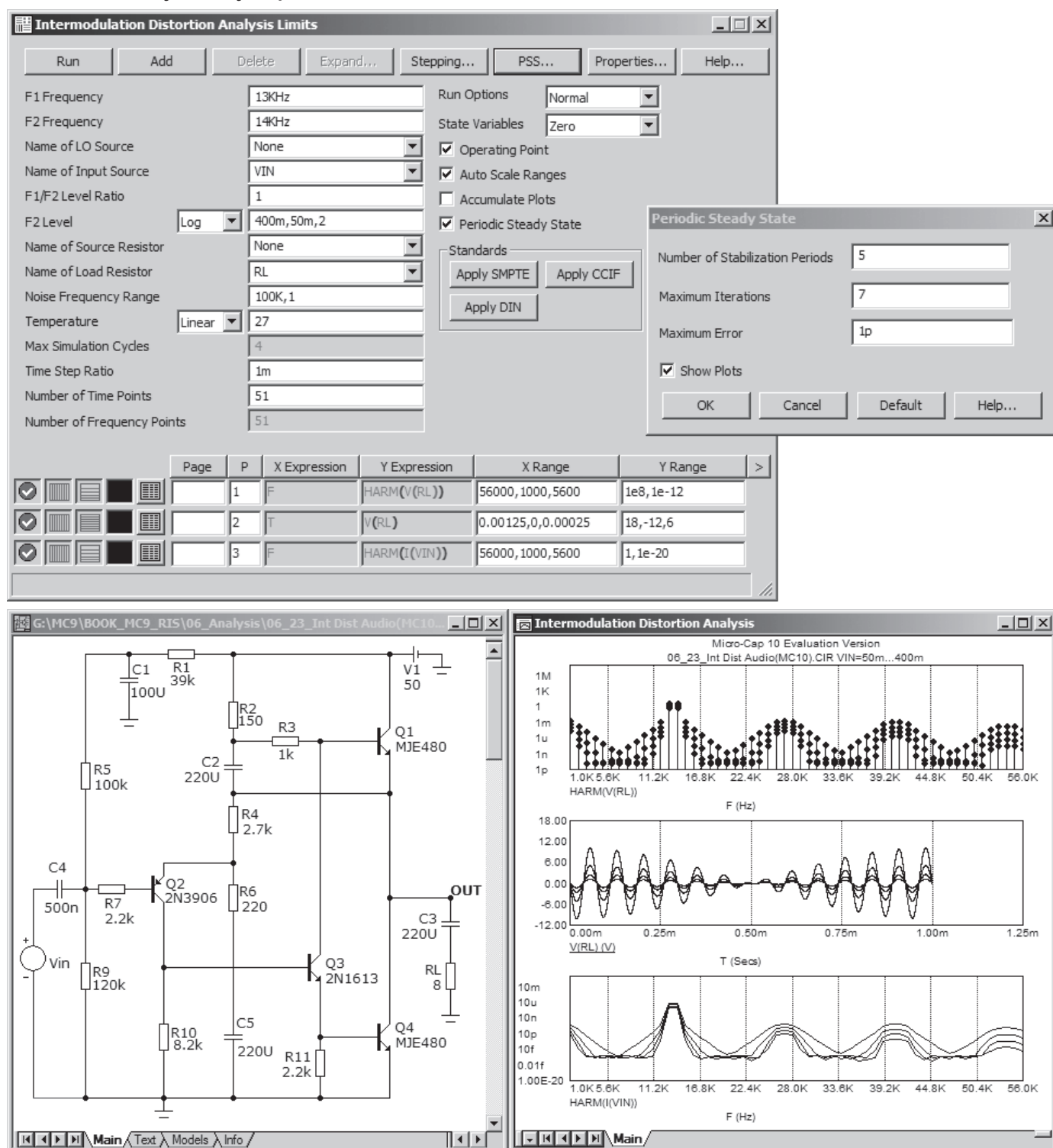


Рис. 6.23. Анализ интермодуляционных искажений УНЧ: а — диалоговое окно задания параметров анализа; б — схема усилителя и результаты анализа

Name of Load Resistor — позиционное обозначение нагрузочного резистора, используемого для измерения искажений (например RL, RLOAD, R23). Используется для вычисления выходной мощности $POUT = V \cdot V / RLOAD$.

Noise Frequency Range — диапазон частот, в котором будет измеряться мощность (среднеквадратическое напряжение) шума. Шум измеряется путем запуска вспомогательного малосигнального частотного анализа и расчета величины $SQRT(SD(ONoise \cdot ONoise))$ с пределами интегрирования по частоте, заданными в этом поле. Рассчитанное значение шума вносит свой вклад в расчет искажений только в том случае, если в окне свойств данного вида анализа выбрана опция *Include Noise*.

Temperature — Температура, при которой будет проводиться анализ искажений. Поддерживаются обычные форматы задания многовариантного анализа: списком, линейный, логарифмический, как и для частот и амплитуд входного источника.

Max Simulation Cycles. Задаёт множитель, на который умножается минимальное время расчета. В результате получается полное время анализа переходных процессов. Длительность этого временного интервала должна быть достаточной для окончания всех начальных переходных процессов. Значение этого множителя для большинства схем находится в диапазоне 10-100. Минимальное значение множителя — 4.

Time Step Ratio. Задаёт максимальный шаг по временной оси, используемый в анализе. Обычно берётся равным $1E-3$. Величина максимального шага анализа переходных процессов рассчитывается по формуле:

$$maximum\ time\ step = (Time\ Step\ Ratio) / F2.$$

Standards — выбор одной из стандартных методик анализа интермодуляционных искажений: SMPTE, DIN, CCIF.

Number of Time Points — количество расчетных точек, выводимых в файл числового вывода для каждого варианта анализа переходных процессов. Числовой вывод для каждого гармонического сигнала определяется установками окна *Properties* (F10). Общее число точек будет равно заданному в этой графе, умноженному на число заданных частот и число заданных амплитуд.

Number of Frequency Points — число расчетных точек в каждом варианте АС анализа, используемого для анализа шумовых характеристик схемы. Оно также используется для численного вывода графиков, использующих в качестве независимой переменной частоту F , как например $HARM(V(RL))$.

Панели **Run**, **Add**, **Delete**, **Expand**, **Stepping**, **PSS**, **Properties** и **Help** имеют такое же назначение, как и в окне анализа переходных процессов. То же относится и к опциям **Run**, **State Variables**, **Operating Point**, **Auto Scale Ranges**, **Periodic Steady State**, и **Accumulate Plots**. Важно отметить, что если используется опция *Leave*, то распараллеливание процессов на мультипроцессорном ПК не будет работать, поэтому ее лучше не использовать. Распараллеливание вычислительных процессов позволяет существенно уменьшить время анализа.

Выражения для построения графиков устанавливаются автоматически в соответствующие позиции спецификации вывода. Их можно дополнить свои-

ми выражениями, используя панель *Add*, или запретить использование некоторых из встроенных (управлением полем **P** — Plot Number).

В рассматриваемом примере ко входу схемы приложены гармонические воздействия: первое — амплитудой 50 мВ, частотой 13 кГц, второе — амплитудой 50 мВ, частотой 14 кГц от источника входного сигнала VIN. Минимальное время анализа 1мс. Будет проведен анализа переходных процессов с выводом последнего периода (1 мс) на график временных зависимостей. Затем амплитуды двух сигналов начинают увеличиваться логарифмически с множителем 2, и описанный процесс будет повторяться. Так будет происходить до тех пор пока не будет достигнуто конечное значение 400 мВ.

В *Dist_Demo1* в спецификации вывода задано построение следующих графиков (все графики встроенные):

HARM(V(RL)) — построение графика амплитуд гармоник выходного напряжения V(RL) в зависимости от частоты.

V(RL) — график выходного напряжения V(RL), зависящего от времени.

HARM(I(Vin)) — построение графика амплитуд гармоник тока через источник входного сигнала.

Для запуска анализа следует нажать F2 или **Run**. Результаты анализа схемы усилителя представлены на рис. 6.23, б.

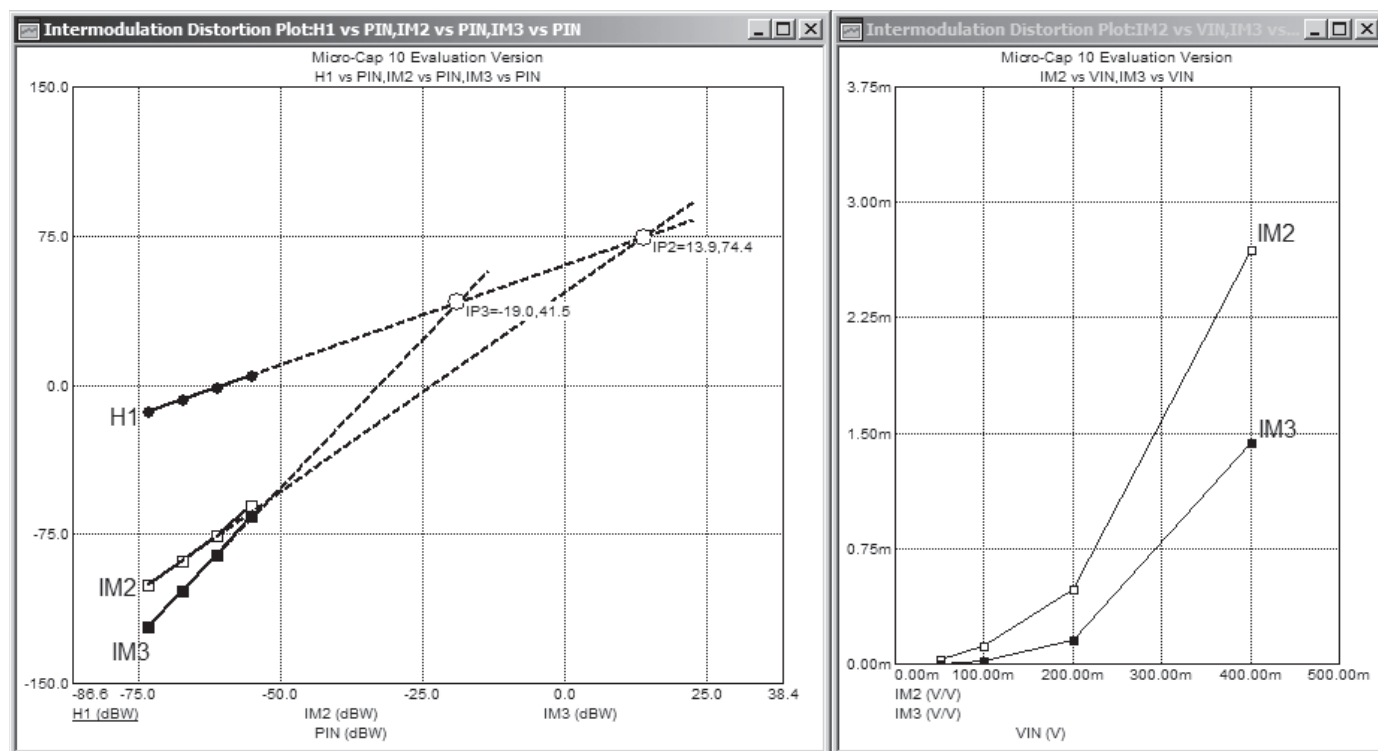


Рис. 6.24. Графики зависимостей интермодуляционных составляющих: а — от уровня входной мощности в логарифмическом масштабе; б — от величины входного сигнала VIN в линейном масштабе

В окнах анализа искажений (Intermodulation Distortion Plot) строятся графики зависимостей H1, IM2, и IM3 от входной мощности PIN(dBW) для комбинаций частот входных сигналов F1=13 кГц и F2=14 кГц и графики интермодуляционных составляющих IM2 и IM3 в зависимости от уровня входного сигнала VIN в линейном масштабе (рис. 6.24). Добавление подобного вспомогательного окна, служащего для построения опосредованных зависимостей, осуществляется командой меню *Intermodulation Distortion>Intermodulation Dis-*

tortion Windows>Add Intermodulation Distortion Window... После этого появляется диалоговое окно *Properties for Intermodulation Distortion*. В нем задается построение графиков опосредованных зависимостей. Далее установки этого окна будут рассмотрены более подробно.

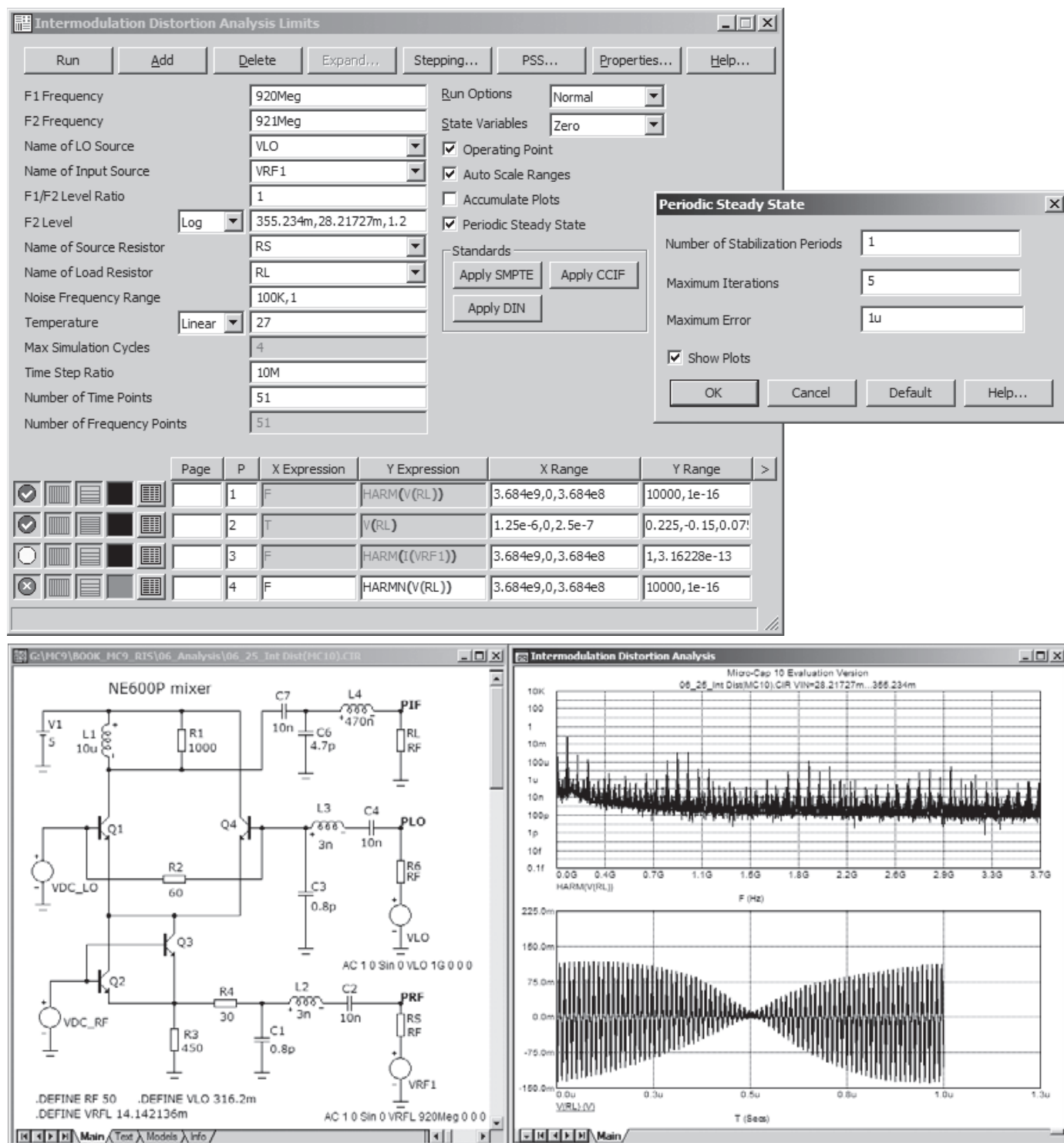


Рис. 6.25. Анализ интермодуляционных искажений в радиочастотном смесителе

Для иллюстрации анализа радиотехнических схем с преобразованием частот рассмотрим пример анализа смесителя *MIXER1* из каталога *Analysis\DISTORTIONMC10*. Схема представляет собой ИМС NE600p в конфигурации понижающего преобразователя частоты (рис. 6.25). Пример демонстрирует построение графиков H1 (1-ой гармоники частотой 79 МГц), IM2 (интермодуляционной составляющей 2-го порядка частотой 999 МГц), IM3 (интермодуляционной составляющей 3-го порядка частотой 78 МГц) и про-

цесс измерения точки 1dB компрессии и построения идеальных пунктирных прямых для IM2 и IM3.

Выбираем **Intermodulation Distortion** из меню **Analysis**. Появляется окно задания параметров анализа (рис. 6.25).

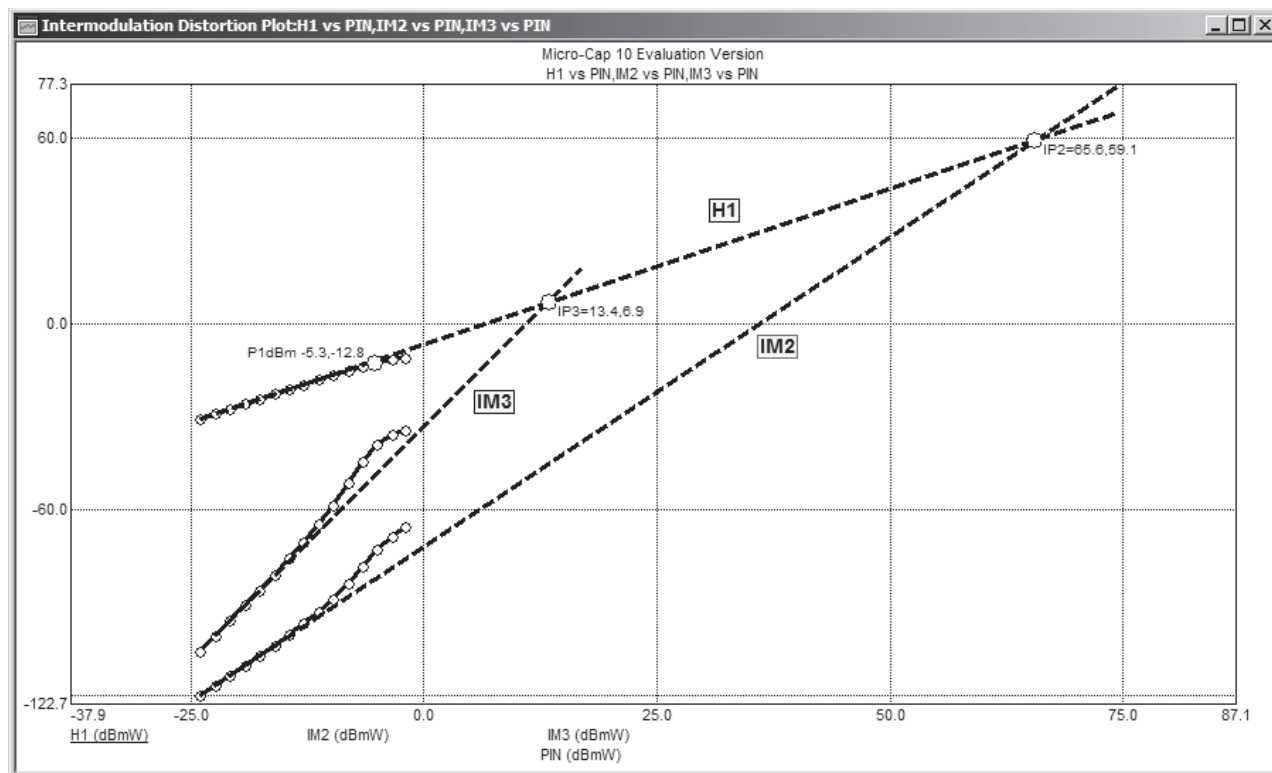
Основное отличие в анализе схемы этой схемы и схемы DIST_DEMO1 — в указании перестраиваемого генератора радиочастоты (гетеродина) LO и резистора входной части (source resistor). Этот резистор необходим для расчета входной мощности, а частота FL гетеродина будет создавать комбинационные составляющие (суммарные и разностные) с 1-ой гармоникой выходного сигнала (H1), комбинационными составляющими 2-го порядка (IM2), и комбинационными составляющими 3-го порядка (IM3). Будут ли находиться суммарные или разностные составляющие, определяется кнопками *Add* и *Subtract* в окне свойств графиков искажений *Properties for Intermodulation Distortion* (F10). По умолчанию находятся разностные составляющие (Subtract FL).

Запускаем анализ нажатием F2. Спустя несколько минут (для демо-версии проходит более часа) появится следующая картинка результатов (рис. 6.25, 6.26).

График показывает H1 (1-ю гармонику), IM2 (интермодуляционную составляющую 2-го порядка), и IM3 (интермодуляционную составляющую 3-го порядка) в зависимости от входной мощности PIN. Все величины откладываются по осям в dBm. Входное напряжение изменяется от 28.217mV до 355.234mV, генерируя мощность во входной цепи в диапазоне от -24 dBm до -2 dBm. Программа сканирует построенные кривые IM2 и IM3 и находит для каждой кривой пару точек. Для IM2 — это пара точек, где наклон отрезка их соединяющего наиболее близок к 2, а для IM3 — пара точек, где наклон отрезка их соединяющего близок к 3. Затем рисуются пунктирные линии, продолжающие найденные отрезки (это идеальные графики IM2, IM3) и находятся точки пересечения их с графиком 1-ой гармоники H1 (или с продолжением линии графика H1 в область насыщения). После этого определяются координаты точек пересечения IP2 (продолжения идеализированной линии IM2 с продолжением графика H1), и IP3 (продолжения идеализированной линии IM3 с продолжением графика H1). IP2 обозначается на графике как IP2=IIP2,OIP2. IP3 показывается на графике как IP3=IIP3,OIP3. Каждая точка обозначается незалитым кружком.

Программа также рассчитывает точку 1dB компрессии P1dB. Это точка на кривой первой гармоники H1, где ее уровень спадает на 1dBm по отношению к идеальной линии H1 с наклоном 1.0.

Для точного построения идеализированных линий и определения точек пересечения, необходимы лишь 2 расчетные точки. Наклон между этими двумя точками должен быть близок к 2.0 для IM2, и близок к 3.0 для IM3. Нет необходимости в расчете столь многих точек, как сделано в приведенном примере MIXER1. Однако для точного вычисления 1 dB компрессии P1dB, должно быть построено достаточное количество точек. Только тогда будет заметно снижение наклона кривой H1 от единичного (который имеется при малых мощностях). Кроме того, только в этом случае можно увидеть точку компрессии (которая находится в области больших мощностей).



Properties for Intermodulation Distortion Plot: H1 vs PIN, IM2 vs PIN, IM3 vs PIN

Plot | Scales and Formats | Colors, Fonts, and Lines | Scope | Header | Numeric Output | Tool Bar

Curves

- ☒ H1 vs. PIN
- ☒ IM2 vs. PIN
- ☒ IM3 vs. PIN

Title
H1 vs PIN, IM2 vs PIN, IM3 vs PIN ☒ Auto

X Axis

- ☐ VIN
- ☐ VOUT
- ☒ PIN
- ☐ POUT

Show As

- ☐ dB
- ☒ dBm
- ☐ Number

Form

- ☒ Peak
- ☐ RMS

Y Axis

Numerator

- ☐ H1 F2-FL=79M
- ☒ IM2 F1+F2-FL=841M
- ☐ IM3 2F2-F1-FL=78M
- ☐ F2-F1-FL=999M
- ☐ 2F2+F1-FL=1.762G
- ☐ 2F1-F2-FL=81M
- ☐ 2F1+F2-FL=1.761G

☐ Add FL ☒ Subtract FL ☐ Include Noise

Show As

- ☐ %
- ☐ dB
- ☒ dBm
- ☐ Number

Denominator
☐ F2-FL=79M ☒ 1

Type
☐ Voltage ☒ Power

Designator
☒ Simple ☐ Literal

Buffer

☒ Show IM2 Intercept ☒ Show IM3 Intercepts ☒ Show 1 dB Compression Point

What To Plot
VIN
28.21727

OK Отмена Применить Справка

List of available waveforms.

Рис. 6.26. Графики интермодуляционных составляющих в логарифмическом масштабе и окно задания их свойств

Рассмотрим теперь установки диалогового окна **Properties for Intermodulation Distortion** построения графиков интермодуляционных искажений.

Это диалоговое окно обеспечивает управление построением графиков многих переменных в различных режимах. Оно имеет следующие панели:

Plot. Закладка задания графиков опосредованных зависимостей.

- **Curves** — Можно добавить/удалить или скрыть/показать график до или после запуска всего анализа.

Title — позволяет присвоить графику имя. Если в ней выбрана опция *Auto*, название присваивается автоматически согласно выбранному для построения графику.

X Axis — Здесь можно выбрать переменную, откладываемую по оси X. Имеются следующие варианты:

- **VIN** — уровень входного сигнала
- **VOUT** — уровень выходного сигнала
- **PIN** — уровень входной мощности
- **POUT** — уровень выходной мощности

Show As — обеспечивает следующие возможности вывода:

- **dB** — использование по оси X переменной в логарифмических единицах dB. Если выбрано напряжение (voltage), то по оси X откладывается $20 \cdot \text{LOG}_{10}(\text{voltage})$. Если выбрана мощность, то по оси X откладывается $10 \cdot \text{LOG}_{10}(\text{Power})$.
- **dBm** — использование по оси X переменной в логарифмических единицах dBm. Доступна только при выборе мощности (power). В этом случае при выборе опции по оси X откладывается $10 \cdot \text{LOG}_{10}(\text{Power}/1\text{E-3})$.
- **Number** — использование по оси X переменной в обычных абсолютных единицах.
- **Form** — позволяет выбирать амплитудное (Peak) или среднеквадратическое (RMS) значения. Опция работает как для переменных, откладываемых по оси X, так и для переменных, откладываемых по оси Y. Среднеквадратическое (RMS) значение напряжения связано с амплитудным (peak) значением формулой $\text{RMS} = \text{Peak} / \sqrt{2}$. Среднеквадратическое (RMS) значение мощности связано с амплитудным (peak) значением формулой $\text{RMS} = \text{Peak} / 2$. Эта опция не влияет на вычисление коэффициентов интермодуляционных искажений IM2 или IM3 со знаменателем (denominator) в виде уровня сигнала частотой F2. Они представляют собой коэффициенты в виде отношения, а умножение и числителя и знаменателя на один и тот же множитель не изменит результат.
- **Y Axis** — позволяет выбрать переменную, откладываемую по оси Y для выбранного графика.

Numerator (числитель) — имеются три основных варианта:

- **H1** — амплитуда выходного сигнала (1-ая гармоника)
- **IM2** — интермодуляционная составляющая 2-го порядка
- **IM3** — интермодуляционная составляющая 3-го порядка

Ниже каждой из возможных составляющих имеется список для их возможных частот, из которого можно сделать выбор. IM2 и IM3 вычисляются как отношения, если задан знаменатель (denominator) как F1 или F2, в противном случае они являются коэффициентами ряда Фурье выходного сигнала. Если выбраны интермодуляционные составляющие 2-го или 3-го порядков, можно

также задать варианты знаменателя для его вычисления в относительных единицах (denominator). При построении интермодуляционных составляющих 2-го порядка для числителя (nominator) могут быть выбраны составляющие $F_2 - F_1 \pm FL$, или составляющие с частотами $F_1 + F_2 \pm FL$. Если выбраны интермодуляционные составляющие 3-го порядка (IM3), можно задать следующие частоты интермодуляционных составляющих в числителе: $2F_1 \pm F_2 \pm FL$ или $2F_2 \pm F_1 \pm FL$. Тактовая частота FL прибавляется или вычитается, если задан источник сигнала гетеродина LO.

- **Add FL** — При указании гетеродина LO, сетка интермодуляционных составляющих расширяется путем образования комбинаций с этой частотой. Данная опция приводит к заданию интермодуляционных составляющих с прибавлением частоты гетеродина FL . Например, в схеме MIXER1, $F_1=920E6$, $F_2=921E6$, $F_L=1000E6$. Если выбрана опция **ADD**, тогда частота H1 определяется как $F_2 + F_L = 1921E6$. Аналогично частоты интермодуляционных составляющих 2-го порядка IM2 будут определяться по формулам $F_2 \pm F_1 + F_L = 1001E6$. Частоты интермодуляционных составляющих 3-го порядка IM3 будут $2F_2 \pm F_1 + F_L = 2 \cdot 921E6 - 920E6 + 1000E6 = 1922E6$. Таким образом опция **ADD** используется для радиочастотных преобразователей с повышением частоты.
- **Subtract FL** — Данная опция приводит к заданию интермодуляционных составляющих с вычитанием тактовой частоты FL . Например, в схеме MIXER1: $F_1=920E6$, $F_2=921E6$, $F_L=1000E6$. Если выбрана опция **SUB**, тогда частота H1 определяется как $F_2 - F_L = 79E6$. Аналогично частоты интермодуляционных составляющих 2-го порядка IM2 будут определяться по формулам $F_2 \pm F_1 - FL = 999E6$. Частоты интермодуляционных составляющих 3-го порядка IM3 будут $2F_2 \pm F_1 - FL = 2 \cdot 921E6 - 920E6 - 1000E6 = 78E6$. Эта опция используется для смесителей с понижением частоты.
- **Include Noise** — добавление уровня шума к интермодуляционным составляющим 2-го и 3-го порядков. Уровень шума рассчитывается при помощи вспомогательного AC-анализа.

Type — выбор представления выходной величины в форме напряжения или мощности.

- **Voltage** — строится график выбранной величины в форме отношения напряжений, или в виде напряжения в случае H1.
- **Power** — строится график выбранной величины в форме отношения мощностей, или в виде мощности в Вт в случае H1.

Show As — обеспечивает следующие опции:

- **%** — построение выбранной величины в %. IM2 и IM3 рассчитываются в процентах от составляющей H1. Если задается для H1, то всегда будет выводиться 100 (%).
- **dB** — построение выбранной величины в логарифмических единицах dB. Если выбрано напряжение (voltage), то строится график $20 \cdot \text{LOG}_{10}(\text{voltage})$. Если выбрана мощность, то строится график $10 \cdot \text{LOG}_{10}(\text{Power})$.

- **dBm** — построение выбранной величины в логарифмических единицах dBm. Доступна только при выборе мощности (power). В этом случае при выборе опции строится график $10 \cdot \text{LOG}_{10}(\text{Power}/1\text{E-3})$.
- **Number** — строится график выбранной величины в обычных абсолютных единицах (Вольтах или Ваттах).

Denominator (знаменатель) — для вычисления в относительных единицах можно выбрать знаменатель $F2 \pm FL$ или 1. $F2 \pm FL$ используется когда вы хотите построить интермодуляционные составляющие 2-го и 3-го порядков в относительных единицах по отношению к 1-ой гармонике H1. 1 используется когда необходимо построить абсолютные значения интермодуляционных составляющих H1, IM2, и IM3, как значения коэффициентов ряда Фурье.

- **Designator** — выбор обозначения

Simple — выбирается простое обозначение, такое как H1, IM2, IM3.

Literal — выбирается более сложное обозначение графиков, такое как IM3P(dBW). Поскольку переменные могут быть измерены различными способами (по напряжению или мощности) это обозначение однозначно говорит о том как производились вычисления.

- **Buffer** — организует доступ к буферу графиков. Позволяет вызвать ранее сохраненный график искажений. Графики могут быть сохранены в буфере посредством правого клика на выбранной кривой, затем выбора из раскрывающегося списка команды *Add to Buffer*.
- **Show IM2 Intercept** — рассчитывается точка, где кривая H1 должна пересечь кривую IM2, если они идеальны (прямые линии) и имеют соответственно наклоны 1 и 2. Если нет пары точек, у которых наклон отрезка их соединяющего находится в диапазоне от 0.9 до 1.1 для H1, или в диапазоне от 1.8 до 2.2 для IM2, тогда точка пересечения не будет найдена и пунктирные линии не будут построены. Для правильного построения IM2, должен быть его знаменатель (denominator) установлен в 1, и выбрана опция Power совместно с dB (или dBm). В качестве переменной откладываемой по оси X должна быть выбрана PIN с единицами dBm.
- **Show IM3 Intercept** — рассчитывается точка, где кривая H1 должна пересечь кривую IM3, если они идеальны (прямые линии) и имеют соответственно наклоны 1 и 3. Если нет пары точек, у которых наклон отрезка их соединяющего находится в диапазоне от 0.9 до 1.1 для H1, или в диапазоне от 2.8 до 3.2 для IM3, тогда точка пересечения не будет найдена и пунктирные линии не будут построены. Для правильного построения IM3, его знаменатель (denominator) должен быть установлен в 1, и выбрана опция Power совместно с dB (или dBm). В качестве переменной откладываемой по оси X должна быть выбрана PIN с единицами dBm.
- **Show 1 dB Compression Point** — определяется точка, где кривая H1 снижается на 1dB ниже идеальной прямой с единичным наклоном. Эта точка обозначается как P1dB=PIN, H1. Величины откладываемые по осям X и Y должны быть определены как мощности в логарифмических единицах dB (или dBm).
- **What to Plot** — если выполнялась вариация более чем одной переменной (например TEMPERATURE, VIN), данный раскрывающийся список выбирает конкретную реализацию (реализации) для построения графика. Вы-

бор конкретной (всех) реализации относится только к выбранному графику. Выбор All приведет к построению графиков всех вариантов.

- **Plot Group** — можно объединять выводимые графики в графические окна (группы) выбором номера группы в этом поле.
- **Labels** — галочка в этом поле приводит к выводу меток для выбранного графика, когда построены варианты. Опция Font позволяет выбрать шрифт для меток.

Scales and Formats — в этой закладке устанавливаются обычным образом числовые форматы выводимых графиков.

Colors, Fonts, and Lines — в этой закладке устанавливаются обычным образом цвет, шрифт и тип прорисовки линии графика.

Scope — Эта закладка обеспечивает обычные возможности управления выводом графиков для более детального просмотра.

Header — обеспечивает управление заголовочным блоком файла числового вывода.

Numeric Output — обеспечивает управление числовым выводом для графиков искажений. В числовой вывод может быть включена любая переменная, вне зависимости от того была ли она выведена на график или нет. Просто следует установить галочку против соответствующей переменной в списке *Variables to Print* и нажать кнопку *Create*. При этом создается файл с именем <имя схемного файла>.IDNO. Следует отметить, что создаются 2 вида файлов числового вывода. Файл обычного формата, который создается автоматически и является числовым выводом временных зависимостей. Другой файл — это файл числового вывода искажений, управление которым осуществляется с помощью данной закладки.

Tool Bar — Закладка служит для управления кнопками панели инструментов графического окна.

Основные рекомендации по анализу интермодуляционных искажений

- Следует всегда использовать PSS, это наверняка приведет к построению более точных графиков искажений.
- При анализе радиотехнических преобразователей частоты следует использовать отношение частот $F1/F2$ не более чем 0.99: Чем ближе это отношение к 1, тем большее время потребуется для анализа переходных процессов. Отличия в результирующей величине искажений при отношениях частот 0.90 и 0.99 обычно незначительны, а время анализа в 10 раз меньше.
- **Быстрое получение графиков $IP2$ и $IP3$.** Точный расчет идеальных прямых $IP2$, $IP3$ требует только два подходящих значения входного напряжения. Проведите эксперимент с двумя парами значений входного сигнала с частотой $F2$, как например 1m,10m, или 10m,50m для нахождения диапазона, где наклоны равны идеальным значениям. Идеальные наклоны для $IM1$, $IM2$, и $IM3$ должны быть 1.0, 2.0, и 3.0 соответственно. Вы можете увидеть величины наклонов в столбце *slope* при включенном курсорном режиме *cursor mode* (F8). Для этого следует поместить левый и правый курсоры в соседние точки графика. В случае только двух значений амплитуд входного сигнала частотой $F2$, курсоры автоматически поместятся именно

в расчетные точки. Оптимальная начальная пара значений амплитуды 1m, 10m для усилителей звуковых частот и 10m, 50m для радиочастотных смесителей. Однажды определенная для конкретной схемы пара значений амплитуд входного сигнала может не изменяться и далее при небольших усовершенствованиях в схеме. Однако, если вы не уверены, можно порекомендовать использовать вариацию амплитуды с логарифмическим шагом: 100m, 1m, 1.2, а затем посмотреть наклоны получившихся кривых. Следует помнить при этом, что анализ потребует существенных затрат машинного времени.

- *Отсутствие идеальных пунктирных линий.* Если требуются идеальные пунктирные линии, а они не выводятся, то это означает что наклоны кривых далеки от идеала. Для H1 наклон должен находиться в диапазоне от 0.9 до 1.1, для IM2 — от 1.8 до 2.2, для IM3 — от 2.7 до 3.3.

Формулы и определения, используемые при расчете интермодуляционных искажений

Определения

A — масштабный множитель для логарифмических единиц dB

S — амплитуда гармоники в виде коэффициента ряда Фурье.

V_1 — амплитуда сигнала фундаментальной частоты ($F2 \pm FL$)

При выборе напряжений (Voltage):

N_2 — среднее квадратическое значение числителя интермодуляционной составляющей 2-го порядка

D_2 — среднее квадратическое значение знаменателя интермодуляционной составляющей 2-го порядка *

N_3 — среднее квадратическое значение числителя интермодуляционной составляющей 3-го порядка

D_3 — среднее квадратическое значение знаменателя интермодуляционной составляющей 3-го порядка *

При выборе мощности (Power):

N_2 — среднее квадратическое значение в квадрате числителя интермодуляционной составляющей 2-го порядка

D_2 — среднее квадратическое значение в квадрате знаменателя интермодуляционной составляющей 2-го порядка *

N_3 — среднее квадратическое значение в квадрате числителя интермодуляционной составляющей 3-го порядка

D_3 — среднее квадратическое значение в квадрате знаменателя интермодуляционной составляющей 3-го порядка *

* Если "1" выбрана в опции Denominator, то $D_2=D_3=1.0$ как для напряжений, так и для мощностей.

Таблица 6.3. Основные выходные параметры анализа интермодуляционных искажений MC10

Обозначение	%	dB	абс. единицы
H1	100	$A \cdot \log(S)$	S
IM2	$\frac{100 \cdot N_2}{D_2}$	$A \cdot \log\left(\frac{N_2}{D_2}\right)$	$\frac{N_2}{D_2}$
IM3	$\frac{100 \cdot N_3}{D_3}$	$A \cdot \log\left(\frac{N_3}{D_3}\right)$	$\frac{N_3}{D_3}$

Таблица 6.4. Основные промежуточные переменные и коэффициенты анализа интермодуляционных искажений MC10

Переменная	Напряжение	Мощность
A	20	10
S	V_1	$\frac{V_1^2}{R_L}$
PIN	$V_{IN} \cdot I_{IN}$, если источник LO не указан	
PIN	$\frac{0.5V_{IN} \cdot 0.5V_{IN}}{R_{SOURCE}}$, если источник LO указан	

6.10. Проблемы сходимости при выполнении моделирования

В этом разделе речь пойдет о сходимости методов расчета и проблемах, из-за которых она отсутствует. Здесь будут перечислены первопричины диагностических сообщений о расхождении и указаны пути их преодоления.

6.10.1. Определение сходимости

Для того, чтобы выполнить анализ, программа Micro-Cap должна решить систему нелинейных уравнений. Ни человек, ни машина не в состоянии решить эти уравнения аналитически, поэтому для их решения используются численные методы. Существует много способов численного решения, но все они основаны на наличии какого-либо критерия достижения правильного результата и прекращении дальнейшего расчета при соблюдении этого критерия. Обычно этот критерий выглядит как нижеприведенный фрагмент программного кода на Паскале:

```
while (error>RELTOL*V+VNTOL and iterations<MAXITERATIONS)
{
error=Solve();
iterations=iterations+1;
}
```

Этот фрагмент кода расшифровывается следующим образом. Если ошибка расчета превосходит допустимую и не превышено максимальное значение итераций численного метода расчета, то следует продолжать итерации вычислений. Указанная ошибка сама определяется как разность между двумя последовательными расчетами (итерациями) значения искомой переменной. Таким образом, если получается одинаковое значение при двух последовательных итерациях, или по крайней мере, разность между последующими решениями меньше чем допустимая ошибка (tol), то можно утверждать, что процесс решения сошелся, и ответ для текущей точки расчета правильный.

Данный критерий проверяется для каждой переменной состояния схемы. Если процесс расчета хотя бы одной из этих переменных разошелся, тогда чаще всего выдается сообщение: *"Internal time step too small"*, или подобное ему.

Проверка процесса сходимости используется при любом виде анализа схемы, включая анализ переходных процессов (TRANSIENT) во всех точках временной оси, расчет рабочей точки по постоянному току перед проведением AC и TRANSIENT анализа, расчет всех точек передаточных характеристик на постоянном токе (DC analysis). Линейная часть анализа по переменному току AC (т.е. собственно малосигнальный анализ в частотной области) — является единственным видом расчета, при котором нет необходимости в критериях сходимости. Здесь просто решаются линейные алгебраические уравнения для комплексных переменных матричными методами.

Сходимость (Convergence) — это соглашение о соотношении между последовательными численными приближениями (итерациями) для получения окончательного решения.

6.10.2. Что вызывает проблемы сходимости методов расчета

Причин расходимости численного алгоритма расчета может быть много. Ниже приведен список наиболее часто встречающихся причин.

Нарушения непрерывности функций в описании моделей. Иногда в модели имеются функции с точками разрыва, которые чаще всего определяют проводимость, передаточную проводимость или емкость. Как правило, это точка, в которой значение производной функции стремится к бесконечности. Когда процесс решения переходит границу разрыва, получается несоразмерный результат, и итерации решений повторяются вокруг точки разрыва до тех пор, пока их число не превысит предельно допустимое значение. Это основное ограничение, о которых должен помнить пользователь, создавая собственную модель. Таким образом, при определении модели необходимо избегать появления областей разрывности проводимости.

Бистабильные или в целом неустойчивые схемы. Если схема неустойчива или имеет много устойчивых состояний, программа расчета будет переходить от одного состояния к другому. Поскольку не будет достигнута

сходимость к единственному результату, в целом расчет разойдется и будет выдано соответствующее сообщение. Обычно подобная проблема возникает при расчете рабочей точки на постоянном токе и при расчете передаточных функций по постоянному току (DC analysis). Для преодоления этой проблемы надо отказаться от расчета рабочей точки на постоянном токе или заменить DC-анализ TRANSIENT-анализом, организовав линейное изменение значений источников питания. Можно изменить метод расчета рабочей точки на постоянном токе на *Pseudo Transient* (см. 6.1.7).

Некорректное моделирование. Это наиболее частый случай возникновения проблемы расходимости. Нереалистичные значения импедансов или источников энергии, нулевые значения емкостей, плавающие (не имеющие связи по постоянному току с «землей») узлы, непреднамеренные закоротки — типовые причины расходимости численного метода.

Первый и наиболее частый случай в этой категории — *неподсоединенные компоненты*. Если имеется схема, расчет которой сходится и при этом запускается и завершается любой вид анализа, то любое изменение ее топологии, заключающееся в разрыве существующей или добавлении новой связи может привести к расходимости.

Вторая причина — *нулевые значения емкостей*. Конденсаторы действуют как поглотители ударной энергии при переходных процессах. Их присутствие в схеме хорошо согласуется с алгоритмами численных методов для получения более быстрой сходимости и реалистичных результатов. Емкостные модельные параметры крайне редко имеют нулевые значения. Для избежания расходимости вместо нулевых значений следует использовать предельно малые величины емкостей, например, 1E-15 Ф.

Еще одна из типичных проблем состоит в том, что *диод или ключ подключаются последовательно катушке индуктивности*. Как известно, при прекращении тока через катушку на ней наводятся большие перенапряжения. Идеальный диод или ключ коммутирует ток катушки, что создает на ней выбросы напряжения бесконечной величины. При этом программа снижает шаг по времени до очень маленьких значений и может возникнуть расходимость расчета. Для устранения этой проблемы следует использовать резистор, включенный параллельно диоду или переключателю, поглощающий часть тока. Резистор надо выбирать достаточно большим, чтобы он не мешал нормальному функционированию схемы, но не бесконечным. На практике наиболее подходящим значением является 1E6 Ом. При этом даже если расходимости не было, процесс расчета заметно ускоряется.

6.10.3. Контроль сходимости на этапе постановки задачи

Ниже приведены несколько рекомендаций по построению схем моделирования для избежания возникновения проблем сходимости.

Проверка топологии схемы

Гальваническая связь с землей (Path to ground). Каждый узел схемы должен иметь связь с общим узлом по постоянному току. Классический пример некорректной схемы — схема, содержащая 2 последовательно соединенных конденсатора, узел межсоединения которых не имеет никаких других связей. Этот узел не имеет связи с землей по постоянному току (отделен от

нее диэлектриками конденсаторов) и в схеме нельзя будет рассчитать рабочую точку по постоянному току (DC operating point). Для устранения этой проблемы необходимо заменить последовательное соединение конденсаторов конденсатором с эквивалентной емкостью или использовать резистор с большим сопротивлением (например, 1E12 Ом) для создания соединения с землей узла межсоединения конденсаторов.

Другая схемная конфигурация, которая создает аналогичные проблемы — цепь каскадного соединения незаземленных линий передачи (transmission lines). В этом случае нет связи по постоянному току между выходным и входным узлами, поэтому если точка межсоединения не заземлена или не связана с землей через другие компоненты, процесс расчета рабочей точки по постоянному току обязательно разойдется. Решение этой проблемы состоит в постановке резистора с большим сопротивлением (1E12 Ом) между узлом межсоединения длинных линий и землей.

Последовательное соединение источников тока. Последовательно соединенные источники тока разной величины — логическая нелепость и из-за этого возникает проблема сходимости. Для ее устранения необходимо добавить резистор с большим сопротивлением параллельно каждому источнику. А лучше такое соединение не использовать вообще.

Контур из источников ЭДС или катушек индуктивности. Как источники ЭДС, так и индуктивности представляют собой ветви, напряжение на которых задано (в случае катушки — это нулевое напряжение). Контур, состоящий только из источников ЭДС — источник многих проблем, поскольку сумма падений напряжений вдоль замкнутого контура может оказаться не равной нулю. Micro-Cap проверяет этот факт и выдает диагностическое сообщение, но можно устранить проблему введением небольшого сопротивления в контур для поглощения ненулевого разностного напряжения. При этом сопротивление не должно быть слишком малым, это может привести к расходимости процесса расчета.

Закоротки и разрывы. Наиболее простой способ обнаружить закоротки и разрывы — включить опцию показа номеров узлов (Node numbers, ). Если 2 узла закорочены, то формируется единый узел с единым номером. Если 2 узла разделены, то каждый будет иметь свой уникальный номер.

Плавающие узлы (Floating nodes). Плавающие узлы могут вызывать проблемы. Убедитесь, что разрешена опция *Floating Nodes Check* (*Options>Preferences>Options>Analysis*). Она устраняет плавающие узлы проверкой наличия по крайней мере 2-х соединений для каждого. Процедура проверки выполняется при запуске анализа.

Проверка схемы перед моделированием

Для уменьшения вероятности сбоев при моделировании схемы необходимо проверить ее и используемые в ней модели на соответствие ряду условий, перечисленных ниже.

Ненулевое последовательное сопротивление диода. Сопротивление RS диода играет роль самоограничителя экспоненциального тока, который может протекать через структуру при подключении к диоду источника напря-

жения. То же самое относится к сопротивлениям выводов биполярного транзистора BJT.

Ненулевое параллельное сопротивление диода. Сопротивление утечки диода RL играет роль ограничителя обратного напряжения, которое возникает при подключении последовательно с диодом катушки индуктивности. Обычное обратное сопротивление диода при протекании только лишь теплового тока составляет величину порядка $1\text{E}15$ Ом. Это нереалистично высокое значение для большинства диодов. Параметр диода RL предоставляет удобный способ задания сопротивления утечки от $1\text{E}6$ до $1\text{E}9$. Высокое обратное сопротивление диода при наличии последовательной индуктивности не только приводит к наиболее распространенному сообщению об ошибке «Шаг по оси времени слишком мал» ("*time step too small*"), он также в большинстве случаев приводит к сильному замедлению расчетов в результате действительно сильного уменьшения шага.

Ненулевые емкости. Все ли конденсаторы имеют ненулевые значения емкостей? Если нет, установите их значения достаточно малыми по отношению к другим конденсаторам в схеме.

Ключи и катушки индуктивности, включенные последовательно. Если присутствуют подобные цепи и возникают проблемы при расчете, добавьте параллельные резисторы величиной 10K или больше для минимизации проблем сходимости. Ключевой компонент любого типа, соединенный последовательно с индуктивностью, может вызвать подобную проблему. Это относится к ключам, диодам и другим активным приборам.

Проводимость сток-исток MOSFET-транзистора. Небольшая отличная от нуля величина, такая как, например, от 0.01 до $.001$, для модельного параметра LAMBDA, приводит к ограниченной конечной выходной проводимости и снижает вероятность появления проблем сходимости в схемах с MOSFET-транзисторами. Кроме того, для улучшения сходимости можно добавить резистор величиной от 1K до 10K между выводами стока (drain) и истока (source). Сопротивление этого резистора должно быть достаточно большим для обеспечения отсутствия влияния на режимы работы схемы.

Изменение установок в Global Settings

Для обеспечения сходимости процессов вычислений может потребоваться изменение значений параметров *Global Settings*.

Увеличение Gmin. Gmin — это минимальная проводимость ветви схемы. Увеличение этого параметра иногда помогает добиться сходимости расчета рабочей точки по постоянному току.

Увеличение RELTOL. RELTOL — максимально допустимая величина относительной ошибки. Иногда увеличение этого параметра от умолчательного значения 0.001 до 0.01 приводит к достижению сходимости проблемных схем.

Увеличение ABSTOL или VNTOL. Эти параметры *Global Settings* специфицируют максимально допустимую абсолютную ошибку для переменных состояния: токов и напряжений соответственно. Умолчательные значения для этих параметров: $\text{ABSTOL}=1\text{E}-12$; $\text{VNTOL}=1\text{E}-6$. Такие значения подходят для типовых интегральных схем, где типичные значения токов 10 mA , а напряжений — 10 V . Если в анализируемой схеме имеются большие токи и напряже-

ния, попробуйте увеличить эти параметры пропорционально величинам максимальных напряжений и токов в схеме. Таким образом, если в вашей схеме течет ток в 1000 А, следует увеличить ABSTOL в $1E5$ раз ($1000/10mA$), т.е. до значения $1E-7$ ($1E5 \cdot 1E-12$).

Увеличение ITL1. Если при расчете рабочей точки по постоянному току процесс вычислений расходится, тогда следует увеличить ITL1 от принятой обычно 100 до большей величины — это иногда помогает достигнуть сходимости. Есть схемы, которые сходятся после 150 или даже после 300 итераций. Данный способ иллюстрирует пример *Converge.cir* (каталог *Analysis\AC*). Если установлен флажок *Convergence Assist* (*Preferences>Options>Analysis*), то увеличение ITL1 при расхождении выполняется автоматически.

Увеличение ITL4. Если процесс расчета переходных процессов расходится, увеличьте ITL4 до 20 или даже до 50. ITL4 — это предельное значение количества итераций при расчете каждой точки на временной оси, при превышении которого программа отбрасывает текущее решение, снижает шаг по временной оси и пытается снова решить систему в текущей точке временной оси методом итераций с меньшим шагом (см. 6.1.1). Если установлен флажок *Convergence Assist* (в *Preferences*), это выполняется автоматически.

Отключение расчета рабочей точки по постоянному току

Если не достигается сходимость при расчете рабочей точки по постоянному току стандартными методами, можно попробовать установить режим по постоянному току способом, подобным процессам, происходящим при подаче питания на реальную схему. Для этого нужно запустить первый процесс анализа при постоянных значениях всех источников сигнала (равных значениям в нулевой момент времени) для установления и расчета режима в рабочей точке на постоянном токе. Затем нужно сохранить полученные конечные значения переменных состояния схемы при помощи редактора начальных условий *State Variables editor*. Последующие запуски анализа должны брать значения переменных для рабочей точки на постоянном токе из сохраненного при первом расчете файла. Для этого в окне задания параметров анализа *Analysis Limits* должна быть установлена опция *Read* из списка *State Variables*. При этом опция *Operating Point* должна быть выключена. Однако, при изменении схемы, возможно, ее понадобится вновь включить. При этом начальные приближения переменных состояния, взятые из сохраненного файла, как правило, в значительной мере облегчают сходимость. Данный способ также иллюстрирует пример *Converge.cir* каталога *book-mc\Analysis\AC*.

Кардинальные меры для достижения сходимости

Линейное нарастание источников энергии в схеме. Для улучшения сходимости можно организовать медленное пилообразное нарастание питания схемы. Для этого необходимо заменить все источники постоянного напряжения и тока в схеме эквивалентными источниками импульсного (пилообразного сигнала). Начальное значение для всех источников энергии должно быть равно 0 или же должен быть выключен расчет рабочей точки по постоянному току сбросом флага *Operating Point* в окне задания параметров анализа *Analysis Limits*. Подобная возможность имеется только при расчете переходных процессов (transient analysis).

Использование команд Nodeset. Команды Nodeset используются для установки заранее рассчитанных (или предполагаемых) величин узловых потенциалов. Если это начальное приближение близко к истинному значению, сходимость, как правило, улучшается.

Использование ключевого слова Off. Выключите активные приборы с помощью ключевого слова OFF. Это может быть особенно эффективно для достижения сходимости в том случае, если прибор включен в часть схемы, вызывающую общую расходимость.

Использование установок IC для соответствующих компонентов. Эти опции позволяют задать начальные условия для активных компонентов, конденсаторов и катушек индуктивностей. Если компонент является причиной расходимости расчета, это обычно помогает достигнуть сходимости. Для того, чтобы прием был эффективным, необходимо правильно оценить начальные условия (напряжение или ток) компонента.

Проверка файла числового вывода (numeric output file). Если сходимость не достигается, просмотрите файл числового вывода numeric output (**F5**). Он содержит информацию о компонентах схемы, которые вызывают расходимость расчета. Иногда можно получить намек на способ решения проблемы сходимости, увидев, какой компонент привел к неудаче анализа.

Установка флага Convergence Assist. Данная опция, расположенная в *Options>Preference>Options>Analysis*, иногда очень полезна для достижения сходимости проблемных схем. Она разрешает несколько попыток расчета схемы при нескольких комбинациях параметров *Global Settings* для достижения сходимости. Т.е. параметры, при которых расчет успешно сошелся, запоминаются и помещаются в директивы .OPTIONS в текстовую область для достижения сходимости при последующих запусках.

Использование различных методов расчета режима по постоянному току. Если возникает проблема достижения сходимости расчета режима по постоянному току, попробуйте изменить метод расчета этого режима, используя соответствующую команду меню анализа *Operating Points Methods* (**Ctrl+Shift+O**). Это позволяет оценить и выбрать приоритет использования методов расчета режима по постоянному току (всего 5), исключить расходящиеся методы (см. 6.1.7).

Использование численного дифференцирования. При использовании функциональных источников с очень сложными алгебраическими выражениями, следует использовать численное дифференцирование, вместо принятого по умолчанию символьного дифференцирования. Сделать это для всех источников всех анализируемых схем можно с помощью окна *Global Settings* (*Options>Global Settings*), установив флажок **Numeric_Derivative**. Если способ вычисления производной надо изменить для конкретного источника, то следует использовать соответствующую установку позиции Derivative его окна атрибутов.

7. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОСНОВНЫХ ВИДОВ АНАЛИЗА

Рассмотренные выше основные виды анализа обладают рядом дополнительных возможностей. Во всех этих видах анализа можно проводить многовариантный расчет **Stepping** (строить семейства характеристик схемы при изменении какого-либо параметра), выполнять статистический анализ **Monte Carlo** (строить семейство характеристик схемы при случайном разбросе параметров компонентов) и осуществлять оптимизацию параметров схемы (**Optimize**).

Кроме того, в режиме анализа переходных процессов и малосигнальном частотном анализе дополнительно можно выполнить спектральный анализ (анализ Фурье).

7.1. Многовариантный анализ (Stepping)

Пункт **Stepping** содержится в меню режимов соответствующего вида анализа (см. рис. 6.4). Кроме того, панель **Stepping** присутствует в окне *Analysis Limits* для режима анализа переходных процессов, малосигнального частотного анализа, анализа по постоянному току и анализа искажений. Быстрый вызов многовариантного анализа осуществляется клавишей **F11** или пиктограммой  на панели инструментов.

Многовариантный анализ (Stepping) представляет собой процесс варьирования различных параметров схемы с заданным шагом для наблюдения ее реакции. Организовывать изменение параметров схемы с помощью окна **Stepping** можно в любом режиме анализа за исключением *Transfer Function* и *Sensitivity*.

Однако вариацию параметров нельзя использовать совместно с режимом анализа *Монте-Карло*. При попытке совместного использования программа Micro-Cap выполняет режим изменения параметров схемы, установленный последним (первый при этом игнорируется).

Графики при изменении параметров методом вариации **Stepping** отображаются в одном графическом окне в виде семейства графиков. Для идентификации графиков (определения, при каких параметрах получен данный график) наиболее просто навести курсор мыши на график, параметры реализации отобразятся рядом с курсором мыши. Это можно сделать и в режиме

Cursor Mode () — клавишами дополнительной клавиатуры ↓, ↑. При этом активизируются отдельные реализации графика и в заголовке выводятся значения варьируемого параметра. Также можно пометить отдельные реализации, используя команду *Scope>Label Branches* или в режиме *Cursor Mode* использовать команду *Scope>Go to Branch* () для активизации необходимой реализации.

Особенностью последних версий программы MC9, MC10 является возможность включения/отключения одновременно всех 20 варьируемых параметров в 20 закладках диалогового окна **Stepping** кнопками *All On /All Off* и обозначение «галочкой» закладки, параметр которой варьируется.

В MC10, кроме того появилось дополнительное удобство — обозначение панели *Stepping* окна задания параметров анализа жирным шрифтом при установке в соответствующем окне вариации хотя бы одного параметра.

Также MC10 при включенном режиме распараллеливания процессов позволяет значительно ускорить анализ, выполняя одновременно анализ двух или более (в зависимости от количества процессорных ядер в системе) вариантов.

7.1.1. Алгоритм работы режима Stepping

При выполнении каждого шага расчета многовариантного анализа изменяется значение одного (или нескольких) варьируемых параметров и запускается соответствующий режим анализа. Полученные значения (реализация) выводятся на график. Затем снова меняются значения варьируемых параметров и расчет и вывод на график повторяются.

Младшие версии программы Micro-Cap имели ограничения на изменения некоторых переменных, таких, например, как уровень модели (LEVEL) или паразитные сопротивления моделей транзисторов. В последних версиях может варьироваться значительно больше параметров. Сюда включаются атрибуты VALUE компонентов (например, сопротивление резистора), параметры моделей активных компонентов (например, коэффициент передачи тока базы при прямом включении транзистора BF) и даже символьные переменные, определенные в текстовой области директивами .DEFINE и .PARAM.

Таким образом, варьироваться могут 3 типа параметров:

- атрибуты компонентов;
- параметры моделей;
- символьные переменные.

Использование символьных переменных позволяет организовать изменение текстовых строк, образующих список. Это удобный способ для организации изменения моделей, цифровых последовательностей и других параметров, базирующихся на текстовых строках (см. примеры *Steptxt2.cir*, *Opamp_Levels_1* из каталога *Analysis\Stepping*).

Поскольку варьирование параметров изменяет матрицу схемы, являющуюся ее математическим описанием, для каждого значения параметра должен проводиться отдельный сеанс расчета и в графическое окно выводиться один график, соответствующий выбранной реализации. После проведения многовариантного анализа для обработки полученного семейства реализаций могут использоваться функции раздела PERFORMANCE и трехмерные 3D графики. Следует отметить, что трехмерный график для функции Performance может быть построен лишь в том случае, если с помощью *Stepping* варьируются как минимум два параметра.

7.1.2. Диалоговое окно Stepping

В меню всех видов анализа имеется закладка, открывающая окно *Stepping* (вызывается также нажатием пиктограммы  или клавиши **F11**), с помощью которого производится вариация от одного до 20 параметров (рис. 7.1, 7.2).

Закладки варьируемых параметров

Окно **Stepping** имеет 20 закладок для 20 варьируемых параметров. Обычно используется не более двух или трех. Каждая закладка управляет одним изменяемым параметром. Вариация данного параметра разрешена, если флажок соответствующей закладки *Step It* установлен в положение *Yes*.

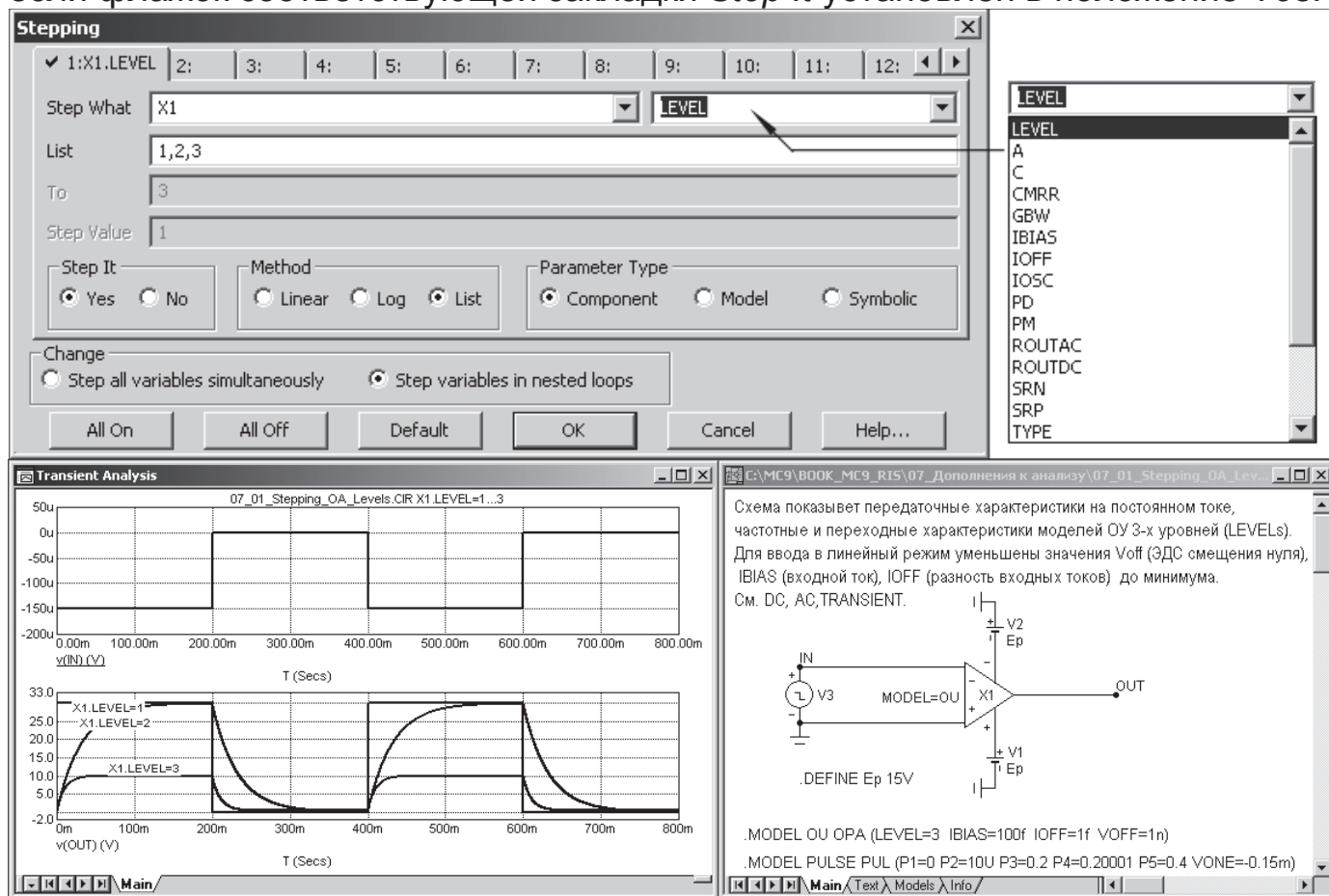


Рис. 7.1. Варьирование параметров компонентов схемы

Опции окна Stepping

Step It — разрешить стейпинг. Установка в *Yes* разрешает вариацию выбранного параметра, в *No* — запрещает.

Step What — что меняется. Содержит два раскрывающихся списка. Левый список позволяет выбрать либо позиционное обозначение компонента, либо имя модели, либо имя символьной переменной. Так как различные компоненты могут использовать одну и ту же модель, математическое определение конкретного компонента ассоциируется с его позиционным обозначением. Имя модели относится ко всем компонентам, использующим данную модель. В правом списке выбирается либо значение атрибута компонента, либо имя модельного параметра.

В общем случае содержание этих двух списков зависит от выбранного типа параметра: *Component*, *Model* или *Symbolic*.

From — начальное значение варьируемого на данной закладке параметра. При выборе логарифмической шкалы оно должно быть больше нуля.

To — конечное значение варьируемого на данной закладке параметра. При выборе логарифмической шкалы должно быть больше нуля.

Step Value — шаг изменения варьируемого параметра. При линейной шкале шаг прибавляется к предыдущему значению, а при логарифмической шкале — умножается на предыдущее значение параметра.

Method — характер изменения варьируемого параметра:

- **Linear** — линейный способ изменения, заключающийся в увеличении параметра на значение шага *Step Value*;
- **Log** — логарифмический способ изменения, заключающийся в умножении параметра на значение шага *Step Value*;
- **List** — список значений варьируемого параметра, в качестве разделителя используется запятая.

Parameter Type — тип варьируемого параметра: параметр компонента, параметр модели, или значение символьной переменной.

- **Component.** Выбор вариации параметров отдельных компонентов. Нажатие на кнопку  в строке *Step What* открывает список имен компонентов, содержащихся в схеме, например, C1, C2, Cb, Q1, R1, R2, Re, Rk, Rn, V1, V2. Если в этом списке выбрать компонент, имеющий единственный параметр (например, конденсатор), то справа на первой строке появится стандартное имя VALUE (обозначающее значение параметра). Если же выбранный компонент имеет модель или макромодель (описываемую директивами .MODEL, .MACRO или .SUBCKT), то справа на первой строке нужно выбрать имя ее параметра. Причем, если в окне *Global Settings* включены опции PRIVATEANALOG и PRIVATEDIGITAL, то варьироваться будут только параметры индивидуально выбранного компонента; параметры других компонентов, имеющих те же модели, варьироваться не будут. При выключении этих опций варьироваться будут параметры всех компонентов, имеющих ту же модель. Если компонент входит в состав макромодели, то используется составное имя: сначала указывается имя макромодели, затем после десятичной точки имя входящего в нее компонента, например X1.D13, X2.R4.
- **Model.** Выбор для вариации параметров моделей (например, емкости коллекторного перехода биполярного транзистора или параметров задержки прохождения сигнала для цифровых схем). Если выбран тип *Model*, то нажатие на кнопку  в левой части панели *Step What* открывает список имен моделей. Для выбранной модели из этого списка нажатием  в правой части панели выбирается имя варьируемого параметра. Например, в первой строке слева можно указать тип модели PNP \$GENERIC_P (p-n-p транзистор с моделью \$GENERIC_P), а справа — имя одного из его параметров, например, BF (рис. 7.2). По этому способу варьируются параметры всех компонентов, имеющих выбранную модель. В приведенном примере могут варьироваться параметры BF всех транзисторов, имеющих модель \$GENERIC_P. Это происходит независимо от установок PRIVATEANALOG и PRIVATEDIGITAL в окне *Global Settings*.
- **Symbolic.** Выбор для вариации символьных переменных — переменных созданных директивами .DEFINE или .PARAM. Они могут использоваться в качестве величин параметров компонентов или модельных параметров. Многовариантный анализ превращает их в мощное средство управления параметрами групп моделей. Например, можно управлять параметрами

ширины и длины канала W и L тех МОП-транзисторов, которые имеют в строке модели, задающей ширину и длину канала символьные переменные $W1$ и $L1$ соответственно:

```
.DEFINE W1 2U
.DEFINE L1 0.3U
.MODEL NM1 NMOS (W=W1 L=L1...)
```

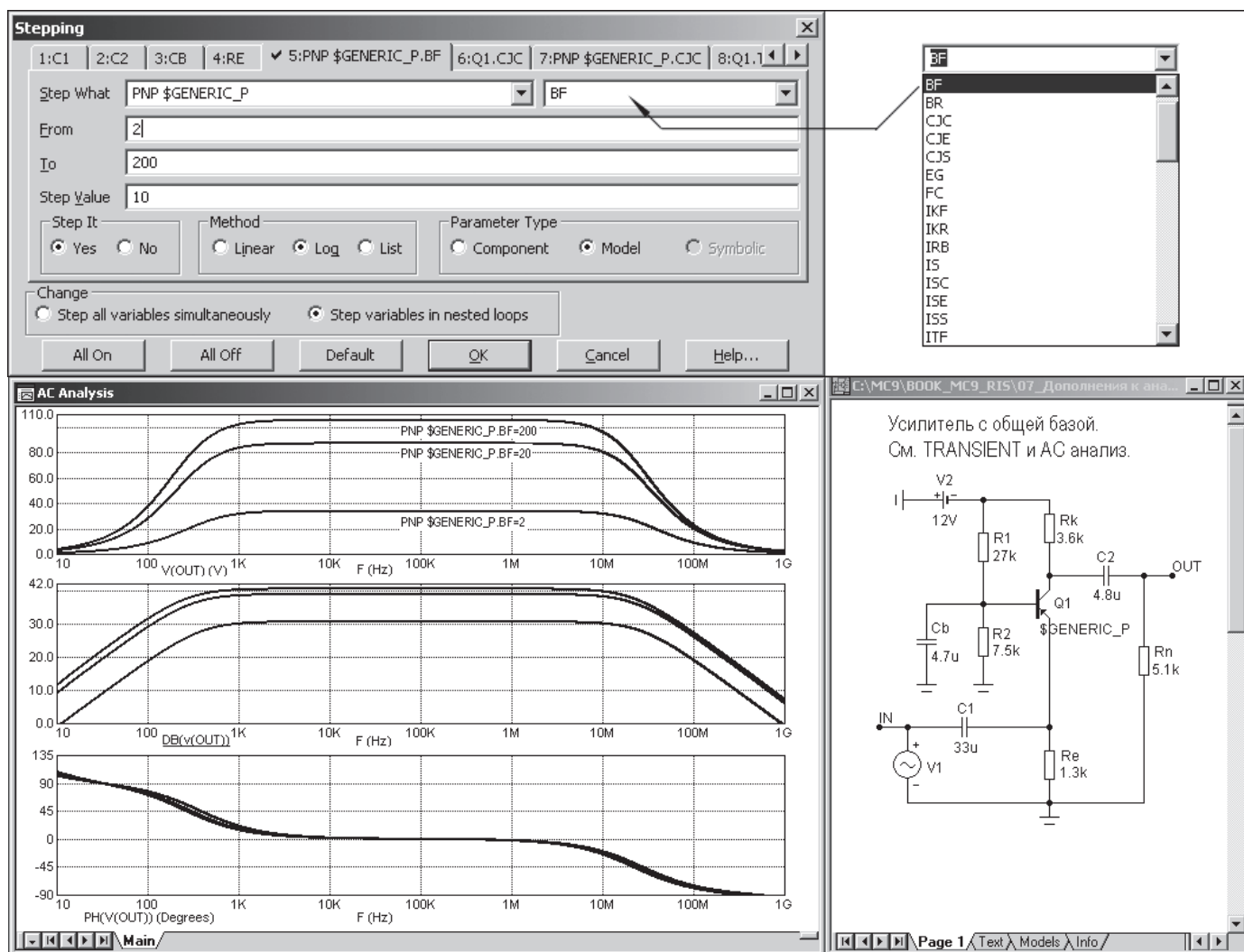


Рис. 7.2. Варьирование параметров модели транзистора

Change — изменение нескольких переменных. Используется только тогда, когда вариации подвергается несколько параметров. Определяет, как будет осуществляться заданное изменение нескольких параметров. Эта опция допускает две установки:

Step all variables simultaneously. В этом случае изменение всех варьируемых параметров осуществляется одновременно. Следовательно, в результате получаются реализации при нескольких фиксированных наборах значений варьируемых параметров. В этом случае числа вариаций всех параметров должны быть равны между собой, в противном случае будет выдано сообщение об ошибке.

Step variables in nested loops. В этом случае каждый параметр изменяется независимо в пределах заданного диапазона, поэтому получается большое число вариантов анализа для всех возможных сочетаний варьируемых параметров. В этом случае происходит поочередное (вложенное) изменение

варьируемых параметров. Во внешнем цикле изменяется переменная на 1-ой закладке, а в самом глубоком, внутреннем — переменная на 20-ой закладке.

Например, на первой закладке задано изменение индуктивности $L1$ от $1U$ до $2U$ с шагом $1U$, на 2-ой закладке — изменение емкости $C2$ от $1N$ до $2N$ с шагом $1N$. При установке опции *Step all variables simultaneously* будет посчитано 2 реализации:

1) $L1=1U$, $C1=1N$ 2) $L1=2U$, $C1=2N$.

При установке опции *Step variables in nested loops* будет посчитано 4 реализации:

1) $L1=1U$ $C1=1N$, 2) $L1=1U$, $C1=2N$, 3) $L1=2U$ $C1=1N$, 4) $L1=2U$ $C1=2N$.

Командные кнопки

All On. Включение вариации параметров на всех закладках.

All Off. Выключение вариации параметров на всех закладках.

Default. Задаёт диапазон изменения параметра на выбранной закладке, принятый по умолчанию — от половины номинального значения до удвоенного номинального значения с логарифмическим шагом равным 2. При этом параметр принимает 3 различных значения.

OK. Выход из диалогового окна *Stepping* с сохранением всех сделанных изменений.

Cancel. Выход из диалогового окна *Stepping* без сохранения всех сделанных изменений.

Help. Вызов раздела подсказки *Stepping Dialog Box*.

Перед выполнением вариации параметров рекомендуется убедиться, что моделирование выполняется без ошибок при номинальном значении параметров. Еще раз обращаем внимание, что одновременная вариация параметров в режиме **Stepping** и статистический анализ по методу **Монте-Карло** невозможны.

Пример многовариантного анализа переходной характеристики операционного усилителя при изменении уровня модели (параметр $LEVEL=1-3$) приведен на рис. 7.1. Пример многовариантного расчета частотных характеристик усилительного каскада с общей базой при вариации параметра модели транзистора BF приведен на рис. 7.2. Соответствующие схемные файлы *Opamp_Levels.cir* и *US_BJT_ОБ.cir* можно посмотреть в каталоге *Analysis\Stepping*.

Ограничения на вариации параметров

Нельзя варьировать параметры компонентов *Transformer*, *User source*, *Laplace source*, *Function source*, зависимых источников SPICE (типа E, F, G и H).

В заключение отметим, что графики, полученные путем многовариантного анализа можно пометить, чтобы знать, какому значению варьируемого параметра соответствует каждая кривая. Осуществляется это с помощью команды *SCOPE>Label Branches* (рис. 7.2).

7.2. Статистический анализ по методу Монте-Карло

Реальные компоненты электронных схем всегда имеют определенный разброс параметров. Поэтому важной задачей автоматизированного анализа электронных схем является исследование поведения электронной схемы в случае, когда ее параметры имеют разброс, а не жестко заданы. Как правило, это заключительный этап анализа, выполняемый после того, как расчеты при фиксированных (номинальных) значениях параметров уже проведены. Micro-Cap предоставляет такую возможность в режиме анализа Монте-Карло (*Monte Carlo*). Закладка **Monte Carlo** появляется в строке меню главного окна системы после проведения основных видов анализа (*Transient, AC, DC*).

Во время анализа *Monte Carlo* производится множество запусков процесса моделирования. Для каждого варианта создается новая схема, параметры компонентов которой принимают случайные значения. Процесс выбора численных значений случайных параметров для каждого варианта анализа основан на допусках номиналов различных компонентов и типе распределения случайного отклонения в пределах заданного диапазона. После проведения анализа Монте-Карло полученные результаты могут быть обработаны с использованием функций *Performance* и показаны в графическом виде в форме гистограммы распределения полученных характеристик по заданным интервалам, из которых можно сделать вывод о проценте выхода годных изделий (электронных схем) при использовании компонентов с заданными допусками без дополнительной настройки.

Особенности анализа *Monte Carlo*

- Пользователь может определять начальное значение (зерно) генератора случайной последовательности;
- Добавлено диалоговое окно установки допусков параметров компонентов *Tolerance*, доступное как из окна схемного редактора так и из окна *Monte Carlo Options*.
- При использовании в режиме *Cursor Mode* функции *Performance* или курсорной функции выбор варианта анализа приводит к показу ее значения.
- В MC10 анализ *Monte Carlo* выполняется в разы быстрее, за счет поддержки механизма распараллеливания вычислительных процессов. На двухядерном процессоре ускорение в 1.5 раза, на четырехядерном — в 3 раза.
- В окне установок параметров анализа *Monte Carlo Options* добавлен новый флаг *Eliminate Outliers*. Его установка удаляет те значения гауссова распределения случайной величины, которые выходят за пределы полосы допуска (MC10).
- Пользователь может сам выбрать масштабы по обеим осям (X и Y) гистограммы (MC10).
- На гистограмме теперь указывается количество вариантов анализа в позиции *Number of Runs* (MC10).
- На вершине гистограммного столбика теперь можно выводить как процентное значение, так и количество попаданий (MC10).

В Micro-Cap допуски могут иметь только параметры моделей и символьные переменные. К примеру, чтобы получить возможность провести анализ

поведения схемы при разбросе параметров резисторов, для них нужно не просто задать номинальные значения сопротивления, а выбрать соответствующие модели.

7.2.1. Основные сведения об анализе Монте-Карло

При выборе анализа *Монте-Карло* происходит анализ множества схем. Каждая схема конструируется из компонентов, значение параметров которых может принимать случайное значение по заданному закону распределения в пределах заданного диапазона (допуска). Допуски задаются в модели компонента. Допуски обычно указываются в абсолютных единицах или в процентах от номинального значения.

Допуски для параметров модели

В общем случае существуют два вида случайных отклонений параметров от номинального значения: коррелированное (абсолютное) отклонение LOT и независимое (относительное) — DEV. Для каждой модели компонента могут быть указаны как оба вида отклонений, так и один. Каждое из них может выражаться в абсолютных единицах или как процентное отклонение от номинального значения (см. раздел 4.9, директива .MODEL).

Абсолютное отклонение LOT дается одновременно всем указанным параметрам компонентов, имеющим одну и ту же модель. Относительное отклонение DEV дается всем указанным параметрам различных компонентов отдельно, независимо друг от друга, даже если они имеют одну и ту же модель. Причем, если для параметра модели указано 2 отклонения и LOT и DEV, то сначала для всех компонентов, имеющих указанную модель, вычисляются случайные значения параметра согласно значению LOT (они будут коррелированными и в случае одинакового значения параметра — одинаковыми), а затем параметру каждого компонента даются независимые случайные отклонения, определяемые величиной DEV.

Обобщая, можно сказать, что отклонение DEV введено для учета разброса номиналов компонентов, изготавливаемых в едином технологическом процессе.

Формат задания допусков параметров в модельной строке следующий:

[LOT[t&d]=<value>[%]] [DEV[t&d]=<value>[%]]

Примеры:

- .MODEL N1 NPN (BF=300 LOT=10%) — модельная строка задает 10% абсолютное отклонение параметра BF биполярного транзистора с моделью N1.

В этом примере при использовании в анализе *Монте-Карло* распределения *WORST CASE* (наихудший случай) все транзисторы, имеющие модель N1, будут иметь прямое Beta 270 (либо 330). Если будет использовано распределение *GAUSS* (Гаусса), то BF всех транзисторов с моделью N1 примет значение, определяемое распределением Гаусса со стандартной девиацией (standard deviation), зависящей от номинального значения (300) и допуска (10%). Если задано распределение *UNIFORM* (равномерное) параметр BF всех транзисторов с моделью N1 будет выбран из диапазона 270-330 случайным образом с одинаковой вероятностью для любого значения внутри диапазона. Будет ли коррелированным разброс BF для транзисторов с одинаковой

моделью N1 зависит от состояния флага PRIVATEANALOG окна *Global Settings*. Отметим, что все сказанное относится к одному варианту расчета в пределах полного анализа *Монте-Карло*, состоящего из расчета заданного количества вариантов.

- .MODEL N1 NPN (BF=300 DEV=1%) — модельная строка задает 1% относительное отклонение параметра BF биполярного транзистора с моделью N1.

Допуск DEV задает относительное случайное отклонение параметра. Величина DEV=0% соответствует идеальному технологическому процессу, при котором отклонения полностью контролируются и не выходят за пределы заданного разброса. Однопроцентный допуск типа DEV подразумевает, что параметр BF каждого транзистора с моделью N1 принимает значения, отличающиеся от номинального на $\pm 1\%$ (в случае использования распределения *WORST CASE*). Задание допуска DEV подразумевает разделение моделей всех компонентов при анализе, даже если они имеют общую модель и флаги PRIVATEANALOG и PRIVATEDIGITAL в окне *Global Settings* сброшены. Т.е. для данного примера значения BF каждого транзистора с моделью N1 будет независимо случайным образом принимать одно из двух значений либо 297, либо 303 в одном сеансе анализа.

- .MODEL N1 NPN (BF=300 LOT=10% DEV=1%) — модельная строка задает 10% абсолютный допуск LOT и 1% относительный допуск DEV для параметра BF биполярного транзистора с моделью N1.

Допустим, при проведении анализа *Монте-Карло* задано распределение *WORST CASE* (наихудший случай). В текущем сеансе анализа сначала выбирается случайным образом одно из 10% LOT отклонений, соответствующих наихудшему случаю, т.е. BF всех транзисторов с моделью N1 принимается равным либо 270 (либо 330):

$$BF = 270 = 300 - 0.1 \cdot (300)$$

$$BF = 330 = 300 + 0.1 \cdot (300)$$

Предположим, что в текущем сеансе анализа выбрано случайным образом BF=330. Таким образом, на первом этапе расчета параметров моделей с допусками, BF всех транзисторов с моделью N1 принимается равным 330. Затем для каждого из указанных транзисторов дается независимое случайное отклонение BF, определяемое допуском DEV, равное для наихудшего случая $\pm 1\%$:

$$327 = 330 - 0.01 \cdot 300$$

$$333 = 330 + 0.01 \cdot 300$$

Таким образом, в текущем сеансе анализа у одних транзисторов с моделью N1 параметр BF будет равен 327, а у других — 333.

Аналогично, если в текущем сеансе расчета согласно допуску LOT, BF выбрано случайным образом равным 270, на втором этапе параметру BF каждого транзистора с моделью N1 дается независимое случайное отклонение ± 3 , определяемое значением допуска DEV и законом распределения *WORST CASE*:

$$267 = 270 - .01 \cdot 300$$

$$273 = 270 + .01 \cdot 300$$

Для каждого варианта расчета внутри анализа Монте-Карло значения BF всех транзисторов с моделью N1 будут взяты либо из множества {267, 273}, либо из множества {327, 333}.

Допуски пассивных компонентов: *резисторов, конденсаторов и катушек* могут быть заданы в параметре масштабный множитель (R, C, L) их модельной строки (см. 5.2.1–5.2.3).

Пример:

Задание 10% допуска LOT и 1% допуска DEV для модели резистора RMOD:

.MODEL RMOD RES (R=1 LOT=10% DEV=1%)

Для этого примера любой резистор с моделью RMOD при анализе Монте-Карло получит коррелированные и независимые случайные отклонения, определяемые значениями LOT и DEV через масштабный множитель сопротивления R=1.

[t&d] определяет номер случайной последовательности и закон распределения чисел в случайной последовательности. Имеет следующий формат:

[/<lot#>][/<имя распределения>]

Основные признаки случайных последовательностей следуют непосредственно за ключевыми словами LOT (DEV) без разделяющих пробелов, между собой разделяются знаком «/».

<lot#> — определяет какой именно из 10 (с номером от 0 до 9) независимых генераторов случайных чисел будет использован для задания случайного отклонения параметра. Это дает возможность коррелировать случайные отклонения для различных компонентов (в том числе и имеющих различные модели), задавая для их параметров один и тот же генератор случайной последовательности. Допуски LOT без указания номера генератора случайных чисел приводят к генерации независимых случайных отклонений для компонентов, имеющих различные модели.

<имя распределения> — указывает выбранный тип распределения случайной величины с помощью ключевых слов:

- **UNIFORM** — равномерное распределение (равновероятное в пределах диапазона);
- **GAUSS** — нормальное или Гауссово распределение;
- **WCASE** — распределение для наихудшего случая (выбор из двух значений на границах диапазона).

Если в модельной строке имя распределения не задано, то оно указывается в диалоговом окне анализа Монте-Карло — *Monte Carlo Options*.

Для иллюстрации использования **<lot#>**, рассмотрим пример (рис. 7.3).

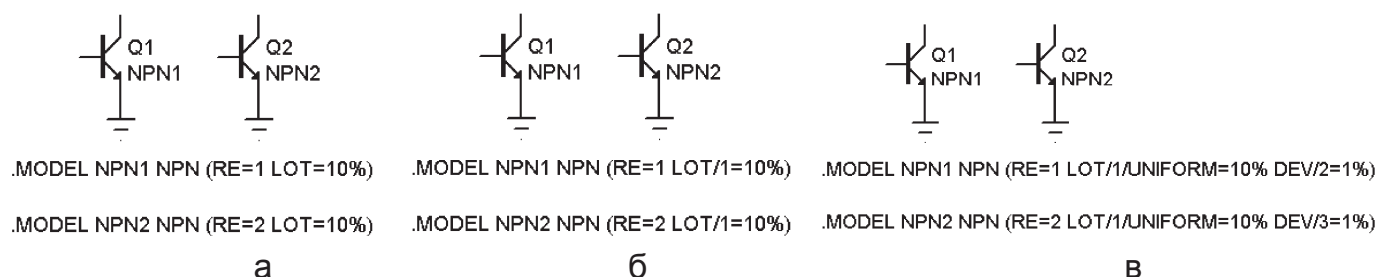


Рис. 7.3. Использование допусков LOT и DEV

На рис. 7.3, а RE транзистора Q1 имеет случайный разброс, независимый от случайного разброса RE транзистора Q2 (они создаются разными генераторами случайных чисел). В примере рис. 7.3, б сопротивления RE обоих транзисторов Q1 и Q2 имеют коррелированный разброс, однако их значения не будут одинаковыми из-за различия номиналов. В следующем примере (рис. 7.3, в) случайные разбросы RE (в пределах заданного диапазона LOT) обоих транзисторов коррелированы, однако в целом разбросы не связаны из-за использования различных генераторов для DEV. DEV задает относительное изменение параметра в процентах в сторону увеличения или уменьшения после вычисления случайной величины по значению LOT в соответствии с заданным законом распределения (см. примеры *Correlation.cir*, *Correlation_lot&dev.cir* из каталога *Analysis\Monte Carlo*).

Допуски значений символьных переменных

Символьные параметры, создаваемые директивой .DEFINE, также могут иметь допуски.

Формат символьной переменной с допуском следующий:

.DEFINE [{*lotspec*}] <имя переменной> <выражение> ,

где формат *lotspec* подобен рассмотренному выше формату задания случайных отклонений, за исключением невозможности использования независимых относительных допусков DEV:

[LOT[*t&d*]=<значение>[%]].

[*t&d*] — указывает номер случайной последовательности и вид распределения случайной величины, используя обычный формат:

[/*<lot#>*]/[/*<имя распределения>*]

Примеры:

.DEFINE {LOT/1/GAUSS=10%} RATE 100

Директива определяет переменную RATE, имеющую номинальное значение 100 и 10% случайное отклонение, подчиняющееся распределению Гаусса на основе первого генератора случайных чисел.

.DEFINE {LOT/3/UNIFORM=20%} VOLTAIRE 100

Директива определяет переменную VOLTAIRE с номинальным значением 100, имеющую 20% случайное отклонение, которое подчиняется равномерному закону распределения. Для генерации случайного отклонения используется 3-ий генератор случайных чисел.

В версии MC10 для задания распределения случайной величины могут быть использованы новые функции AGAUSS, GAUSS, UNIF, и AUNIF. Например, если в поле VALUE резистора задать *agauss(1k,100,2)* это будет означать что резистор номиналом 1k resistor имеет допуск 100 Ом при коэффициенте стандартного отклонения 2. В этом случае стандартное отклонение сопротивления резистора от номинала $50=100/2$.

Зависимость корреляции допусков от состояния флагов PRIVATEANALOG и PRIVATEDIGITAL

1. Если используются допуски типа DEV, то параметры всех компонентов, имеющих одинаковые модели, получают независимое (некоррелированное) случайное отклонение, независимо от состояния флагов PRIVATEANALOG и PRIVATEDIGITAL в окне *Global Settings*. При этом параметры указанных компо-

нентов могут иметь различные значения в одном сеансе расчета только в том случае, если допуск DEV отличен от нуля.

2. Если допуски типа DEV не используются и флаги PRIVATEANALOG и RIVATEDIGITAL в окне *Global Settings* сброшены, тогда параметры компонентов, имеющих одинаковые модели, будут принимать одинаковые значения в одном сеансе анализа.

3. Если допуски типа DEV не используются и флаги PRIVATEANALOG и RIVATEDIGITAL в окне *Global Settings* установлены, тогда параметры компонентов, имеющих одинаковые модели, могут принимать разные значения в одном сеансе анализа, если допуск (в данном случае только LOT) отличен от нуля.

Законы распределения случайной величины

Действительные величины, присваиваемые параметрам элементов, имеющим разброс, зависят не только от величины допуска, но и от закона распределения случайного отклонения от номинального значения.

1. Распределение *WORST CASE* (наихудший случай) генерирует случайным образом экстремальные значения на границах диапазона. Оно соответствует равной вероятности (0.5) принятия случайной величиной минимально возможного и максимально возможного значения (см. примеры *carlo2.cir*, *Gauss.cir* из каталога *Analysis\Monte Carlo*). Два возможных значения параметра определяются по формулам:

$$Min = \langle \text{Номинальное значение} \rangle - \langle \text{Допуск} \rangle;$$

$$Max = \langle \text{Номинальное значение} \rangle + \langle \text{Допуск} \rangle.$$

2. Распределение *UNIFORM* (равномерное) — означает одинаковую вероятность принятия случайной величиной любого значения внутри диапазона, определяемого параметром модели — величиной допуска (LOT, DEV). Значение параметра принимает с одинаковой вероятностью любое значение внутри диапазона $\{\langle \text{Номинальное значение} \rangle - \langle \text{Допуск} \rangle\} \dots \{\langle \text{Номинальное значение} \rangle + \langle \text{Допуск} \rangle\}$.

3. Распределение *GAUSS* (Гаусса) генерирует значения с плавно убывающей плотностью вероятности от центрального (номинального) значения к границам диапазона. Значения расположенные ближе к номинальному значению генерируются чаще, чем значения, лежащие ближе к границам диапазона (рис. 7.4 и схемные файлы *carlo2.cir*, *Gauss.cir*, из каталога *Analysis\Monte Carlo*).

Гауссово распределение случайной величины x описывается уравнением:

$$f(x) = \frac{e^{-0.5 \cdot s^2}}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \quad (7.1),$$

где $s = \frac{x - \mu}{\sigma}$; μ — номинальное значение параметра; σ — величина стандартной девиации (standard deviation), вычисляемая по формуле (7.2); x — значение случайной величины; $f(x)$ — плотность вероятности принятия случайной величиной значения x .

Среднеквадратическое отклонение параметра от номинального значения (standard deviation) σ при этом законе распределения определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{\langle \text{допуск} \% \rangle}{100} \cdot \frac{\langle \text{номинальное значение} \rangle}{SD} = \frac{Tol\% \cdot \mu}{100 \cdot SD}, \quad (7.2)$$

где SD — параметр среднеквадратического отклонения, от которого зависит количество попаданий в диапазон допуска (параметр диалогового окна *Global Settings*, по умолчанию равен 2.58).

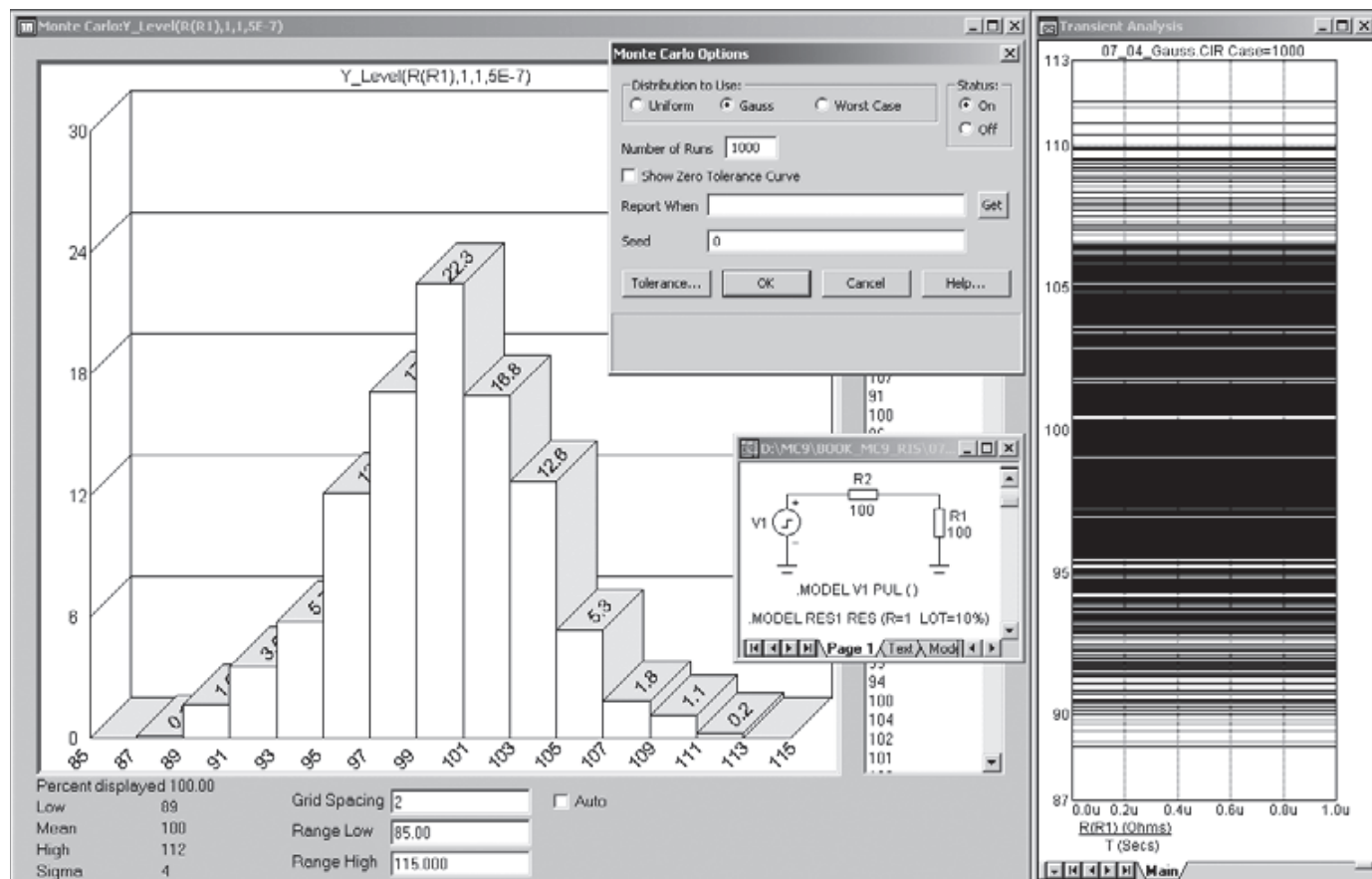


Рис. 7.4. Распределение Гаусса для сопротивления резистора с 10%-ым разбросом

Таким образом, среднеквадратичное отклонение σ при гауссовом распределении рассчитывается непосредственно из значения процентного допуска. От значения SD зависит процент попаданий сгенерированных случайных чисел в диапазон допуска при достаточно большом количестве испытаний (табл. 7.1). Примеры, иллюстрирующие эту зависимость, приведены в схемных файлах *Gauss_01.cir*, *Gauss_02.cir*.

Если производитель компонентов гарантирует, что сопротивления 99,9% выпускаемых 1кОм резисторов с 10% допуском попадают внутрь заданного диапазона, необходимо установить в *Global Settings* (или директивой .Options) $SD=2.96$. При использовании гауссова распределения подавляющее большинство резисторов будет иметь сопротивление, лежащее в диапазоне от 0,9 до 1,1 кОм, лишь 0,1% резисторов не будет удовлетворять этому условию. Говоря иначе, вероятность выхода номинала резистора за пределы диапазона допуска, крайне мала (1/1000), но все же такое событие может произойти.

Таблица 7.1. Иллюстрация действия параметра SD при распределении Гаусса случайного отклонения

Значение SD	Процент попаданий в диапазон, определяемый допуском
1.0	68,7
1.96	95,0
2.0	95,5
2.58	99,3
2.8	99,7
2.9	99,8
2.96	99,9
3	99,99

7.2.2. Диалоговое окно Monte Carlo Options

После выбора любого вида анализа, становится доступным анализ Монте-Карло — появляется меню **Monte Carlo**. Командой этого меню **Options**  открывается диалоговое окно для анализа Монте-Карло **Monte Carlo Options** (рис. 7.5). Окно имеет следующие панели:

Distribution to Use. Эта панель позволяет выбрать один из трех возможных законов распределения случайного отклонения параметров, указанных в модельных строках ключевыми словами LOT и DEV. Выбор в этой панели устанавливает закон распределения тех параметров, у которых в позиции [t&d] закон распределения не задан.

- **Gauss** — распределение Гаусса случайного отклонения параметра от номинального значения, определяемое формулой (7.1).
- **Uniform** — равномерный закон распределения отклонения случайной величины. Равновероятно любое значение отклонения в пределах заданного допуска.
- **Worst case** — соответствует равной вероятности (0.5) принятия случайным отклонением минимально возможного и максимально возможного значения.

Status. Выбор ON включает анализ по методу Монте-Карло, OFF — выключает. Перед выполнением расчетов по методу Монте-Карло следует поставить переключатель **Status** в положение ON. Выделение параметров, имеющих случайный разброс, выполняется с помощью ключевых слов LOT и/или DEV в директиве .MODEL, как показано на рис. 7.5 под анализируемой схемой.

Number of Runs. Задаёт число реализаций (сеансов расчета) при проведении анализа Монте-Карло. Чем больше эта величина, тем точнее реализуется заданное распределение, тем выше достоверность выходных статистических данных. Обычно используется число в диапазоне от 30 до 300. Максимальное значение количества реализаций — 30000.

Show Zero Tolerance Curve. При выборе этой опции первый запуск анализа (и первая кривая на графиках, Case=1) соответствует схеме с номинальными значениями параметров, без случайных отклонений.

Eliminate Outliers. Флаг активен только при использовании Гауссова распределения случайной величины. При его установке значения попавшие за пределы полосы допуска отбрасываются (только для MC10).

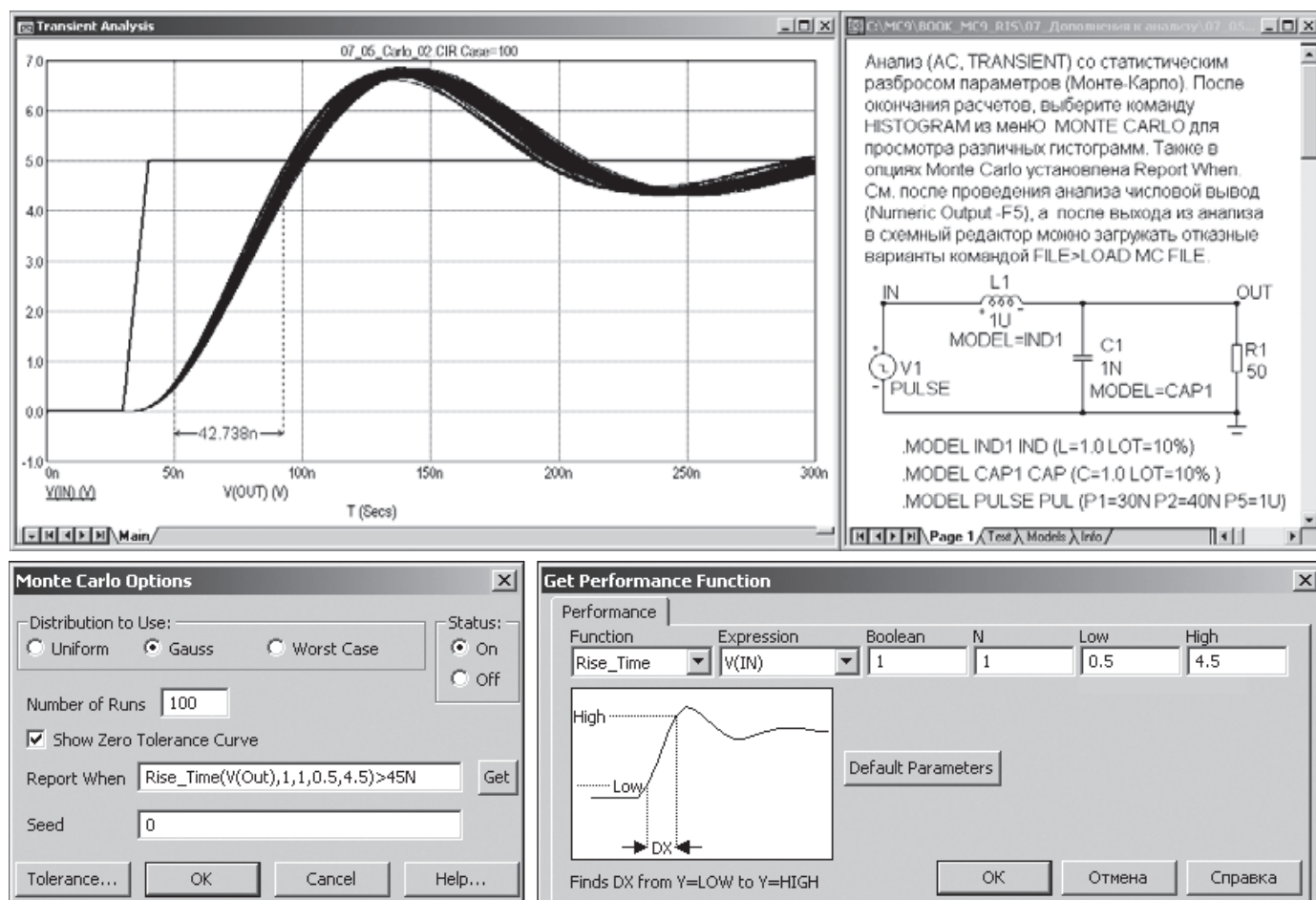


Рис. 7.5. Семейство графиков переходного процесса при случайных независимых разбросах индуктивности и емкости

Report When. В этой строке указывается условие, при выполнении которого в текстовый файл выводится предупреждающее сообщение и значения варьируемых параметров, при которых заданное условие оказывается истинным. Так реализуется регистрация отказов схемы (выход ее характеристик за допустимые границы) при проведении анализа *Монте-Карло*. Сообщение об отказе и соответствующие параметры выводятся в файл, каждый раз, когда логическое выражение в этой строке становится истинным.

Текстовый файл с параметрами, при которых произошел отказ схемы, имеет такое же имя, как и схемный файл, а расширение — *.tno, *.ano или *.dno для **Transient**, **AC** и **DC** анализа соответственно.

Имя указанной в этой строке функции может быть выбрано в раскрывающемся списке доступных функций (рис. 7.5, 7.7). Например, можно задать $\text{Rise\_Time}(V(1),1,1,0.5,4.5)>45\text{ns}$, что вызовет запись в выходной файл значений параметров моделей, при которых время нарастания сигнала от 0.5 до 4.5 Вольт превысило 45 нс.

Содержимое выходного файла можно посмотреть так же, как и содержимое файла табличного вывода данных, который формируется при проведении основных типов анализа. Для этого можно использовать команду *Numeric*

Output, клавишу **F5** или пиктограмму

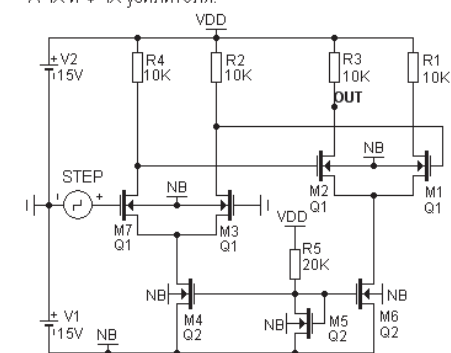
Можно также загрузить этот файл в Micro-Cap по команде *File>Load MC File*. При этом будет сформировано столько схем с соответствующими параметрами, сколько отказов произошло в ходе анализа *Монте-*

Карло. Это позволит рассмотреть каждый случай отказа в отдельности, проанализировать параметры, при которых этот отказ произошел, и внести необходимые коррективы в исходную схему (см. рис. 7.5 и пример *Carlo_02.cir* из каталога *Analysis\Monte Carlo*).

Seed: Управляет последовательностями генерируемых случайных чисел, путем установки начального значения генераторов случайных чисел *SEED*. Если $SEED \geq 1$, то генерируются повторяющиеся последовательности случайных чисел. Если *SEED* отсутствует или $SEED < 1$, то генерируются неповторяющиеся последовательности.

Tolerance (Ctrl+Shift+T). Открытие диалогового окна *Tolerance* (рис. 7.6).

Дифференциальный усилитель на МОП-транзисторах
См. Transient, AC, DC анализ. AC анализ строит
АЧХ и ФЧХ усилителя.



Page 1 | Text | Models | Info |

.MODEL step PUL (VONE=1M P2=200N P3=2.6U P4=2.7U P5=5U)

.MODEL Q1 NMOS (LEVEL=1 CGBO=200P CGDO=40P CGSO=40P GAMMA=500M
+ KAPPA=0 KP=20M LOT/GAUSS=5% L=100U MJSW=333M NFS=10G NSS=10G
+ NSUB=1000T TOX=100N VTO=2 W=100U XQC=0)

.MODEL Q2 NMOS (LEVEL=1 VTO=2 KP=2M L=100U W=100U GAMMA=500M
+ LAMBDA=1M CGSO=40P CGDO=40P CGBO=200P MJSW=333M TOX=100N
+ NSUB=1000T NSS=10G NFS=10G XJ=0 LD=0 XQC=0 FC=500M KAPPA=0)

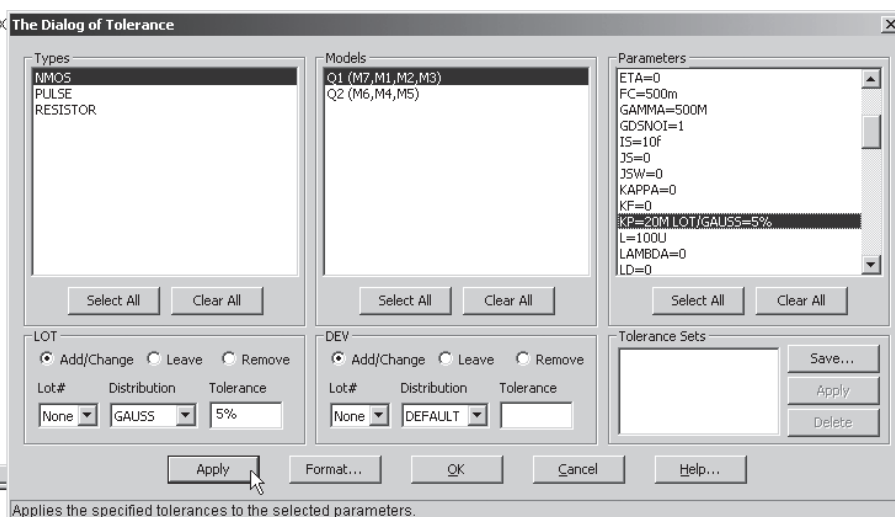


Рис. 7.6. Диалоговое окно *Tolerance*

Допуски номиналов компонентов (*Tolerances*) обычно определяются при создании модельной директивы. Однако модели современных MOSFET- и BJT-транзисторов, имеют столь большое количество параметров, что практически невозможно ввести допуски для всего их ряда, даже если они известны. Рассматриваемое диалоговое окно, вызываемое также из диалогового окна **Monte Carlo>Options** и из пункта меню **Edit>Change>Tolerances**, позволяет определить допуски для всех параметров одной командой. Можно использовать допуски типа *LOT* и *DEV* для любого компонента, имеющего модель (определена модельная директива), а, следовательно и модельные параметры. Можно также сохранять набор установок для разброса параметров (допусков) для последующего использования для других моделей того же типа. Диалоговое окно имеет следующие поля:

- **Types:** Список типов компонентов, имеющих в текущей схеме. Можно выбрать один или несколько типов для дальнейшего определения допусков, хотя обычно допуски используются для компонентов одного типа.
- **Models:** Список всех моделей для выбранного типа (типов) компонентов. Можно выбрать одну (рис. 7.6) или несколько моделей для последующего задания допуска параметров.

- *Parameters*: Показывает список параметров для всех выбранных моделей. Здесь также для задания допуска можно выбрать один (рис. 7.6) или группу параметров.
- *LOT*: Управление опциями для допуска типа LOT:
 - *Add/Change*. Добавляет или изменяет допуск типа LOT для выбранного модельного параметра(ов) в соответствии с величиной указанной в поле *Tolerance*, но только после нажатия панели *Apply*.
 - *Leave*. Выбор этой опции оставляет параметры допуска LOT неизменными.
 - *Remove*. Установка этой опции приводит к удалению допусков типа LOT для выбранных модельных параметров.
 - *Lot#*. Поле позволяет задать номер генератора случайной последовательности *lot#* для допуска типа LOT.
 - *Distribution*. Позволяет выбрать тип распределения для допуска типа LOT.
 - *Tolerance*. Позволяет задать величину допуска. Можно ввести абсолютное значение или относительное — в % от номинального значения.
- *DEV*: Панель управления опциями допуска типа DEV. Набор опций тот же, что и для панели *LOT*.
- *Tolerance Sets*: Данная панель позволяет присвоить имя текущей установке допусков для последующего применения к набору модельных параметров другого компонента, имеющего аналогичную модель. Для определения имени следует нажать на кнопку *Save* и ввести имя, такое, как например, MOSFET_5%, Caps_10%, Res_10%. Для применения установки допусков к выбранным параметрам, следует выбрать имя нужного набора из списка и нажать на кнопку *Apply* панели *Tolerance Sets*. Для удаления набора установок допусков, следует выбрать имя удаляемого набора установок допусков, а затем нажать на кнопку *Delete*.

Примечание. Допуски не могут быть установлены для параметров, которые не определены в модельных директивах или имеют значения, принятые по умолчанию.

Например при использовании нижеприведенной модельной директивы:

.MODEL MM1 NMOS (Level=1)

в транзисторе MM1 нельзя использовать допуски, скажем, для параметра GAMMA, поскольку его значение не определено в модельной директиве. Можно использовать допуски для GAMMA, если его величина определена в модельной директиве, как например сделано ниже:

.MODEL MM1 NMOS (Level=1 GAMMA=.65)

7.2.3. Использование функций Performance и построение гистограмм

При проведении анализа **Монте-Карло** Micro-Cap сохраняет все значения X-выражений и Y-выражений в каждой точке графика для всех вариантов расчета. Следовательно, можно построить гистограммы для функций, которые используют графики всех реализаций. Например, если в процессе анализа строились графики напряжения V(3) от времени, то после окончания ана-

лиза можно построить гистограмму, к примеру, следующей функции
 $\text{Rise Time}(V(3),1,1,2,5)+\text{Fall Time}(V(3),1,1,2,5)$.

Записанные в последнем выражении две функции представляют собой функции раздела *Performance*, которые обрабатывают параметры графиков нескольких вариантов анализа (будь то обычный многовариантный анализ *Stepping* или анализ *Monte Carlo*). Функция раздела *Performance* вычисляет по одной реализации значение одного численного параметра, который является важной характеристикой схемы (см. рис. 7.5, функция *Rise_Time* — длительность нарастания). Отдельные характеристики затем объединяются в массив данных, который подвергается статистическому анализу, заключительным результатом которого является построение гистограммы. Эти гистограммы распределения по интервалам важнейших характеристик схемы (значений функций *Performance*) помогают предсказать выход годных электронных схем при массовом производстве. Функции *Performance* подробно будут рассмотрены в разделе 8.4. Раскрывающийся список функций *Performance*, доступный из окна построения гистограмм представлен на рис. 7.7.

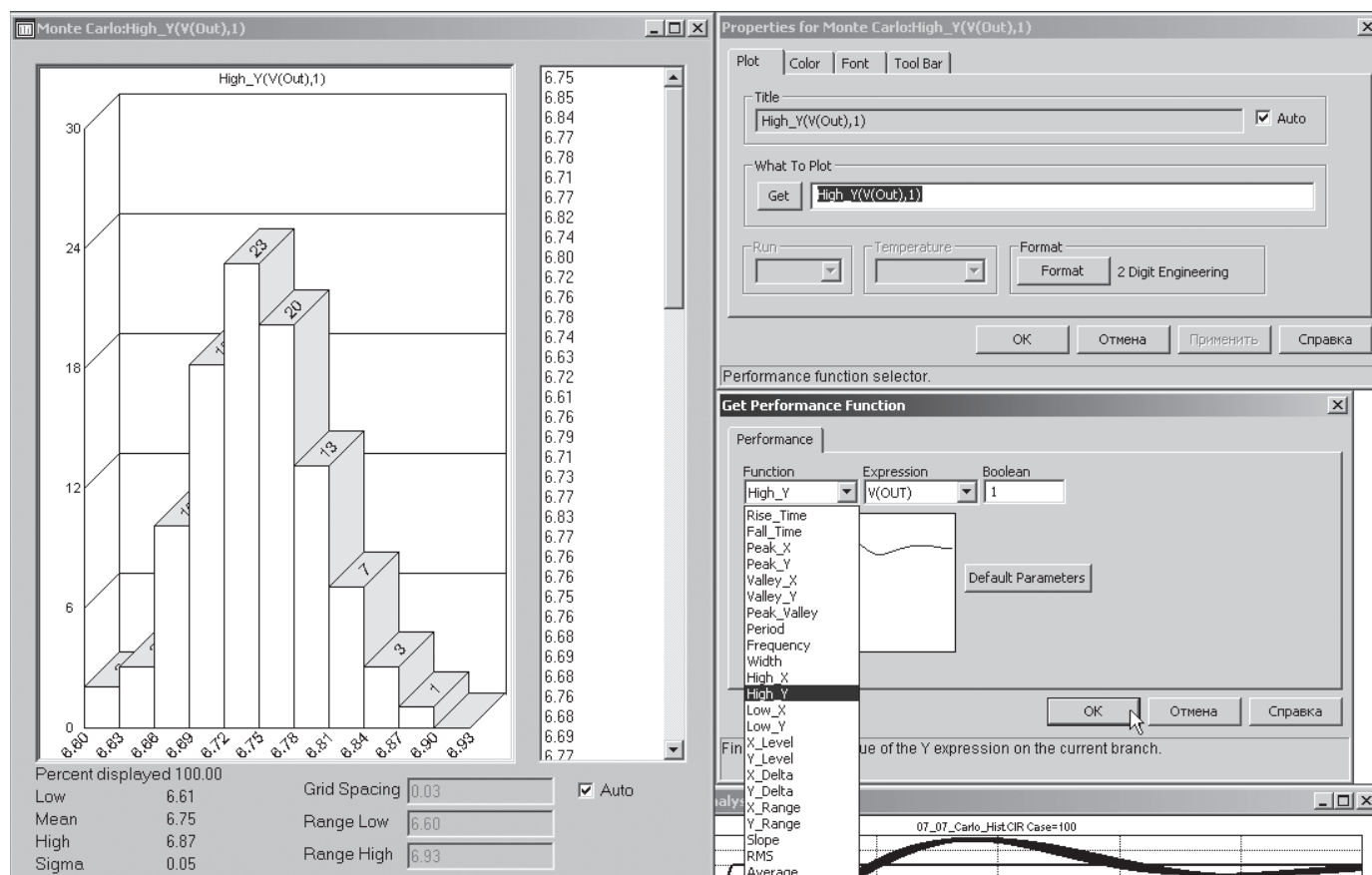


Рис. 7.7. Окно построения гистограмм и выбор Performance-функции

После проведения анализа Монте-Карло, из его меню становится доступным пункт построения гистограмм **Monte Carlo>Histograms**, который имеет следующие команды:

Add Histogram  — добавление окна гистограмм (доступно после проведения моделирования);

Delete Histograms  — удаление окна гистограмм (доступно после построения хотя бы одной гистограммы);

Statistics  — статистическая обработка результатов (доступно после построения гистограммы).

Статистическая обработка результатов моделирования начинается по команде *Monte Carlo>Histograms>Add Histogram*. Ее результаты представляются в виде гистограммы, примерный вид которой показан на рис. 7.7. Двойной клик левой клавишей мыши в поле окна гистограмм открывает диалоговое окно задания параметров *Properties* (закладка *Plot*). Это же окно открывается и при выполнении команды *Add Histograms*. В нем в строке *What to Plot* с помощью нажатия клавиши *GET* (рис. 7.7) указывается имя анализируемой функции, а в строке *Title* — имя характеристики цепи (это поле можно отредактировать, предварительно сняв флажок *Auto*).

На графике гистограммы по горизонтальной оси откладываются значения характеристики F , по вертикали — процент попаданий функции в интервал от общего количества вариантов анализа в виде столбиковой диаграммы. Так на рис. 7.7. показана гистограмма распределения максимума переходной характеристики RLC-схемы (схемный файл *Carlo_02.cir*).

В последней версии MC10 существует также возможность вывода по вертикали (или на верхнюю грань столбца) абсолютного количества попаданий в заданный интервал. Это происходит при установке флажка *Bar Top= Quantity* в окне свойств гистограммы (F10 или двойной клик).

Значения характеристики F во всех реализациях выведены в окне в правой части окна. Ниже гистограммы располагается панель, в которой можно задать ширину интервала разбиения (*Grid Spacing*) области определения анализируемой характеристики F и значения ее границ (*Range Low*, *Range High*). Можно задать автомасштабирование гистограммы (установлено по умолчанию), выбрав опцию *Auto*.

В нижней панели окна гистограмм помещается следующая статистическая информация:

- *Low* — минимальное значение характеристики;
- *Mean* — ее среднее значение;
- *High* — максимальное значение;
- *Sigma* — среднеквадратическое отклонение величины F от среднего значения.

Результаты статистической обработки заносятся также в текстовый файл командой *Monte Carlo>Statistics*. Текстовая информация размещается в файлах, имеющих такое же имя, как и схема, а расширения — *.amc*, *.dmc*, *.tmc* в зависимости от вида анализа. Примеры статистического анализа см. в схемных файлах подкаталога *Analysis\Monte Carlo*.

7.3. Параметрическая оптимизация

Параметрическая оптимизация выполняется в программе Micro-Cap при проведении любого вида анализа. Метод Пауэлла наиболее подходит для решения задач оптимизации электронных схем.

В этом режиме особенности последних версий Micro-Cap следующие:

- Оптимизация может использоваться в режимах анализа *Dynamic DC* и *Dynamic AC*.

- В окне оптимизатора имеется флажок, позволяющий динамически отображать оптимизируемый график в процессе проведения оптимизации.
- Начальная область оптимизации (область поиска экстремума) может устанавливаться автоматически, исходя из существующих величин параметров.
- В MC9 при проведении оптимизации используется единственный метод — метод Пауэлла (в обычном и пошаговом вариантах), в то время как в MC10 появились 3 новых метода поиска оптимума — метод Левенберга-Марквардта, Хука-Дживса, дифференциальной эволюции.
- В MC10 в окно задания параметров оптимизации введена новая команда импорта графика из файла.

7.3.1. Принцип работы оптимизатора Micro-Cap

Оптимизатор упорядоченным образом (согласно алгоритму поиска экстремума) меняет значения параметров схемы в пределах областей, заданных пользователем, для того, чтобы добиться минимума, максимума, равенства определенному значению заданной характеристики схемы. Он вызывается из любого режима анализа (за исключением *Sensitivity* и *Transfer Function*), позволяя оптимизировать искажения, характеристики во временной области, малосигнальные частотные характеристики и характеристики на постоянном токе. Все параметры выходных графиков, которые могут быть найдены с помощью функций *Performance* (см. 8.4), также могут подвергаться оптимизации.

Рассмотрим работу оптимизатора на примере решения типичной задачи на поиск экстремума: нахождения сопротивления нагрузки, при котором, мощность, передаваемая в нее максимальна при условии заданного сопротивления генератора (рис. 7.8 и схемный файл *opt1.cir* из каталога *Analysis\Optimize*).

Схема передает мощность на активную нагрузку RL (в исходном состоянии $RL=6\text{ Ом}$) от батареи $VG=1\text{ В}$ с внутренним сопротивлением $RG=75\text{ Ом}$. Используем встроенный оптимизатор для нахождения сопротивления резистора RL, при котором мощность, рассеиваемая на нем максимальна.

7.3.2. Диалоговое окно Optimize

Выполним вначале анализ переходных процессов в схеме на достаточно коротком интервале времени (1 мкс), при этом выведем на график зависимость рассеиваемой на резисторе RL мощности $PD(RL)$ от времени. После окончания расчета вызовем оптимизатор, нажав **CTRL+F11** или . Появится диалоговое окно **Optimize** (рис. 7.8).

Синтаксис задания поиска оптимального решения следующий. Найти величину параметра, при которой заданная характеристика схемы минимальна (максимальна или равна заданному значению) при соблюдении заданных ограничений в виде логических выражений. При этом надо использовать либо стандартный метод Пауэлла либо метод прямого пассивного поиска оптимума.

Диалоговое окно содержит следующие панели:

Find. Указываются параметры компонентов схемы, для которых проводится оптимизация (не более 20). Содержит следующие поля.

- *Parameter*. Указывает компонент, параметр которого оптимизируется. Для выбора возможного варианта можно нажать кнопку GET. Выбор в этом поле аналогичен выбору варьируемого параметра в диалоговом окне *Stepping*.
- *Low* — нижний предел значения параметра компонента.
- *High* — верхний предел значения параметра компонента.
- *Step* — шаг приращения при использовании метода прямого пассивного поиска.
- *Current* — текущее значение оптимизируемого параметра во время выполнения процесса оптимизации.
- *Optimized* — оптимальное значение параметра по текущим результатам выполняемой оптимизации.

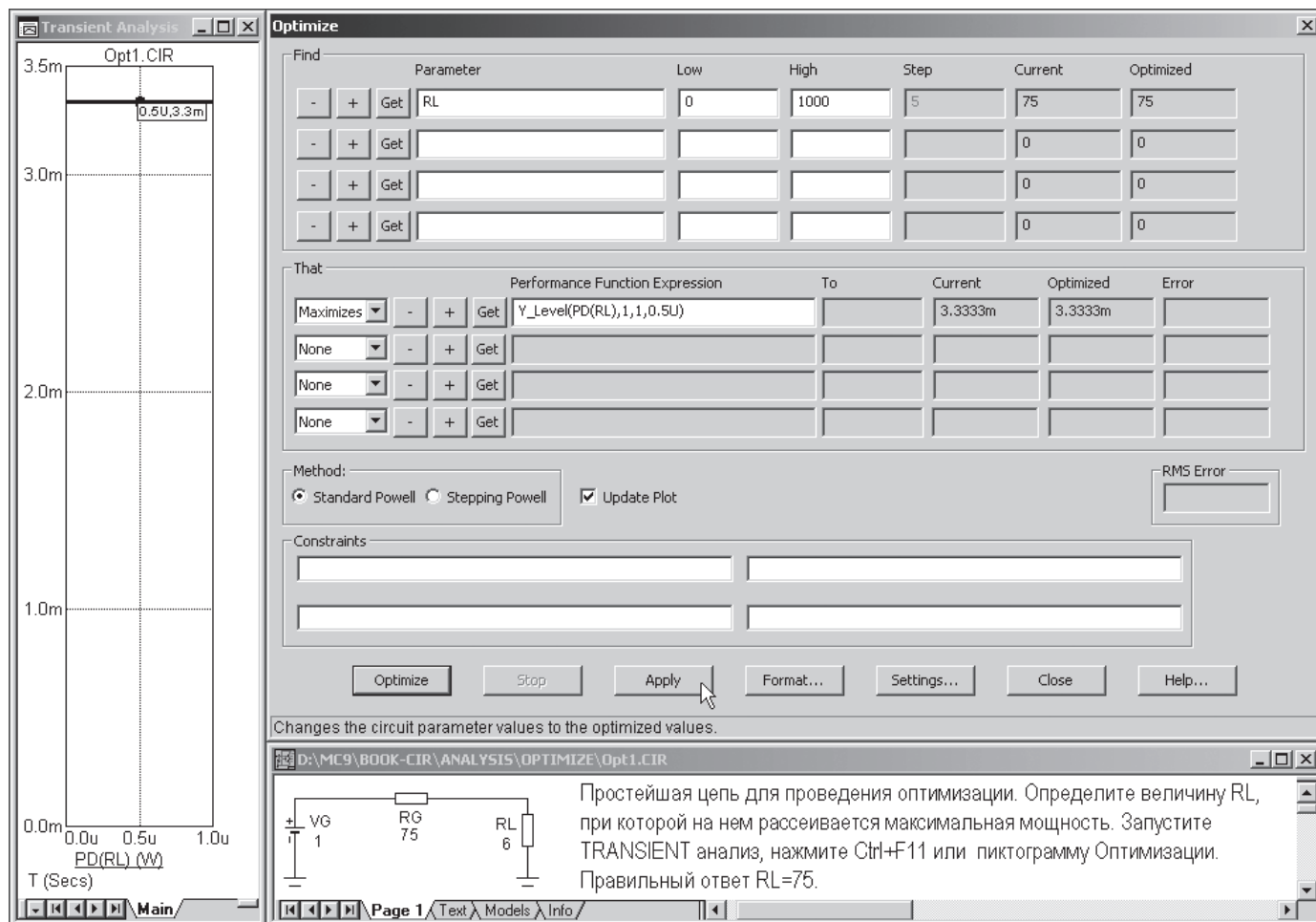


Рис. 7.8. Диалоговое окно OPTIMIZE

That: Указывается цель проведения оптимизации, включая критерий оптимизации (максимум, минимум, определенное значение) и целевую функцию, выбираемую как правило из списка функций **PERFORMANCE**. Целевая функция — это функция (или комплекс не более чем 20 функций), которая в результате проведения оптимизации должна принять заданное оптимальное значение (множество значений).

- (*Maximizes*, *Minimizes*, *Equates*) — поля выбора критериев оптимизации. Можно задать достижение функцией максимального или минимального значения, заданного значения (*Equates*). Функция из раздела **PERFORMANCE** указывается в следующем поле справа, с помощью кнопки **GET**.
- — — удаляет критерий оптимизации из текущей строки.

- **+** — добавляет новый критерий оптимизации в конец списка функций. Можно задавать несколько критериев оптимизации, но нельзя комбинировать критерии *maximize/minimize* с критериями *equate*. Все критерии имеют равную значимость.
- **Get** — позволяет выбрать функцию из группы PERFORMANCE для заданного режима анализа и указать ее параметры.
- **To** — значение, которого оптимизатор будет добиваться для целевой функции, если выбран критерий *Equate*
- **Current** — текущее значение целевой функции
- **Optimized** — наиболее оптимальное значение функции, найденное в процессе текущей неоконченной оптимизации. После окончания процесса показывает оптимальное значение целевой функции.
- **Error** — показывает отклонения от заданных значений при выборе критериев оптимизации вида *Equate*.

Value to Start With (только для MC10). Позволяется выбрать начальные значения оптимизируемых параметров:

- **Initial**. Начальные значения берутся равными нижним пределам областей изменения параметров при каждом новом запуске оптимизации. Оптимизированные значения параметров, полученные ранее, не принимаются во внимание.
- **Existing**. Начальные значения берутся равными значениям, достигнутым в конце предыдущего сеанса оптимизации. Все методы (кроме метода Пауэлла) при этом быстрее и надежнее сходятся.

Minimize Dialog (только для MC10). Минимизирует диалоговое окно в процессе проведения оптимизации, чтобы оптимизируемая кривая была полностью видна на экране.

Method — позволяет выбрать метод оптимизации (только в MC9):

- **Standard Powell** — стандартный метод Пауэлла с выбором направления изменения переменных. Предпочтительный метод для проведения оптимизации, поскольку при правильной постановке задачи позволяет быстро найти экстремум.
- **Stepping Powell** — метод прямого пассивного поиска. Изменяет упорядоченно параметры оптимизации с шагом от нижнего (Low) к верхнему (High) пределам. При этом производится нахождение локальных экстремумов. Если локальный экстремум оптимальнее, чем текущая величина, то он удерживается, и производится следующий шаг поиска. В противном случае за точку локального экстремума принимается значение вектора параметров на текущем шаге и процесс поиска продолжается. Метод очень медленный, поскольку общее количество шагов его выполнения: $N = \langle \text{Число шагов для параметра 1} \rangle * \langle \text{Число шагов для параметра 2} \rangle * \dots$. Метод пассивного поиска рекомендуется использовать для функций, которые на области поиска имеют много локальных экстремумов и стандартный метод Пауэлла не приводит к нахождению глобального оптимума.

Update Plot — обновляет график, построенный в одном из режимов анализа, на основе которого производится оптимизация. Позволяет при длительном процессе отслеживать прогресс в поиске оптимального решения.

Time (только в MC10). Поле показывает полное время, затраченное на данный сеанс оптимизации.

RMS Error. При использовании критериев оптимизации типа *Equate*, в этом поле выводится среднеквадратическое отклонение целевой функции (комплекса функций) от заданных значений — корень квадратный из суммы квадратов отклонений текущих значений функций от заданных значений.

Percent Error (только в MC10). При оптимизации на совпадение (*equate*) показывает среднюю относительную ошибку в %.

Constraints (только в MC9). Содержит 4 поля для указания ограничений в виде логических выражений.

Примеры:

PD(R1)<=100m

V(OUT)>=1.2

VCE(Q1)*IC(Q1)<=200m

В версии MC10 установка ограничений происходит в диалоге, вызываемом после нажатия командной кнопки *Constraints*.

Командные кнопки

Optimize — запускает процесс оптимизации.

Stop — останавливает процесс оптимизации.

Apply — модифицирует схему в соответствии с найденными оптимальными значениями параметров.

Format — позволяет выбрать числовой формат индицируемых значений

Settings — позволяет выбрать следующие установки для оптимизатора:

- *Maximum Relative Per-iteration Error*. Оптимизации завершается, если относительная разность среднеквадратических ошибок целевых функций на соседних итерациях становится меньше этого значения. Типичное значение находится в диапазоне от 1E-6 до 1E-3.
- *Maximum Percentage Error*. Оптимизация завершается, если среднеквадратическая ошибка целевой функции, выраженная в процентах, становится меньше этой величины. Типичное значение от 0,1 до 5.
- *Initial Range Factor*. Значения этого поля используются для создания области поиска экстремума (значений Low и High) для оптимизируемых параметров. Значение этого поля может быть изменено пользователем. Величины Low и High определяются по формулам:

$$\langle Low \rangle = \frac{\langle \text{Номинальное значение} \rangle}{\langle Initial Range Factor \rangle};$$

$$\langle High \rangle = \langle \text{Номинальное значение} \rangle \cdot \langle Initial Range Factor \rangle.$$

В версии MC10 команда **Settings** позволяет выбрать используемые методы оптимизации (см. рис. 6.15) и произвести установку параметров для каждого из них. Параметры подобны параметрам, перечисленным выше для метода Пауэлла.

Constraints (MC10). Вызывает окно с четырьмя свободными полями для установки в них ограничений в виде логических выражений.

Close — выход из окна оптимизатора.

Help — вызов раздела подсказки по диалоговому окну *Optimizer*.

В рассматриваемом примере на график выводится зависимость значения активной мощности PD(RL) от времени. Следовательно, в качестве целевой функции, можно взять ее значение в любой момент времени, что достигается выбором с помощью кнопки GET функции $Y\_Level(PD(RL), 1, 1, 0.5U)$. Здесь в качестве последнего параметра функции указан момент времени 0.5U, который находится посередине моделируемого интервала времени. В качестве критерия оптимизации выбирается максимизация выбранной функции — *Maximizes*.

Далее следует нажать на кнопку *Optimize*, после того как процесс остановится, можно увидеть в поле *Optimized* оптимальное значение $RL=75\ \text{Ом}$.

Аналогичный пример оптимизации для демо-версии MC10 — схемный файл *OPT1(MC10).cir*, находящийся в каталоге *Analysis\Optimize*.

7.3.3. Оптимизация амплитудно-частотной характеристики

Типичной задачей оптимизации является подбор параметров схемы с целью достижения заданной амплитудно-частотной характеристики.

Проиллюстрируем последовательность действий при оптимизации на примере схемы *opt4.cir* из каталога *Analysis\Optimize*, представленной на рис. 7.9. Задача приведенного примера состоит в том, чтобы, изменяя параметры схемы R1, C1, L1 в процессе проведения оптимизации добиться максимально близкого расположения амплитудно-частотной характеристики к 6 заданным точкам (частота, амплитуда в децибелах).

Сначала в меню *Analysis* выберем режим AC и нажмем на клавишу Run (**F2**). После этого выведем на график значения исходной АЧХ неоптимизированной схемы в 6 заданных точках. Для этого воспользуемся командой *Scope>Label Frequency Points...* (рис. 7.9). Заметим, что ход АЧХ неоптимизированной схемы существенно отличается от заданного.

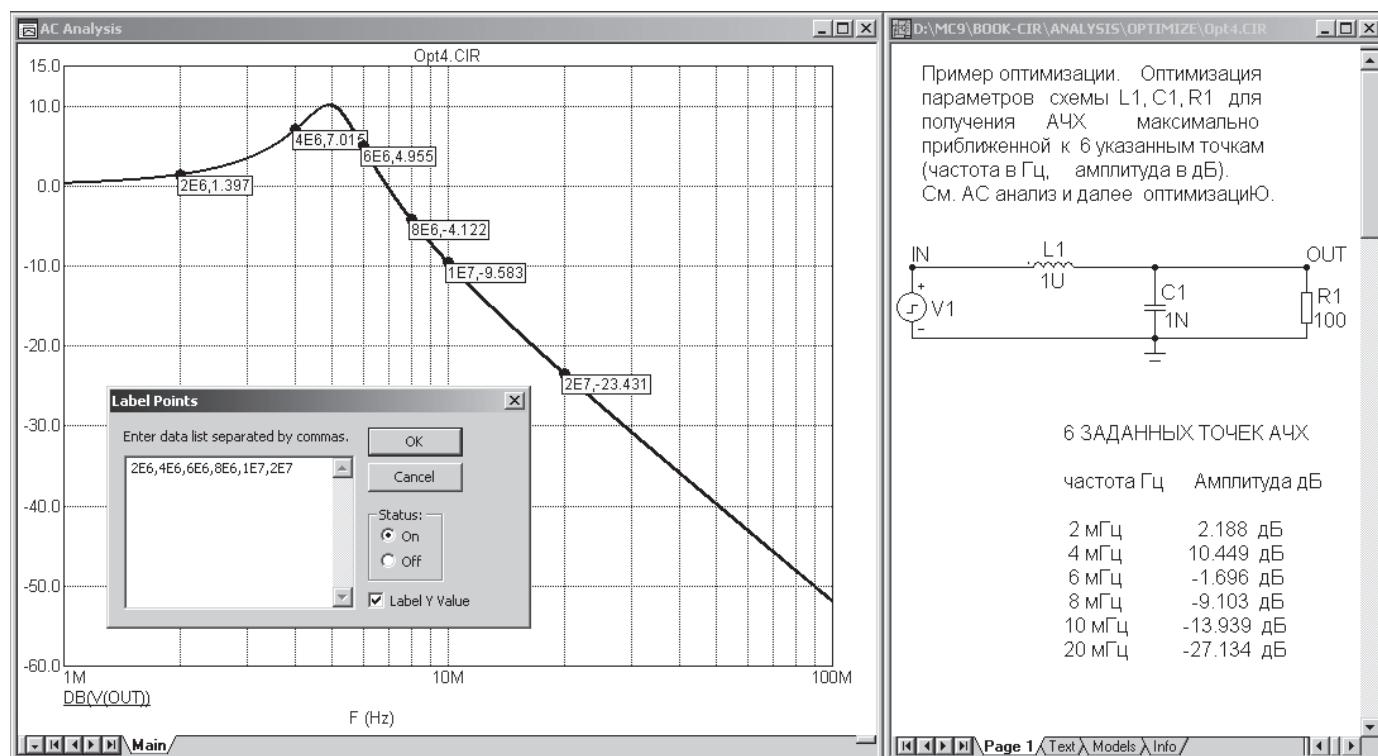


Рис. 7.9. АЧХ схемы с неоптимизированными параметрами

После этого нажатием на пиктограмму  или комбинацией клавиш **Ctrl+F11** открывают диалоговое окно, показанное на рис. 7.10 слева.

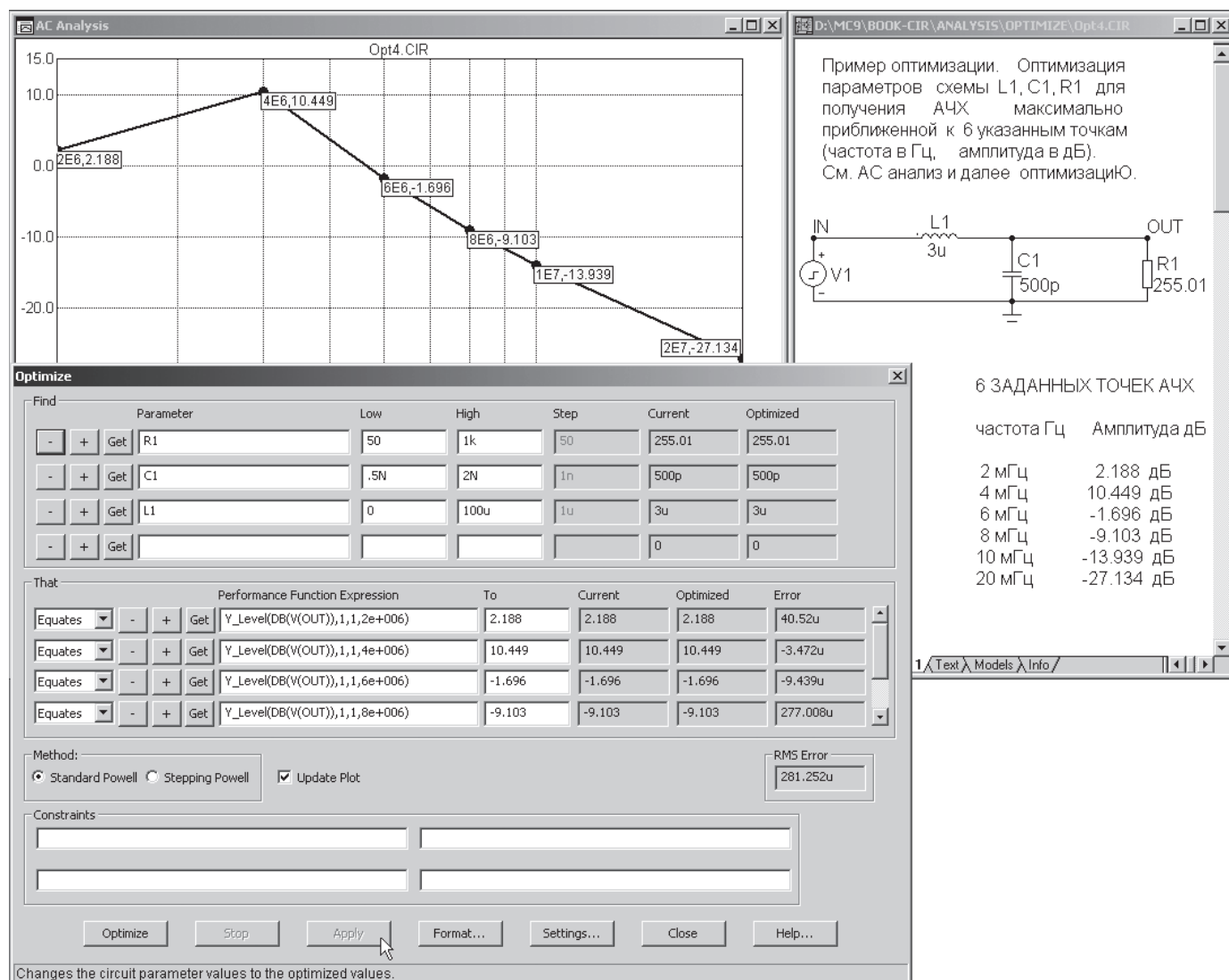


Рис. 7.10. Пример оптимизации схемы колебательного контура на заданную АЧХ

В приведенном примере требуется изменением L1, C1, R1 добиться такого вида АЧХ, чтобы она максимально близко проходила возле 6 заданных точек (частота, амплитуда в дБ): (2E6, 2.188), (4E6, 10.449), (6E6, -1.696), (8E6, -9.103), (10E6, -13.939), (20E6, -27.134). Это означает, что корень квадратный из суммы квадратов отклонений полученной АЧХ от заданных значений в заданных точках должен быть минимальным. В соответствии с заданной целевой функцией заполняются поля группы **THAT** в окне **Optimize** (см. рис. 7.10). Например, `Y_Level(DB(V(OUT)),1,1,2e+006)` обозначает значение кривой оптимизируемой характеристики (АЧХ в дБ) при значении независимой переменной (частоты), равной 2E6 Hz. Выбор *Equates* означает, что оптимизация идет для наилучшего удовлетворения условию равенства коэффициента передачи в дБ заданному значению 2.188. Подобным образом заполняются все 6 полей целевой функции согласно заданным значениям передачи в дБ на различных частотах. Целевой функцией при выборе указанных критериев оптимизации будет среднеквадратическое отклонение значений функций в 6 точках на частотной оси от заданных значений коэффициентов передачи. Эта величина в процессе проведения оптимизации будет выводиться в поле **RMS Error**. Для рассматриваемого примера:

$$RMS\ Error = \sqrt{Error_1^2 + Error_2^2 + Error_3^2 + Error_4^2 + Error_5^2 + Error_6^2}.$$

Заполнение полей группы **FIND** в рассматриваемом примере осуществляется в соответствии с оптимизируемыми параметрами R1, C1, L1 (поля Parameter) и заданными диапазонами их изменения (поля Low и High).

Следует отметить, что в последней версии MC10 существует возможность импорта точек кривой из файла (командная панель *File Import*).

На панели **Method** выбирается стандартный метод Пауэлла (Standard Powell), обеспечивающий быстрый поиск глобального экстремума.

После заполнения всех полей нажимается кнопка **Optimize**, и спустя несколько секунд выводятся оптимальные значения параметров RLC-контура: R1=255.01, L1=3μ, и C1=500pF. При этом в графическом окне грубо (с неоптимальным шагом) выводится оптимизированная АЧХ, на которой отмечены координаты заданных точек (см. рис. 7.10) благодаря выполненной ранее команде *Scope>Label Frequency Points...* (см. рис. 7.9). Если бы оптимизация проводилась без предварительного выполнения указанной команды, то были бы видны заданные точки в виде красных окружностей. Для построения характеристики в обычном режиме, примем сделанные в схеме изменения, нажав **Apply**, и выйдем из диалогового окна оптимизации. Теперь можно запустить анализ оптимизированной схемы, нажав **F2**.

Выполняемый после таких действий анализ выведет характеристики схемы при полученных оптимальных значениях параметров (рис. 7.11). По его результатам пользователь может проверить соответствие выполненной оптимизации техническому заданию.

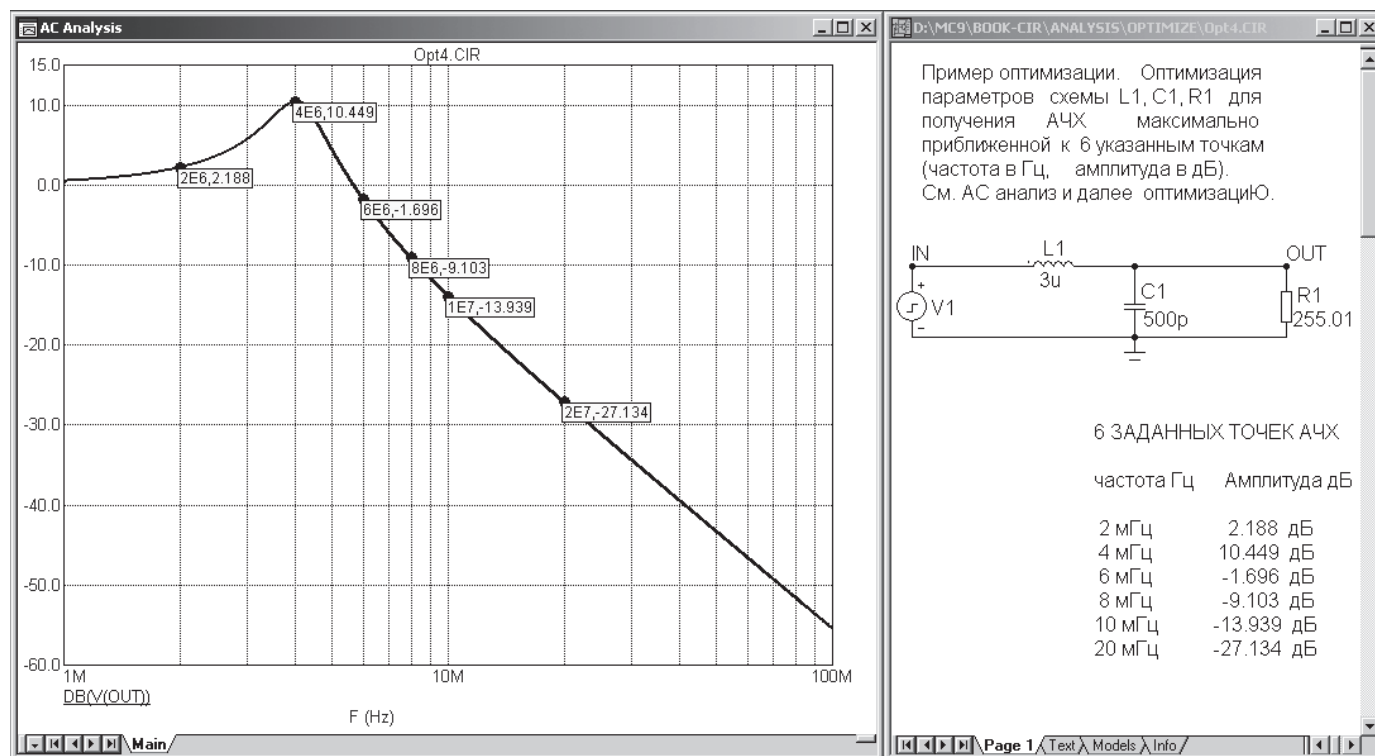


Рис. 7.11. Вид АЧХ и параметры компонентов схемы после оптимизации

См. также другие примеры параметрической оптимизации в схемных файлах из каталога *Analysis\Optimize*.

7.4. Спектральный анализ (анализ Фурье)

В Micro-Cap группа функций, базирующихся на основе быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transform — FFT), предназначена для получения информации о поведении схемы в частотной и временной областях на основе имеющихся результатов анализа переходных процессов (**Transient**) и частотных характеристик (**AC**) соответственно.

Спектрального анализа как обособленного вида расчетов в Micro-Cap нет. Для его проведения необходимо в графах *Y expression* окна *Analysis Limits* при проведении *Transient* или *AC* анализа задать соответствующие функции (подробно рассмотрены ниже). Кроме того, пункт **FFT Windows** меню **Transient** позволяет быстро построить некоторые наиболее часто используемые функции спектрального анализа.

Особенности версий Micro-Cap 9, 10

- Окно *FFT WINDOW*, позволяет автоматизировать задание некоторых наиболее часто используемых функций спектрального анализа, теперь доступно и в режимах анализа с графическим постпроцессором *PROBE*;
- Функции спектрального анализа HARM и FFTS теперь имеют опциональный параметр — ширину полосы BW. Параметр может быть задан в виде выражения, разрешающего частотную полосу.
- В версии MC10 расширен список функций, графики которых могут быть получены в окне FFT. Добавлены функции HARMN, dB(HARMN), THD, IHD.

7.4.1. Принцип работы функций спектрального анализа

Все функции спектрального анализа используют встроенную подпрограмму быстрого преобразования Фурье (FFT). Для работы этой подпрограммы требуются 2 параметра:

- 1) N — количество отсчетов функции
- 2) DF (DT) — шаг по частотной (временной) оси.

Параметр N принимается равным целому числу, указанному в поле *Number of data points* закладки *FFT* диалогового окна *Plot Properties (F10)*. N может быть целым числом, равным целой степени двойки, и при этом должно находиться в диапазоне от $N_{min}=8=2^3$ до $N_{max}=1048576=2^{20}$. Типичное значение $N=1024$.

Значение параметра DF (DT) находится из установок *Transient* и *AC* анализа соответственно. В режиме анализа переходных процессов *Transient* по выходному сигналу, как правило, определяется его спектральный состав. Для этого необходимо задать частоту первой гармоники DF. Она определяется формулой:

$$DF = \frac{1}{<Upper Time Limit> - <Lower Time Limit>},$$

где *<Upper Time Limit>* и *<Lower Time Limit>* берутся из установок закладки **FFT** диалогового окна **Plot Properties (F10)**.

Интервал DF представляет собой интервал между соседними отсчетами FFT-функций и всегда равен частоте первой гармоники выходного сигнала (в

режиме анализа переходных процессов). Весь частотный диапазон гармоник получается следующим образом:

Номер отсчета	Содержимое
1	H_0 или постоянная составляющая сигнала $F=0$
2	H_1 , 1-ая гармоника сигнала с частотой $F=DF$
3	H_2 , 2-ая гармоника сигнала с частотой $F=2*DF$
...	...
N	H_{N-1} , $(N-1)$ -ая гармоника сигнала с частотой $F=(N-1)*DF$

В режиме анализа частотных характеристик (**AC**) по известной частотной характеристике путем обратного преобразования Фурье может быть найдена импульсная характеристика (реакция схемы на единичную δ -функцию). Данный режим, правда, используется крайне редко (см. схему *FFT4_02.cir*). Шаг по оси времени для определения поведения системы во временной области DT определяется по формуле:

$$DT = \text{Time Step} = \frac{1}{DF} = \frac{1}{\text{Upper Frequency}},$$

где *<Upper Frequency>* берется из установок закладки **FFT** диалогового окна **Plot Properties (F10)** графиков частотного анализа AC.

Функции FFT могут использоваться как в частотном (AC) анализе, так и в анализе переходных процессов (*Transient*).

При использовании в режиме *Transient* берется заданное количество отсчетов N на заданном интервале для выходных функций, зависящих от времени. На основе этого массива отсчетов рассчитываются N коэффициентов быстрого преобразования Фурье, для частот, расположенных на расстоянии DF друг от друга (так работают функции FFT и HARM).

Увеличение $Tmax$ приводит к уменьшению шага по частоте DF , т.е. к увеличению разрешения по частоте и снижению максимальной частоты в результирующих FFT-функциях, поскольку $Fmax=(N-1) \cdot DF$. Увеличение количества отсчетов N увеличивает верхнюю границу частотного диапазона.

При использовании функций в режиме частотного анализа (AC) берется заданное количество отсчетов частотного спектра N (выходной функции схемы, зависящей от частоты). На основе этого массива путем обратного преобразования Фурье IFT рассчитываются N отсчетов временной функции, стоящих друг от друга на интервал дискретизации DT . Правда, подобное использование дискретного обратного преобразования Фурье представляет лишь теоретический интерес, поскольку необходимая временная характеристика системы (импульсная) может быть получена непосредственно при анализе переходных процессов.

Увеличение $Fmax$ приводит к уменьшению временного шага DT , т.е. к увеличению разрешения по времени и снижению максимального времени в результирующих IFT-функциях, поскольку $Tmax=(N-1) \cdot DT$. Увеличение количества отсчетов N увеличивает верхнюю границу временного диапазона.

Таким образом, разрешение, диапазон и точность расчетов определяются для каждого вида анализа параметрами N и DF (DT) операций прямого (обратного) быстрого преобразования Фурье (см. схемные файлы *FFT4_01.cir* и *FFT4_02.cir* из каталога *Analysis\Fourie*).

7.4.2. Функции на основе быстрого преобразования Фурье (FFT-функции)

При проведении анализа Фурье в поле *Y expression* окна *Analysis Limits* необходимо записать соответствующие функции. Micro-Cap позволяет использовать следующие FFT-функции:

HARM(u[,BW]). Вычисляет амплитудные значения гармоник сигнала $u(t)$. BW — необязательное выражение для ширины частотной полосы. HARM близка к SPICE-функции, вычисляемой директивой .FOUR. В результате её выполнения возвращаются (выводятся на график) следующие величины

Номер отсчета	Содержание
1	H0, амплитуда нулевой гармоники или постоянная составляющая
2	H1, амплитуда первой гармоники
3	H2, амплитуда второй гармоники
...	...
N	HN, амплитуда (N-1)-ой гармоники

Примеры:

HARM(V(OUT)) — амплитуды гармоник напряжения V(OUT).

HARM(IC(Q1)) — амплитуды гармоник тока IC(Q1).

HARMN(u[,f]) — аналогична функции HARM, но найденные величины гармоник нормируются по гармонике с частотой f . При отсутствии необязательного параметра f нормировка производится по 1-ой гармонике (только в MC10).

THD(S[,FR]). Вычисляет текущий накапливающийся коэффициент гармоник спектра S, в процентах относительно уровня составляющей на частоте FR; если частота FR не указана, то относительно составляющей на частоте первой гармоники, равной $1/(Upper\ Time\ Limit - Lower\ Time\ Limit)$ в анализе переходных процессов (установки закладки **FFT**). Возвращает (выводит на график) следующие значения:

Отсчет	Содержание
1	0
2	0
3	Уровень 2-ой гармоники в % относительно 1-ой гармоники;
4	Уровни 2-ой и 3-ей гармоник в % относительно 1-ой гармоники;
...	...
N	Суммарно все N-2 гармоник в % относительно 1-ой гармоники.

Величина отсчета с номером (m+1) функции THD определяется следующим образом:

$$THD_{m+1} = 100 \cdot \sqrt{\frac{H_2^2 + H_3^2 + H_4^2 + \dots + H_m^2}{H_1^2}},$$

где $H_m = \sqrt{[REAL(H_m)]^2 + [IMAG(H_m)]^2}$.

Примеры:

THD(HARM(V(1))) — полный коэффициент гармоник напряжения V(1).

THD(HARM(I(D1))) — полный коэффициент гармоник тока I(D1).

IHD(S[,FR]). Вычисляет коэффициент гармонических искажений отдельных составляющих спектра S, в процентах относительно уровня составляющей на частоте FR; если частота FR не указана, то относительно составляющей на частоте первой гармоники, равной $1/(Upper\ Time\ Limit-Lower\ Time\ Limit)$, где величины в знаменателе представляют собой установки закладки **FFT**. Возвращает (выводит на график) следующие значения.

Отсчет	Содержание
1	0
2	0
3	Отношение амплитуд 2-ой и 1-ой гармоник, выраженное в %
4	Отношение амплитуд 3-ой и 1-ой гармоник, выраженное в %
...	...
N	Отношение амплитуд (N-1)-ой и 1-ой гармоник, выраженное в %

Величина отсчета функции IHD с номером (m+1) определяется выражением:

$$IHD_{m+1} = \frac{100 \cdot \text{mag}(H_m)}{\text{mag}(H_1)}$$

Примеры:

IHD(HARM(V(A))) — индивидуальные коэффициенты гармоник напряжения V(A).

IHD(HARM(IB(Q1))) — индивидуальные коэффициенты гармоник тока IB(Q1).

FFT(u). Вычисляет значения классического прямого преобразования Фурье дискретных отсчетов сигнала u(t). Отличается от функции HARM множителем N/2 для гармоник с первой до (N-1)-ой и множителем N для нулевой гармоники, где N — количество дискретных отсчетов. Напомним, что разложение периодической функции в ряд Фурье имеет следующий вид:

$$X(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_N [a_N \cdot \cos(2\pi \cdot N \cdot f_1 \cdot t) + b_N \cdot \sin(2\pi \cdot N \cdot f_1 \cdot t)],$$

где f_1 — фундаментальная частота или частота 1-ой гармоники.

Функция FFT вычисляет комплексную величину, действительная часть которой содержит промасштабированную последовательность коэффициентов a_N , а мнимая — промасштабированную последовательность коэффициентов b_N :

Отсчет	REAL(FFT())	IMAG(FFT())
1	$a_0 \cdot N$	0
2	$a_1 \cdot N/2$	$b_1 \cdot N/2$
3	$a_2 \cdot N/2$	$b_2 \cdot N/2$
...	...	...
N	$a_{N-1} \cdot N/2$	$b_{N-1} \cdot N/2$

Обратное преобразование Фурье от функции прямого преобразования Фурье вычисляет исходную функцию времени, т.е. $IFT(FFT(x(t)))=x(t)$.

Примеры:

$FFT(V(A))$ — прямое преобразование Фурье напряжения $V(A)$.

$FFT(IB(Q1))$ — прямое преобразование Фурье тока базы $IB(Q1)$.

FFTS(u,[BW]) — прямое дискретное преобразование Фурье, промасштабированное таким образом, что $RE(FFTS(u))$ вычисляет последовательность косинусных коэффициентов ряда, а $IM(FFTS(u))$ вычисляет последовательность синусных коэффициентов ряда. Данная функция подобна функции $HARM(u)$.

Функции $HARM$, IHD , THD , FFT и $FFTS$ преобразуют функцию времени в частотно-зависимые спектры. Таким образом, при использовании одной из этих функций в качестве Y -выражения (*Y expression*), в качестве X -выражения (*X expression*) необходимо использовать частоту (F). Верхняя граница частотного диапазона по оси X первоначально по умолчанию устанавливается равной $10*DF$. Впоследствии это значение можно отредактировать в установках диалогового окна *Transient Analysis Limits*. Примеры использования функций разложения в тригонометрический ряд с помощью дискретного преобразования Фурье ($HARM$, $FFTS$, FFT) приведены в схемном файле *Harm_FFT.cir*.

FS(u,[N1],N2) — решетчатая функция времени, построенная по гармоникам с номерами от $N1$ до $N2$ спектра функции времени $u(t)$. $N1$ по умолчанию принимается равной 0 (постоянная составляющая), а $N2$ — числу отсчетов быстрого преобразования Фурье, поделенному на 2 ($(FFT \text{ Number of Points})/2$), т.е. номеру наивысшей гармоники. Может быть использована для выделения переменной составляющей (пульсаций) в преобразовательных устройствах (см. *ACcoupled.cir*).

RES(u,[N1],N2) — остаточное разложение в ряд Фурье, равное анализируемой функции $u(t)$ минус сумма гармоник с номерами от $N1$ до $N2$ спектра функции времени $u(t)$. $N1$ по умолчанию принимается равным 0 (постоянная составляющая), а $N2$ — 1, так что $RES(u)=RES(u,0,1)$, и в сущности, показывает функцию времени с гармоническими составляющими спектра с номерами больше или равными 2 (при анализе нелинейных искажений в усилителях, это компонента искажений, добавляющаяся к идеальной синусоиде).

Примеры использования функций FS и RES см. в схемном файле *FS_RES.cir*.

IFT(S) — классическое обратное преобразование Фурье спектра S . Спектр представляет собой комплексную функцию, зависящую от частоты. При АС анализе как раз и получаются подобные выходные выражения, поэтому здесь использование, скажем, $IFT(V(1))$ ведет к получению адекватных результатов в виде функции времени. В режиме анализа переходных процессов использование $IFT(V(1))$ бессмысленно, поскольку здесь $V(1)$ переменная, зависящая от времени. Однако, выражение вида $IFT(FFT(V(1)))$ имеет смысл при проведении анализа переходных процессов и в итоге восстанавливает исходную функцию времени $V(1)$.

Пример:

$IFT(V(5)*I(R10))$ — обратное преобразование Фурье от частотно-зависимой комплексной функции $V(5)*I(R10)$.

Функция IFT преобразует спектральную функцию, зависящую от частоты во временную зависимость. Поэтому при использовании функции IFT в Y-выражении (*Y expression*) выражение X (*X expression*) должно быть временем T. Граница временного диапазона первоначально устанавливается в пределах от $10 \cdot DT$ до $100 \cdot DT$.

IFTS(S) — масштабированное обратное преобразование Фурье. Для него выполняется равенство $IFTS(FFTS(u))=u$;

CONJ(S) — комплексно сопряженный спектр для спектра S. Числом, сопряженным с комплексным числом $a+bj$, является $a-bj$. Данная функция просто меняет знак у мнимой части спектра.

CS(u1,u2) — взаимный спектр сигналов u1 и u2, равный $CONJ(FFTS(u2)) \cdot FFT(u1) \cdot DT \cdot DT$;

AS(u) — авто-спектр сигнала u(t), равный $CS(u,u)=CONJ(FFTS(u)) \cdot FFT(u) \cdot DT \cdot DT$;

AC(u) — автокорреляционная функция сигнала u(t), равная $IFT(AS(u))/DT = IFT(CONJ(FFTS(u)) \cdot FFT(u)) \cdot DT$. См. схемный файл *FFT5.cir* из каталога *Analysis\Fourie*.

CC(u,v) — взаимная корреляционная функция сигналов u(t) и v(t), равная $IFT(CS(u,v))/DT = IFT(CONJ(FFTS(v)) \cdot FFT(u)) \cdot DT$. Функция используется для нахождения временной задержки между двумя периодическими сигналами. См. схемный файл *FFT3.CIR* из каталога *Analysis\Fourie*.

COH(u,v) — нормированная корреляционная функция сигналов u(t) и v(t), равная $CC(u,v)/\sqrt{AC(u(0)) \cdot AC(v(0))}$.

Операторы FFT

REAL(S)=RE(S) — действительная часть спектра S, рассчитанного с помощью FFT;

IMAG(S)=IM(S) — мнимая часть спектра S, рассчитанного с помощью FFT;

MAG(S) — амплитудный спектр S, рассчитанный с помощью FFT;

PHASE(S)=PH(S) — фазовый спектр S, рассчитанный с помощью FFT.

Признак амплитудного значения MAG в соответствующем операторе можно опускать. Напомним, что указание для вывода на график, например, напряжения V(1) эквивалентно выводу MAG(V(1)).

7.4.3. Пример использования FFT функций

Для иллюстрации использования FFT функций рассмотрим пример (схема *FFT1.cir* из каталога *Analysis\Fourie*) анализа спектрального состава сигнала источника ЭДС, напряжение которого изменяется по закону:

$$1.5 + 1.0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot T \cdot 10^6) + 2.0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot T \cdot 2 \cdot 10^6) + 3.0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot T \cdot 3 \cdot 10^6)$$

Функциональный источник напряжения генерирует сигнал, имеющий следующий гармонический состав:

Частота F	Амплитуда	Фаза
0	1.5	0
1E6	1.0	0
2E6	2.0	0
3E6	3.0	0

В схеме отсутствуют реактивные компоненты (индуктивности и емкости), поэтому никаких переходных процессов в ней происходить не будет и исключать их на начальном этапе нет необходимости. Выбираем из меню **Analysis** режим **Transient**, появляется диалоговое окно *Analysis Limits* (рис. 7.12).

Результат работы FFT-функций зависит от правильного выбора основной частоты DF и количества отсчетов N для выполнения быстрого преобразования Фурье. Основная частота (частота первой гармоники) при расчете переходных процессов определяется по формуле:

$$DF=F1=1/(\text{Upper Time Limit} - \text{Lower Time Limit}),$$

где *Upper Time Limit* и *Lower Time Limit* берутся из соответствующих полей закладки FFT диалогового окна Properties графика TRANSIENT-анализа.

Следует отметить, что в эти поля по умолчанию переписываются значения поля *Time Range* окна *Transient Analysis Limits*. Таким образом, основную частоту первоначально задает именно это поле. Формат поля *Time Range*, как известно: $\langle t_{max} \rangle, \langle t_{min} \rangle$ для MC9 и $\langle t_{max} \rangle, \langle t_{start} \rangle$ для MC10 (см. 6.1.2). В большинстве случаев t_{max} — единственная величина, присутствующая в поле *Time Range*, т.е. $t_{min}=0$ и $T_{start}=0$ (MC10). Тогда

$$DF=F1=1/t_{max}.$$

Необходимо, чтобы выполнялось условие $t_{max} \geq 1/f_{min}$, где f_{min} — предполагаемая частота низшей гармоники. В соответствии с заданной формой сигнала достаточно поставить в поле *Time Range* для *TMAX* значение 1E-6.

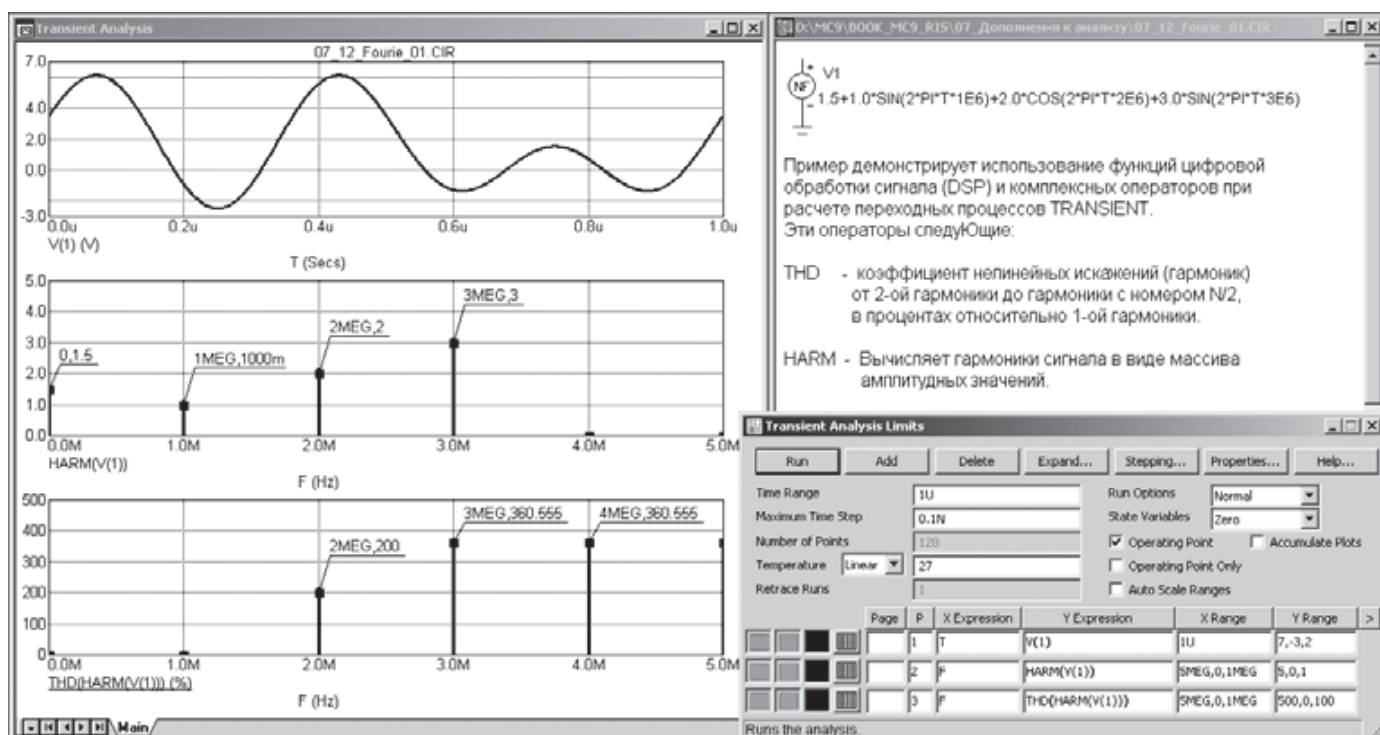
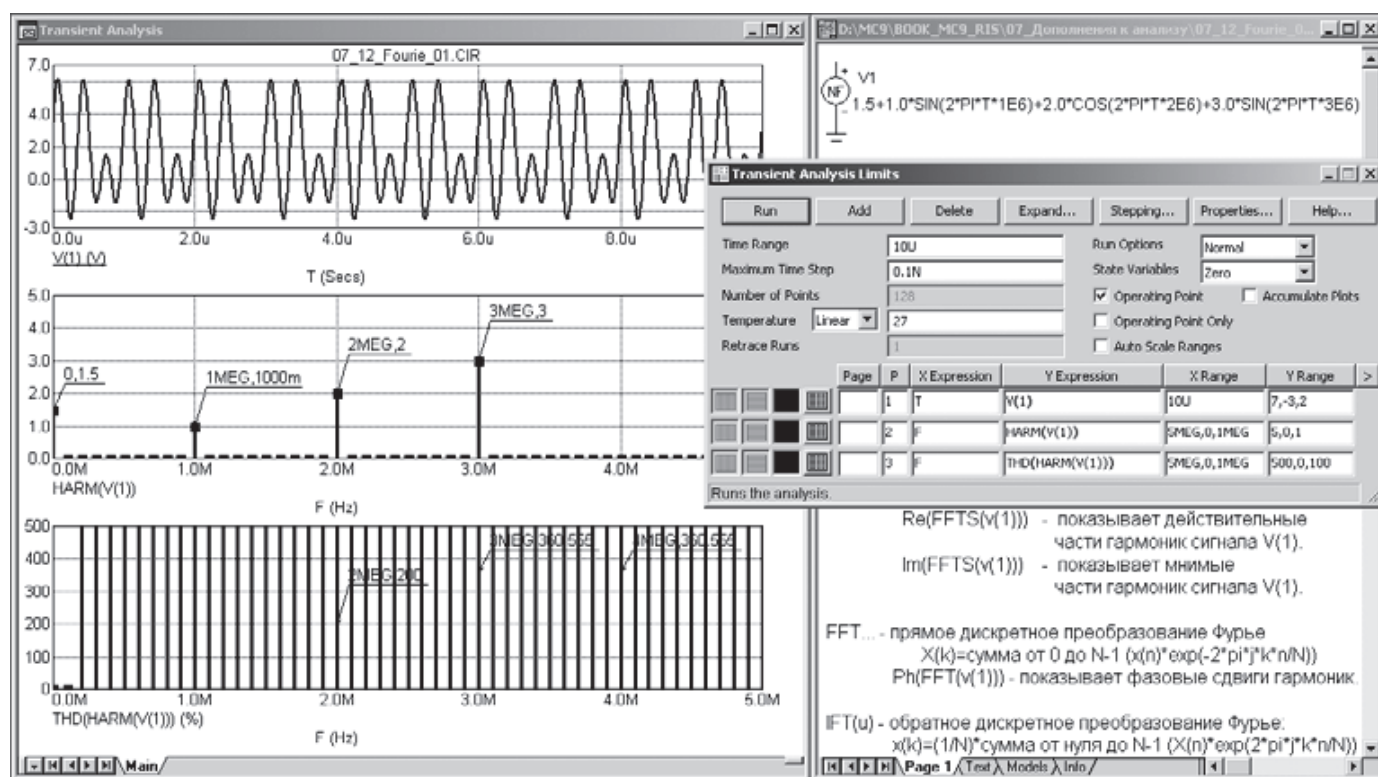


Рис. 7.12. Задание FFT функций в окне *Transient Analysis Limits*

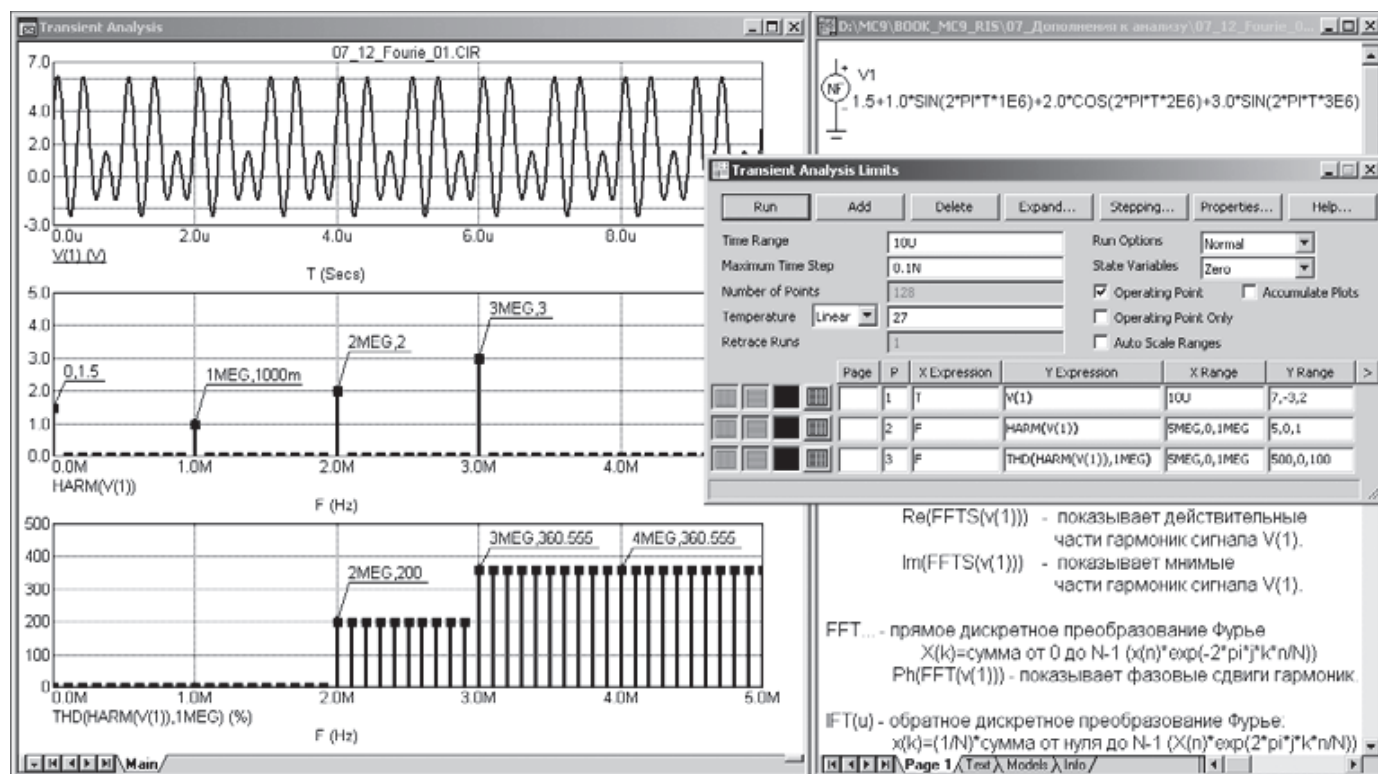
При полной уверенности, что f_{min} является минимальной частотой спектра сигнала, выбирается диапазон расчета $1/f_{min}$. Если рассматриваются колебания генератора в стационарном режиме, то для вычисления временного диапазона берется предполагаемая частота колебаний.

Теперь необходимо выбрать максимальный шаг расчета переходных процессов. Чем меньше это значение, тем точнее расчет, однако на него за-

трачивается больше времени. Как правило, максимальный шаг по оси времени DT выбирают на уровне не более 0.1% от периода гармонической составляющей минимальной частоты. Это значение примерно соответствует количеству отсчетов быстрого преобразования Фурье $N=1024$ (*Properties>FFT>Number of Points*). Для рассматриваемого оно составит $0.001 \cdot T_{MAX}=1$ нс.



а



б

Рис. 7.13. Иллюстрация изменения временного диапазона при Фурье-анализе

Для FFT операции (FFT, HARM) по нахождению гармоник сигнала, определенного во временной области, в качестве выражения X необходимо использовать частоту. Таким образом, в поле X *expression* для соответствующих выражений Y : $HARM(V(1), THD(HARM(V(1))))$ необходимо поставить F .

После заполнения всех позиций окна *Transient Analysis Limits* запускается расчет (**F2**) и на экране появляются диаграммы, отражающие значения амплитуд гармоник и коэффициента нелинейных искажений (см. рис. 7.12).

Теперь изменим T_{max} , введя в графу *Time Range* окна *Analysis Limits* значение $10u$, также изменим на $10u$ значение поля X *Range* для первого графика (рис. 7.13, а). Запуск расчета при таких параметрах показывает, что функция HARM по прежнему правильно вычисляет величины амплитуд гармоник с частотами 0MHz, 1MHz, 2MHz, и 3MHz, а функция THD выдает заведомо неверные результаты (рис. 7.13, а). Это происходит потому, что изменилась частота первой гармоники, используемая по умолчанию функцией THD, теперь $F_1 = 1/10u = 100kHz$. Для преодоления этой проблемы необходимо для функции THD явно указать параметр FR — частоту первой гармоники.

Для рассматриваемого примера в соответствующей графе Y *expression* следует набрать $THD(HARM(V(1)), 1MEG)$. Запуск расчета при таких параметрах показывает вполне адекватные результаты (рис. 7.13, б). При этом необходимо учитывать, что шаг по частоте при вычислении FFT функций уменьшился в 10 раз. Это привело к тому, что на графиках появились промежуточные точки. Значение функции HARM в этих точках равно нулю (в промежуточных точках гармоник в сигнале нет), а значение функции THD повторяется до появления следующей ненулевой гармоники сигнала.

7.4.4. Закладка FFT диалогового окна Plot Properties

Функции FFT используют параметры, установленные в закладке *FFT* диалогового окна **Properties** (**F10**). Это окно вызывается нажатием клавиши

F10, пиктограммы  или просто двойным кликом мыши на поле графика.

Основные установки закладки FFT показаны на рис. 7.14, 7.15.

Upper Time Limit — устанавливает верхнюю границу временного интервала при вычислении FFT функций. Первоначально по умолчанию устанавливается равным T_{max} . Обычно для периодического сигнала выбирается равным 3-5 периодам основной гармоники.

Lower Time Limit — устанавливает значение нижней границы временного интервала при вычислении FFT функций. Первоначально по умолчанию устанавливается равным $T_{min} = 0$ для MC9 или T_{start} для MC10. Обычно для периодического сигнала выбирается равным 2-4 периодам основной гармоники. Вообще же, для получения адекватных результатов общее правило такое. Величина *Lower Time Limit* должна быть на один период основной гармоники меньше, чем величина *Upper Time Limit* (но такие установки обычно выполняются пользователем при настройке спектрального анализа).

Frequency Step (MC10). Шаг по частоте (частота первой гармоники), рассчитанный как обратная величина разности (*Upper Time Limit* – *Lower Time Limit*). Первоначально по умолчанию в это поле устанавливается именно это значение. Если же в это поле пользователем вводится своё значение, MC10

рассчитает подходящее значение для *Lower time limit* и скорректирует его. Связь между указанными 3-мя значениями в любом случае определяется формулой:

$$\text{Frequency Step} = 1 / (\text{Upper Time Limit} - \text{Lower Time Limit})$$

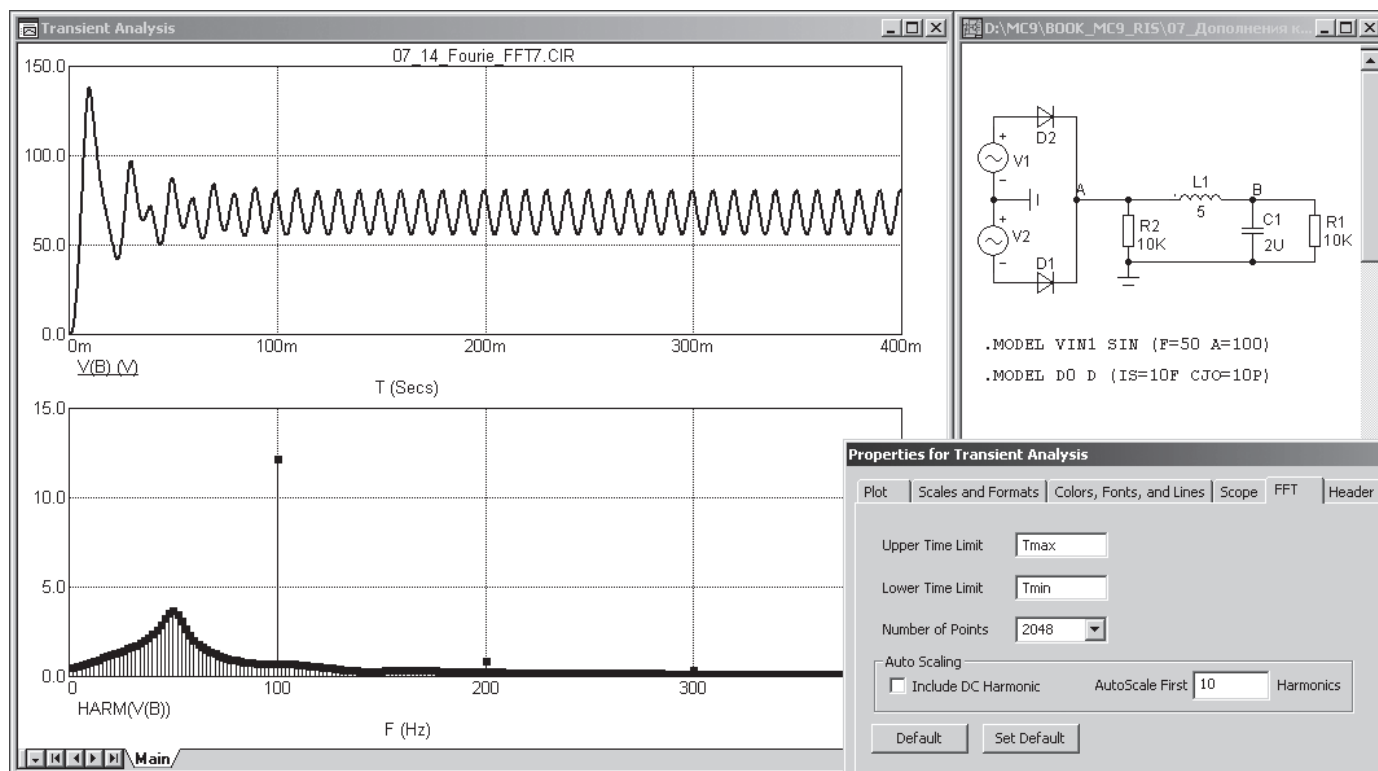


Рис. 7.14. Закладка FFT диалогового окна Plot Properties

Number of Points — устанавливает количество интерполированных равноотстоящих по оси времени точек отсчета для вычисления спектральных функций на основе быстрого преобразования Фурье. Типичное значение 1024, 2048, или 4096.

Auto Scaling — управляет автомасштабированием для FFT функций и включает следующие опции:

- *Include DC Harmonic*. При установке опции принимается во внимание величина постоянной составляющей при выполнении автомасштабирования. Обычно эта опция запрещена.
- *Auto Scale First Harmonics*. Число начальных гармоник, принимаемых во внимание при выполнении операции автомасштабирования.

Для иллюстрации действия управляющих параметров закладки *FFT* диалогового окна **Properties** рассмотрим пример *FFT7.cir* из каталога *Analysis\Fourie* — однофазный выпрямитель по схеме со средней точкой и LC-фильтр (см. рис. 7.14). Следует обратить внимание на установки закладки FFT по умолчанию — спектральный анализ производится на всем промежутке времени Tmin...Tmax (Tstart...Tmax для MC10), включая и начальные переходные процессы.

На графике зависимости выходного напряжения V(B) от времени отображаются переходные процессы при включении. На начальном участке (до 100 мс) имеются непериодические колебания, вызванные взаимодействием выпрямленного напряжения с LC-контуром. Спектральный анализ применяется

ко всем участкам этого графика, в том числе и к начальному, в котором наблюдаются нестационарные процессы. Поэтому функция $HARM(V(B))$ (характеризующая гармонический состав сигнала) имеет сложную форму и получен не линейчатый, а практически непрерывный спектр. Однако, спектр выходного напряжения выпрямителя в установившемся режиме является линейчатым. И при исследовании схемы интерес представляет именно этот спектр, поскольку именно он характерен для процессов в реальных (а не модельных) схемах.

Как правило, при использовании FFT функций предполагается, что они применяются к периодическому сигналу. Если в схеме на начальном интервале времени происходят переходные процессы, то при установке $Tmin=0$, спектральные функции дают неправильный результат (что было продемонстрировано выше). Для того, чтобы вывести спектр сигнала в установившемся режиме, нужно изменить (увеличить) параметр *Lower Time Limit* на закладке FFT диалогового окна **Properties**. Значение этого параметра должны соответствовать моменту времени, при котором переходные процессы в схеме заканчиваются. В рассматриваемом примере следует установить на закладке FFT *Upper Time Limit* — 400m, *Lower Time Limit* — 200m (согласно результатам первоначального анализа, см. рис. 7.14).

После этого проводится анализ с новым временным интервалом. Начальный период нестационарных процессов исключен из спектрального анализа и теперь спектр выходного напряжения схемы стал линейчатым (рис. 7.15).

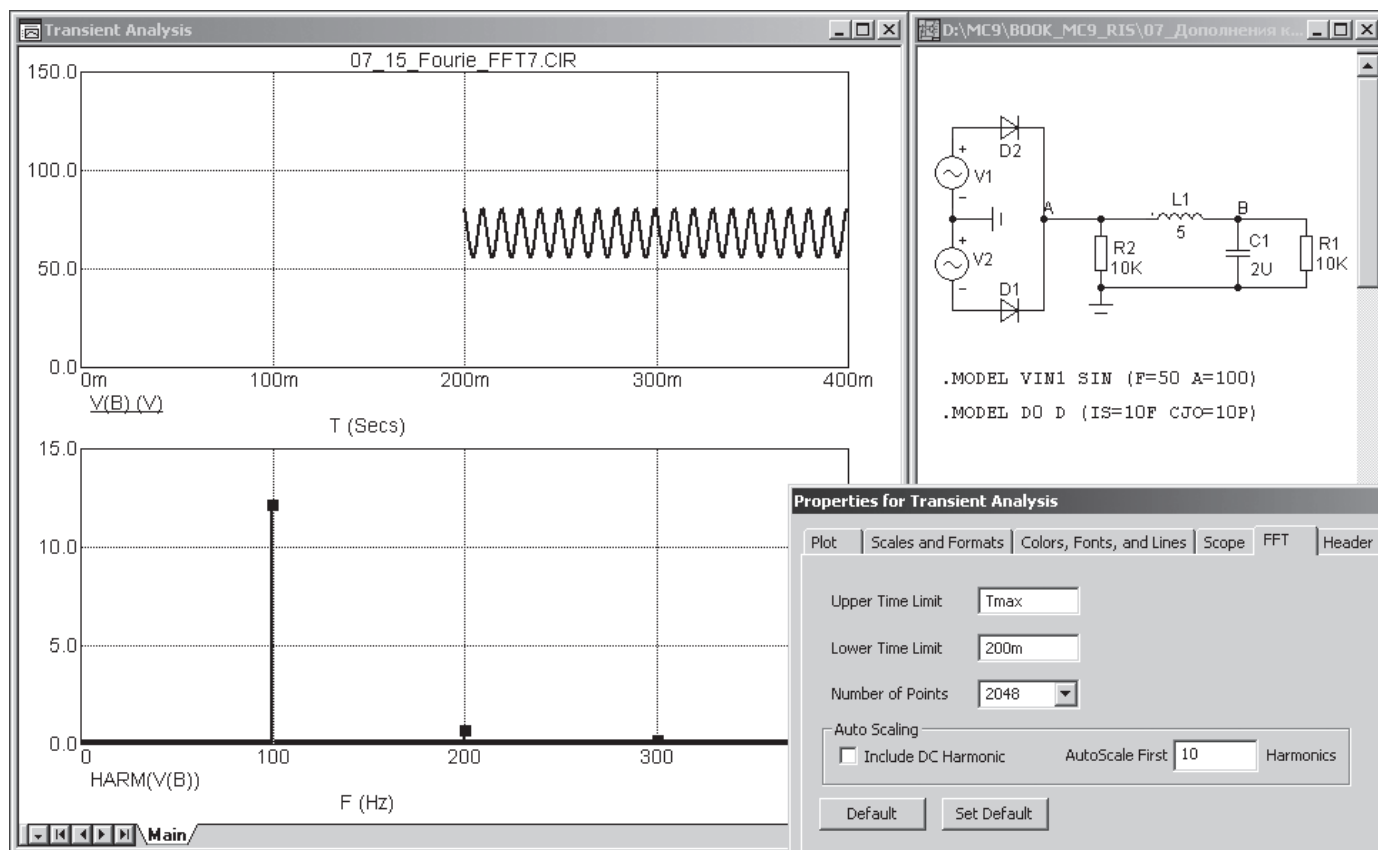


Рис. 7.15. Исключение начального неустановившегося режима из спектрального анализа: *Upper Time Limit* = Tmax=400m, *Lower Time Limit*=200m

Управляющие установки закладки FFT в примере выполняют следующие функции:

1. Удаление начального интервала 0-200ms из результатов моделирования переходных процессов для напряжения $V(B)$.

2. Создание нового графика на заданном интервале от 200ms до 400ms путем интерполяции первоначального графика в 2048 эквидистантных точках вдоль оси времени на этом интервале.

3. Применение функции спектрального анализа HARM к полученному новому графику.

Следует отметить, что в версии MC10 исключение начального нестационарного интервала может быть осуществлено значительно проще — непосредственно изменением значений в поле *Time Range* окна задания параметров анализа TRANSIENT. В этой версии программы 2-е значение в этом поле *Tstart* — это начало вывода графиков и именно оно является умолчательной установкой для *Lower Time Limit* закладки FFT. Поэтому достаточно установить *Time Range*=400m,200m, необходимые поля для Фурье-анализа заполнятся автоматически.

Кроме того в MC10 можно использовать опцию PSS для исключения начальных нестационарных процессов из Фурье-анализа. Для этого не изменяя диапазон анализа, т.е. оставив его прежним *Time Range*=400m,0m, следует установить «галочку» в позиции *Periodic Steady State* окна *Transient Analysis Limits* и запустить анализ. Результаты будут подобными приведенным на рис. 7.15 (См. схемный файл *FFT7(MC10).cir* из каталога *ANALYSIS\FOURIE*).

7.4.5. Окно для построения спектральных функций FFT window

Как видно из предыдущего изложения, использование FFT функций представляет относительно сложную задачу, требующую специальных знаний. Упростить процесс гармонического анализа можно используя окно **FFT Window**, вызываемое из меню анализа переходных процессов **Transient>FFT Window**. Последовательность действий в этом случае такова. Сначала запускается анализ переходных процессов в схеме. Затем выполняется команда **Transient>FFT window>Add FFT Window**. После этих действий появляется диалоговое окно **Properties**, имеющее следующие закладки:

Plot. Закладка выбора анализируемых кривых и установки графических окон (рис. 7.16).

- *Curves*. Список, в котором перечисляются строящиеся в окне FFT графики.
- *Title*. При сброшенном флажке *Auto* позволяет задать название графику.
- *Curve*. Разрешает или запрещает показ выбранных кривых в графических окнах. В MC10 для этой цели служит «галочка», устанавливаемая в списке *Curves* рядом с выбранным графиком.
- *Plot Group*. Установка графического окна для выбранной кривой.
- *What To Plot*. Позволяет добавить или удалить график вида HARM(), DB(HARM()), PH(FFT()), RE(FFTS()), IM(FFTS()). В последней версии программы MC10 к этому списку добавлены следующие функции: HARMN(), DB(HARMN()), THD(), IHD().

Format (Scales and Format в MC10). Закладка для задания числовых форматов, масштабов, автомасштабирования. Аналогична соответствующей закладке окна *Properties* (см. раздел 8.3).

Colors, Fonts, and Lines. Закладка задания цветового оформления окна и графиков, шрифтовых параметров текстовых объектов. Аналогична соответствующей закладке окна *Properties*.

Scope. Управление способом вывода графиков: координатными сетками, метками, курсорами. См. раздел 8.2.

FFT. Установка параметров быстрого преобразования Фурье (FFT). Аналогична соответствующей закладке окна *Properties*.

Numeric output. Управление числовым выводом графиков Фурье-анализа в окне FFT (MC10).

Tool Bar. Выбор пиктограмм для панели инструментов окна. Аналогична соответствующей закладке окна *Properties*.

В качестве примера на рис. 7.16 показано использование окна FFT для спектрального анализа выходного напряжения схемы однофазного выпрямителя в стационарном режиме. При этом установки закладки FFT этого окна следующие: Upper Time Limit=Tmax, Lower Time Limit=200m. См. также анализ переходных процессов в схемном файле *FFT7.cir* из каталога *Analysis\Fourie*.

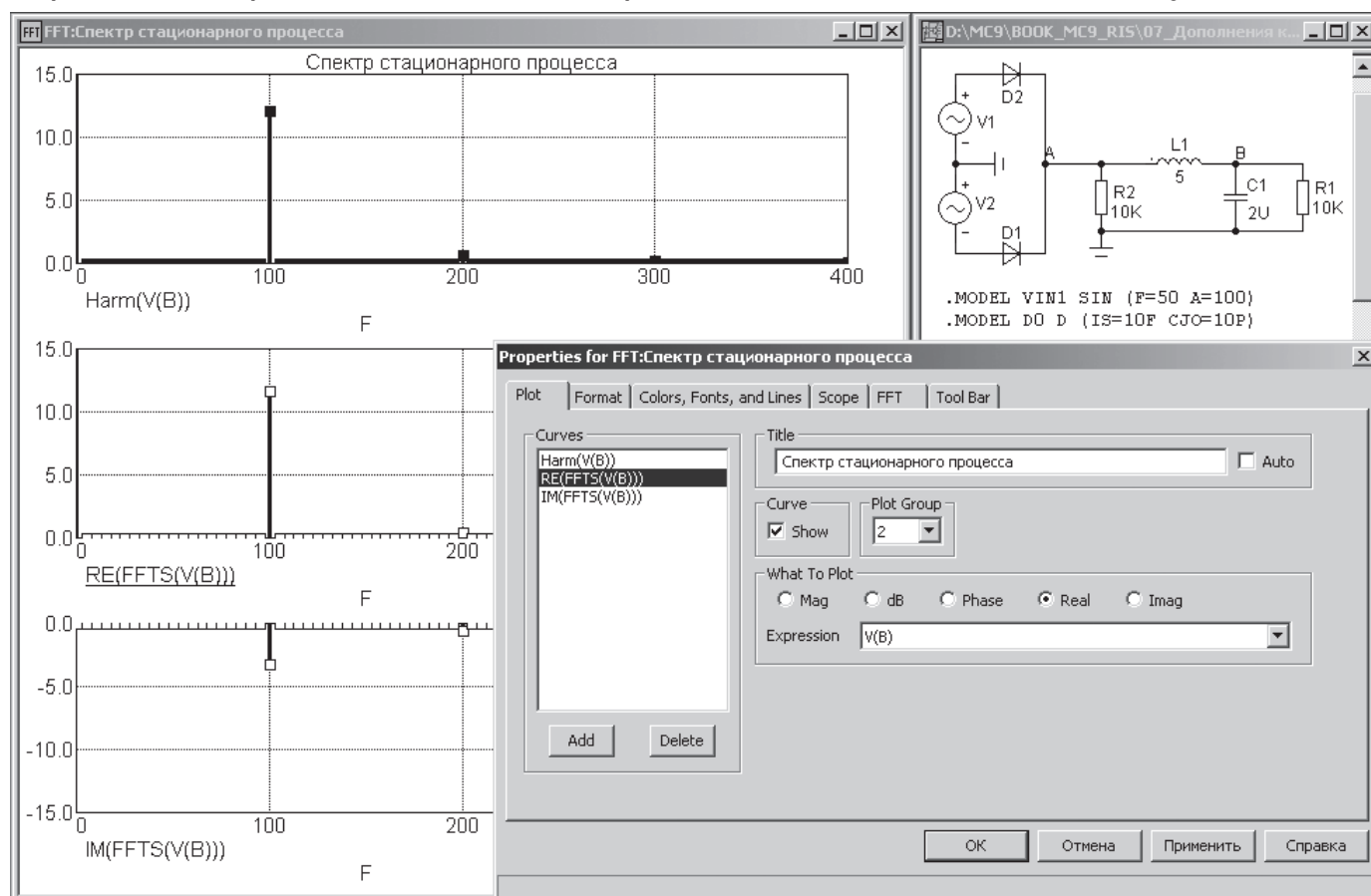


Рис. 7.16. Использование окна FFT для построения основных функций спектрального анализа

7.5. Нахождение стационарного режима работы схем с периодическими воздействиями (опция PSS)

Поиск стационарного режима (опция PSS) — это новая возможность, свойственная только версии MC10. Опция может использоваться в следующих видах анализа: *Transient*, *Harmonic distortion*, и *Intermodulation distortion*.

Что дает PSS? Какую пользу она приносит? Ответы находятся в фундаментальных математических основах схемотехнического анализа, а именно в уравнениях которые при этом решаются. Все симуляторы (включая и Micro-Cap), составляют систему дифференциальных уравнений и затем численными методами последовательно шаг за шагом по оси времени решают ее. Решение системы дифференциальных уравнений состоит из двух частей:

- 1) Собственно переходный процесс (или так называемая свободная составляющая — *transient portion*);
- 2) Стационарный процесс (или так называемая принужденная составляющая — *steady-state portion*)

Во многих случаях представляет интерес только принужденная составляющая, определяющая стационарный режим работы схемы. Более того, переходный процесс установления стационарного режима искажает результаты при некоторых видах анализа. Например, при анализе нелинейных искажений, начальный процесс установления стационарного режима генерирует случайные гармоники, которые должны быть исключены из анализа. Для устранения этого влияния необходимо проводить анализ нелинейных искажений только в тот промежуток времени, когда переходные процессы уже закончились и схема находится в стационарном состоянии. Для этого расчет переходных процессов запускается на очень длительное время, а при анализе нелинейных искажений используется только его конечная часть (последний период колебаний).

При этом заранее не известно, в какой момент закончатся переходные процессы в схеме и время расчета приходится выбирать с большим запасом, либо повторять расчет несколько раз, что существенно увеличивает время, которое нужно затратить для получения результата.

Использование PSS позволяет оптимизировать затраты времени и исключить ошибки, поскольку программа автоматически находит стационарный режим по заданным критериям. При этом нет необходимости задавать время расчета, необходимое для завершения переходного процесса, достаточно лишь задать нужный диапазон. А время расчета автоматически увеличится на величину, необходимую для завершения переходных процессов, но этот этап не будет выводиться на график. Он будет начинаться из стационарного режима работы схемы (рис. 7.17).

Окно установки параметров PSS (рис. 7.18) вызывается кнопкой из окна *Analysis Limits* следующих видов анализа: *Transient*, *Harmonic Distortion*, и *Intermodulation Distortion*. Оно имеет 3 числовых поля:

Number of Stabilization Periods — количество периодов $T_{\max}$, на которые программа запускает анализ перед тем как начать оценку установления стационарного режима.

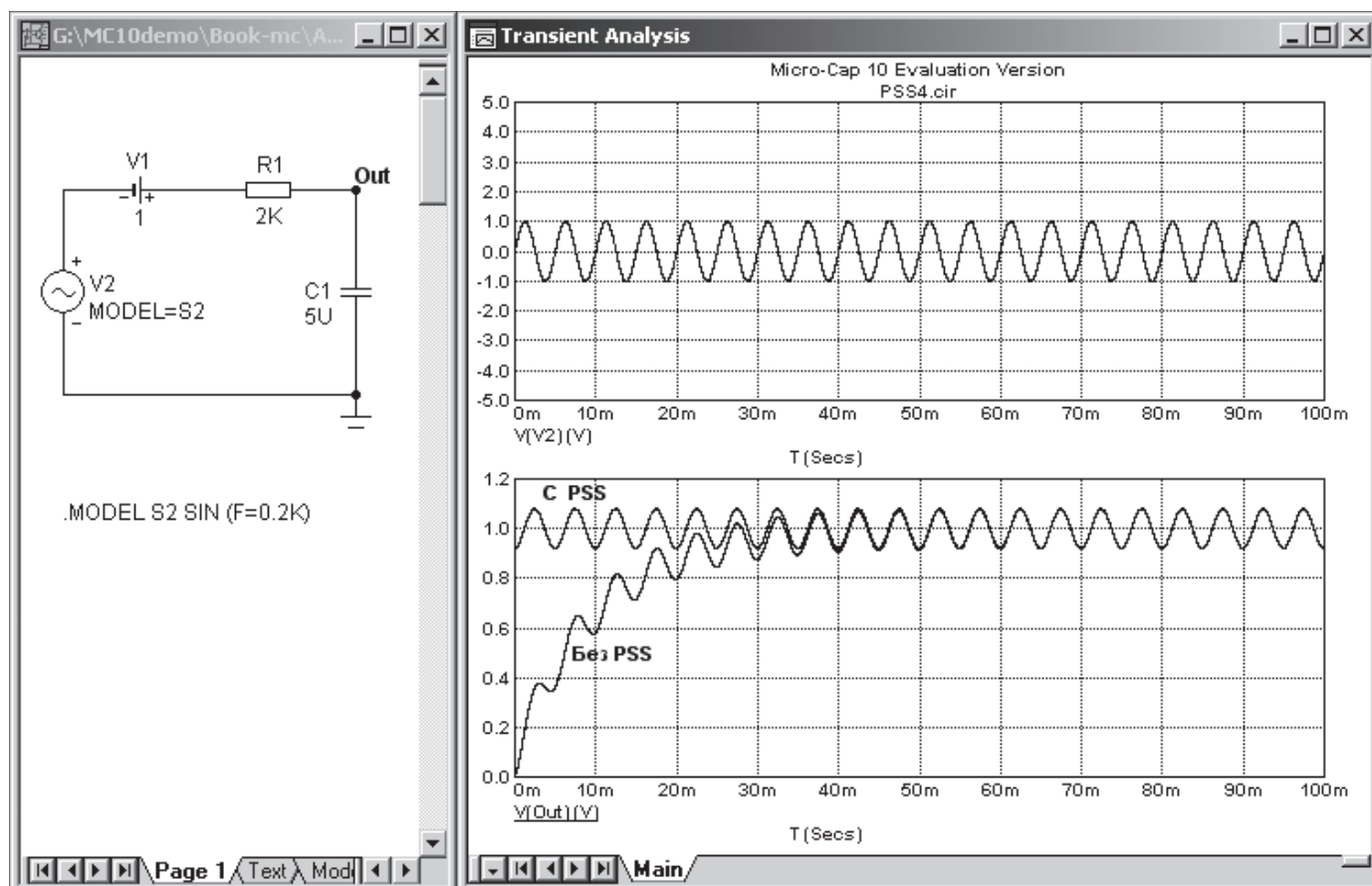


Рис. 7.17. Расчет с выключенной и включенной опцией PSS

Maximum Iterations — максимальное число итераций, на которые запускается процесс поиска стационарного режима PSS для снижения периодической относительной ошибки до величины, указанной в позиции **Maximum Error**.

Maximum Error — максимальная величина периодической относительной ошибки. Режим PSS успешно завершается вместе с анализом переходных процессов, когда периодическая ошибка становится ниже этой величины.

Рис. 7.18. Окно задания параметров поиска стационарного режима

Show Plots. При установке этого флага, на графике анализа показываются последовательные итерации приближения к стационарному режиму, позволяя наблюдателю следить за прогрессом решения. Ошибка PSS и параметры итераций показываются динамически в строке состояния, их также

можно посмотреть после окончания анализа в конце текстовой страницы схемы *Info*.

Периодическая ошибка — это наибольшая относительная разность между итерациями поиска стационарного режима (для узловых потенциалов, токов катушек индуктивности).

Условия применимости опции PSS

Периодичность. Реакция схемы должна быть периодическим сигналом. Если на схему воздействуют множество источников, время анализа $t_{\max}$ должно равняться произведению периодов этих источников.

Линейность. Связь между начальным и конечным значением интервала серии должна быть практически линейной. При полной линейности сходимость обычно наступает через 1-3 итерации. Если зависимость имеет существенно нелинейный характер может потребоваться намного больше итераций или режим PSS может не сойтись вовсе.

Нехаотичность сигналов схемы (Nonchaotic Circuits). PSS не может работать с генераторами (за исключением тех случаев, если период их колебаний известен) и со схемами, отклики которых близки к случайным процессам, такие, как например, дельта-сигма модуляторы и некоторые схемы импульсных источников питания.

PSS не работает со схемами, содержащими линии передачи, Лапласовы источники, Z-источники (цифровые фильтры) и N-полюсники.

Примеры анализа схем с использованием опции PSS находятся в каталоге *ANALYSIS\PSS*, в них же содержатся и необходимые пояснения. Другие примеры использования PSS уже были продемонстрированы при разборе анализа искажений и спектрального анализа (см. разделы 6.9, 7.4.4).

8. ПРОСМОТР И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Micro-Cap предоставляет богатые графические возможности обработки результатов, полученных в ходе вычислений. Можно выполнять панорамирование и масштабирование окна результатов моделирования, нанести на графики размерные линии и координаты отдельных точек и т.п. Кроме того, использование постпроцессора **Probe** позволяет строить любые графики без повторного моделирования на основе сформированного в процессе вычислений файла данных.

Micro-Cap позволяет также строить трехмерные графики (**3D Windows**) и выполнять анимацию (**Animate**).

8.1. Дополнительные возможности при построении графиков

Во всех режимах анализа после выполнения команды **Run** начинается расчет и вывод на экран заданных графиков. Помимо графиков в процессе расчета в нижней части графического окна справа от обозначения каждой переменной можно выводить ее текущее численное значение. Выбор этой функции осуществляется нажатием клавиши **P** во время проведения расчета. Отмена — повторным нажатием этой клавиши.

Отображение текущих значений переменных удобно для контроля за длительными расчетами передаточных функций, диапазон изменения которых заранее не известен (так что текущие результаты могут быть не видны на экране). Однако моделирование при этом значительно замедляется, поэтому после просмотра наиболее интересного фрагмента данных этот режим рекомендуется отключать.

Для замедления построения графиков можно нажать кнопку  на панели инструментов. При этом появляется возможность включить режим анимации (**Animate**), который позволяет замедлить вывод графиков, что удобно при построении наряду с зависимостями во времени зависимостей различных величин между собой, например $B(H)$ — петли гистерезиса материала магнитного сердечника.

После завершения моделирования в графическом окне выводятся графики характеристик схемы. Дальнейшая обработка графиков может выполняться в нескольких режимах.

8.1.1. Окно отображения результатов моделирования

Рассмотрим средства отображения, просмотра, обработки сигналов и нанесения надписей на их графики непосредственно после завершения моделирования.

Двойной щелчок курсором мыши в поле графиков открывает диалоговое окно **Properties**. В этом режиме можно изменить свойства графиков: тип линий, цвет, толщину и т.п. (подробно возможности описаны ниже).

Кроме того, в верхней части окна графиков выводятся пиктограммы дополнительных возможностей (рис. 8.1). С помощью этих пиктограмм можно осуществлять нанесение на графики размерных линий и координат отдельных точек, задать оформление графиков и представленной на них дополни-

тельной информации, осуществлять управление электронными курсорами, выполнить панорамирование и масштабирование и т.д.

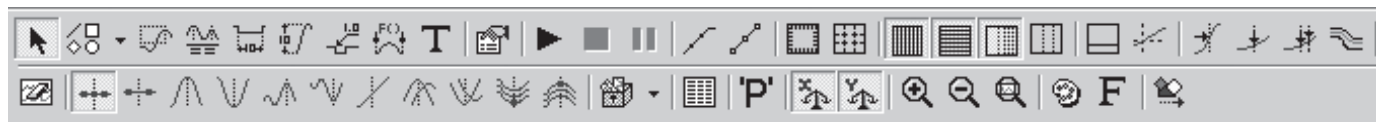


Рис. 8.1. Панель инструментов окна графиков анализа



Select (Ctrl+E). В этом режиме левой клавишей мыши можно выделять различные объекты: текст, графику, измерительные линии, стрелки, координаты точек графика и пр., для их последующего перемещения и редактирования.



Graphics. Позволяет выбрать графический объект, наносимый на график: линию, эллипс, прямоугольник, ромб, дугу, сектор эллипса, скобки, многоугольник. Помещенные на график объекты затем можно редактировать, выбирая их двойным щелчком левой клавиши мыши в режиме *Select*.



Text (CTRL+T). Ввод текста (в абсолютных и относительных координатах). Текст в относительных координатах (Relative) сохраняет свое положение относительно кривой, к которой он привязан, при изменении масштабов графиков. Абсолютный текст (Absolute) сохраняет свое местоположение в графическом окне, независимо от масштабирования графиков. В текстовом объекте можно устанавливать рамку и заливку, а также менять гарнитуру, начертание, размер и цвет шрифта, менять ориентацию текста.

Остальные пиктограммы этого окна описаны ниже в соответствующих разделах.

8.1.2. Панорамирование и масштабирование окна результатов моделирования

Панорамированием называется перемещение окна без изменения масштаба изображения. Оно выполняется с помощью клавиатуры или мыши.

Клавиатура. Одновременное нажатие **Ctrl+<клавиша стрелок>** перемещает графики активного окна в направлении стрелки. Например, нажатие **Ctrl+→** панорамирует активное графическое окно вправо. Активным является то окно, в котором щелчком курсора выбрано имя одного из графиков (оно помечается подчеркиванием).

Мышь. Щелчок и буксировка правой кнопки мыши перемещает график движением мыши (курсор при этом принимает форму руки). Так происходит панорамирование во всех режимах, за исключением режима электронного курсора *Cursor Mode*. Панорамирование графиков в режиме электронного курсора *Cursor Mode* выполняется аналогично, но при нажатой клавише **Ctrl**.

После того, как анализ выполнен и графики построены, путем **масштабирования** можно уменьшать или увеличивать их размер внутри графических окон. Опция *Enable Scaling* на закладке *Scales and Formats* диалогового

окна **Properties (F10)**, дублируемая кнопками панели инструментов  , позволяет разрешить/запретить масштабирование вдоль каждой из осей ко-

ординат (X, Y). Ее состояние учитывается при выполнении нижеприведенных команд.

Масштабирование графиков выполняется с помощью команд меню *Scope*, *Options*, *Windows*, дублируемых следующими пиктограммами или функциональными клавишами:



Scope>Auto Scale (F6) — автоматическое масштабирование графиков выбранного окна так, чтобы они заняли все окно при использовании количества линий координатной сетки, указанной в позиции *Auto/Static Grids* (*Properties>Scales and Formats*).

Scope>Auto Scale Visible Region — автоматическое масштабирование видимой области графика с параметрами аналогичными предыдущей команде. Видимая область графика предварительно устанавливается с помощью панорамирования или масштабирования.

Scope>Restore Limit Scales (Ctrl+Home) — перечерчивание всех графиков в масштабе, указанном в окне *Analysis Limits*.



Options>Mode>Scale (F7). В этом режиме протяжкой левой клавиши мыши можно увеличить заключенную в нее прямоугольную область графика



Windows>Zoom-Out (CTRL+<->). Уменьшения масштаба изображения графиков выбранного графического окна.



Windows>Zoom-In (CTRL+<+>). Увеличение масштаба изображения графиков выбранного графического окна.

Масштабирование мышью. Масштабирование мышью возможно только в 2-х режимах: *Scale Mode* и *Cursor Mode*, выбираемыми из меню *Options*.

- *Scale mode*  (**F7**). Протяжка левой клавишей мыши с захватом прямоугольной области, которая после отпускания будет показана в размере полного графического окна.
- *Cursor mode*  (**F8**). Протяжка левой клавишей мыши при с нажатой одновременно клавише **Ctrl** с захватом прямоугольной области, которая после отпускания будет показана в размере полного графического окна.

Properties (F10). Данное диалоговое окно управляет характеристиками переднего графического окна. Когда после завершения анализа передним окном становится окно графиков функций (возможно многостраничное), в нем появляется закладка *Scales and Formats*, позволяющая изменять масштабы вручную установкой нужных пределов для уже построенных графиков.



Undo: (CTRL+Z). Команда восстанавливает предыдущий масштаб.



Redo: (CTRL+Y). Команда отменяет восстановление предыдущего масштаба.

8.1.3. Нанесение на графики размерных линий и координат отдельных точек

Нанесение размерных линий и координат на график является способом наглядного показа различий между двумя (и более) характерными точками

графика. Выбираются указанные команды из пункта меню **Options>Mode**. Размерные линии могут наноситься между точками одного графика или между точками разных графиков одного графического окна (рис. 8.2).



 **Point Tag** — указание координат X и Y выбранной точки графика. Используется для указания точного времени события при моделировании цифровых устройств или координат пиков и впадин графиков при аналоговом моделировании. В этом режиме протяжка левой клавишей мыши рисует выносную линию со стрелкой, оканчивающуюся значениями координат для ближайшей точки на графике. Формат представления чисел задается параметром *Analysis Plot Tags* на закладке *Format* окна **Preferences**.



 **Vertical Tag** — нанесение размерной линии с указанием расстояния по оси Y между двумя выбранными точками одного или двух графиков. Формат представления чисел задается параметром *Analysis Plot Tags* на закладке *Format* окна *Preferences*.

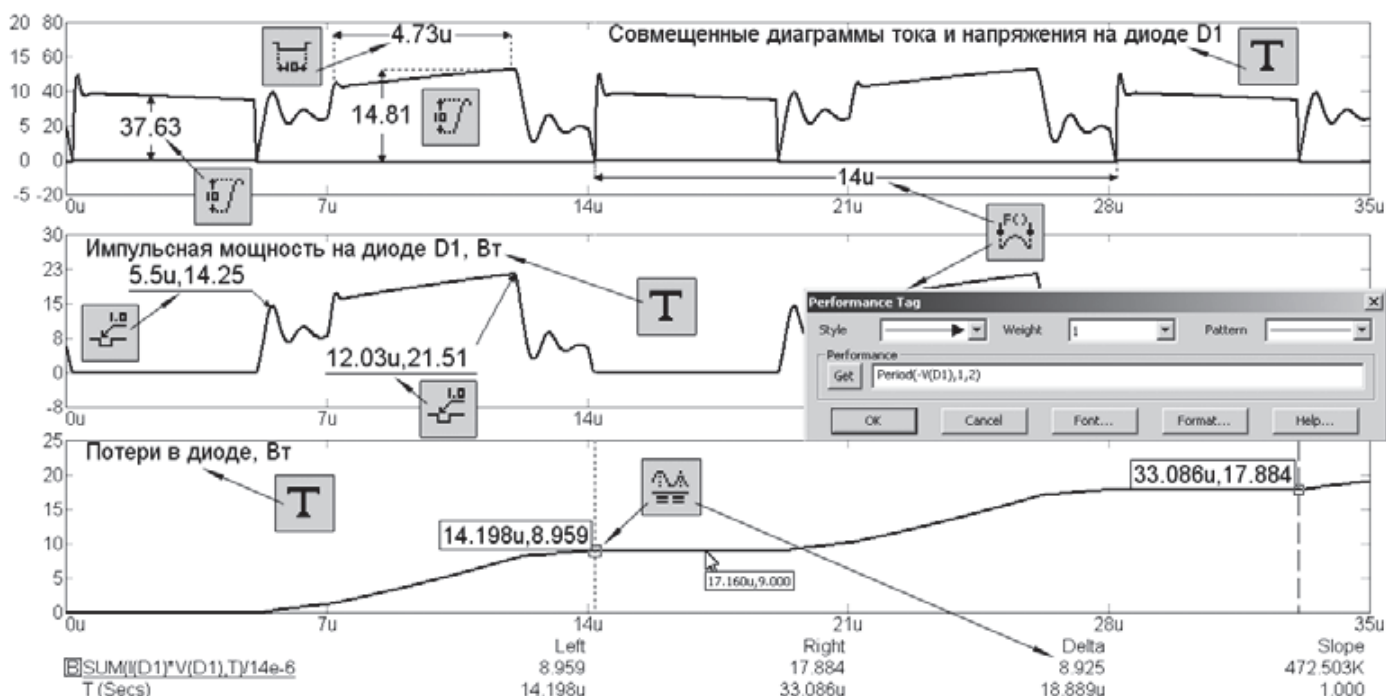


Рис. 8.2. Нанесение на график координат точек и поясняющих надписей



 **Horizontal Tag** — нанесение размерной линии с указанием расстояния по оси X между двумя выбранными точками одного или двух графиков. Удобно для измерения сдвига во времени между двумя событиями при цифровом моделировании, длительности импульса и временных задержек — при аналоговом моделировании. Формат представления чисел задается параметром *Analysis Plot Tags* на закладке *Format* окна **Preferences**.



 **Performance Tag** — нанесение динамической размерной линии для Performance-функции. В этом режиме левый клик мыши с последующим заполнением диалогового окна позволяет запрограммировать размерную линию для функции из раздела *Performance*. Это могут быть время фронта импульса (Rise time), спад импульса (Fall time), пиковое значение (Peak), период (Period), частота (Frequency) и многое другое. После этого будет произво-

даться измерение заданного параметра графика при каждом новом запуске анализа (включая любой вариант расчета внутри Stepping, Monte-Carlo, а также после редактирования схемы в динамическом режиме со слайдерами или просто в одновременно открытом окне схемного редактора). Иллюстрацию использования этого тэга можно посмотреть в схемном файле *Perf_Tag.cir* из каталога *Analysis\Performance*.

Координаты точек и расстояние между ними могут быть также указаны в режиме двух электронных курсоров *Cursor Mode*  с помощью следующих команд меню **Scope**:

- *Tag Left Cursor: (CTRL+L)* — нанесение выносной линии с координатами точки пересечения левого электронного курсора с выбранным графиком.
- *Tag Right Cursor: (CTRL+R)* — нанесение выносной линии с координатами точки пересечения правого электронного курсора с выбранным графиком.
- *Tag Horizontal: (SHIFT+CTRL+H)* — нанесение размерной линии и отображение на графике расстоянием вдоль оси X между точками, на которые указывают левый и правый электронные и курсоры.
- *Tag Vertical: (SHIFT+CTRL+V)* — нанесение размерной линии с расстоянием по оси Y между точками графиков на которые указывают левый и правый электронные и курсоры.

Числовой формат координат, выводимых на размерных линиях и выносках определяется в окне, которое вызывается командой *Options>Preferences>Format>Analysis Plot Tags*.

8.1.4. Режим **Cursor mode**

Режим **Cursor mode** вызывается пиктограммой  или клавишей **F8**. Он используется для отображения координат одной или двух точек на выбранном графике (имя выбранной переменной подчеркивается). Расположение двух электронных курсоров на графике изменяется их буксировкой правой и левой кнопками мыши соответственно. Клавиши **←** и **→** используются для более точного позиционирования левого электронного курсора, **Shift+←** и **Shift+→** — правого.

При включении этого режима в точках пересечения активного графика с левой и правой границей появляются маленькие квадратики. Фактически эти квадратики расположены на вертикальных пунктирных линиях, но в начальный момент их не видно, поскольку они совпадают с границами поля графика.

Эти пунктирные линии можно переместить в любые точки графиков нажатием в нужном месте левой и правой кнопок мыши, а потом проводить различные измерения для этих точек. Курсоры привязываются к графикам, имена которых также выбираются кнопками мыши — выбранные имена подчеркиваются. Перемещение курсоров по выбранным графикам осуществляется не только с помощью кнопок мыши, но и стрелками клавиатуры (что обеспечивает более точную настройку): первый (левый) курсор перемещается влево или вправо нажатием клавиш **←** или **→**, второй (правый) — одновременным нажатием клавиш **Shift+→**, **Shift+←**.

Внизу каждого окна графиков располагается таблица, число строк которой равно числу построенных графиков плюс одна строка, в которой размещаются значения независимой переменной, откладываемой по оси X (время, частота и т. п.). В колонках таблицы располагается информация:

- Имя переменной, выведенной на график;
- *Left* — значение переменной, помеченной левым курсором;
- *Right* — значение переменной, помеченной правым курсором;
- *Delta* — разность значений координат курсоров;
- *Slope* — тангенс угла наклона прямой ($\Delta y / \Delta x$), соединяющей два курсора.

Таким образом, режим **Cursor mode** позволяет анализировать полученные результаты по точным числовым значениям, отображаемым в этой таблице.

Перемещение левого курсора между несколькими графиками результатов многовариантного анализа выполняется нажатием клавиш $\uparrow$, $\downarrow$, правого курсора — **Shift** $\uparrow$, $\downarrow$.

8.2. Режим электронной лупы Scope

Пункт меню Scope находится в верхней строке главного окна программы. Его разделы определяют характер оформления графиков и представленной на них дополнительной информации, а также осуществляет управление электронными курсорами. Доступные разделы меню Scope меняются в зависимости от выбранных режимов отображения графиков. Максимальные возможности предоставляются в режиме **Cursor mode**.

8.2.1. Возможности меню Scope

Для режима **Cursor mode** в меню **Scope** доступны следующие пункты:

Delete All Objects — удаление всех значений координат, текста и всех графических объектов, нанесенных ранее (для удаления отдельного объекта он выбирается щелчком курсора в режиме **Select**  и затем удаляется нажатием клавиши **Delete** или **Ctrl+X**).

 **Auto Scale (F6)** — автоматическое масштабирование графиков выбранного окна.

Auto Scale Visible Region — автоматическое масштабирование видимой области графиков активного графического окна, которая предварительно устанавливается операциями панорамирования и масштабирования.

 **Restore Limit Scales (Ctrl+Home)** — перечерчивание графиков всех окон в масштабе, указанном в окне *Analysis Limits*.

 **Go Up a Level (ALT+Up)** — переход на один уровень вверх в макро-модели (подсхеме) с иерархическими вложениями в режиме анализа с графическим постпроцессором Probe. См. пример *Cmos_Counter.cir* из каталога *Analysis\Probe*.

View — характер отображения информации:

-  **Data Points** — отображение на графиках расчетных точек;

-  *Tokens* — нанесение на графики специальных значков для облегчения их распознавания при черно-белой печати;
-  *Ruler* — нанесение разметки координатных осей вместо изображения сетки;
-  *Plus Mark* — замена изображения сетки знаками «+»;
-  *Horizontal Axis Grids* — нанесение сетки по горизонтальной оси координат;
-  *Vertical Axis Grids* — нанесение сетки по вертикальной оси координат;
-  *Minor Log Grids* — нанесение более мелкой логарифмической сетки 23456789 по всем осям координат, размеченным в логарифмическом масштабе;
-  *Minor Log Grids 2 5* — нанесение более мелкой логарифмической сетки 2 5 по всем осям координат, размеченным в логарифмическом масштабе;
- *Label All Minor Grids* — нанесение меток на оси для любого мелкого логарифмического масштаба;
-  *Baseline* — нанесение нулевой линии на все графики;
-  *Horizontal Cursor* — проведение горизонтальной линии через точку пересечения курсора с графиком при включенном режиме *Cursor Mode*.

Trackers — управление изображением координат на графиках.

- *Cursor (Ctrl+Shift+C)* — включение/выключение координат вертикальных курсоров на точке пересечения с графиком;
- *Cursor: Branch Info (Ctrl+Shift+C)* — отображение значения варьируемого параметра или номера реализации в точке пересечения курсоров с графиками при использовании многовариантного анализа (Stepping, Monte Carlo);
- *Intercept (Ctrl+I)* — включение/выключение отображения координат точек пересечения вертикальных курсоров с графиком на осях координат;
- *Mouse (Ctrl+M)* — включение/выключение координат курсора мыши.

Cursor Functions — перемещение курсора к характерным точкам выбранного графика:

-  *Next Simulation Data Point*. При выборе (нажатии) этой пиктограммы при помощи клавишей → ← для левого курсора и Shift + → Shift + ← для правого курсора происходит его перемещение к следующей рассчитанной точке данных;
-  *Next Interpolated Data Point*. При выборе (нажатии) этой пиктограммы возможно перемещение курсора к следующей интерполиро-

ванной точке ($\rightarrow \leftarrow$ — для левого курсора и $\text{Shift}+ \rightarrow$, $\text{Shift}+ \leftarrow$ — для правого);

-  **Peak** — перемещение курсора к следующему пику, расположенному слева или справа от текущего положения курсора нажатием клавиш $\rightarrow \leftarrow$ (или $\text{Shift}+ \rightarrow$, $\text{Shift}+ \leftarrow$) соответственно;
-  **Valley** — перемещение курсора к следующей впадине, расположенной слева или справа от текущего положения курсора нажатием клавиш $\rightarrow \leftarrow$ (или $\text{Shift}+ \rightarrow$, $\text{Shift}+ \leftarrow$) соответственно;
-  **High** — перемещение курсора в наиболее высокую точку графика (глобальный максимум) нажатием клавиш $\rightarrow \leftarrow$ или $\text{Shift}+ \rightarrow$, $\text{Shift}+ \leftarrow$ соответственно;
-  **Low** — перемещение курсора в наиболее низкую точку графика (глобальный минимум) нажатием клавиш $\rightarrow \leftarrow$ или $\text{Shift}+ \rightarrow$, $\text{Shift}+ \leftarrow$ соответственно;
-  **Inflection** — перемещение курсора к следующей точке перегиба (точке, в которой 2-ая производная равна нулю).
-  **Top** ($\text{Alt}+\text{Home}$) — переход к графику, расположенному сверху;
-  **Bottom** ($\text{Alt}+\text{End}$) — переход к графику, расположенному снизу;
-  **Global High** — перемещение курсора при нажатии клавиш $\rightarrow \leftarrow$ к наиболее высокой точке семейства графиков (наиболее эффективно при многовариантном анализе или статистическом анализе по методу Монте-Карло);
-  **Global Low** — перемещение курсора при нажатии клавиш $\rightarrow \leftarrow$ к наиболее низкой точке семейства графиков (наиболее эффективно при многовариантном анализе или статистическом анализе по методу Монте-Карло)



Waveform Buffer — вызов буфера графиков для сохранения кривых и их последующего использования. Содержит следующие команды:

- **Waveform Buffer ($\text{Ctrl}+\text{Shift}+\text{B}$)** — вызов диалогового окна буфера графиков. Дальнейшие команды позволяют управлять кривыми, сохраненными в буфере графиков: удалять, защищать от случайного удаления, воспроизводить в текущем или следующем сеансах анализа.
- **Save a Waveform to the Buffer** — сохранение активного графика в буфере.
- **Retain** — сохранение активного графика в буфере и добавление соответствующих установок в окно *Analysis Limits* для его воспроизведения при следующем запуске.

Label Branches — простановка параметров вариантов графиков при многовариантном анализе.

Label Time (Frequency, Input Sweep) Points — вызывает диалоговое окно, в котором можно указать координаты X (время, частота, входная переменная при DC-анализе) для точек на графике, которые должны быть помечены.

Envelope — рисование полигона с заливкой, ограничивающего все варианты графиков выбранной переменной (при многовариантных режимах Stepping, Monte Carlo). Для удаления полигона следует его выбрать в режиме *Select* и нажать клавишу удаления **Del**.



Animate Options... — позволяет организовать замедленный показ узловых напряжений/состояний цифровых узлов (а также при включении соответствующих кнопок токов , мощностей , состояний компонентов ) в каждой расчетной точке при одновременно открытом схемном окне. Команда открывает диалоговое окно *Animate Options* для задания параметров анимации (замедления вывода графиков). После включения этого режима и запуске анализа при нажатой кнопке  () можно также видеть схему с изменяющимися в замедленном режиме переменными состояниями и элементами анимации. Элементы анимации были описаны в разделе 5.7.



Thumb Nail Plot — изображение текущих графиков в отдельном окне с изменяемыми размерами по обеим координатам. Протяжкой левой и правой клавиш мыши в этом окне можно масштабировать и панорамировать графики в основном графическом окне.

Normalize at Cursor (Ctrl+N) — нормирование выбранного графика — деление (уменьшение вычитанием для логарифмического масштаба Y) всех его ординат Y на значение ординаты Y точки графика, отмеченной курсором).

Normalize at Minimum — нормирование выбранного графика по минимуму — деление (уменьшение вычитанием для логарифмического масштаба Y) всех его ординат Y на значение минимальной ординаты Y_{min} точки графика).

Normalize at Maximum — нормирование выбранного графика по максимуму — деление (уменьшение вычитанием для логарифмического масштаба Y) всех его ординат Y на значение максимальной ординаты Y_{max} точки графика).



Go To X... (Shift+Ctrl+X) — перемещение левого или правого курсора в точку с заданной координатой по оси X.



Go To Y... (Shift+Ctrl+Y) — перемещение левого или правого курсора в ближайшую точку с заданной координатой по оси Y.



Go to Performance... — перемещение левого или (и) правого курсора в точку(и) с указанными свойствами, заданными с помощью функции окна *Performance* (см. пункты 8.4.1, 8.4.3 и рис. 8.5).



Go to Branch — переход к указанной реализации многовариантного анализа.

Tag Left Cursor (Ctrl+L) — нанесение на график значений координат точки пересечения графика с левым курсором.

Tag Right Cursor (Ctrl+R) — нанесение на график значений координат точки пересечения графика с правым курсором.

Tag Horizontal (*Shift+Ctrl+H*) — нанесение на график размерных линий между точками графика, отмеченными левым и правым курсором и простановка расстояния между ними по горизонтали.

Tag Vertical (*Shift+Ctrl+V*) — нанесение на график размерных линий между точками графика, отмеченными левым и правым курсором и простановка расстояния между ними по вертикали.

Align Cursors — синхронное перемещение курсоров и считывание координат графиков, расположенных во всех графических окнах.

Keep Cursors on Same Branch — поддержка перемещения одновременно левого и правого курсоров по одному и тому же графику результатов многовариантного анализа (при нажатии клавиш $\uparrow$, $\downarrow$, **Shift+ $\uparrow$** , **Shift+ $\downarrow$**).

Copy Cursor Values to Clipboard (только в MC10) — копирование числовых значений из курсорного табло в буфер обмена, откуда они могут быть вставлены в любой текстовый фрагмент.

Same Y Scales for Each Plot Group — перестроение всех графиков так, чтобы они имели общую ось Y (используется в том случае, если графики строятся в одном окне, но в разных масштабах).



Enable X Scaling — эта опция разрешает масштабирование по горизонтали (автомасштабирование при нажатии **F6**, уменьшение/увеличение при нажатии **Ctrl +/-** и изменение масштаба мышью). Если при установленной опции нажать F6, произойдет автомасштабирование выбранной группы графиков по горизонтали. Установка не влияет на масштабы вертикальной оси. Однако опция *Auto Scale* в окне *Analysis Limits* имеет более высокий приоритет, и автомасштабирует графики по обеим осям.



Enable Y Scaling — эта опция разрешает масштабирование по вертикали выбранной группы графиков: автомасштабирование при нажатии **F6**, уменьшение/увеличение при нажатии **Ctrl +/-** и изменение масштаба мышью. Установка не влияет на масштабы горизонтальной оси. Опция *Auto Scale* в окне *Analysis Limits* имеет более высокий приоритет, и автомасштабирует графики по обеим осям.

Keep X Scale the Same — опция приводит к единому масштабу все графики в окне (во всех группах), имеющие одинаковую переменную X (откладываемую по горизонтальной оси). Панорамирование и масштабирование графиков в одном графическом окне аналогичным образом панорамирует и масштабировует все другие графические окна.



Clear accumulated Plots — очистка графических окон от накопленных графиков при следующем запуске анализа. При установленной опции *Accumulate Plots* в окне *Analysis Limits* происходит накопление графиков, построенных в процессе изменения схемы. Это может привести к сложности восприятия результатов и перегрузке оперативной памяти. Для этого следует регулярно использовать указанную команду.

Следует отметить, что быстрое переключение в режим *Select* для выбора графических и текстовых объектов может осуществляться клавишей пробела.

8.2.2. Использование буфера графиков

Буфер графиков предназначен для запоминания и воспроизведения графиков. Благодаря ему можно вызвать и нарисовать в текущем окне анализа графики, которые были сохранены в предыдущих сеансах расчета или даже при анализе совершенно других схем. Буфер может работать с графиками, рассчитанными и построенными в режимах анализа: Transient, AC, DC, или Distortion. К графикам из буфера, воспроизведенным в текущем окне анализа, также применимы все команды меню *Score* и панели инструментов.

Диалоговое окно, открывающееся при вызове буфера графиков (рис. 8.3), содержит список графиков (слева) и окно прорисовки выбранного графика (справа).

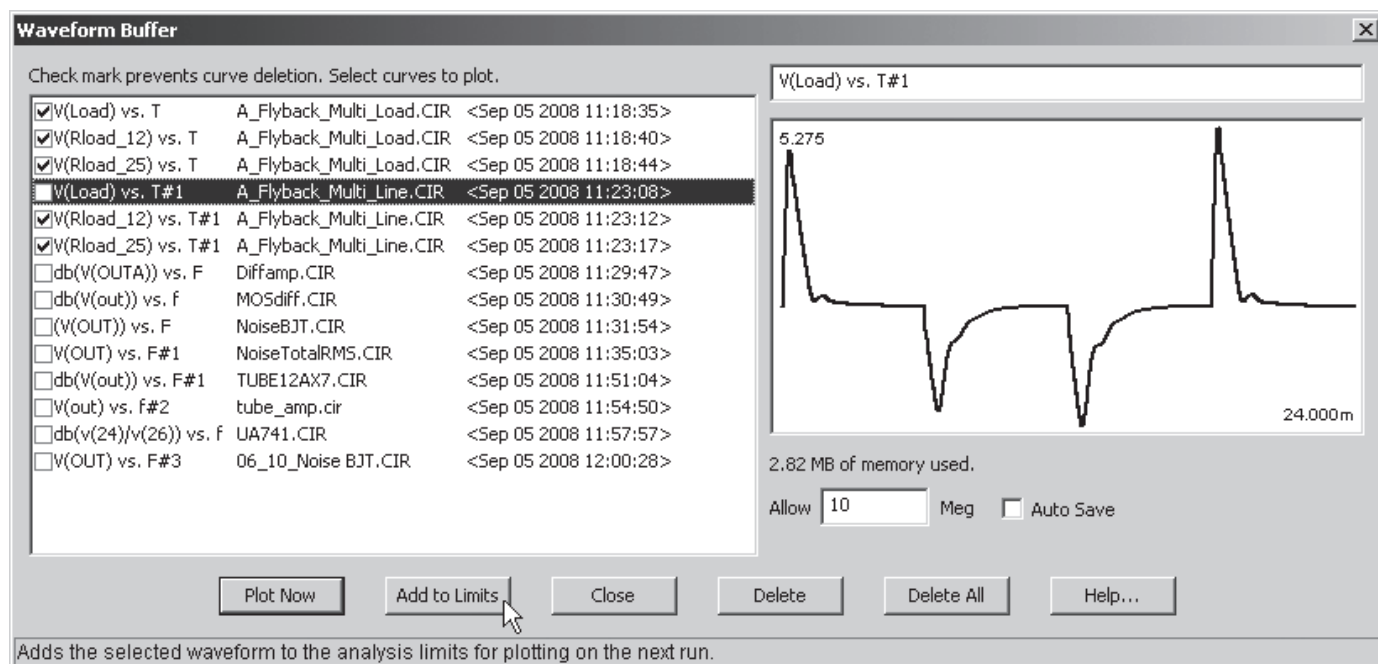


Рис. 8.3. Диалоговое окно буфера графиков (Waveform Buffer)

Список графиков содержит метки защиты графиков, вид зависимости, имя схемы из которой производился анализ, и время сохранения графика в буфере. Галочка, установленная в поле метки защиты предохраняет соответствующий график от случайного удаления. Графическое окно справа схематично демонстрирует выбранный в буфере график. Поле сверху указанного окна служит для редактирования названия графической зависимости. Другие интересные функции рассматриваемого диалогового окна:

Plot Now: команда немедленно добавляет выбранный график в окна анализа и помещает соответствующие установки в таблицу графиков окна *Analysis limits*, так чтобы графики отображались и при последующих запусках анализа.

Add to Limits: команда помещает соответствующие установки для выбранных графиков буфера в таблицу графиков окна *Analysis limits*, так чтобы графики отображались при последующих запусках анализа.

Delete: команда удаляет выбранные графики (для которых не установлена «галочка» защиты) из буфера.

Delete All: команда удаляет все графики (для которых не установлена галочка защиты) из буфера.

Auto Save: При установке этой опции будут сохраняться в буфере все графики при всех последующих запусках анализа. Как можно представить,

это будет происходить до тех пор пока не будет превышен объем памяти, отведенный под данный буфер. Как только этот предел будет достигнут, самые старые графики начнут удаляться, освобождая память для вновь сохраняемых графиков. Опять же защитная «галочка», предотвратит удаление устаревшего графика, если она была предварительно установлена.

Команды контекстного меню (правый клик мыши на имени построенного графика)

Add to Buffer: сохранение выбранного графика в буфере *Waveform Buffer*.

Retain: сохранение выбранного графика в буфере и добавление соответствующих установок в таблицу графиков окна *Analysis Limits* для воспроизведения сохраненного графика и при последующих запусках анализа.

Также описанные команда доступны через команду меню **SCOPE: Scope>Waveform Buffer**.

Когда график сохраняется в буфере, его цвет, толщина, прорисовка линии и стили также сохраняются. Сохраненные установки будут являться умолчательными при первом извлечении графика из буфера с целью прорисовки в графическом окне. После вызова свойства сохраненного графика могут быть модифицированы с помощью изменения установок окна *Analysis Limits* или через диалоговое окно *Properties*.

8.3. Диалоговое окно Properties

Диалоговое окно **Properties** вызывается пиктограммой , клавишей **F10** или просто двойным кликом левой клавиши мыши на поле графика. Это окно, главным образом предназначено для настройки параметров графических окон, однако выполняет и некоторые иные функции. Диалоговое окно (рис. 8.4) имеет следующие закладки.

Plot

Управляет отображением всех графиков, выведенных во всех графических окнах.

- **Curves.** Список построенных графиков. Позволяет выбрать график.
- **Title.** Позволяет подписать название выведенного в графических окнах результата при снятии флага *Auto*. При установленном флаге *Auto* графический вывод называется именем схемы.
- **Curve (MC9).** Позволяет выключить/включить отображение выбранного графика.
- **Plot Group.** Позволяет изменить номер графического окна вывода графика.
- **Plot Type.** Позволяет выбрать вид координат для построения графика: декартовые, полярные или диаграмма Смита. Последние 2 типа доступны только в режиме АС анализа.

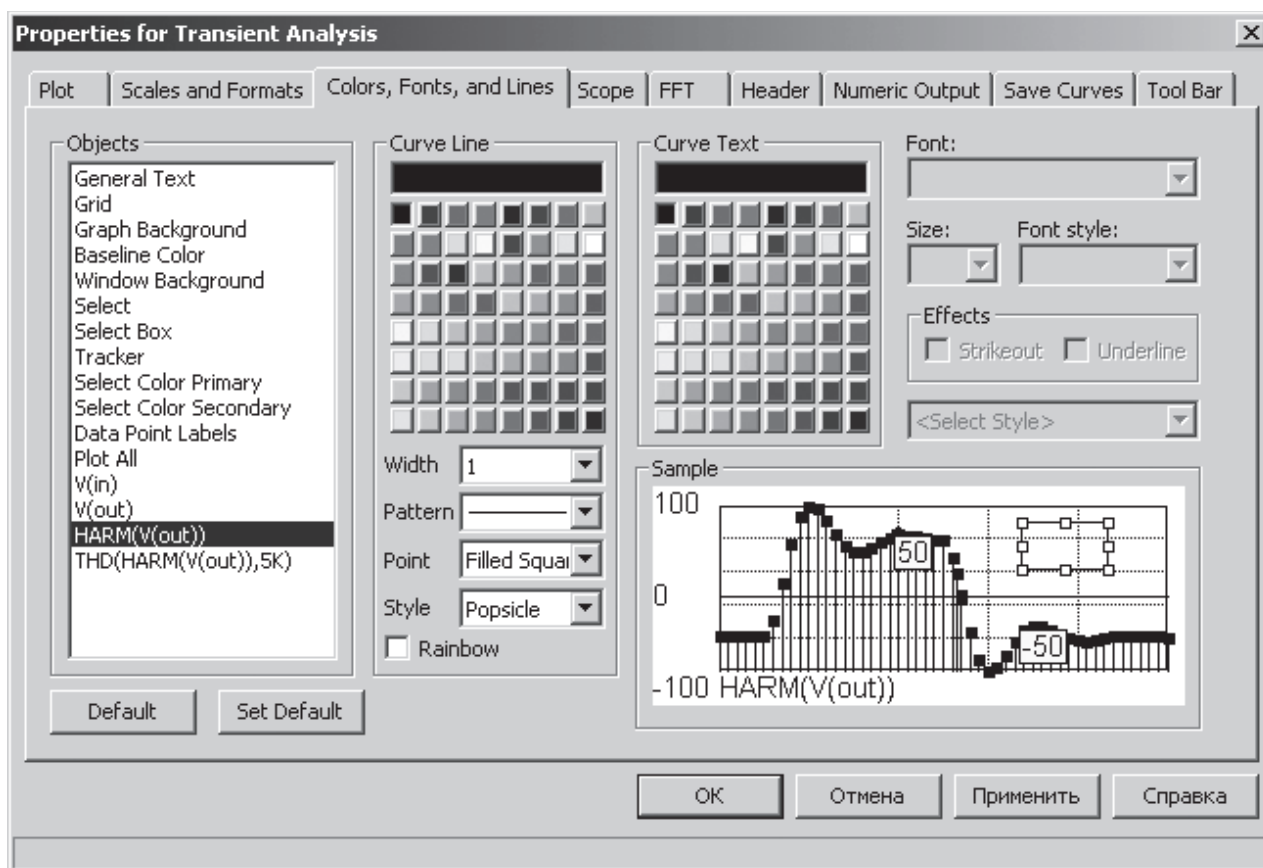


Рис. 8.4. Диалоговое окно Plot Properties

Scales and Formats

Закладка управления масштабами и форматом численного вывода.

- **Curves.** Список построенных графиков, из которого осуществляется выбор.
- Далее справа располагаются 2 панели: **X** — для управления координатами по оси X, **Y** — для управления координатами по оси Y. Каждая панель включает в себя следующие поля:
 - *Range Low* — минимальное значение величины, откладываемое по соответствующей оси для выбранного графика.
 - *Range High* — максимальное значение величины, откладываемое по соответствующей оси для выбранного графика.
 - *Grid Spacing* — расстояние между линиями координатной сетки по соответствующей оси.
 - *Bold Grid Spacing* — расстояние между утолщенными линиями координатной сетки соответствующей оси.
 - *Scale Factor* — масштабный множитель для величины выбранного графика, откладываемой по соответствующей оси. Выбирается из раскрывающегося списка (None, Auto, T, G, Meg, K, m, u, n, p, f).
 - *Scale Units* — единицы для величины выбранного графика, откладываемой по соответствующей оси. Выбираются из раскрывающегося списка (None, Auto, Seconds, Volts, Amps, Ohms, ...).
 - *Scale Format* — формат вывода масштабных чисел по соответствующей оси.

- **Value Format (Cursor Format в MC10)** — формат вывода координат точек по соответствующей оси в режиме *Cursor Mode* и на выносных и размерных линиях.
 - **Auto Scale.** Команда оценивает значения максимальной и минимальной величин, откладываемых по соответствующей оси, и, в соответствии с этим, автомасштабирует график. Результат становится виден после нажатия кнопки *Apply* (Применить).
 - **Log.** После проверки значений, откладываемых по соответствующей оси (они должны быть положительными), устанавливает на ней логарифмический масштаб.
 - **Auto/Static Grids** — число линий координатной сетки по соответствующей оси при использовании автомасштабирования (*Auto Scale*) или статической координатной сетки (*Statics Grids*).
 - **Enable Scaling** — разрешает операции масштабирования и панорамирования вдоль соответствующей оси.
- **Static Grids.** При выборе этой опции используется количество линий координатной сетки N , указанное в позиции *Auto/Static Grids*. При этом шаг координатной сетки принудительно принимается равным $(Range\ High - Range\ Low)/N$ и сохраняется равной этой величине при всех последующих операциях масштабирования и панорамирования.
 - **Keep X Scales the Same.** Устанавливает одинаковые масштабы по оси X , для всех графических окон, использующих в качестве X -переменной одну и ту же переменную (выражение) при всех последующих операциях масштабирования и панорамирования.
 - **Slope Calculation.** Список способов вычисления производных выражений, откладываемых по оси Y . Можно выбрать обычный способ вычисления как отношение приращений (*Normal*); дБ/дек (*dB/dec*); дБ/октаву (*dB/oct*). Последние два способа используются в режиме малосигнального частотного анализа АС.
 - **Same Y Scales for Each Plot Group.** В результате установки этого флага при автомасштабировании всех графиков одного графического окна подбирается единый масштаб по осям, подходящий для размещения всех графиков. В противном случае автомасштабирование производится отдельно для каждого графика одного графического окна.
 - **Save Range Edits.** Установка этого флага приводит к перезаписи всех установок для масштабов в этой закладке в установки окна *Analysis Limits*, делая их постоянно действующими.
 - **Use Common Formats.** Копирует установки форматов по осям для выбранной кривой в соответствующие установки всех других кривых, выводимых на графики.
 - **Common Y Scale.** Устанавливает масштаб по оси Y для всех графиков выбранного графического окна в соответствии с заданными на панели Y значениями.
 - **Smith Chart Scale Factor.** В этом поле производится установка масштабного множителя сопротивления для диаграммы Смита (обычно выбирается единица).

Colors, Fonts, and Lines

Закладка для изменения параметров отображения различных объектов графического окна (см. рис. 8.3.).

- **Objects.** Список объектов, параметры отображения которых можно настраивать в этом окне:

- *Baseline Color* — цвет нулевой линии координатной сетки.
- *Data Point Labels* — цвет шрифта (Foreground) и заднего фона (background) меток графиков, устанавливаемых в режиме Label Time (Frequency, Input Sweep) Points. Также для них устанавливается гарнитура (Font), размер (Size) и начертание шрифта (Font style). При желании можно из списка <Select Style> выбрать необходимый стиль вывода X,Y координат точек.
- *General Text* — текст, используемый для отображения масштабов по осям, заголовков, курсорных таблиц, имен кривых. Для него устанавливается цвет (General Text), размер (Size), гарнитура (Font) и начертание шрифта (Font style). При желании можно из списка <Select Style> выбрать необходимый стиль текста.
- *Graph Background* — цвет заднего фона окон вывода кривых.
- *Grid* — линии координатной сетки. Для них устанавливается цвет (Grid), толщина (Width) и тип линий (Pattern).
- *Select* — цвет выбранного двойным кликом мыши объекта.
- *Select Box* — цвет прямоугольника, образуемого буксировкой левой клавиши мыши в режиме Select  для выделения группы объектов.
- *Select Color Primary* — выбор цвета графика варианта многовариантного анализа к которому осуществляется переход при нажатии кнопки *Left* диалогового окна *Go To Branch*.
- *Select Color Secondary* — выбор цвета графика варианта многовариантного анализа к которому осуществляется переход при нажатии кнопки *Right* диалогового окна *Go To Branch*.
- *Tracker* — координаты пересечения электронных курсоров с графиком. Для них устанавливаются цвет шрифта (Foreground) и фона (background), гарнитура (Font), размер (Size) и начертание шрифта (Font style). При желании можно из списка <Select Style> выбрать необходимый стиль вывода координат.
- *Window Background* — цвет заднего фона окна результатов анализа.
- *Plot All* — устанавливается цвет (Curve Line), толщину (Width), тип линии (Pattern), тип вывода расчетных точек (points), стиль вывода графиков (Style), а также цвет выражений графиков и чисел в строке курсорной таблицы, соответствующей выражению Y (Curve Text), одновременно для всех графиков.
- *Список отображаемых графиков.* Позволяет устанавливать цвет (Curve Line), толщину (Width), тип линии (Pattern), тип вывода расчетных точек (points), стиль вывода графиков (Style), а также цвет выражения графика и чисел в строке курсорной таблицы, соответствующей выбранному Y-выражению (Curve Text), по отдельности для каждого графика.

Перечисленные возможности управления выводом графиков и координат курсоров дополнены в MC10 управлением форматом числовых данных на размерных линиях и в результатах вычислений с помощью формульного текста: *Plot Tag*, *Formula Text*.

Относительно стилей вывода графиков (Style) следует отметить, что они могут быть следующими:

- Normal. Наиболее частот используемый стиль отображения, заключающийся в прорисовке прямой линии между расчетными точками (линейная интерполяция).
- Popsicle. Вывод расчетных точек с перпендикуляром соединяющим их с осью X. Такой способ обычно используется для отображения спектров и функций производных от них (см. рис. 7.12).
- **Rainbow.** Установка этой опции присваивает каждой кривой многовариантного анализа разный цвет.
- **Sample.** Показывает образец текущего изменения свойств объектов.

SCOPE

Установки этой закладки дублируют одноименные команды меню *Scope*.

Версия MC10 отличается тем, что в этой закладке появились дополнительные команды: *Align Cursors*, *Keep Cursors on Same Branch*, позволяющие устанавливать связанность курсоров и их привязку к одному варианту анализа для текущей схемы.

FFT

Закладка, управляющая параметрами вычисления функций спектрального анализа на основе прямого и обратного быстрого преобразования Фурье. Для режима анализа переходных процессов *Transient*:

- **Upper Time Limit.** Указывает конечное значение временного интервала, используемого при вычислении функций на основе быстрого преобразования Фурье (FFT). По умолчанию устанавливается TMAX.
- **Lower Time Limit.** Указывает начальное значение временного интервала, используемого при вычислении FFT функций. По умолчанию устанавливается TMIN. В Micro-Cap 10 по умолчанию устанавливается TSTART.

Обычно полное время расчета переходных процессов устанавливается от 2 до 10 периодов гармонического воздействия на входе для установления переходных процессов. А интервал времени, на котором производится спектральный анализ [*Lower Time Limit*, *Upper Time Limit*], обычно устанавливается равным 1 периоду в конце полного интервала расчета.

- **Frequency Step** (MC10) – шаг изменения частоты Это величина, обратная разности верхнего и нижнего пределов Фурье-анализа:

$$\text{Frequency Step} = 1 / (\text{Upper Time Limit} - \text{Lower Time Limit})$$

Она равна частоте первой гармоники исследуемого сигнала.

- **Number of Points.** Количество точек данных (в том числе и интерполированных), используемых при вычислении коэффициентов быстрого преобразования Фурье. Типичные значения — 1024, 2048, или 4096.
- **Auto Scaling.** Управляет автомасштабированием графиков FFT функций. Включает в себя следующие опции.

- *Include DC Harmonic.* Включение этой опции производит при автомасштабировании учет величины постоянной составляющей (0-ой гармоники). Обычно она выключена.
- *Auto Scale First Harmonics.* Поле указывает количество гармоник, начиная с 1-ой, которые учитываются при автомасштабировании графиков функций спектрального анализа.

Header

Закладка управляет заголовками в файле численного вывода <имя схемы>.*но, в выходном файле редактора начальных условий <имя схемы>.svv, в выходном файле статистики анализа Monte Carlo <имя схемы>.*мс.

Numeric Output

На этой закладке указывается, какие разделы будут включены в текстовый файл числового вывода, а какие нет. Опции этой закладки подробно были рассмотрены при описании числового вывода в режиме анализа переходных процессов (см. пункт 6.1.6).

Save Curves

Закладка позволяет сохранить на диск одну или несколько кривых в форме табличного текстового файла с расширением .usr (или .csv) для последующего использования в качестве пользовательских источников сигнала *User Sources*.

Curves. Список построенных графиков, из которых выбирается одно или несколько выражений для применения к нему опций закладки.

- *Temperature.* Если анализ выполнялся при нескольких температурах, выбирается одна необходимая.
- *Переменная многовариантного анализа (Run, *.Value).* Если имел место многовариантный анализ, то из раскрывающихся списков выбирается необходимая реализация.
- *Save Curve(s).* В этом поле устанавливается зависимость, эквивалентная выбранной кривой. Можно переименовать зависимость, но при этом необходимо учесть имя новой зависимости при последующем использовании её в качестве источника User Source.
- *Number of Points.* Позволяет установить количество точек интерполированной зависимости, если сбросить флажок *Save Actual Data Points*.
- *Save Actual Data Points.* Если этот флажок сброшен, кривая сохраняется в файл, используя значение количества точек, заданное в поле *Number of Points*. Точки данных для этого случая эквидистантны вдоль оси независимой переменной и получаются путем интерполяции расчетных точек. Если же флаг установлен, то в файл будут сохраняться рассчитанные точки данных, которые могут отстоять друг от друга на различный интервал.
- *In File.* В этом поле указывается имя файла, в который записывается таблица значений кривой. Для выбора места в иерархической структуре папок можно воспользоваться кнопкой *Browse*.
- *Browse.* Позволяет выбрать директорию, куда будет сохранен файл численных значений выбранного графика.

- **Save.** Кривая сохраняется в файле с заданным именем и директорией. Отметим, что если кривые сохраняются в уже существующий файл, они добавляются, не уничтожая предыдущую информацию. Если же в файле содержалась уже кривая с таким же именем, то она перезаписывается.
- **Delete.** Команда удаляет кривые с указанными именами из файла.

WAV (только в MC10). Эта панель закладки служит для управления сохранением выбранной кривой в формате WAV-файла (см. рис. 6.1, в).

- **Sample Rate** — выбор частоты дискретизации.
- **Number of Bits** — разрядность цифрового представления сигнала в битах.
- **Range** — максимум шкалы для выбранного сигнала.
- **Play** — воспроизведение выбранного сигнала через громкоговорители.
- **Stop** — прервать воспроизведение выбранного сигнала.
- **Auto Range** — автоматическая установка максимума шкалы для выбранного сигнала.

Tool Bar

Закладка позволяет установить кнопки локальных панелей инструментов для схемы для разных режимов работы (редактирования, анализа, обработки графиков). Выбор осуществляется установкой флажков возле желаемой пиктограммы и установкой опции желаемого местоположения схемной панели инструментов.

На закладках *Colors, Fonts, and Lines; Scope; FFT; Numeric Output* имеются кнопки **Default** и **Set Default**:

- **Default.** Присваивает установкам текущей схемы установки, сделанные при выполнении команды *Options>Default Properties For New Circuit* (Alt+F10).
- **Set Default.** Присваивает умолчательным установкам для новой схемы (*Default Properties For New Circuit*) значения установок текущей схемы.

8.4. Использование функций Performance

Micro-Cap имеет группу специальных функций *Performance*, которые предназначены для обработки результатов моделирования. Эти функции позволяют на основании анализа полученного графика зависимости вычислить некоторые характеристики этой зависимости. С их помощью можно измерять такие характеристики как, время нарастания и спада импульса, длительность импульса, частота, период и многое другое. Например, функция *Rise_Time* позволяет вычислить, в течение какого времени произошло нарастание сигнала от одного уровня до другого. Т.е. ее можно использовать для вычисления длительности фронтов импульсов.

Кроме того, использование функций *Performance* при обработке результатов серий расчетов позволяет строить опосредованные зависимости. Например, при помощи этих функций можно построить график зависимости длительности фронта импульса от сопротивления резистора в цепи базы транзисторного ключа или зависимость амплитуды пульсаций на выходе фильтра выпрямителя от емкости этого фильтра.

Непосредственное построение таких зависимостей в режиме анализа переходных процессов невозможно. Но использование многовариантного анализа и функций *Performance* позволяет решить такую задачу.

Функции раздела *Performance* могут использоваться несколькими способами.

8.4.1. Обработка результатов моделирования в режиме Go to Performance

Окно режима *Go to Performance* вызывается соответствующей командой из меню **Scope** или пиктограммой  после построения графиков зависимостей (рис. 8.5.). Необходимая для расчета функция выбирается в списке *Function* (назначение функций рассмотрено ниже). При этом в окне появляется графическая подсказка назначения выбранной функции, а в нижней строке окна — алгоритм ее вычисления (рис. 8.5).

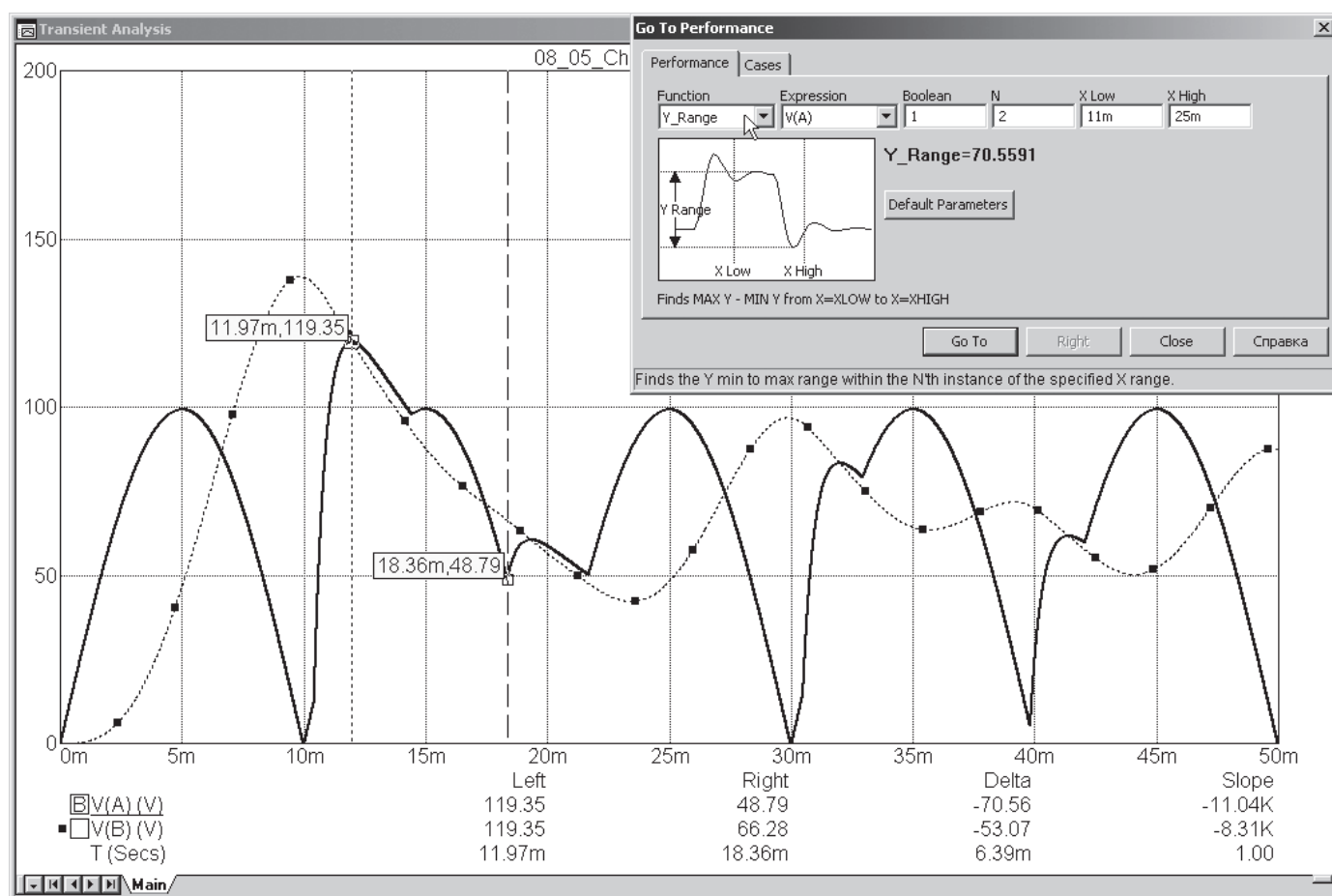


Рис. 8.5. Выполнение измерений с помощью диалогового окна *Go To Performance*

Выбранная функция применяется к зависимости, которую задают в списке *Expression*.

В поле *Boolean* задается логическое выражение, при истинности которого будет вычисляться выбранная функция. Обычно вычисления параметров зависимостей производят после окончания переходных процессов. Использование этого поля позволяет исключать из рассмотрения начальный этап расчетов, задав, например, $T > 100\text{ms}$. Если в этом поле задана единица, то функция вычисляется всегда.

Поле *N* — целое число, указывающее какое по порядку измерение делается в данный момент. Например, необходимо измерить длительность фронта нескольких идущих подряд импульсов. Тогда *N=1* соответствует первому импульсу слева. Величина *N* в режиме *Cursor Mode* увеличивается на 1 при каждом нажатии на кнопку *Go To*.

Остальные поля задают параметры, характерные для использования конкретной функции. Соответственно, они меняются при выборе позиции раскрывающегося списка *Function*. Назначение этих параметров для различных функций *Performance* рассмотрено ниже.

В примере рис. 8.5 (схема *Choke.cir* из каталога *Analysis\Scope*) используются следующие параметры:

Поле *X Low* задает нижнее граничное значение независимой переменной 11 мс, используемое функцией *Y_range*.

Поле *X High* — верхнее граничное значение независимой переменной 25 мс, используемое функцией *Y_range*.

Вычисление функции производится после нажатия кнопки *Go To*, а результат вычислений выводится непосредственно в поле диалогового окна. В приведенном на рис. 8.5. примере этот результат (максимальный перепад напряжения в узле А в диапазоне времени от 11 мс до 25 мс) — *Y_Range=70.5591*. Кроме того, в рассмотренном примере после нажатия кнопки *Go To* левый и правый курсор установились в позиции, соответствующие выполняемому измерению — в высшую и низшую точку графика в рассматриваемом временном диапазоне (*X low*, *X high*).

8.4.2. Использование функций *Performance* и построение их графиков

Ниже будут перечислены все возможные случаи использования функций раздела *Performance*.

Построение графиков функций *Performance* возможно только после проведение многовариантного анализа (***Stepping*** или ***Monte Carlo***). Для многовариантного анализа ***Stepping*** можно построить двумерные (рис. 8.6 и схемный файл *Perf1.cir*) и трехмерные графики функций *Performance* (схемный файл *Perf1_02.cir*) в зависимости от количества вложений варьируемых параметров.

Предположим, что анализ переходных процессов в колебательном контуре (рис. 8.6) проводился при изменении емкости конденсатора *C1* от 100пФ до 4600пФ с шагом 500пФ. Многовариантный анализ организован с помощью соответствующих установок окна *Stepping*.

1. Для построения графиков может быть использована команда меню соответствующего анализа ***Add Performance Window***, а затем в разделе ***Plot*** окна ***Properties (F10)*** из списка, вызываемого нажатием кнопки *GET*, выбирается необходимая функция (рис. 8.6). В рассматриваемом примере строится зависимость времени переднего фронта (*Rise_Time*) от емкости *C1*.

2. В режиме статистического анализа *Монте-Карло* строится гистограмма распределения функции *Performance* по интервалам, наглядно показывающая ее поведение при статистическом разбросе параметров компонентов схемы. При этом используется команда *Monte Carlo>Histograms>Add Histogram*, а в разделе ***Plot*** окна ***Properties (F10)*** из списка, вызываемого на-

жанием кнопки **GET**, выбирается необходимая функция (см. рис. 7.7). Кроме того, функция **Performance** используется для выявления варианта отказа схемы при статистическом анализе в строке **Report When** окна **Monte Carlo Options** (см. рис. 7.5).

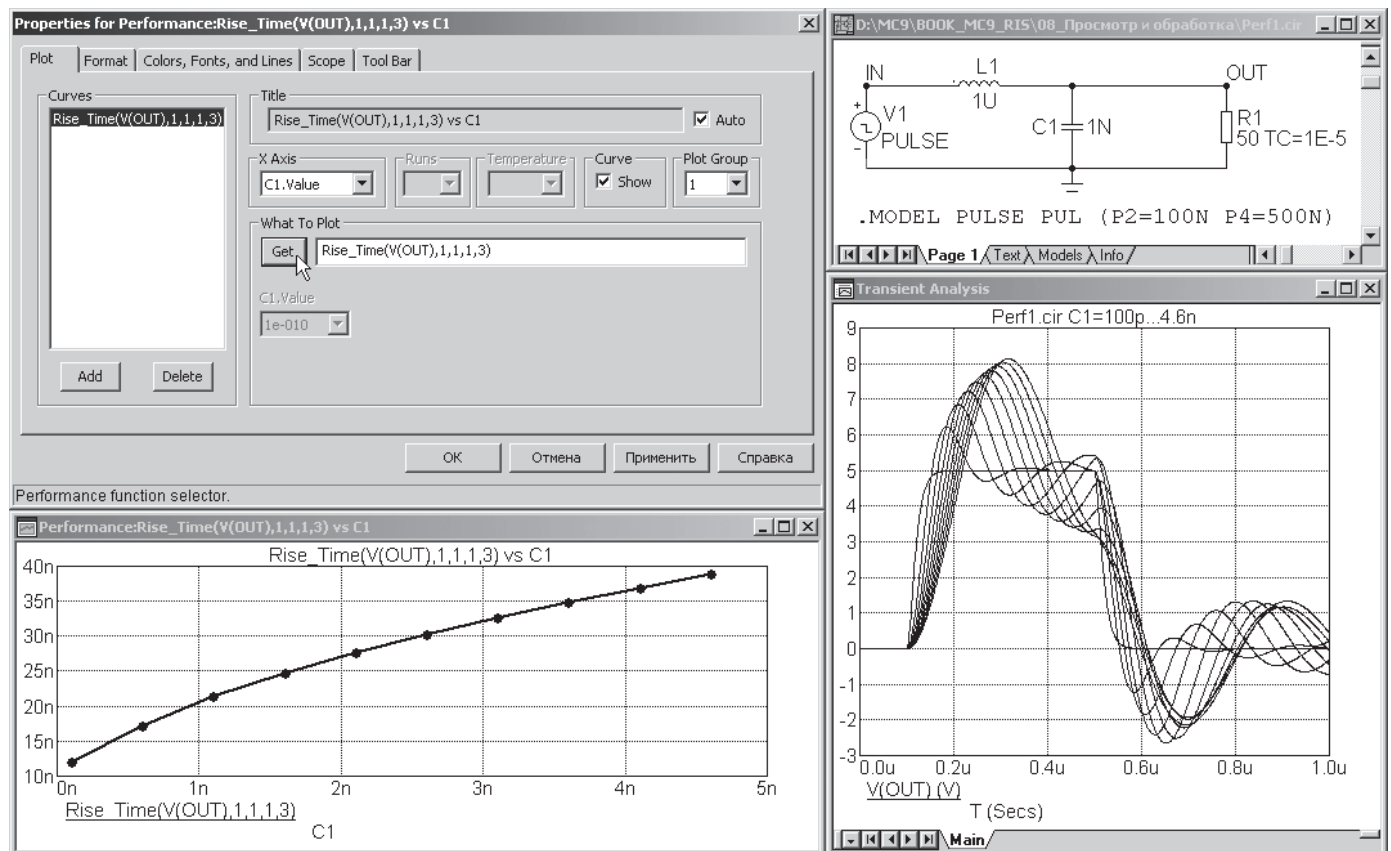


Рис. 8.6. Задание функций Performance в окне Performance Window

3. При проведении оптимизации из списка, вызываемого в окне **Optimize** нажатием кнопки **Get** (см. рис. 7.8, 7.10), выбирается оптимизируемая функция из группы **Performance**.

4. И, наконец, в последних версиях программы (MC9, MC10) функции Performance используются в динамических размерных линиях (performance tag), вызываемых командой **Options>Mode>Performance Tag** или . Динамическая размерная линия осуществляет новое измерение для каждого нового запуска анализа (в том числе и при вариации параметров, температуры, статистическом анализе *Monte Carlo*) и при выборе варианта показывает соответствующие результаты измерения.

Допустим в рассматриваемом схемном примере (рис. 8.6) ставится задача измерения переднего фронта импульса (времени нарастания от 0.1 до 0.9 установившегося значения). Таким образом, необходимо измерить время нарастания напряжения $V(out)$ от 0.5 В до 4.5 В. Сначала выбирается режим

нанесения динамической размерной линии . Затем, после клика мышью на поле графика в открывшемся диалоговом окне выбирается нужная функция **Performance**, в данном случае **Rise_Time(V(OUT),1,1,0.5,4.5)** (рис. 8.7). Также в этом диалоговом окне задается графическое и шрифтовое оформление размерной линии.

При выборе в режиме *Cursor Mode* (F8) графика варианта анализа (например перемещением стрелками $\downarrow \uparrow$ на дополнительной клавиатуре), размерная линия будет изменять свое положение и показания в соответствии с параметрами сигнала выбранного варианта. Так в рассматриваемом примере (рис. 8.7) выбран вариант анализа при $C1=4.6n$, динамическая размерная линия Performance-функции показывает длительность фронта выходного сигнала для этого варианта.

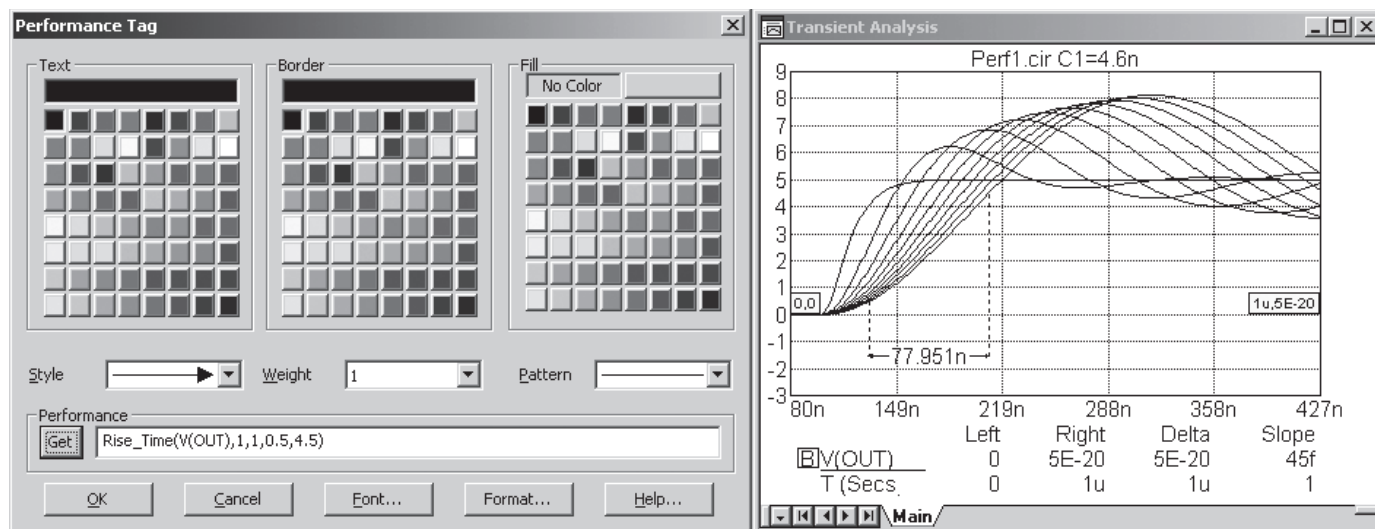


Рис. 8.7. Использование динамических размерных линий для Performance-функций

В схемном файле *Perf_Tag.cir* каталога *Analysis\Performance* динамические тэги используются для измерения времени включения и задержки выключения (времени рассасывания) ключа на биполярном транзисторе при изменении параметров схемы.

8.4.3. Функции Performance

Ниже будет приведен перечень функций **Performance** с аргументами и результат их выполнения. При этом приняты следующие обозначения.

Y_Expr — выражение для переменной, откладываемой по оси ординат, для которого необходимо выполнить функцию группы **Performance**.

Boolean_Expr — логическое выражение, при истинности которого будет вычисляться выбранная функция. Обычно вычисления параметров зависимостей производят после окончания переходных процессов. Использование этого поля позволяет исключить из рассмотрения начальный этап расчетов, задав, например, « $T > 100ns$ ». Если в этом поле задана 1, то функция вычисляется всегда.

N — целое число, указывающее какое по порядку измерение делается в настоящий момент. Например, если необходимо измерить длительность фронта нескольких идущих подряд импульсов, то $N=1$ соответствует первому импульсу слева. Величина **N** в режиме **Cursor Mode** увеличивается на 1 при каждом нажатии на кнопки **GO TO**, **Left**, **Right**.

Low — нижнее граничное значение переменной, используемое соответствующими функциями.

High — верхнее граничное значение переменной, используемое соответствующими функциями.

Level — уровень значения переменной, используемый при вычислении различных параметров сигналов.

Список функций Performance (в алфавитном порядке)

Average(Y_expr, Boolean_expr, XMin, XMax) — находит среднее значение функции *Y_expr* на интервале изменения независимой переменной от *Xmin* до *Xmax* (по умолчанию устанавливается интервал от *Tmin* (*Tstart* в MC10) до *Tmax*).

Fall_Time(Y_expr, Boolean_expr, N, low, high) — длительность убывания вдоль оси *X* переменной *Y* от указанного верхнего (*High*) до указанного нижнего (*Low*) уровней при выполнении заданного логического выражения **Boolean_expr**.

Frequency(Y_expr, Boolean_expr, N) — дополнение функции *Period*. Работает также, как и функция *Period*, но вычисляет значение $1/Period$.

Gain_Margin (только в MC10) — вычисляет запас по амплитуде в частотном анализе. Заранее должны быть построены графики АЧХ *dB(expr)* и ФЧХ *PHASE(expr)*. Может быть применена только к результатам АС-анализа.

High_X(Y_expr, Boolean_expr) — определяет координату *X* точки глобального максимума функции *Y_expr*. В режиме *Cursor Mode* в найденную точку дополнительно помещается выбранный левый (или правый) курсор и вычисляется ее координата по оси *X*.

High_Y(Y_expr, Boolean_expr) — определяет координату *Y* точки глобального максимума функции *Y_expr*. В режиме *Cursor Mode* дополнительно помещается выбранный левый (или правый) курсор в найденную точку и вычисляется ее координата по оси *Y*.

Low_X(Y_expr, Boolean_expr) — определяет координату *X* точки глобального минимума функции *Y_expr*. В режиме *Cursor Mode* дополнительно помещается выбранный левый (или правый) курсор в найденную точку и вычисляется ее координата по оси *X*.

Low_Y(Y_expr, Boolean_expr) — определяет координату *Y* точки глобального минимума функции *Y_expr*. В режиме *Cursor Mode* дополнительно помещается выбранный левый (или правый) курсор в найденную точку и вычисляется ее координата по оси *Y*.

Peak_Valley(Y_expr, Boolean_expr, N) — возвращает разность координат *Y* 2-х соседних точек локального максимума и минимума выбранной переменной *Y_expr*. В режиме *Cursor Mode* дополнительно помещаются левый и правый курсоры в очередные найденные 2 точки максимума и минимума. Может использоваться для измерения размаха разнообразных пульсаций, выбросов и удвоенных амплитуд периодических сигналов.

Peak_X(Y_expr, Boolean_expr, N) — функция вычисляет координату *X* очередного локального максимума (PEAK) выбранной переменной *Y_expr*. Локальный максимум — это точка, значение функции *Y* в которой больше чем в соседних точках с обеих сторон. В режиме *Cursor Mode* при этом дополнительно помещается левый или правый курсор в очередной локальный максимум.

Peak_Y(Y_expr, Boolean_expr, N) — функция аналогична функции *Peak_X*, но вычисляет значение координаты *Y* точки локального максимума. Функция может использоваться для измерения значений выбросов при ана-

лизе переходных процессов и пульсаций коэффициента передачи фильтров при проведении АС-анализа.

Period(Y_expr, Boolean_expr, N) — вычисляет период колебаний переменной *Y_expr* путем измерения расстояния по оси *X* между последовательными одинаковыми значениями величины *Y_expr*. Первоначально находится среднее значения величины *Y_expr* на интервале моделирования, где соблюдается истинность логического выражения *Boolean_expr*. Затем ищутся два очередных последовательных участка возрастания величины от среднего значения. Разница в расстоянии по оси *X* между этими точками и принимается за значение периода колебаний. Как правило, вводимое логическое выражение бывает типа "*T*>500ns" и используется для исключения ошибок определения периода на начальном нестационарном участке процесса. Удобна для определения периода колебаний преобразователей напряжение-частота, где существует необходимость измерения периода колебаний с высокой точностью. Функция работает наиболее эффективно для переменной, проходящей через свое среднее значение в течение каждого периода. Она не будет работать с достаточной точностью с колебаниями, которые содержат гармоники значительной величины. В режиме *Cursor Mode* дополнительно помещаются левый и правый курсоры в две указанные точки графика (которые определяются как показано выше) и вычисляет расстояние между этими точками по оси *X*.

Phase Margin(Y_expr) — вычисляет запас по фазе графика частотной характеристики *Y_expr*. При этом заранее должны быть построены графики *dB(Y_expr)* и *Phase(Y_expr)*. Данная функция доступна только из АС анализа.

Rise_Time(Y_expr, Boolean_expr, N, low, high) — длительность возрастания вдоль оси *X* переменной *Y_expr* от указанного нижнего (Low) до указанного верхнего (High) уровней при выполнении заданного логического выражения **Boolean_expr**.

В режиме *Cursor Mode* курсоры графиков помещаются последовательно в две выбранные точки и вычисляется разность координат *X* для этих точек. Функции *Rise_Time* и *Fall_Time* можно использовать для измерения времени нарастания и спада импульсных сигналов (см. рис. 8.6, 8.7).

RMS(Y_expr, Boolean_expr, XMin, XMax) — находит среднеквадратическое значение функции *Y_expr* на интервале изменения независимой переменной от *Xmin* до *Xmax* (по умолчанию устанавливается интервал от *Tmin* до *Tmax*).

Slope(Y_expr, Boolean_expr, N, X_value) — вычисляет производную функции *Y_expr* в окрестности точки с абсциссой *X_value*. Курсоры помещаются в точку с абсциссой *X_value* и ближайшую к ней точку (отстоящую на шаг расчета). Затем разность ординат указанных точек делится на разность абсцисс. Полученная величина и есть значение функции *Slope*.

Valley_X(Y_expr, Boolean_expr, N) — функция вычисляет координату *X* очередного локального минимума (VALLEY) выбранной переменной *Y_expr*. Локальный минимум — это точка, значение функции *Y* в которой меньше чем в соседних точках с обеих сторон. В режиме *Cursor Mode* при этом дополнительно помещается левый или правый курсор в очередную точку локального минимума.

Valley_Y(Y_expr, Boolean_expr, N) — функция аналогична функции **Valley_X**, но вычисляет значение координаты *Y* точки локального минимума. Функция может использоваться для измерения значений отрицательных выбросов при анализе переходных процессов и пульсаций коэффициента передачи фильтров при проведении АС-анализа.

Width(Y_expr, Boolean_expr, N, level) — функция измеряет расстояние по оси *X* между двумя точками графика *Y_expr* с заданными значениями ординаты *level*. В режиме *Cursor Mode* в очередные выбранные точки помещаются курсоры (левый и правый) и вычисляется расстояние по оси *X* между этими точками.

X_Delta(Y_expr, Boolean_expr, N, Y_low, Y_high) — определяет разность абсцисс двух очередных точек графика, в которых переменная *Y_expr* принимает значения *Y_High* и *Y_Low*. В режиме *Cursor Mode* дополнительно помещаются курсоры в найденные точки и вычисляется разность их абсцисс.

X_Level(Y_expr, Boolean_expr, N, Y_level) — определяет координату *X* очередной точки графика, в которой переменная *Y_expr* принимает значение *Y_Level*. В режиме *Cursor Mode* дополнительно помещается выбранный левый (или правый) курсор в найденную точку и вычисляется ее координата по оси *X*.

X_Range(Y_expr, Boolean_expr, N, Y_low, Y_high) — определяет диапазон изменения абсцисс между двумя точками графика в которых переменная *Y_expr* принимает заданные значения *Y_low*, *Y_high*. Сначала она находит очередные точки графика в которых *Y_expr* принимает заданные *Y_Low* и *Y_High* значения. Затем исследуются все точки внутри диапазона *Y_Low...Y_High* и ищутся с наибольшим и наименьшим значением абсциссы *X* (в эти точки и помещаются курсоры в режиме *Cursor Mode*). Разность между найденными абсциссами вычисляется как значение функции *X_range*.

Y_Delta(Y_expr, Boolean_expr, N, X_low, X_high) — определяет разность ординат двух точек графика, в которых абсцисса принимает значения *X_High* и *X_Low*.

Y_Level(Y_expr, Boolean_expr, N, X_level) — определяет значение переменной *Y_expr* в точке с абсциссой *X_Level*. В режиме *Cursor Mode* дополнительно помещается выбранный левый (или правый) курсор в найденную точку и вычисляется ее координата по оси *Y*.

Y_Range(Y_expr, Boolean_expr, N, X_low, X_high) — определяет диапазон изменения переменной *Y_expr* между двумя точками графика в которых абсцисса принимает заданные значения *X_low*, *X_high*. Сначала она находит точки графика, которые имеют абсциссы *X_Low* и *X_High*. Затем исследуются все точки внутри диапазона *X_Low...X_High* и ищутся с наибольшим и наименьшим значением переменной *Y_expr* (в эти точки и помещаются курсоры в режиме *Cursor Mode*). Разность между найденными ординатами вычисляется как значение функции *Y_range*. Функция может использоваться для измерения пульсаций АЧХ фильтра в заданном частотном диапазоне.

Примеры использования функций раздела **Performance** приведены в схемных файлах каталога *Analysis\Performance*.

8.5. Вывод графиков характеристик в режиме Probe

Характерной особенностью программы Micro-Cap, отличающей ее от других программ схемотехнического анализа (Design Lab, Orcad и пр.), является построение графиков не после окончания всех расчетов, а еще в процессе моделирования. Такая особенность пакета позволяет прервать моделирование при обнаружении явно ошибочных результатов. Однако такой метод имеет и недостаток, связанный с необходимостью до начала моделирования перечислять имена переменных, выводимых на график, и их масштабы. Для построения графиков других переменных необходимо повторить моделирование. Поэтому в программе Micro-Cap предусмотрен специальный режим **Probe** для создания файла данных, в который заносятся переменные состояния схемы, что позволяет после завершения моделирования с помощью графического постпроцессора построить график любой переменной.

Разновидности режима **Probe** выбираются в списке меню **Analysis**.

Особенности режима Probe в Micro-Cap 9, 10

1. В режиме анализа с постпроцессором Probe можно перемещаться по вложенным друг в друга схемным макроопределениям и SPICE-подсхемам по уровням вниз и вверх, получая доступ к выводу графиков внутренних переменных состояния (узловых напряжений, токов ветвей и пр.).

2. Из этого режима анализа теперь доступны окна *FFT*, *Performance* и *3D*, позволяющие проводить спектральный анализ, строить опосредованные зависимости и выполнять трехмерное моделирование при многовариантных режимах.

3. Появилась новая команда переключения вывода различных переменных состояния схемы **CTRL+<пробел>**.

4. Клик на компоненте в режиме **All** (*Vertical>All*) выводит список всех возможных переменных состояния для него.

8.5.1. Принципы работы постпроцессора Probe

Когда для выбранной схемы запускается режим *Probe Transient*, *Probe AC* или *Probe DC*, то программой сначала производится проверка, существует ли файл данных в рабочей директории. Если файл отсутствует, происходит запуск соответствующего вида анализа (*Transient*, *AC*, *DC*), в ходе которого создается файл данных. Для новой схемы автоматически появляется окно *Analysis Limits*, которое заполняется по правилам, рассмотренным ранее для каждого типа анализа. После нахождения существующего или создания нового дискового файла результатов анализа происходит переход в режим графического постпроцессора *Probe*.

В этом режиме экран делится на две части. Справа размещается окно с изображением схемы, а слева — окно построения графиков характеристик. После этого можно выбирать мышью переменные состояния схемы для построения их графиков. Графики будут строиться согласно установкам, имеющимся на закладке *Analysis Plots* диалогового окна *Default Properties for New Circuits*, доступ к которому осуществляется командой меню *Options>Default Properties for New Circuits>Analysis Plots*.

В режиме *Probe* эти установки можно изменить в текущем сеансе построения графиков, вызвав диалоговое окно **Properties (F10)** и сделав соответствующие изменения. Однако новый запуск анализа в этом режиме опять вернет прежние установки для графиков новой схемы, принятые по умолчанию (*Default Properties for New Circuits*).

Анализ в режиме *Probe* запускается в соответствии с установками, сделанными в диалоговом окне *Analysis Limits* соответствующего обычного режима анализа (если он производился ранее). Для изменения параметров запуска анализа в режиме *Probe* вызывается окно *Analysis Limits* нажатием **F9** или командой меню *Probe>Limits*. Окна параметров режимов анализа *Probe* являются сокращенными версиями соответствующих обычных окон задания параметров моделирования. Однако и в них можно сделать все необходимые установки для запуска моделирования. После изменения установок, производится запуск анализа командой *Probe>New Run (F2)* для создания обновленной версии дискового файла данных.

Основные приемы анализа схем в режимах *Probe (Transient, AC, DC)*

1. Для выбора переменной состояния схемы курсором мыши на схеме указывается узел схемы, вывод компонента, сам компонент или пространство между двумя выводами компонента — в левой части экрана немедленно выводится график соответствующей переменной состояния. Повторный клик мыши на том же самом месте вызывает удаление построенного графика.

2. Переключение вида основных переменных состояния (токов/напряжений), выводимых на график кликом мыши, производится нажатием комбинации клавиш *Ctrl+<пробел>*. При этом в окне схемы рядом с указателем мыши меняется символ выводимой переменной (*V()* или *I()*). При предварительном выборе опции *Save All* комбинация клавиш *Ctrl+<пробел>* последовательно переключает вывод всех возможных переменных состояния, что также отражается на внешнем виде курсора.

3. При необходимости построения графиков дополнительных переменных состояния, таких как заряд, емкость, индуктивность, поток, магнитная индукция, напряженность магнитного поля, необходимо выполнить команду *Probe>Save All*.

4. Если при выборе переменной не видна нужная часть схемы, то окно схемы можно панорамировать правой клавишей мыши.

5. Во время работы в режиме *Probe* можно включать/отключать показ номеров узлов схемы с помощью пиктограммы  для более наглядной идентификации графиков построенных узловых потенциалов.

6. Меню *Vertical* выбирает переменную, откладываемую по вертикальной оси, а меню *Horizontal* — по горизонтальной оси.

8.5.2. Команды режима *Probe*

Меню *Probe*



New Run (F2) — выполнение нового моделирования, обычно производится после изменения параметров анализа *Analysis Limits* и глобальных установок *Global Settings*.



Limits (F9) — вызов диалогового окна установки параметров анализа. Обычно после изменений в нем следует новый запуск *New Run*.



Stepping (F11) — вызов окна Stepping для задания вариации параметров.

Operating Point Methods (CTRL+SHIFT+O) — доступ к диалоговому окну выбора методов расчета рабочей точки на постоянном токе и приоритетов их использования для обеспечения сходимости расчета (см. пункт 6.1.7).

Reduce Data Points — приглашает одноименное диалоговое окно, позволяющее установить вывод на экран лишь каждой N-ой расчетной точки либо после вывода графика (Now), либо в процессе выполнения анализа для всех переменных (Run Time).

Add Curve... — добавление графика любого выражения, зависящего от переменных состояния схемы, например $IC(Q1)*VCE(Q1)$ — мощность, рассеиваемая транзистором Q1.

Delete Curves... — удаление графиков выражений, выбранных из открывающегося вслед диалогового окна.



Delete All Curves (Ctrl+F9) — удаление графиков всех переменных из всех окон.

Separate Analog and Digital. Активизируется только при смешанном моделировании. Размещение графиков аналоговых и цифровых переменных в разных окнах. Имеет приоритет перед установками номера графического окна P (Plot Group).

One Curve — построение только одного графика. График каждой новой выбранной переменной замещает предыдущий график. Возможно добавление графиков только при одновременно нажатой клавише **Ctrl**.

Many Curves — добавление графика в окно при выборе каждой новой переменной без удаления ранее построенных графиков.

Save All — сохранение данных для всех переменных на диске. По умолчанию выключено. Используется при построении графиков, заряда, магнитного потока, сопротивления, емкости, индуктивности, магнитной индукции, напряженности магнитного поля и др.

Save V and I Only — сохранение только значений отсчетов времени (частот, переменной DCinput1), логических состояний цифровых узлов, напряжений и токов. Установлен по умолчанию и обеспечивает высокую скорость работы и минимальный объем дискового файла данных.



3D Windows — данный пункт меню активизируется если в режиме Stepping варьировалась хотя бы одна переменная. Позволяет построить функцию 2-х переменных в виде поверхности в трехмерном пространстве.



Performance Windows — данный пункт меню активизируется если в режиме Stepping варьировалась хотя бы одна переменная. Позволяет построить опосредованную зависимость (см. раздел 8.4).

FFT Windows — позволяет добавить или удалить окно для вычисления функций спектрального анализа.



Slider — приглашение диалогового окна для задания параметров движкового регулятора (слайдера), позволяющего изменять параметры компонентов и моделей.

Plot Group (1...9) — выбор графического окна для построения графика следующей выбранной переменной.

Exit Probe (F3) — завершение режима *Probe* и возвращение в окно схем.

Меню *Vertical* и *Horizontal*

Меню *Vertical* задает переменную, которая откладывается по оси Y, а меню *Horizontal* — переменную, которая откладывается по оси X. Клик мыши по компоненту схемы или узлу приводит к построению зависимости переменных, выбранных в этих меню. Состав этих меню совпадает (за исключением пункта *All* в меню *Vertical*), но активные поля (отмеченные жирной точкой) меняются от режима к режиму.

Если кликнуть мышью по цифровому узлу, *Probe* нарисует график логического состояния этого узла.

Если опция *Macro Drill Down (Options>Preferences>Options>Analysis)* установлена, то клик мышью на аналоговой макромоделе или SPICE-подсхеме приведет к раскрытию макроопределения на один уровень вниз. Это даст возможность при последующих кликах мыши выводить внутренние переменные состояния (токи, напряжения и пр.) макромоделей обычным образом. Вернуться на уровень вверх можно командой *Scope>Go Up a Level (Alt+UP, *)

Если опция *Macro Drill Down (Options>Preferences>Options>Analysis)* не установлена, то после клика мышью на макромоделе выведется список её внутренних переменных состояния, из которого можно выбрать необходимую переменную.

Если произвести клик мышью на аналоговом узле или компоненте (отличном от макромоделей или подсхем) постпроцессор *Probe* в соответствии с активными позициями меню *Vertical* и *Horizontal* построит графическую зависимость соответствующих переменных.

Режим *Probe Transient*

В режиме **Save All** можно циклически менять выбираемую для вывода переменную (V, I, E, P, R, Q, C, X, L, B, H) последовательными нажатиями комбинации клавиш **CTRL+<пробел>**.

В режиме **Save V and I Only** можно переключаться между выводом токов и напряжений нажатием этой же комбинации клавиш **CTRL+<пробел>**.

В режиме *Probe Transient* состав меню **Vertical** и **Horizontal** следующий:

All (только в меню *Vertical*) — режим вывода списка всех возможных переменных состояния при клике мышью на компоненте.

Voltage — по соответствующей оси выводится узловой потенциал или логическое состояние выбранного цифрового узла или напряжение на 2-полюсном компоненте при указании курсором на этот компонент. Если курсор размещен между двух выводов многополюсного компонента, выводится график напряжения между выводами. Если производится последовательные

клики мышью на двух узлах схемы при нажатой клавише **<Shift>** — выводится напряжение между узлами.

Current — по соответствующей оси выводится ток двухполюсного компонента или ток, втекающий в вывод 3-х или 4-х полюсного компонента.

Energy — по соответствующей оси выводится энергия указанного компонента. Выбирается один из трех видов: ED, ES, EG (рассеиваемая, накапливаемая, генерируемая). Если для выбранного компонента можно вывести более одного варианта энергии, появляется список, позволяющий сделать выбор.

Power — по соответствующей оси выводится мощность указанного компонента. Выбирается один из трех видов PD, PS, PG (рассеиваемая, накапливаемая, генерируемая). Если для выбранного компонента можно вывести более одного варианта мощности, появляется список, позволяющий сделать выбор.

Resistance — по соответствующей оси выводится сопротивление указанного резистора.

Charge — по соответствующей оси выводится заряд указанного конденсатора или заряд внутренней емкости между выводами полупроводникового прибора. Например, клик мышью между выводами базы и эмиттера биполярного транзистора приводит к выводу графика заряда, накопленного в барьерной и диффузионной емкости перехода база-эмиттер.

Capacitance — по соответствующей оси выводится емкость указанного конденсатора или междуэлектродная емкость полупроводникового прибора.

Flux — по соответствующей оси выводится магнитный поток через индуктивность, по которой произведен клик мышью.

Inductance — по соответствующей оси выводится индуктивность катушки индуктивности.

B Field — по соответствующей оси выводится магнитная индукция в нелинейном магнитном сердечнике, связанном с катушкой, на которую указывает курсор.

H Field — по соответствующей оси выводится напряженность магнитного поля в нелинейном магнитном сердечнике, связанном с катушкой, на которую указывает курсор.

Time — по соответствующей оси выводится время.

Linear — по соответствующей оси используется линейная шкала.

Log — по соответствующей оси используется логарифмическая шкала.

Режим Probe AC

В этом режиме состав меню **Vertical** и **Horizontal** следующий:

All (только в меню Vertical) — режим вывода списка всех возможных комплексных переменных при клике мышью на компоненте.

Voltage — по соответствующей оси выводится комплексная амплитуда потенциала узла при указании курсором узла или напряжение на 2-х полюсном компоненте при указании курсором на этот компонент. Если курсор размещен между двух выводов многополюсного компонента, рассчитывается комплексная амплитуда разности потенциалов выводов. Если производится последовательные клики мышью на двух узлах схемы при нажатой клавише **<Shift>** — выводится комплексная амплитуда напряжения между узлами.

Current — по соответствующей оси выводится комплексная амплитуда тока двухполюсного компонента или тока, втекающего в вывод 3-х или 4-х полюсного активного компонента.

Power — по соответствующей оси выводится мощность на переменном токе указанного компонента. Выбирается один из 3-х видов PD, PS, PG (рассеиваемая, накапливаемая, генерируемая).

Conductance — по соответствующей оси выводится комплексная проводимость двухвыводного компонента.

Impedance — по соответствующей оси выводится комплексное сопротивление (Impedance) двухвыводного компонента (резистора, конденсатора, катушки, диода, источника).

Inoise — по соответствующей оси выводится спектральная плотность напряжения (тока) шума, приведенного ко входу схемы, указанному в строке *Noise Input* окна *AC Analysis Limits* (независимо от точки расположения курсора).

Onoise — по соответствующей оси выводится спектральная плотность напряжения (тока) выходного шума, указанного в строке *Noise Output* окна *AC Analysis Limits* (независимо от точки расположения курсора).

Frequency — по соответствующей оси выводятся отсчеты частоты в заданных пределах.

Magnitude — по соответствующей оси выводится модуль выбранной комплексной переменной.

Magnitude(dB) — по соответствующей оси выводится модуль выбранной комплексной переменной в логарифмических единицах децибелах. Этот режим установлен по умолчанию.

Phase — по соответствующей оси выводится фаза выбранной комплексной переменной в градусах.

Group Delay — по соответствующей оси выводится групповое время запаздывания выбранной переменной.

Real Part — по соответствующей оси выводится действительная часть выбранной переменной.

Imag Part — по соответствующей оси выводится мнимая часть выбранной переменной.

Linear — по соответствующей оси используется линейная шкала.

Log — по соответствующей оси используется логарифмическая шкала.

Режим Probe DC

В этом режиме состав меню **Vertical** и **Horizontal** следующий:

All (только в меню Vertical) — режим вывода списка всех возможных переменных при клике мышью на компоненте.

Voltage — по соответствующей оси выводится узловой потенциал аналогового узла или логическое состояние выбранного цифрового узла или напряжение на 2-х полюсном компоненте при указании курсором на этот компонент. Если курсор размещен между двух выводов многополюсного компонента, выводится график напряжения между выводами. Если производится последовательные клики мышью на двух узлах схемы при нажатой клавише **<Shift>** — выводится напряжение между узлами.

Current — по соответствующей оси выводится логическое состояние выбранного цифрового узла, ток двухполюсного компонента или ток, втекающий в вывод 3-х или 4-х полюсного активного компонента.

Power — по соответствующей оси выводится мощность указанного компонента. Выбирается один из 2-х видов PD, PG (рассеиваемая, генерируемая).

Linear — по соответствующей оси используется линейная шкала.

Log — по соответствующей оси используется логарифмическая шкала.

Редактирование схемы в режиме Probe

В 9-ой версии программы возможно редактирование схемы в режиме Probe. С этой целью введен новый режим постпроцессора Probe  — режим графиков, для того чтобы можно было отличить манипуляции мышью в режиме редактирования и в режиме построения графиков.

Режимы *Select* , *Component* , *Text* , *Wire* , и другие используются для редактирования схемы.

Режим графиков  используется для выбора строящихся графиков.

Клавиша <пробел> используется для быстрого переключения между режимами редактирования и построения графиков *Probe*.

Пример использования различных режимов анализа **Probe** см. в схемных файлах каталога *Analysis\Probe*.

Недостатком режима **Probe** является невозможность отображения логических состояний шин в цифровых устройствах в компактном виде с использованием кодов, отличных от двоичного.

8.6. Анимация

Режим анимации — это способ визуализации результатов анализа. Он воздействует на отображение всех результатов анализа. В этом режиме каждая расчетная точка графиков и соответствующее состояние анимационного компонента (см. 5.7) обновляются при замедленном тем или иным способом выводе результатов расчета на экран монитора. При этом программа Micro-Cap ожидает либо нажатия пользователем клавиши для продолжения расчета после обновления экранных данных, либо выдерживает указанную временную задержку перед выводом на экран очередной точки. Цель такого замедления вывода результатов — достижение наглядности показа изменения состояния схемы и результатов расчета. Замедление позволяет наблюдать и обдумывать результаты моделирования. При использовании этого режима, если одновременно открыто окно схем, можно также наблюдать изменение узловых потенциалов () , токов компонентов () , мощности () , состояния полупроводниковых приборов () .

Кроме того, Micro-Cap имеет в своем составе анимационные компоненты, модели которых позволяют имитировать прямо на принципиальной схеме поведение реальных индикаторных, коммутационных, измерительных и электро-механических устройств. К таким устройствам относятся индикаторы различного вида, ключи, реле, вольтамперметр, двигатель постоянного тока (см. 5.7).

8.6.1. Действия, производимые программой в процессе анимации

В режиме **Transient**, как только получается значение новой расчетной точки переходного процесса, состояние анимационного компонента и переменных состояния схемы заново перерисовываются на экране в соответствии с результатами расчета. Причем перерисовываются не только графики, но и схемы моделирования вместе с выбранной для показа информацией (узловыми потенциалами, токами и т.п.) и анимационными компонентами. Это состояние будет удерживаться, пока пользователь не нажмет клавишу или не истечет заданная временная задержка, после этого будет осуществляться следующий шаг расчета. Таким образом, пользователь может настроить скорость воспроизведения процесса в соответствии с возможностями своего восприятия меняющегося изображения.

Примечание. Для того чтобы во время анимированного моделирования можно было видеть схему с отображенными на ней переменными состояния или анимационными компонентами, необходимо до запуска процесса моделирования включить

многооконный режим (, ) и при необходимости настроить размеры окон. Показ необходимой информации включается/выключается в схемном окне с помощью кнопок , , , , .

В режиме малосигнального частотного анализа **AC** на схеме отображаются состояния компонентов анимации и переменных состояния схемы в рабочей точке по постоянному току в течение всего времени выполнения расчета. Действие анимации распространяется только на отображение каждой следующей расчетной точки данных на графиках выходных частотных характеристик.

В режиме анализа передаточных характеристик на постоянном токе **DC**, по мере того, как рассчитывается очередной режим схемы на постоянном токе, отображающийся в виде расчетных точек графиков, на схеме обновляются значения отображаемых переменных состояния и анимационные компоненты. Это состояние удерживается до истечения временной задержки или до нажатия пользователем клавиши, затем схема переходит к следующему шагу расчета — изменению переменной Variable 1 (Variable 2). Следует отметить, что индикация на экране в этом режиме, всегда соответствует последнему рассчитанному режиму на постоянном токе при изменении входных переменных Variable 1 (Variable 2).

При использовании режима **Dynamic DC**, режим анимации включен все время. Любое изменение в схеме вызывает перерисовку анимационных компонентов и значений переменных состояния схемы.

8.6.2. Диалоговое окно Animate Options

После выполнения в режиме **Analysis** команды **Scope>Animate Options**

или нажатия на кнопку  выводится диалоговое окно (рис. 8.8), в котором выбирается способ замедления показа результатов моделирования. Оно имеет следующие установки:

Wait. Выбор способа замедления отображения результатов моделирования.

- **Don't Wait.** Выбор этой опции отключает режим анимации. Графики строятся с максимальной скоростью без дополнительной задержки.

- *Wait for Key Press*. Выбор этой опции включает режим анимации, при котором каждая очередная точка графиков строится только после нажатия комбинации клавиш **CTRL+<пробел>**;
- *Wait for time Delay*. Включение режима анимации, при котором очередная точка графиков строится с указанным запаздыванием (по умолчанию установлено запаздывание 0.5 с).

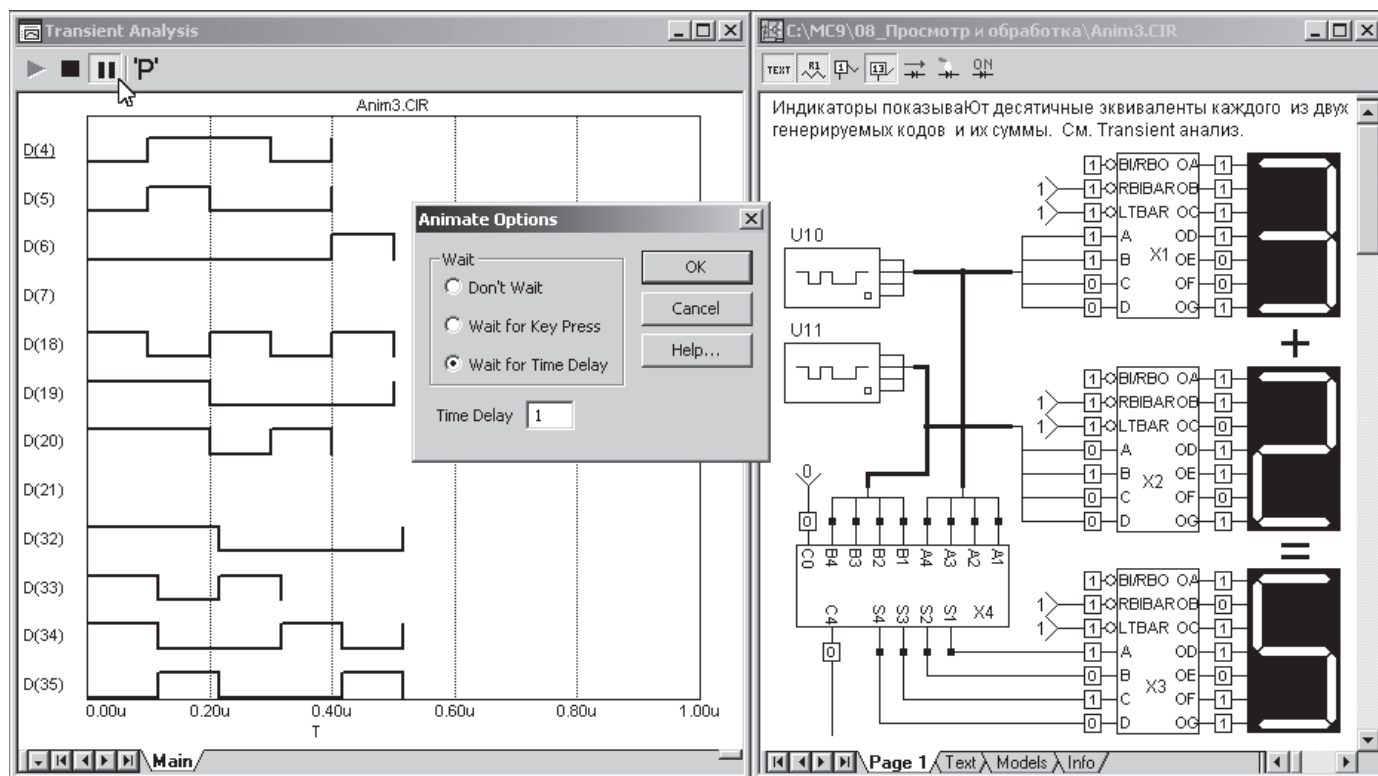


Рис. 8.8. Использование режима анимации и диалоговое окно Animate Options

Time Delay. В этом поле указывается время в секундах, по истечении которого на график будет выводиться очередная расчетная точка. Поле активируется только в том случае, если выбрана опция *Wait for time Delay*.

OK. Закрытие диалогового окна с сохранением всех изменений.

Cancel. Закрытие диалогового окна без сохранения изменений.

Help. Вызов раздела подсказки Animate Options.

См. примеры анализа схем с анимацией в каталогах *Analysis\Animation* и *Component\Animation*.

8.7. Трехмерные графики

При построении трехмерных графиков используются 3 переменные, каждая из которых связана с одной из взаимно-ортогональных координатных осей X, Y и Z (рис. 8.9). Ось Z условно можно рассматривать как прямую линию, перпендикулярную плоскости страницы (экрана), направленную к наблюдателю. Оси X и Y — взаимно перпендикулярные оси в плоскости страницы (экрана).

Выходная функция рассматривается как переменная Y, откладываемая по соответствующей оси. Здесь возможны 2 варианта:

- Функция $Y(x,z)$ — это любое выражение, зависящее от 2-х переменных, график которого строится по результатам анализа. Первая независимая

переменная X — это время T , частота F или переменная $DCinput$. Вторая независимая переменная Z — это либо варьируемая температура, либо любой параметр схемы, изменяемый пошаговым методом с помощью окна **Stepping**;

- Функция из группы **Performance**, использующая не менее чем двумерное множество обычных кривых, построенных на координатной плоскости. Указанное множество кривых может быть получено при вложенном пошаговом изменении (Nested Loops) не менее чем двух параметров схемы, одним из которых может быть температура. В этом случае по осям X и Z откладываются различные варьируемые переменные.

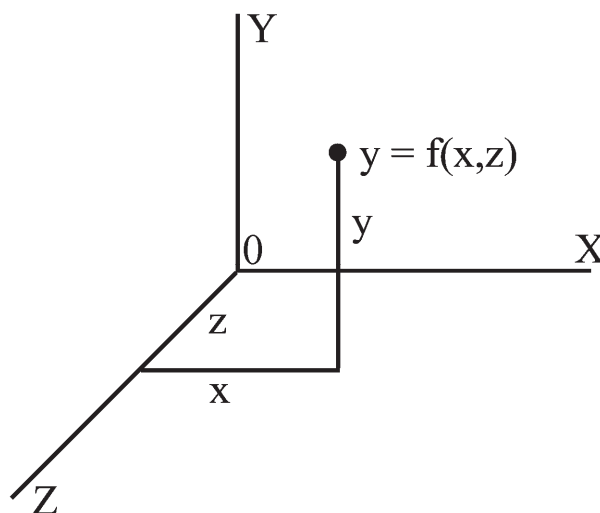


Рис. 8.9. Расположение координатных осей при построении трехмерных графиков

Для иллюстрации построения и модификации трехмерного графика рассмотрим построение частотных характеристик (рис. 8.10) полосового фильтра (пример *3d2.cir* из каталога *Analysis\3D*). В этом примере используется вложенное изменение параметров. Во внешнем цикле меняется индуктивность $L2$ от 11мН до 13мН с шагом 0,25мН; во внутреннем — емкость $C1$ от 800пФ до 900пФ с шагом 25пФ. Это приведет к $9 \cdot 5 = 45$ запускам малосигнального частотного анализа фильтра.

АЧХ выходного напряжения полосового фильтра строится в логарифмическом масштабе в диапазоне от 45кГц до 55 кГц (рис. 8.10). После этого выполняется команда *AC>3D Windows>Add 3D Window*, приводящая к открытию диалогового окна, в котором выбираются переменные, откладываемые по осям X ($C1.Value$), Z ($L2.Value$) и Y ($Y\_Range(db(v(Out)),1,1,49K,51K)$). Функция **Performance**, откладываемая по оси Y представляет собой пульсации коэффициента передачи фильтра в полосе пропускания 49–51 кГц. При нажатии **OK** появится окно с построенным трехмерным графиком измеренных пульсаций.

Пример построения обычных графиков (например напряжения, тока) в трехмерном режиме приведено в примере *3d1.cir* из каталога *Analysis\3D*.

Видоизменение построенных трехмерных графиков можно осуществить с помощью диалогового окна **Properties**, вызываемого двойным щелчком мыши

по полю графика или нажатием **F10** (). Оно имеет следующие закладки:

Plot. Эта закладка окна вызывается при первичной команде построения графика. Окно имеет три раскрывающихся списка: *X axis*, *Z axis*, *Y axis*, в кото-

рых выбираются переменные, откладываемые по соответствующим осям координат. Причем функция *Performance* может быть указана только по оси Y. При количестве варьируемых параметров больше двух, открываются дополнительные списки, которые выбирают конкретную реализацию поверхности для заданного значения температуры и (или) других варьируемых параметров.

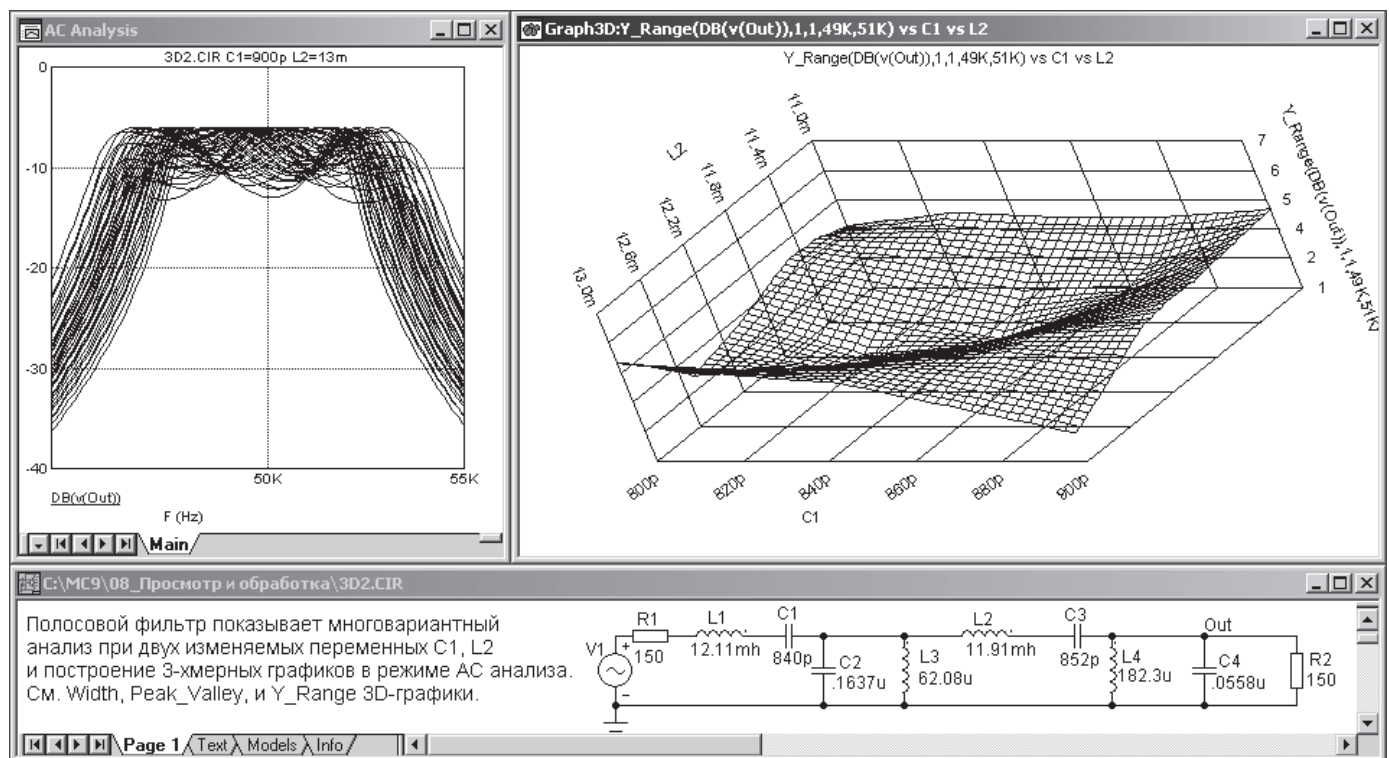


Рис. 8.10. Построение трехмерных графиков

Options. Опции этой панели управляют способом отображения трехмерного графика.

- *Contour* — отображает двумерный контурный рельеф переменной Y на плоскости XZ.
- *Axes* — включает отображение 3-х координатных осей на трехмерном графике X, Y, Z.
- *Isolines* — включает прорисовку на графике изолиний (линий на которых X и Z координаты имеют постоянное значение). Число этих линий по соответствующим координатам указывается на этой же закладке на панели *Patches*.
- *Grid* — отображение трехмерной координатной сетки на координатных плоскостях.
- *Scales* — отображение масштабных числовых меток вдоль координатных осей.
- *Background* — прорисовка трех координатных плоскостей, если для них установлены соответствующие цветовые параметры на закладке **Color**.
- *Flash Cursor* — установка мелькающих курсоров для трехмерного режима *Cursor Mode*.
- *Patches* — установка числа изолиний по координатам X и Z (по умолчанию 40).

Scales and Formats. Устанавливает числовой формат вывода масштабов (*Scale Format*) и значений функций (*Value Format*) трехмерных графиков. Так-

же устанавливает способ вычисления наклонов (Slope Calculation): нормальный, дБ/октава, дБ/декада.

Color. Устанавливает цветовые параметры текста, масштабной сетки, изолиний, трех координатных плоскостей (Plane), заднего фона 3D-окна, выделенного объекта, границы прямоугольного выделения. Также позволяет выбрать способ раскраски поверхности:

- *Clear.* Поверхность не окрашивается, являясь при этом прозрачной и состоящей из изолиний.
- *Spectrum.* Поверхность окрашивается в радужные тона, причем тон зависит от значения Y-координаты. Голубой цвет используется для минимальных значений, красный — для максимальных значений.
- *Gray.* Поверхность окрашивается в оттенки серого. Черный цвет используется для минимальных значений, белый — для максимальных значений.
- *Red, Green, Blue.* Поверхность окрашивается в тона красного, зеленого, голубого цветов соответственно.

Font. На этой закладке устанавливают гарнитуру, размер и начертание шрифта, используемого для текстовых объектов.

Tool Bar. Устанавливает состав панели инструментов окна построения трехмерных графиков.

Изменение ориентации трехмерных графиков

Ориентация трехмерных графиков может быть изменена несколькими способами:

1. Захватом и протяжкой правой клавишей мыши (точно так же как панорамирование в обычном двумерном режиме).

2. Использованием клавиатуры:

- A: Поворот графика по часовой стрелке относительно оси X.
- Q: Поворот графика против часовой стрелки относительно оси X.
- W: Поворот графика по часовой стрелке относительно оси Y.
- S: Поворот графика против часовой стрелки относительно оси Y.
- E: Поворот графика по часовой стрелке относительно оси Z.
- D: Поворот графика против часовой стрелки относительно оси Z.
- X: Вид перпендикулярно плоскости YZ ($X=0$).
- Y: Вид перпендикулярно плоскости XZ ($Y=0$).
- Z: Вид перпендикулярно плоскости XY ($Z=0$).
- CTRL+HOME: Возврат к стандартной ориентации.
- C: Переключение между контурным рельефом на плоскости ZX и обычным трехмерным графиком.

9. СИНТЕЗ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

Micro-Cap позволяет проводить не только анализ, но и синтез электронных устройств. Правда, типы синтезируемых электронных устройств очень ограничены. Можно синтезировать только пассивные и активные фильтры.

В процессе синтеза с помощью программы Micro-Cap можно задать тип фильтра, частотную характеристику, схемную реализацию каждого звена. Оба вида синтеза фильтров (активных и пассивных) выбираются из пункта меню *Design*. Программа синтеза Micro-Cap создаёт схему фильтра с заданными параметрами в виде схемного файла или макромодели.

Особенностью синтеза фильтров в пакете программ Micro-Cap является отображение на заднем плане во время выполнения синтеза принципиальной схемы фильтра вместе с текстовыми директивами.

Особенностью 9-ой и 10-ой версий программы Micro-Cap по сравнению с предшествующими, является добавление эллиптического фильтра в список синтезируемых пассивных фильтров.

9.1. Математическое описание различных типов фильтров

Принятые обозначения

F — частота

$S = j \cdot 2\pi \cdot F$ — комплексная круговая частота

$U = \frac{S}{2\pi \cdot F_C} = j \frac{F}{F_C}$ — нормированная комплексная частота

F_0 — частота полюса в Гц

Q_0 — Q-фактор

FN — частота нуля в Гц (только для эллиптических фильтров и инверсных фильтров Чебышева).

F_C — нижняя граничная частота полосы задержания для ФНЧ, нижняя граница полосы пропускания для ФВЧ или средняя (центральная) частота для полосового и заграждающего фильтров. Указанная центральная частота может быть слегка изменена для получения симметричной полосы пропускания/задержания. Подгонка частоты F_C просматривается в директиве *.define U...* на поле схемы. Например, для полосового фильтра Батерворта, использующего по умолчанию центральную частоту 1000 Гц, полосу пропускания 100, в действительности центральная частота 998.75 Гц. Используется при синтезе всех фильтров, кроме инверсных фильтров Чебышева.

F_{CI} — граница полосы пропускания для ФНЧ (частота среза, обычно определяемая по точке -3 дБ) или граничная частота полосы задержания для ФВЧ. Для полосовых и заграждающих фильтров $F_{CI}=F_C$. Используется при синтезе инверсных фильтров Чебышева.

$W_0=F_0/F_C$ — нормированная частота полюса.

$W_{0I}=F_0/F_{CI}$ — нормированная частота полюса для инверсного фильтра Чебышева.

$W_N = FN/F_C$ — нормированная частота нуля.

$W_{NI} = FN/F_{CI}$ — нормированная частота нуля для инверсного фильтра Чебышева.

9.1.1. Нормированные частотные характеристики для различных фильтров 2-го порядка

Фильтры низких частот и фазовые фильтры (Low Pass and Delay)

Батерворта (Butterworth)
$$F(U) = \frac{1}{U^2 + \frac{U}{Q_0} + 1}, \quad Q_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Чебышева (Chebyshev)
$$F(U) = \frac{1}{U^2 + \frac{U \cdot W_0}{Q_0} + W_0^2}.$$

Эллиптический (Elliptic)
$$F(U) = \frac{U^2 + W_N^2}{U^2 + \frac{U \cdot W_0}{Q_0} + W_0^2}.$$

Инверсный Чебышева (Inv. Chebyshev)
$$F(U) = \frac{U^2 + W_{NI}^2}{U^2 + \frac{U \cdot W_{0I}}{Q_0} + W_{0I}^2}.$$

Фильтры высоких частот (High Pass)

Батерворта (Butterworth)
$$F(U) = \frac{U^2}{U^2 + \frac{U}{Q_0} + 1}.$$

Чебышева (Chebyshev)
$$F(U) = \frac{U^2}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}}.$$

Эллиптический (Elliptic)
$$F(U) = \frac{U^2 + W_N^2}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}}.$$

Инверсный Чебышева (Inv. Chebyshev)
$$F(U) = \frac{U^2 + W_{NI}^2}{U^2 + \frac{U}{W_{0I} \cdot Q_0} + \frac{1}{W_{0I}^2}}.$$

Полосовые фильтры (Bandpass)

$$\text{Батерворта (Butterworth)} \quad F(U) = \frac{U}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}} .$$

$$\text{Чебышева (Chebyshev)} \quad F(U) = \frac{U}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}} .$$

$$\text{Эллиптический (Elliptic)} \quad F(U) = \frac{U^2 + W_N^2}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}} .$$

$$\text{Инверсный Чебышева (Inv. Chebyshev)} \quad F(U) = \frac{U^2 + W_{NI}^2}{U^2 + \frac{U}{W_{0I} \cdot Q_0} + \frac{1}{W_{0I}^2}} .$$

Заграждающие фильтры (Notch)

$$\text{Батерворта (Butterworth)} \quad F(U) = \frac{U^2 + 1}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}} .$$

$$\text{Чебышева (Chebyshev)} \quad F(U) = \frac{U^2 + 1}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}} .$$

$$\text{Эллиптический (Elliptic)} \quad F(U) = \frac{U^2 + W_N^2}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}} .$$

$$\text{Инверсный Чебышева (Inverse Chebyshev)} \quad F(U) = \frac{U^2 + W_{NI}^2}{U^2 + \frac{U}{W_{0I} \cdot Q_0} + \frac{1}{W_{0I}^2}} .$$

9.2. Синтез активных фильтров

Команда синтеза активных фильтров выбирается из пункта меню **Design**. Она позволяет задать тип фильтра по полосе пропускания и типу полиномов передаточной характеристики в S-области, схемную реализацию каждого звена, затем на заключительном этапе создать схему фильтра.

Основные типы фильтров:

- ФНЧ (Low Pass)
- ФВЧ (High Pass)
- Полосовые фильтры (Bandpass)
- Заграждающие или режекторные (Notch)
- Фазовые фильтры (всепропускающие или фильтры задержки Delay), имеющие заданную ФЧХ.

Первые 4 вида определяются своей диаграммой Бode — передаточной характеристикой в частотной области (совокупностью АЧХ и ФЧХ). Фазовые фильтры (Delay) характеризуются временем задержки или фазочастотной характеристикой.

Возможны следующие способы реализации активных фильтров:

- В виде фильтра Батерворта (Butterworth)
- В виде фильтра Чебышева (Chebyshev)
- В виде фильтра Бесселя (Bessel)
- В виде эллиптического фильтра (Elliptic)
- В виде инверсного фильтра Чебышева (Inverse-Chebyshev)

Для каждого конкретного выбранного типа фильтра (ФНЧ, ФВЧ, полосового, режекторного, фазового) возможны не все виды реализаций. Например, для построения фазовых фильтров, можно использовать только фильтр Бесселя.

Для каждого звена синтезируемого фильтра в режиме диалога могут быть выбраны следующие схемные реализации:

- звено Саллена-Ки (Sallen-Key) — наиболее распространенное звено при создании активных фильтров;
- звено с многопетлевой обратной связью Multiple Feedback (MFB)
- звено Той-Томаса (Tow-Thomas);
- звено Флейшера-Той (Fleischer-Tow);
- звено Кервина-Хьюлсмана-Ньюкомба (KHN);
- звено Аккерберга-Моссберга (Acker-Mossberg);
- звено Той-Томаса 2 (Tow-Thomas 2);
- гираторное звено Dual Amplifier Band Pass (DABP).

Для реализации конкретного типа фильтра подходят не все из указанных схем, поскольку некоторые звенья не могут обеспечить заданный вид полинома АЧХ в S-области. Доступный порядок схем — от 3 до 8.

9.2.1. Окно диалога синтеза активных фильтров.

Синтез активных фильтров запускается из меню **Design**. Выбор из этого меню пункта *Active Filters* вызывает появление диалогового окна (рис. 9.1), имеющего 3 основные закладки, доступ к которым осуществляется мышью или с помощью нажатия <TAB>: **Design, Implementation, Options**.

Design

Эта закладка позволяет выбрать тип фильтра (ФНЧ, ФВЧ...), параметры фильтра и тип реализации (Батерворта, Чебышева и т.д.). Каждый раз, когда осуществляется выбор в любой группе параметров, в нижнем правом углу

выводятся полюсы, нули и значения Q-фактора (добротности). Для подгонки формы частотной характеристики можно редактировать частоту полюса F_0 , значение Q_0 , и частоту нуля F_N .

Закладка **Design** содержит 3 секции:

Type: В этой секции можно выбрать один из 5 основных видов фильтров.

- Low pass (ФНЧ — фильтр нижних частот);
- High pass (ФВЧ — фильтр верхних частот);
- Bandpass (Полосовой фильтр);
- Notch (Заграждающий фильтр);
- Delay (Фильтр задержки).

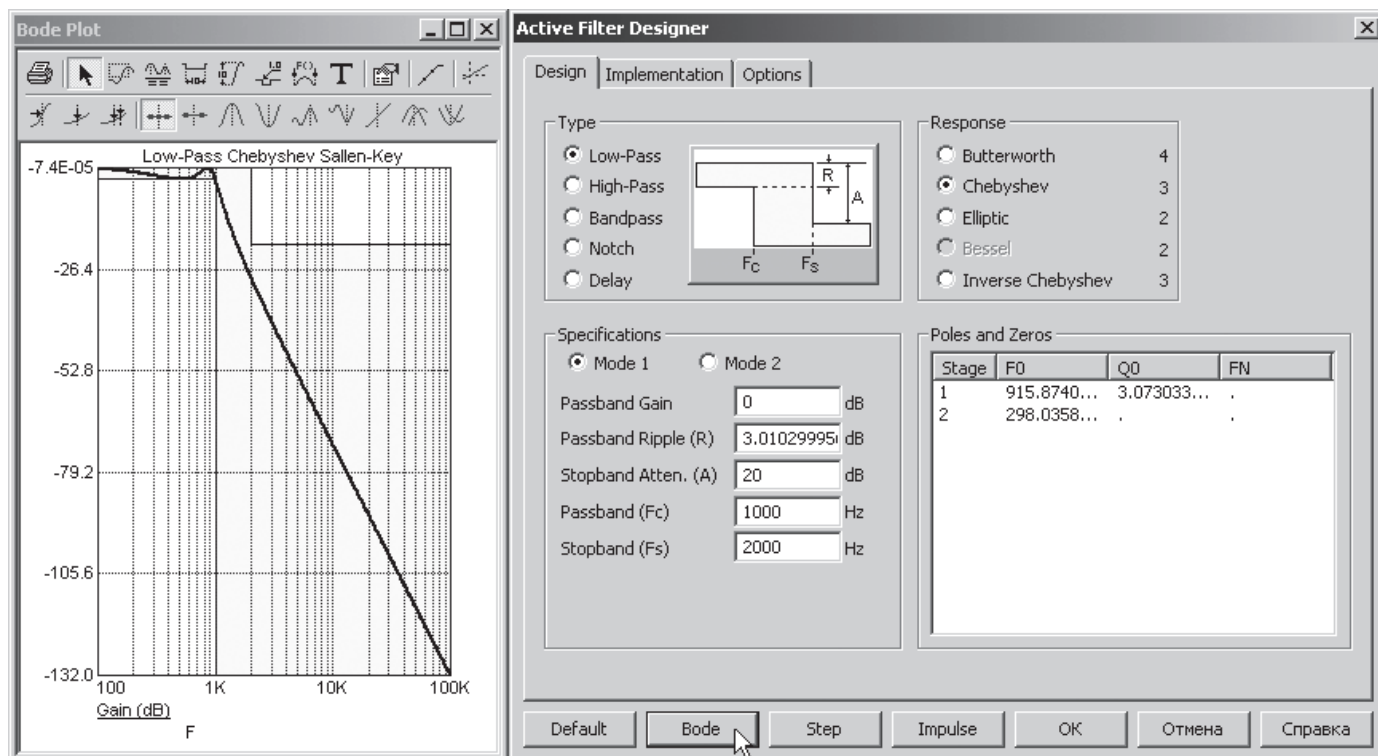


Рис. 9.1. Диалоговое окно синтеза активных фильтров и его закладка *Design*

Response: В этой секции Вы можете выбрать математическую аппроксимацию идеального фильтра.

- Butterworth (Батерворта);
- Chebyshev (Чебышева);
- Bessel (Бесселя);
- Elliptic (Эллиптического или фильтра Кауэра);
- Inverse-Chebyshev (Инверсного Чебышева).

Различные аппроксимации для своей реализации требуют схемы разной сложности. Так при прочих равных условиях фильтры Батерворта требуют большего количества звеньев для достижения параметров фильтрации, но имеют приемлемую частотную характеристику для времени задержки. Фильтры на основе аппроксимации прямым и инверсным полиномами Чебышева требуют меньшего количества каскадов, но имеют более резко выраженную зависимость времени задержки. Эллиптические аппроксимации требуют для реализации минимальное количество звеньев, но имеют максимальный диапазон изменения времени задержки. ФНЧ Бесселя — это фильтры с макси-

мально плоской кривой зависимости времени задержки и поэтому они подходят для построения фазовых фильтров.

Справа от типа аппроксимации показывается порядок для ФНЧ и ФВЧ или число звеньев для полосно-пропускающих и полосно-заграждающих фильтров.

Specifications: В этом разделе вводятся численные значения параметров для реализуемого фильтра. Есть два способа задания фильтра: Mode 1 и Mode 2.

В режиме Mode 1 указываются полные характеристики АЧХ фильтра, такие как коэффициент передачи в полосе пропускания, частота среза, ослабление в полосе задержания. Программа вычисляет количество звеньев фильтра, требуемых для их достижения при использовании конкретной аппроксимации.

Режим Mode 2 наоборот позволяет вам непосредственно задать лишь основные параметры и порядок фильтра. Более подробно задаваемые характеристики рассмотрены ниже при описании синтеза конкретного типа фильтра.

Poles and Zeros: Эта секция закладки **Design** показывает численные значения полюсов, нулей (соответственно корней знаменателя и числителя полиномиальной характеристики) и добротности Q_0 . Она в сущности представляет математическое описание фильтра. Если вносятся изменения в поля типа (Type), характеристики (Response) и параметров (Specifications), то программа заново вычисляет полиномиальные коэффициенты и обновляет численные значения этой секции. Если нажать кнопку **Bode**, **Step** или **Impulse**, в открывшемся окне будут нарисованы амплитудно-частотная, переходная или импульсная характеристики идеализированного фильтра соответственно. Кроме того, при нажатии кнопки **Bode**, возможен вывод коэффициента передачи, фазы и групповой задержки или одной из этих функций в зависимости от установок в закладке **Options**.

График является идеализированной характеристикой, поскольку он вычисляется по стандартной полиномиальной формуле для выбранного фильтра, причем величины F_0 , Q_0 , и FN доступны для редактирования. Этот график может быть в точности реализован только при наличии совершенных компонентов (идеальных операционных усилителей и пассивных компонентов с абсолютно точными номиналами). Реальный фильтр, изготовленный из реальных электронных компонентов, может вести себя по-другому. Когда схема синтезирована, можно запустить анализ и посмотреть, насколько хорошо она соответствует заданным характеристикам. Реальная схема может быть выполнена на любом операционном усилителе из библиотеки Micro-Cap — от идеального ОУ до любой из наиболее широко распространенных микросхем, представленных в библиотеке Micro-Cap. Резисторы и конденсаторы могут иметь как точные расчетные значения, так и приближенные к расчетным, выбранные из стандартного ряда. Реальные операционные усилители и компоненты, величина которых берется из стандартного ряда, могут сильно изменять ход частотной характеристики, вплоть до изменения типа полинома.

Можно редактировать величины (F_0 , Q_0 , FN), чтобы исследовать их влияние на ход графика. Возможно даже создание фильтра с модифицированными коэффициентами. Хотя при этом не удастся повторить на реальных

компонентах синтезированный идеальный фильтр, но характеристика синтезированной программой схемы приблизится к изображенному идеализированному графику. Заметим, что любое редактирование в областях типа (Type), аппроксимации (Response), параметров АЧХ (Specifications) заставит программу заново вычислить величины полюсов и нулей в соответствующей секции, уничтожив результаты предшествующего редактирования.

Implementation

Эта закладка позволяет выбрать:

- схему для реализации звеньев фильтра;
- использовать ли точные значения пассивных компонентов или воспользоваться номиналами из стандартных рядов;
- тип операционного усилителя
- способ построения звеньев фильтра нечетного порядка.

Закладка имеет несколько секций (рис. 9.2).

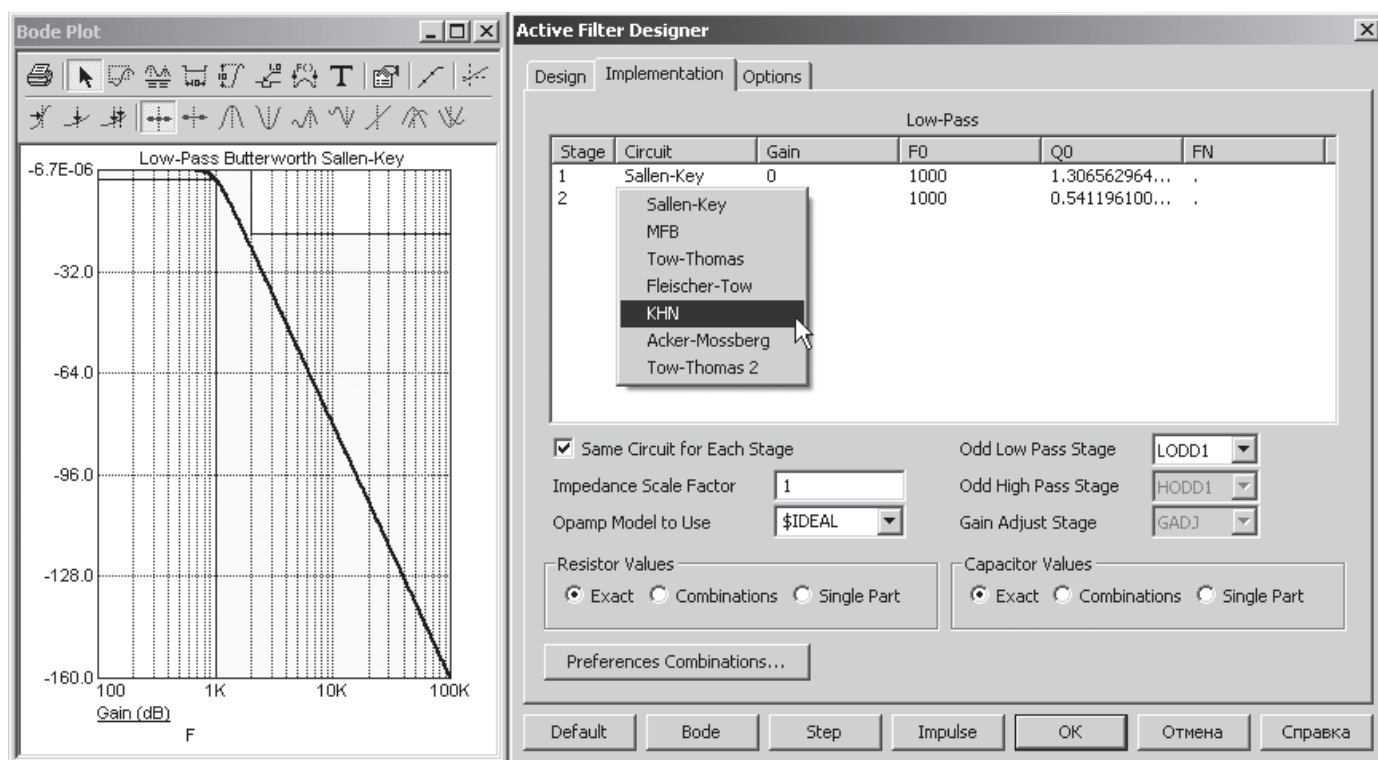


Рис. 9.2. Закладка *Implementation* диалогового окна синтеза активных фильтров

Позиция Stage Values (параметры звена фильтра). Эта позиция позволяет указать для каждого звена тип схемной реализации и коэффициент передачи. Она также позволяет редактировать частоты полюсов и нулей, значение добротности звеньев. Можно менять значения полюсов/добротности (F_0/Q_0) между различными звеньями фильтра с помощью клика правой клавишей мыши в поле F_0 или Q_0 . Выпадающее меню в колонке *Circuits* позволяет выбрать другой тип звена для обмена установками F_0/Q_0 . Это может понадобиться, если необходимо оптимизировать размах сигнала и чувствительность к шумам. Некоторые схемные реализации позволяют воздействовать на размах сигнала (увеличивать его) и уменьшать чувствительность к шумам. В этом случае нули передаточной функции должны быть фиксированными и не должны меняться местами между звеньями.

Для изменения реализации звена фильтра можно кликнуть левой клавишей мыши в колонке *Circuit* в строке, где необходимо изменить реализацию звена. Появится список доступных схемных реализаций для выбранного типа фильтра и передаточной характеристики. Этот список будет состоять максимум из 8 строк, их может быть и меньше, поскольку не все схемы могут реализовывать требуемую передаточную функцию.

После создания схемы фильтра звенья нумеруются слева направо, начиная с первого. Вход фильтра всегда расположен у крайнего слева звена, выход — у крайнего справа звена.

Same Circuit for Each Stage. Эта опция позволяет использовать для реализации фильтра только одинаковые схемные звенья. Если она не установлена, то разрешается указывать различные цепи для реализации отдельных звеньев.

Impedance Scale Factor. Эта опция позволяет задавать масштабный коэффициент, применяемый к номиналам всех пассивных компонентов схемы. На этот коэффициент умножаются сопротивления всех резисторов и делятся емкости всех конденсаторов. От него не зависит вид передаточной характеристики, однако он позволяет подогнать номиналы пассивных компонентов ближе к реально используемым величинам.

Opamp Model to Use. Позволяет задать модель операционного усилителя для реализации фильтра. По умолчанию используемая модель — \$IDEAL. Это модель источника тока, управляемого напряжением (ИТУН) с малым выходным сопротивлением. Она имеет очень большой коэффициент передачи, неограниченную полосу пропускания, в ней отсутствуют токи утечки и ограничение выходного сигнала. Главная цель использования этой модели — посмотреть, как фильтр будет себя вести, имея в своем составе идеальные компоненты. Можно выбрать любую другую модель из открывающегося списка. Он содержит сотни моделей популярных операционных усилителей в формате Micro-Cap. Однако предлагаемые поставщиками интегральных схем SPICE-подсхемы моделей усилителей не включены в этот список.

Resistor Values. Эта опция определяет, как выбираются величины сопротивлений резисторов. Во время реализации фильтра, когда синтезируется его схема, программа рассчитывает точные значения сопротивлений, требуемые для соответствия фильтра заданным параметрам. Естественно, резисторы с величинами, имеющими 16 значащих цифр не используются на практике, поэтому следует выбрать одно из двух:

- создавать схему с резисторами, сопротивления которых в точности совпадают с рассчитанными значениями;
- создавать схему, применяя наиболее подходящие значения из стандартного ряда величин.

Выбор между этими двумя вариантами заключается в том, что можно использовать большинство компонентов из стандартного ряда и точно подгонять лишь номиналы некоторых резисторов. Существуют несколько рядов стандартных значений, можно внести в них добавочные значения или сделать новые ряды в соответствии со специфическими требованиями (см. 9.2.2).

Кроме того при выборе второго варианта Micro-Cap предоставляет возможность использования компонентов со стандартными номиналами из ряда

либо в виде одного компонента (single part) либо в виде их последовательно-параллельного соединения (combinations).

Capacitor Values. Эта опция позволяет задать, как будут определяться величины емкостей конденсаторов. Она действует так же, как аналогичная опция для резисторов.

Preferences Combinations. Эта панель позволяет выбрать опции для использования единичных пассивных компонентов или их комбинации. При ее нажатии открывается соответствующая закладка окна пользовательских предпочтений *Preferences*.

Odd Low Pass Stage (нечетное НЧ звено). Опция позволяет выбрать последнее звено в реализации НЧ фильтра нечетного порядка. Существуют несколько вариантов. LODD1 — это простой RC-фильтр. LODD2 — это буферированный RC-фильтр с неинвертирующим повторителем на выходе. LODD3 — буферированный RC-фильтр с инвертирующим повторителем на выходе (рис. 9.3).

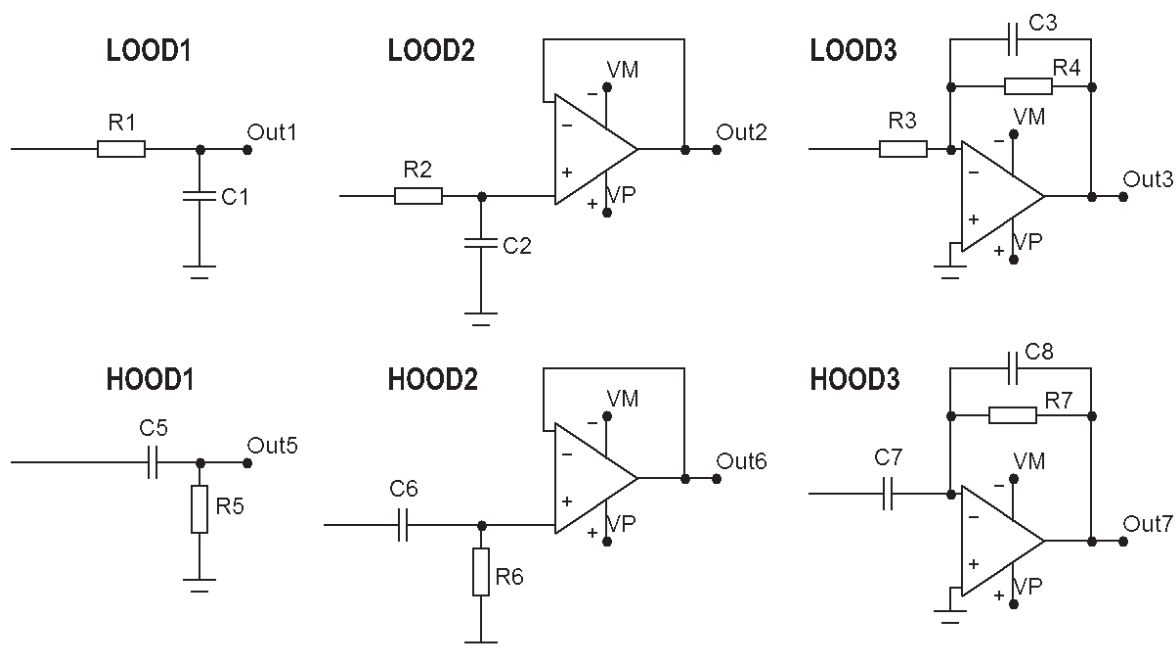


Рис. 9.3. Последние звенья для реализации НЧ и ВЧ фильтров нечетного порядка

Odd High Pass Stage. Опция позволяет выбрать последнее звено в реализации ВЧ фильтра нечетного порядка. Существуют несколько вариантов. HODD1 — это простой RC-фильтр. HODD2 — это буферированный RC-фильтр с неинвертирующим повторителем на выходе. HODD3 — это буферированный RC-фильтр с инвертирующим повторителем на выходе (рис. 9.3).

Gain Adjust Stage. Опция позволяет выбрать звено для реализации заданного коэффициента передачи. Существуют два варианта. NULL не добавляет дополнительное звено, что означает отсутствие коррекции величины коэффициента передачи фильтра. GADJ — коэффициент передачи корректируется добавлением в схему простого инвертирующего усилителя (рис. 9.4). Используется для полосовых и заграждающих фильтров.

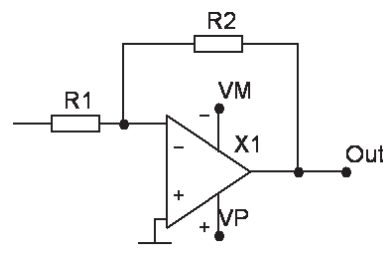


Рис. 9.4. Звено GADJ

Options

В этой закладке выбирается точность и способ представления используемых пассивных компонентов, графики для построения при нажатии **Plot**, сохранение синтезированного фильтра в виде макромодели или схемы, перенос результатов синтеза в текущую схему или создание новой. Закладка **Options** содержит следующие пункты (рис. 9.5).

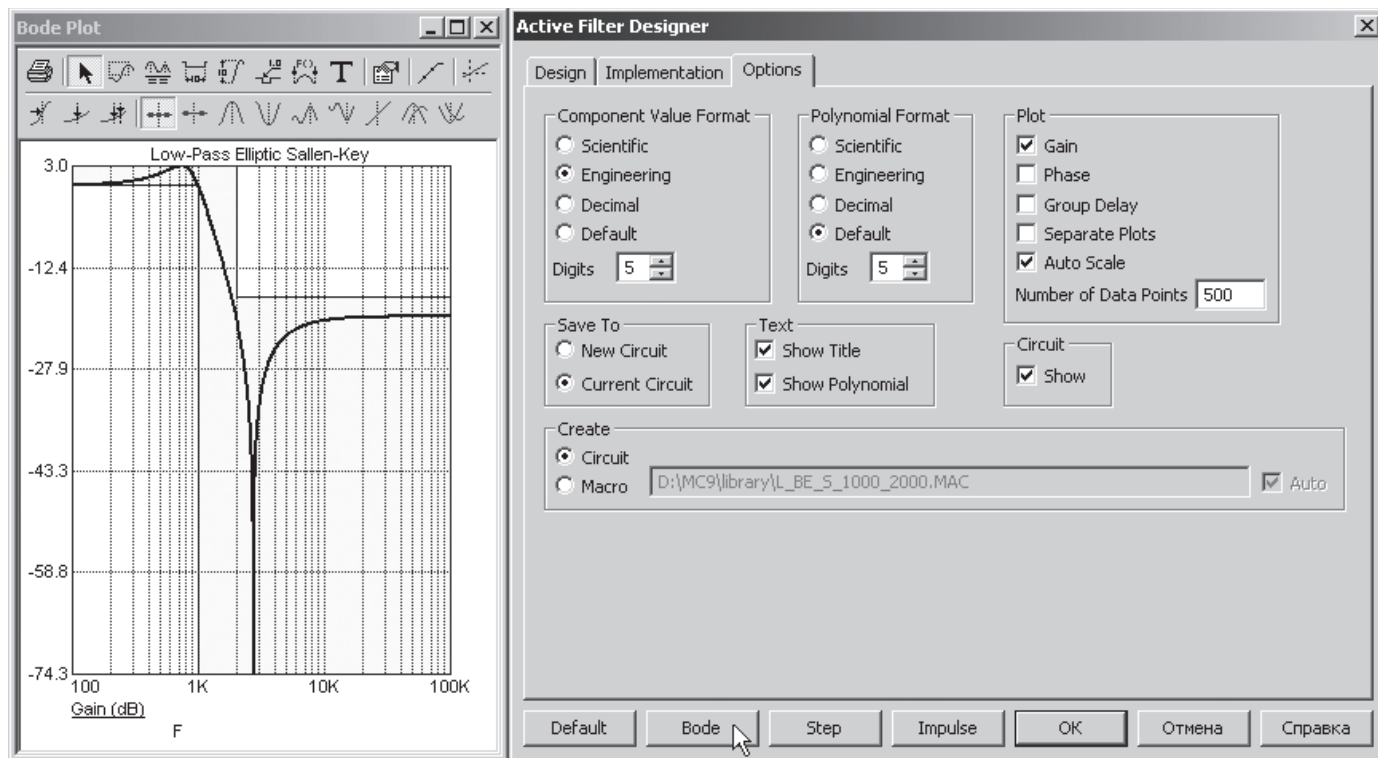


Рис. 9.5. Закладка Options диалогового окна синтеза активных фильтров

Component Value Format. Позволяет выбрать способ представления величин компонентов в научной (scientific), инженерной (engineering) нотациях, или в нотации по умолчанию (default). Можно также установить число значащих цифр при представлении величин. В основном это чисто косметическое средство для улучшения восприятия, однако, в некоторых фильтрах высокого порядка для получения точных частотных характеристик требуется увеличение количества значащих цифр по сравнению с пятью, принятым по умолчанию.

Polynomial Format. Опция позволяет выбрать, в какой нотации представлять полиномиальные коэффициенты — научной (scientific), инженерной (engineering) или в нотации по умолчанию (default). Работает аналогично опции **Component Value Format**, но для коэффициентов полинома. Коэффициенты полинома используются для определения идеальных передаточных функций (полиномиальных характеристик). Полиномиальные функции (LP, HP, BP, BR, AP) используются в малосигнальном частотном анализе (AC) для построения идеальной передаточной функции рядом с реальной для сравнения. (Их список с соответствующими фильтрами представлен в табл. 9.1).

Plot. Позволяет выбрать графики диаграммы Боде (частотных характеристик). Можно выбрать:

- **Gain** — модуль коэффициента передачи;
- **Phase** — фазовый сдвиг коэффициента передачи;

- **Group delay** — групповую задержку;
- **Separate plots** — построение каждого графика в отдельном окне.

Установки указанной панели работают следующим образом.

Во-первых они воздействуют на графики, которые показываются при нажатии кнопки «Bode» (рис. 9.6). Этот график представляет собой график идеальной комплексной частотной передаточной функции. Он показывает, как будет работать схема, собранная на идеальных компонентах.

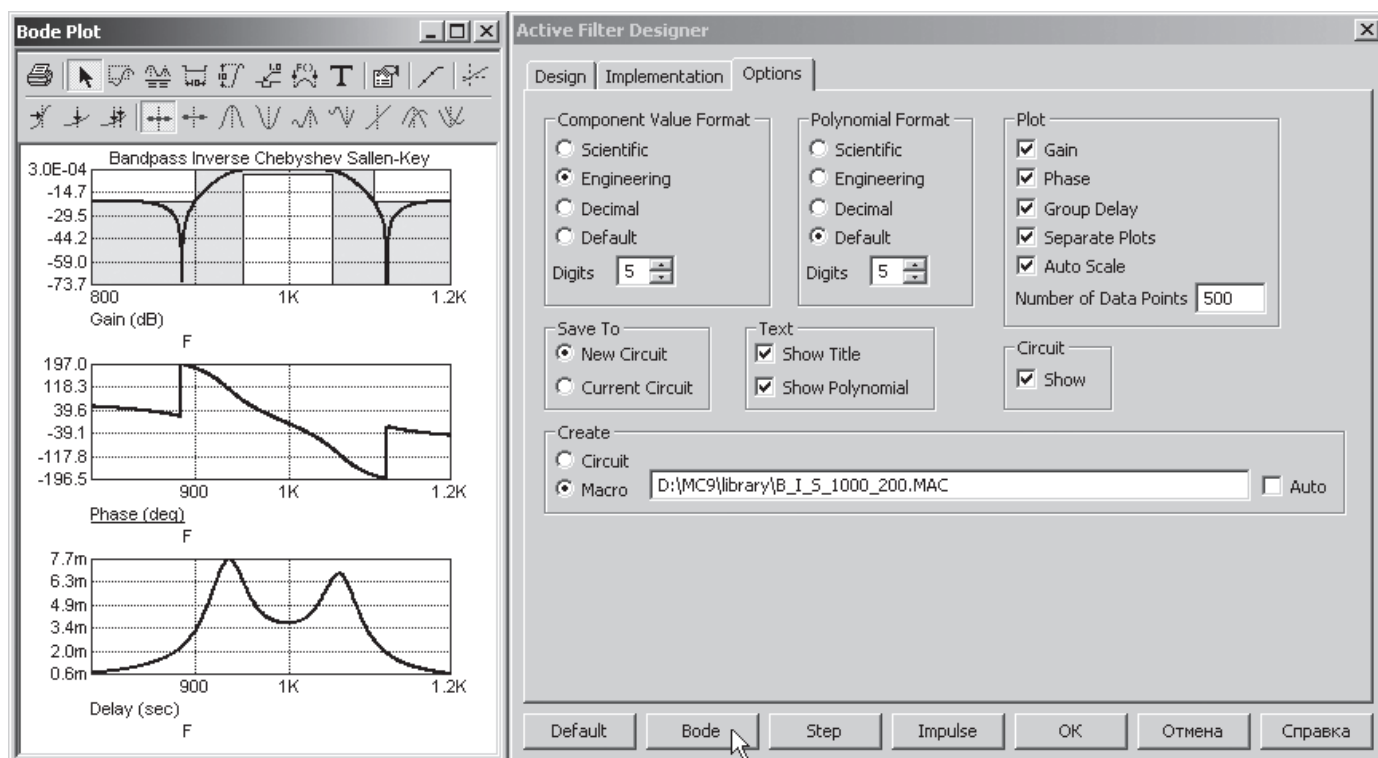


Рис. 9.6. Окно *Bode Plot* с графиками частотных характеристик идеального фильтра

Во-вторых, если выбрана опция *Save To: New Circuit*, она изменяет установки АС-анализа создаваемой схемы. Она устанавливает выражения для частотного анализа такими, чтобы при выборе **АС** анализа и его запуске (**F2**) сразу же строились только те графики, которые выбраны, причем для двух вариантов: идеализированного и реального фильтров (рис. 9.7).

- **Auto Scale.** При установке этого флага производится автоматическое масштабирование построенных графиков.
- **Number of Data Points.** Редактируя это поле, можно устанавливать количество расчетных точек на графике. Для графиков частотного анализа идеального и реального фильтров программа синтеза использует фиксированный логарифмический шаг, а не автоматический. Поэтому данное поле определяет, сколько точек данных будет на графике. Значение по умолчанию 500 обычно является достаточным, однако для фильтров очень высокого порядка, может потребоваться его увеличение для улучшения точности воспроизведения частотных характеристик в окрестности крутых участков.

Save To. Опция позволяет выбрать, где будет сохранена схема фильтра:

- **New Circuit** — в этом случае фильтр помещается в новую схему;
- **Current Circuit** — в этом случае фильтр помещается в текущую загруженную в окно схемного редактора схему.

Text. Позволяет включить в создаваемую схему фильтра текстовые блоки:

- **Show Title** — это текстовый блок, формируемый как заголовок. Он показывает основные спецификации фильтра.
- **Show Polynomials** — полиномиальные функции, которые включают в себя серию директив .DEFINE. Это иногда удобно использовать как примечание. Полиномиальная функция — это функция символической переменной $U=S/(2 \cdot \pi \cdot F_C)$, которая может быть выведена как функция частоты для сравнения с частотной характеристикой реальной схемы. Имена полиномиальных характеристик и соответствующие им типы фильтров представлены в табл. 9.1.

Таблица 9.1. Полиномиальные характеристики фильтров

Наименование полинома	Тип фильтра
LP	Low Pass (ФНЧ)
HP	High Pass (ФВЧ)
BP	Bandpass (полосовой фильтр)
BR	Notch (заграждающий фильтр)
AP	Delay (фильтр задержки)

Примечание. Все идеальные полиномы передаточных функций получаются из соответствующего полинома LP для ФНЧ-прототипа путем преобразования частотной оси [13].

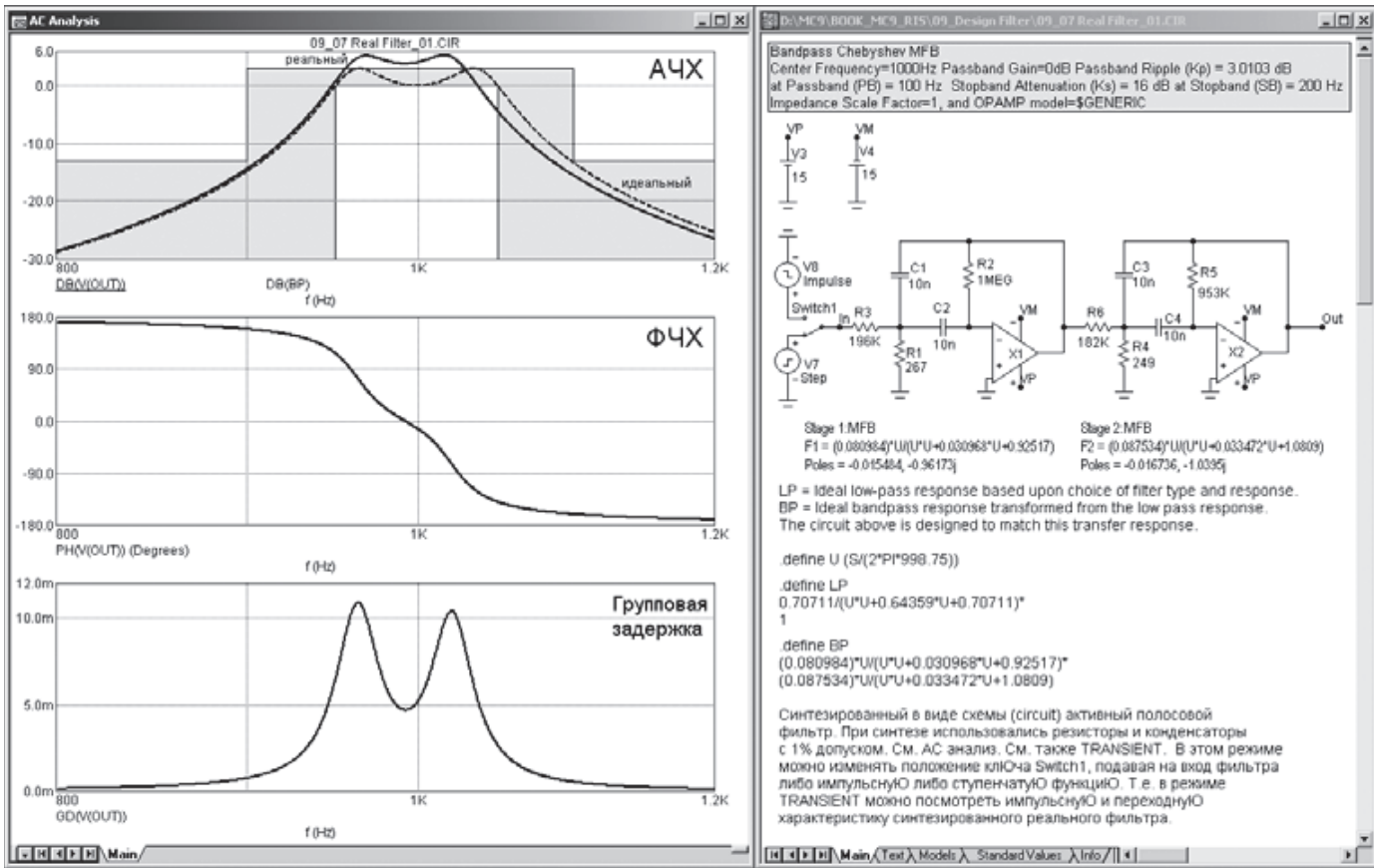


Рис. 9.7. Частотный анализ синтезированного фильтра

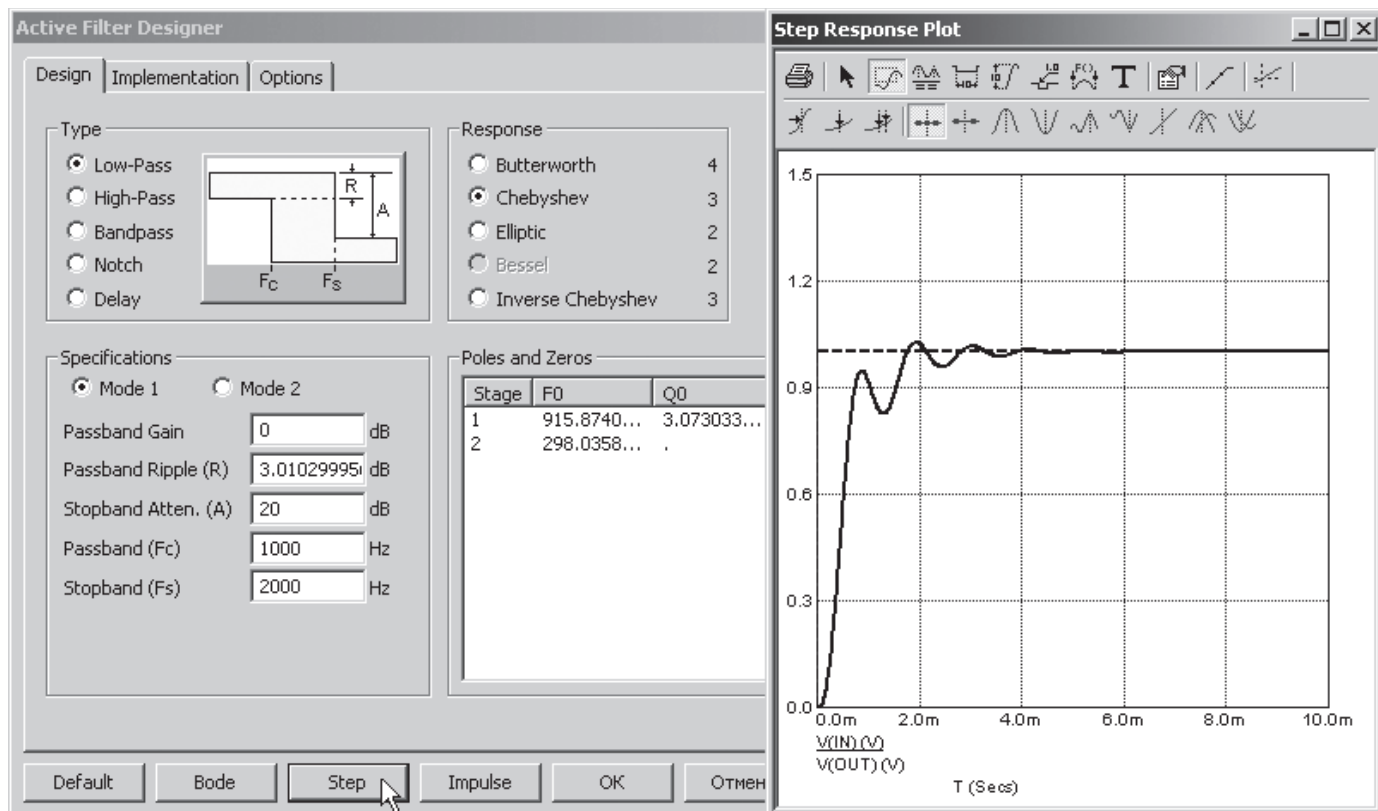
Circuit. При установленном флаге **Show** после проверки на заднем плане показывается схема фильтра в соответствии с пользовательскими изменениями в параметрах.

Create. Позволяет выбрать, в каком виде будет создаваться фильтр:

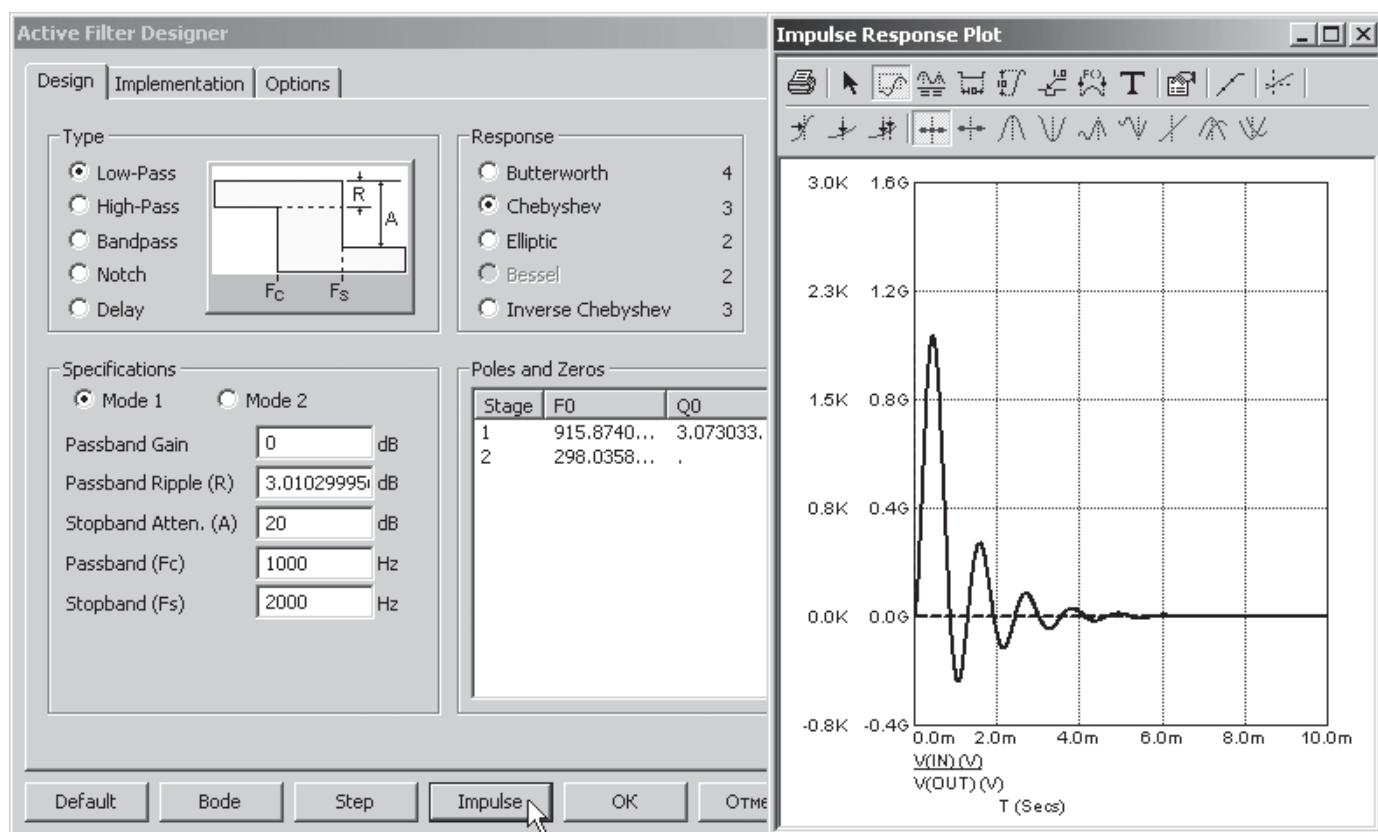
- **Circuit** — в этом случае синтезированный фильтр помещается либо в текущую схему, либо в новый схемный файл.
- **Macro** — в этом случае фильтр создается как макроопределение в виде подсхемы и помещается либо в текущую схему, либо в новый схемный файл. Макроопределение включает в себя количество звеньев фильтра, как в опциях схемы фильтра; кроме того, сами звенья содержат внутри себя схемное макроопределение, которое хранится на диске. Эти макроопределения содержатся в отдельном библиотечном файле с именем FILTERS.CMP и доступны для использования в других схемах.

Кнопки диалогового окна. В диалоговом окне синтеза активных фильтров в каждой закладке внизу расположены несколько кнопок:

- **Default.** Восстанавливает умолчательные величины для всех полей данных и опций.
- **Bode.** Показывает выбранные характеристики диаграммы Боде. Это могут быть модуль коэффициента передачи (см. рис. 9.5), фаза и (или) групповая задержка (см. рис. 9.6) в зависимости от того какие флажки и опции установлены на соответствующей панели закладки OPTIONS. То, что строится в окне Bode Plot — это график *идеальной* передаточной функции для выбранного фильтра. Этот график не является передаточной функцией реального фильтра, который изготавливается на основе выбранной реализации. Для того чтобы получить передаточную функцию реального фильтра надо запустить АС анализ для синтезированной схемы. Если установлен режим задания параметров (specification mode) *Mode 1*, то на построенном в режиме АС графике будут присутствовать специальные области, выделенные жёлтым цветом, — это области разрешенного хода кривой передаточной функции реального фильтра в соответствии с задаваемыми параметрами. По расположению графика передачи реального фильтра относительно указанного полигона можно судить о его соответствии техническому заданию. Выше (см. рис. 9.7) приведен пример частотного (АС) анализа синтезированного полосно-пропускающего фильтра Чебышева. На графике коэффициентов передачи в децибелах видны различия идеального и реального фильтров и выход за пределы полигона амплитудно-частотной характеристики реального фильтра.
- **Step.** Показывает реакцию фильтра на единичный скачок напряжения на входе (переходную характеристику) (рис. 9.8, а)
- **Impulse.** Показывает реакцию фильтра на δ -импульс напряжения единичной площади, подаваемый на вход. В действительности на вход подается прямоугольный импульс амплитудой 1Е9 В и длительностью 1Е-9 с (рис. 9.8, б).



а



б

Рис. 9.8. Характеристики фильтра: а — переходная; б — импульсная

- **OK.** Нажатие на эту панель вызывает построение схемы фильтра, соответствующей введенным спецификациям. Фильтр будет соответствовать выбранной конструкции, в нем будут использоваться соответствующие

схемы для реализации всех звеньев. Если включена опция *New Circuit*, также производятся установки в диалоговом окне АС-анализа для построения характеристик схем: реальной синтезированной и идеализированной теоретической (см. рис. 9.7). Если флажок на панели *Specifications* установлен в положение *Mode 1*, на графики добавляется область, показывающая разброс возможного хода кривой передаточной функции, определяемая параметрами технического задания для фильтра (см. рис. 9.7). Также производятся установки параметров анализа *Transient* для расчета переходных процессов при воздействии на вход схемы ступенчатой (*Step*) и импульсной (*Impulse*) функции. Выбор воздействия осуществляется двойным кликом по переключателю *SPDT*. После создания схемы фильтра программа выходит из диалогового окна.

- **Cancel.** Нажатие на эту панель заставляет выйти из диалогового окна без сохранения всех изменений.
- **Help.** Обеспечивает доступ в базу данных помощи.

9.2.2. Списки компонентов (Component lists)

Схемы могут быть созданы с использованием компонентов с точными значениями величин или с приближенными значениями величин, полученными из стандартных рядов. Ряды хранятся в текстовых файлах, которые имеют расширение **.cap** для емкостей, **.ind** — для индуктивностей, и **.res** — для резисторов. Формат этих файлов следующий:

TOLERANCE
<tolerance>[%]

DIGITS
<digit 1>
<digit 2>

...
<digit n>

MULTIPLIERS
<multiplier 1>
<multiplier 2>

...
<multiplier m>

ADD
<value 1>
<value 2>

...
<value p>

REMOVE
<value 1>
<value 2>

...
<value q>

Величина допусков (*<tolerance>*) используется для задания компонента в будущем схемном файле фильтра модельной строкой, используемой впоследствии при анализе методом Монте-Карло.

Программа синтеза создает список доступных номиналов пассивных компонентов следующим образом. Сначала вычисляются величины компонентов из указанного текстового файла рядов путем нахождения всех возможных произведений значащих цифр (DIGITS) на масштабные множители (MULTIPLIERS). После этого добавляются числа после ключевого слова ADD. На заключительном этапе из выбранного списка программа удаляет все значения, которые перечислены в файле после ключевого слова REMOVE. Полученный перечень номиналов далее используется при синтезе активного фильтра. Например:

```
TOLERANCE
1%
DIGITS
10
50
80
MULTIPLIERS
1
10
100
ADD
26
135
REMOVE
8000
```

В этом примере программа сначала создает пробный список исходя из заданных значащих цифр и множителей: 10, 50, 80, 100, 500, 800, 1000, 5000, 8000. Затем добавляются числа 26 и 135 и удаляется величина 8000, в результате получается: 10, 26, 50, 80, 100, 135, 500, 800, 1000, 5000.

Список создается таким образом, чтобы облегчить ввод стандартных рядов величин компонентов. Они часто создаются из небольшого списка чисел, умножаемых на 10 в различной целой степени. В них часто бывают исключения, особенно для больших и маленьких значений (в конце и начале ряда). DIGITS (значащие цифры) и MULTIPLIER (множители) введены для того, чтобы список имел сжатую форму, в то время как ADD и REMOVE приходят на помощь при исключениях. Все ключевые слова опциональны, таким образом можно создать список номиналов, используя только директиву ADD.

Файлы поддержки фильтров (Filter support files)

Программа синтеза фильтров использует файл с именем *filter.bin*, который постоянно находится в той же директории, что и исполняемые файлы *mc9.exe* (*mc10.exe*). Он не может быть удален или перемещен, поскольку в нем постадийно формируется фильтр на этапе синтеза в различных схемных реализациях, он также используется для построения полной схемы фильтра. Программа синтеза фильтров способна лишь выполнить математическую

часть синтеза, если этот файл отсутствует. Таким образом, программа синтеза не сможет создать реальную схему фильтра без файла *filter.bin*.

Программа также сохраняет последние использованные установки в диалоговом окне в файлах *ACTIVE.FLT* и *PASSIVE.FLT*. Эти установки могут быть возвращены к исходным (используемым по умолчанию) нажатием на кнопку *Default*, которая расположена внизу диалогового окна.

При нажатии **OK**, программа создает схемную реализацию заданного фильтра (см. рис. 9.7). Она называет его *circuit2*. Последующие схемы фильтров получают имена *circuit3*, *circuit4* и т.д. Схемы, конечно же, могут быть переименованы после сохранения их на диске.

9.2.3. Задание параметров фильтра в режиме Mode 1

Параметры различны для различных типов фильтров.

Параметры для фильтров нижних частот

Параметры ФНЧ представлены на рис. 9.9.

- **Passband Gain** (коэффициент передачи в полосе пропускания) — представляет собой коэффициент передачи фильтра на низких частотах, выраженный в дБ.
- **Passband Ripple R** (пульсации коэффициента передачи в полосе пропускания) — изменение коэффициента передачи в пределах полосы пропускания.

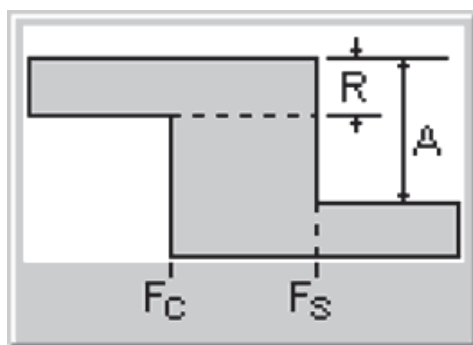


Рис. 9.9. Основные параметры фильтра нижних частот (ФНЧ)

- **Stopband Attenuation A** (ослабление в полосе задержания) — максимальный коэффициент передачи в полосе пропускания минус максимальный коэффициент передачи в полосе задержания, выраженный в дБ. Ослабление всегда является положительным числом.
- **Passband Frequency Fc** (нижняя граница переходной полосы или частота среза) — до этой частоты коэффициент передачи равен коэффициенту передачи в полосе пропускания плюс-минус пульсации:

$$|K(j\omega)| / [\text{дБ}] = (PB \text{ gain} \pm R), \quad \text{для } F \leq F_c.$$

- **Stopband Frequency Fs** (верхняя граница переходной полосы). Выше этой частоты коэффициент передачи фильтра меньше или равен коэффициенту передачи в полосе пропускания плюс-минус пульсации за вычетом ослабления в полосе задержания (stopband attenuation):

$$|K(j\omega)| / [\text{дБ}] \leq PB \text{ gain} \pm R - A, \quad \text{для } F \geq F_s.$$

Параметры для фильтров верхних частот

Фильтры верхних частот полностью подобны своим типовым аналогам фильтрам нижних частот и их параметры иллюстрирует рис. 9.10.

- **Passband Gain** (коэффициент передачи в полосе пропускания). Представляет собой коэффициент передачи на высоких частотах, выраженный в дБ.
- **Passband Ripple R** (пульсации коэффициента передачи). Это отклонения коэффициента передачи в пределах полосы пропускания.
- **Stopband Attenuation A** (ослабление в полосе задержания) — представляет собой максимальный коэффициент передачи в полосе пропускания минус максимальный коэффициент передачи в полосе задержания, выраженный в дБ. Ослабление всегда является положительным числом.
- **Passband Frequency Fc** (верхняя граница переходной полосы или частота среза) — выше этой частоты коэффициент передачи равен коэффициенту в полосе пропускания $\pm$ пульсации:

$$|K(j\omega)| [дБ] = (PB\ gain \pm R), \quad \text{для } F \geq F_c.$$

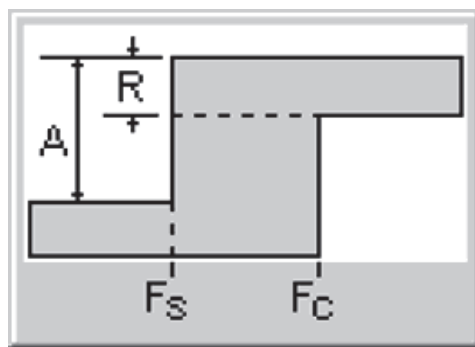


Рис. 9.10. Основные параметры фильтров верхних частот (ФВЧ)

- **Stopband Frequency Fs** (нижняя граница переходной полосы). Ниже этой частоты коэффициент передачи меньше или равен коэффициенту передачи в полосе пропускания плюс-минус пульсации, уменьшенной на ослабление в полосе задержания (stopband attenuation):

$$|K(j\omega)| [дБ] \leq PB\ gain \pm R - A, \quad \text{для } F \leq F_s.$$

Параметры для полосовых фильтров

Параметры полосовых фильтров (Bandpass Filters) иллюстрирует рис. 9.11. Основные параметры полосового фильтра:

- **Passband Gain** (коэффициент передачи в полосе пропускания) — представляет собой максимальный коэффициент передачи фильтра в пределах полосы пропускания, выраженный в дБ.
- **Passband Ripple R** (пульсации коэффициента передачи в полосе пропускания) — изменение коэффициента передачи в пределах полосы пропускания, выраженное в децибелах.
- **Stopband Attenuation A** (ослабление в полосе задержания) — это максимальный коэффициент передачи в полосе пропускания минус максимальный коэффициент передачи в полосе задержания. Ослабление всегда является положительным числом.
- **Center Frequency Fc** (центральная частота) — центральная частота полосы пропускания.

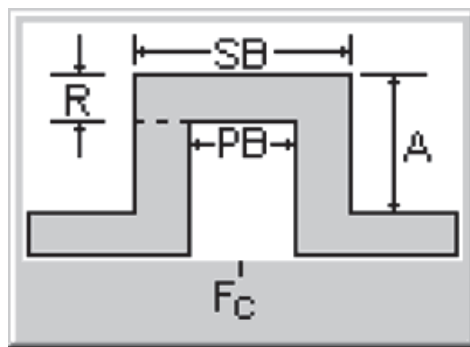


Рис. 9.11. Основные параметры полосового (Bandpass) фильтра

- **Passband PB** (полоса пропускания) — полоса частот, в которой коэффициент передачи фильтра равен passband gain плюс-минус пульсации:

$$|K(j\omega)|_{[dB]} = PB \text{ gain} \pm R.$$

- **Stopband SB** (границы полосы задержания) — это полоса частот, включающая полосу пропускания PB и две переходные области выше и ниже верхней и нижней граничных частот полосы пропускания. Также этот диапазон можно определить как область частот, в которой коэффициент передачи фильтра больше чем passband gain плюс-минус пульсации за вычетом ослабления:

$$|K(j\omega)|_{[dB]} \geq PB \text{ gain} \pm R - A.$$

Параметры для заграждающих фильтров

Параметры заграждающих фильтров (Notch Filters) иллюстрирует рис. 9.12.

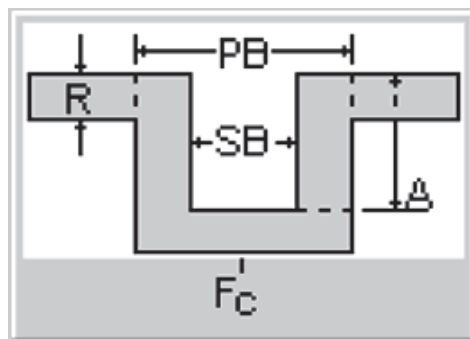


Рис. 9.12. Основные параметры заграждающего фильтра

Основные параметры заграждающего фильтра:

- **Passband Gain** (коэффициент передачи в полосах пропускания) — представляет собой максимальный коэффициент передачи фильтра за пределами полосы PB, выраженный в дБ.
- **Passband Ripple R** (пульсации коэффициента передачи в полосах пропускания) — изменение коэффициента передачи за пределами полосы PB, выраженное в децибелах.
- **Stopband Attenuation A** (ослабление в полосе задержания) — это максимальный коэффициент вне полосы PB минус максимальный коэффициент передачи в полосе задержания SB. Ослабление всегда является положительным числом.
- **Center Frequency Fc** (центральная частота) — центральная частота полосы задержания Stopband.

- **Passband PB** — полоса частот, которая включает в себя полосу частот задержания Stopband SB плюс 2 переходные области выше и ниже границ полосы задержания.
- **Stopband SB** (полоса задержания) — это полоса частот, в которой коэффициент передачи фильтра меньше чем (**Passband Gain**– $A \pm R$).

Следует отметить, что для всех типов фильтров (нижних частот, верхних частот, полосовых, заграждающих) при реализации в виде *эллиптических фильтров и фильтров Чебышева* коэффициент передачи в полосе пропускания всегда равен коэффициенту передачи на постоянном токе низкочастотного фильтра-прототипа. На границе же полосы пропускания коэффициент передачи фильтров указанных реализаций меняется в зависимости от значения порядка (четности-нечетности) для ФНЧ, ФВЧ и числа звеньев для ФПП и ФПЗ. Для четных значений порядка коэффициент передачи на границе полосы пропускания (Gain at passband edge) равен сумме коэффициента передачи ФНЧ-прототипа на постоянном токе и пульсаций коэффициента передачи, а для нечетных — разности коэффициента передачи на постоянном токе и пульсаций коэффициента передачи.

Для всех типов фильтров (нижних частот, верхних частот, полосовых, заграждающих) при реализации в виде *фильтров Баттерворта и инверсных Чебышева* коэффициент передачи на границе полосы пропускания не ниже разности коэффициента передачи на постоянном токе НЧ фильтра-прототипа и пульсаций коэффициента передачи.

Инверсные фильтры Чебышева проектируются так, чтобы соблюдалась полоса пропускания с допусками и соблюдалось точное значение полосы задержания без допусков. Идеальные реализации других фильтров проектируются в точности наоборот. Они проектируются так, чтобы соблюдалась полоса задержания с допусками и соблюдалось точное значение полосы пропускания без допусков.

9.2.4. Задание параметров фильтра в режиме Mode 2

Режим Mode 2 позволяет непосредственно указывать порядок фильтра (рис. 9.13). Формат задания следующий.

Фильтры нижних (верхних) частот:

- **Gain** — коэффициент передачи на нижних (верхних) частотах в дБ для ФНЧ и ФВЧ соответственно.
- **Passband Frequency** — частота, ниже (выше) которой, коэффициент передачи фильтра равен Gain.
- **Ripple** — изменение коэффициента передачи в дБ в пределах полосы пропускания (passband).
- **Order** — порядок фильтра.

Полосовые и заграждающие фильтры:

- **Gain** — коэффициент передачи фильтра на центральной частоте F_c в дБ для полосового фильтра или коэффициент передачи на нижних/верхних частотах для заграждающих фильтров.

- **Center Frequency** — частота, на которой достигается максимальный коэффициент передачи (для полосовых) фильтров или минимальный коэффициент передачи для заграждающих фильтров.
- **Ripple** — изменение коэффициента передачи в дБ в пределах полосы пропускания РВ для полосового фильтра или за пределами полосы задержания РВ для заграждающего фильтра.
- **Order** — порядок фильтра.
- **Q** — Q-фактор фильтра. Это мера резонансных свойств фильтра вблизи центральной частоты (добротность).

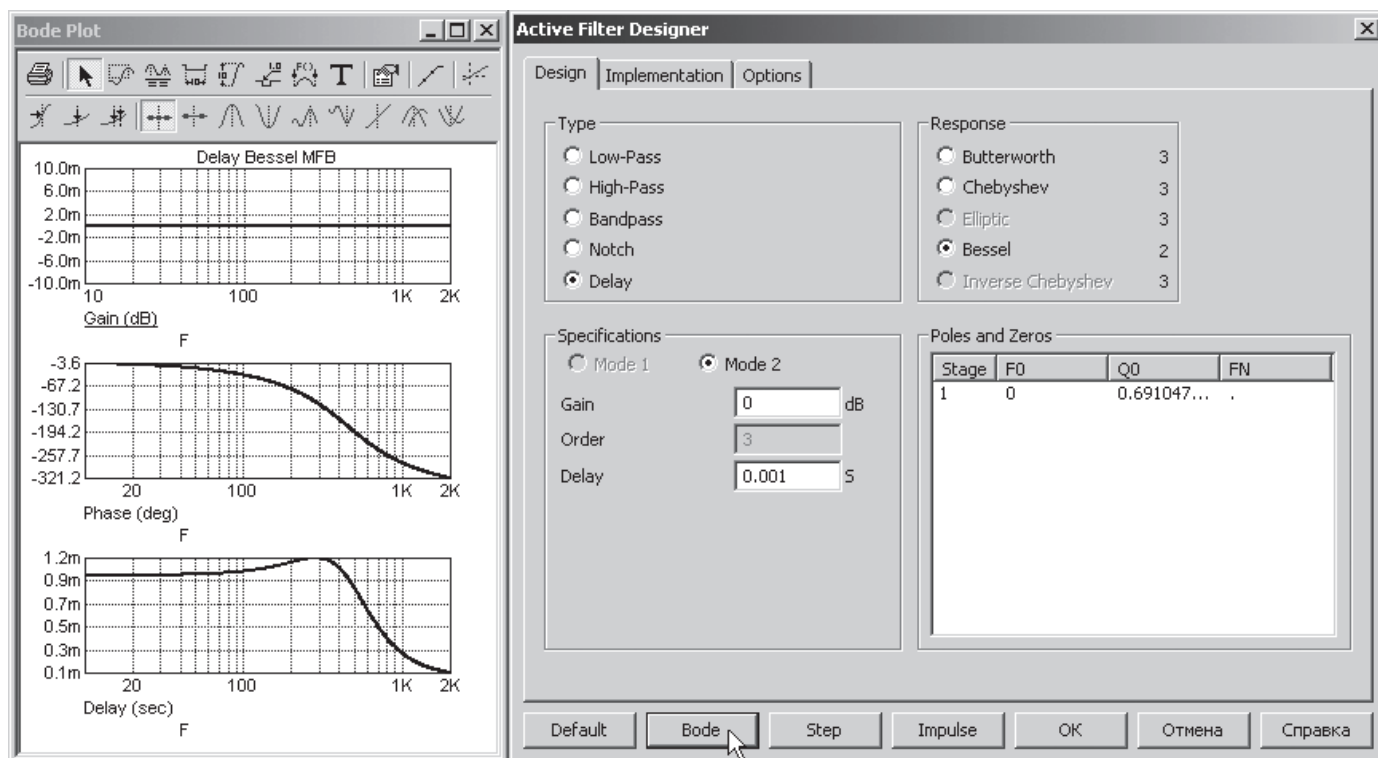


Рис. 9.13. Синтез активных фильтров в режиме Mode 2

Фильтры задержки (Delay Filters):

- **Gain** — коэффициент передачи на нижних частотах в дБ.
- **Order** — порядок фильтра, всегда равный трем для данного типа.
- **Delay** — задержка, вносимая фильтром, в секундах.

9.3. Синтез пассивных фильтров.

Синтез пассивных фильтров осуществляется аналогично синтезу активных фильтров. Соответствующий вид синтеза выбирается из пункта меню *Design*. Так же как и при синтезе активных фильтров, здесь можно выбрать тип фильтра, его основные параметры, вид амплитудно-частотной характеристики, схемную реализацию. Затем программа синтеза создаст требуемую схему фильтра.

Основные типы фильтров:

- **Low pass** (Фильтры нижних частот)
- **High pass** (Фильтры верхних частот)
- **Bandpass** (Полосовые фильтры)
- **Notch** (Заграждающие фильтры)

Типы частотных характеристик:

- Батерворта
- Чебышева
- Эллиптического фильтра (или фильтра Кауэра)

Схемные реализации фильтров могут быть двух видов:

- **Standard** (стандартная)
- **Dual** (дуальная)

9.3.1. Математическое описание фильтров

Точные математические выражения аппроксимирующих полиномов для используемых звеньев фильтров показаны ниже. Следует отметить, что U — это комплексная частота, нормированная к заданной проектировщиком характерной частоте F_C .

Принятые обозначения

F — частота

$S = j \cdot 2\pi \cdot F$ — комплексная круговая частота

$U = \frac{S}{2\pi \cdot F_C} = j \cdot \frac{F}{F_C}$ — нормированная комплексная частота

F_0 — частота полюса, Гц

Q_0 — Q-фактор

FN — частота нуля, Гц. (только для эллиптических фильтров).

F_C — верхняя граничная частота для ФНЧ. Нижняя граничная частота для ФВЧ. Средняя (центральная) частота для полосового и заграждающего фильтров. Указанная центральная частота может быть изменена незначительно программой синтеза для получения симметричной полосы пропускания/задержания. Подгонка частоты F_0 просматривается в директиве .define U... на поле схемы. Например, для фильтра Батерворта, использующего по умолчанию центральную частоту 1000 Гц, полосу пропускания 100, в действительности центральная частота 998.75 Гц.

$W_0 = F_0 / F_C$ — нормированная частота полюса.

$W_N = FN / F_C$ — нормированная частота нуля.

Передаточные функции фильтров низких частот (Low Pass)

Батерворта (Butterworth)
$$F(U) = \frac{1}{U^2 + \frac{U}{Q_0} + 1}, \quad Q_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Чебышева (Chebyshev)
$$F(U) = \frac{1}{U^2 + \frac{U \cdot W_0}{Q_0} + W_0^2}.$$

Эллиптического (Elliptic)
$$F(U) = \frac{U^2 + W_N^2}{U^2 + \frac{U \cdot W_0}{Q_0} + W_0^2}$$

Передаточные функции фильтров высоких частот (High Pass)

Батерворта (Butterworth)
$$F(U) = \frac{U^2}{U^2 + \frac{U}{Q_0} + 1} .$$

Чебышева (Chebyshev)
$$F(U) = \frac{U^2}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}} .$$

Эллиптического (Elliptic)
$$F(U) = \frac{U^2 + W_N^2}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}}$$

Передаточные функции полосовых фильтров (Bandpass)

Батерворта (Butterworth)
$$F(U) = \frac{U}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}} .$$

Чебышева (Chebyshev)
$$F(U) = \frac{U}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}} .$$

Эллиптического (Elliptic)
$$F(U) = \frac{U^2 + W_N^2}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}}$$

Передаточные функции заграждающих фильтров (Notch)

Батерворта (Butterworth)
$$F(U) = \frac{U^2 + 1}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}} .$$

Чебышева (Chebyshev)
$$F(U) = \frac{U^2 + 1}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}} .$$

Эллиптического (Elliptic)

$$F(U) = \frac{U^2 + W_N^2}{U^2 + \frac{U}{W_0 \cdot Q_0} + \frac{1}{W_0^2}}$$

9.3.2. Диалоговое окно синтеза пассивных фильтров

Функция синтеза пассивных фильтров выбирается из меню *DESIGN*. Выбор указанного пункта меню вызывает появление следующего диалогового окна (рис. 9.14).

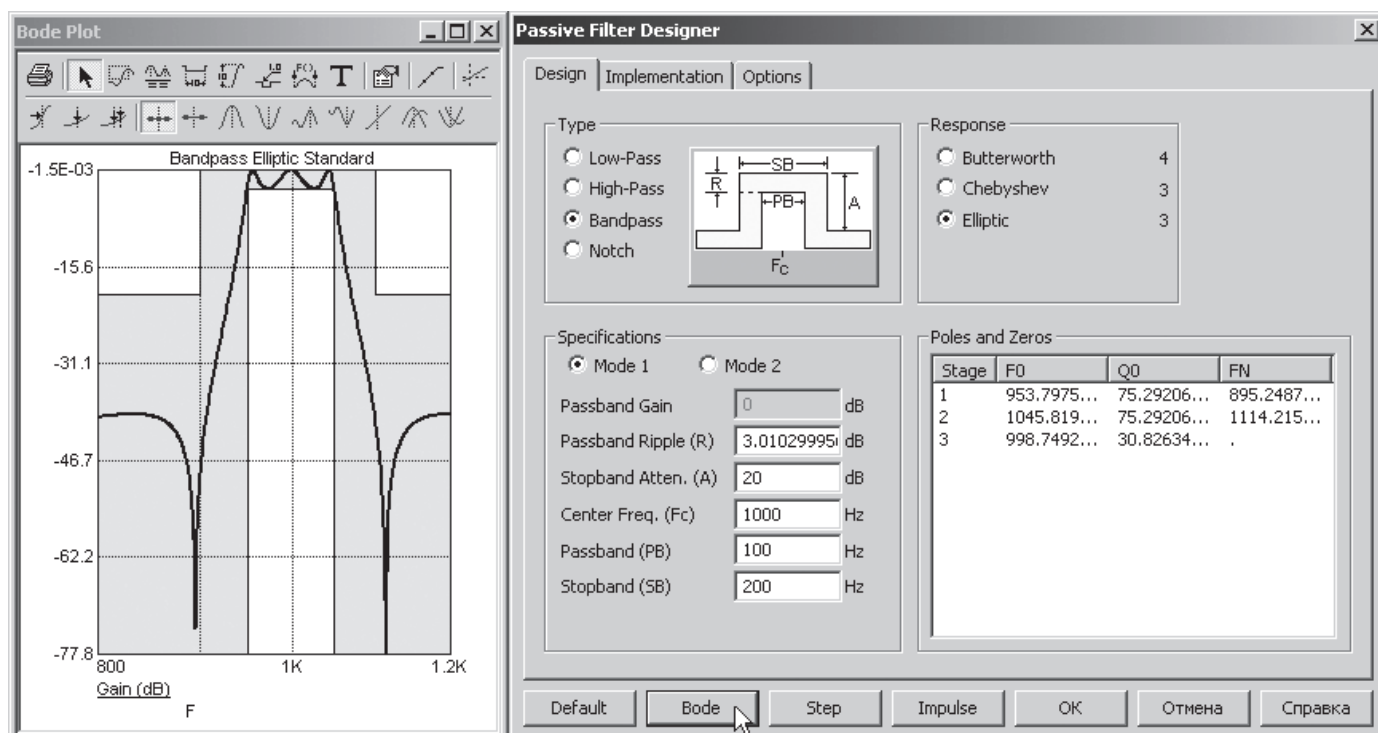


Рис. 9.14. Диалоговое окно синтеза пассивных фильтров и его закладка *Design*

Диалоговое окно имеет 3 основные закладки, доступ к которым осуществляется мышью или с помощью нажатия **<TAB>**.

Design. Эта закладка позволяет выбрать тип фильтра (ФНЧ, ФВЧ...), спецификации и тип характеристики (Батерворта, Чебышева и т.д.). Каждый раз, когда вы делаете выбор в каждой группе параметров в нижнем правом углу меняется число звеньев, расположение полюсов и нулей, величина добротности Q. Можно редактировать частоты полюсов F0 и добротность Q0 для подгонки формы частотной характеристики.

Implementation. Эта закладка позволяет выбрать реализацию пассивного фильтра, включая и используемую схему. Также она позволяет выбрать, будут ли использоваться точные значения пассивных компонентов или приближенные (в том числе и их комбинации) из стандартных рядов, надо ли производить масштабирование величин, выбирать сопротивление источника сигнала и нагрузки.

Options. В этой закладке выбирается точность и способ представления используемых пассивных компонентов, графики для построения при нажатии панели **Bode**, сохранение синтезированного фильтра в виде макромоделей или схемы, перенос результатов синтеза в текущую схему или создание новой.

Design

Закладка **Design** (рис. 9.14) содержит 3 секции:

Type: В этой секции Вы можете выбрать один из основных типов фильтров:

- Low pass (ФНЧ);
- High pass (ФВЧ);
- Bandpass (Полосовой);
- Notch (Заграждающий).

Response: В этой секции Вы можете выбрать математическую аппроксимацию идеального фильтра:

- Butterworth (Батерворта);
- Chebyshev (Чебышева);
- Elliptic (Эллиптический).

Различные аппроксимации требуют различных компромиссов при конструктивной реализации. Фильтры Батерворта требуют больших схемотехнических затрат для реализации заданных параметров, но имеет приемлемое изменение времени задержки. Аппроксимации полиномами Чебышева требуют меньшего количества звеньев, но имеют более заметные изменения времени задержки. Число звеньев для реализации фильтра показано справа от типа аппроксимации.

Specifications. Здесь вводятся численные значения параметров для выбранного фильтра. Имеются два способа задания параметров фильтра Mode 1 и Mode 2. В режиме Mode 1 указываются функциональные характеристики фильтра, такие как коэффициент передачи в полосе пропускания, частота среза, граничные частоты полос задержания F_s , ослабление в полосе задержания. Указывается весь список параметров, которые хотят получить от готового фильтра, а программа вычисляет количество звеньев фильтра, требуемых для их достижения, используя выбранную аппроксимацию. В режиме Mode 2 задаются лишь основные параметры и число звеньев.

Poles and Zeros. Эта секция показывает численные значения полюсов, нулей (для эллиптических фильтров) и добротности Q_0 выбранной полиномиальной аппроксимации. Она, в сущности, представляет математическое описание фильтра. Если вносятся изменения в поля типа фильтра (Type), аппроксимации (Response) и параметров (Specifications), то программа заново вычисляет полиномиальные коэффициенты и обновляет значения этой секции. Если с помощью нажатия соответствующих кнопок выведены графики (диаграммы Боде, переходная, импульсная характеристики) для идеального фильтра, программа также перерисовывает заново и их графики.

График является идеализированной характеристикой, поскольку он вычисляется по стандартной полиномиальной формуле для выбранной реализации, причем рассчитанные величины F_0 и Q_0 доступны для редактирования. Этот график может быть реализован в точности только при наличии совершенных компонентов. Реальный фильтр, изготовленный из реальных компонентов, может вести себя по-другому. После синтеза фильтра можно запустить анализ и посмотреть, насколько полученный фильтр соответствует

заданной характеристике. Реальная схема может быть выполнена на компонентах из ограниченного перечня стандартных катушек и конденсаторов. При этом номиналы реальных компонентов будут лишь приближенно равны рассчитанным, поэтому могут сильно изменять ход частотной характеристики синтезированного фильтра.

При нажатии кнопки **Bode** выводятся графики частотных характеристик (рис. 9.14) для коэффициента передачи, фазы и групповой задержки (в одном графическом окне или в разных окнах). Возможен вывод графика лишь одной из указанных величин при соответствующих установках в закладке *Options*.

Можно также вывести переходную и импульсную характеристики фильтра при нажатии панелей *Step* и *Impulse* соответственно (рис. 9.15).

Implementation

Эта закладка диалогового окна (рис. 9.15) позволит выбрать, как осуществить конструктивную реализацию фильтра. Она имеет несколько основных секций.

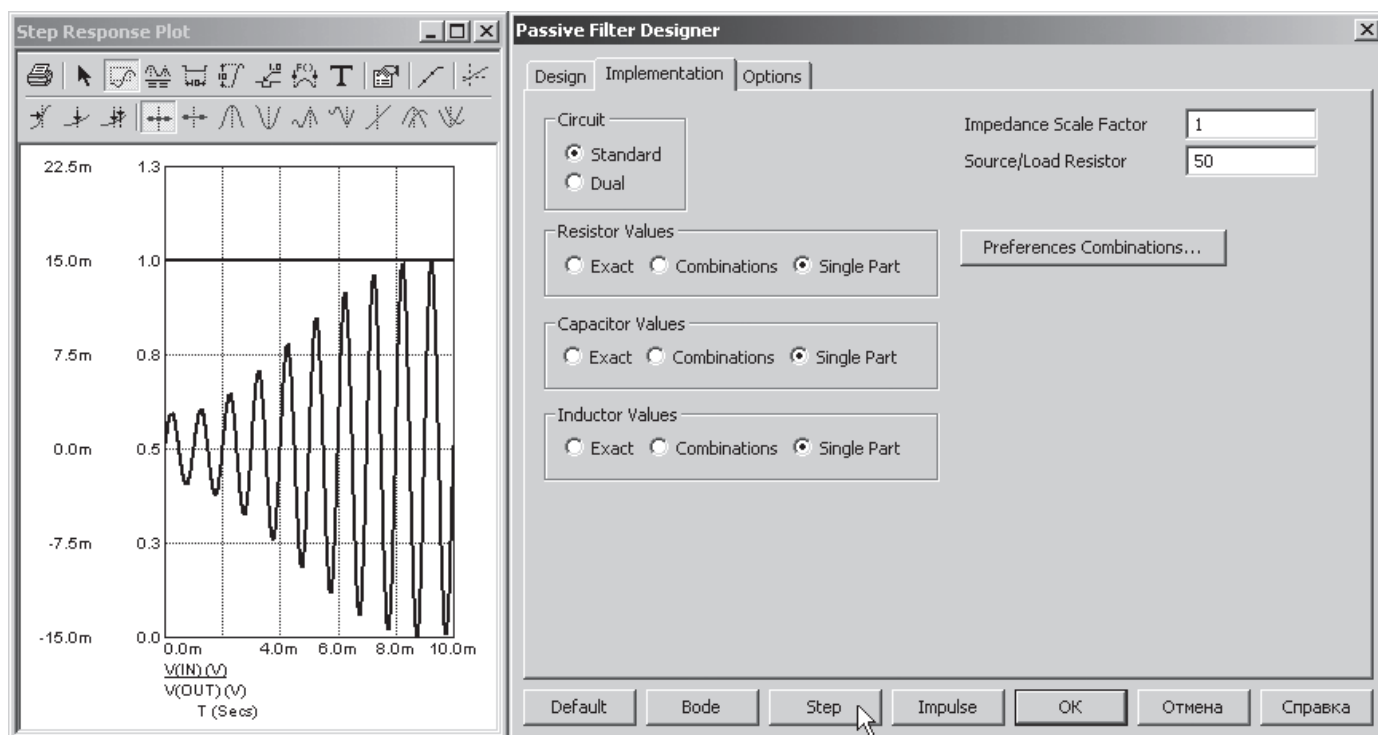


Рис. 9.15. Закладка Implementation окна синтеза пассивных фильтров

Circuit. Эта секция позволяет указать, надо ли использовать при реализации фильтра стандартные пассивные LC-цепи или их дуальные эквиваленты.

Resistor Values. Эта секция позволяет указать, следует ли использовать точные значения исходных сопротивлений или выбирать их из указанного файла, содержащего стандартные ряды. Причем во втором случае можно использовать для каждого резистора отдельный стандартный компонент (Single Part) либо их комбинацию в виде параллельно-последовательного соединения (Combinations). Это относится только к единственному номиналу исходного сопротивления, указанного в позиции *Source/Load Resistor*.

Capacitor Values. Эта секция позволяет указать, как следует выбирать конденсаторы для реализации фильтра. Работает аналогично секции *Resistor Values*.

Inductor Values. Эта секция позволяет указать, как следует выбирать катушки индуктивности для реализации фильтра. Работает аналогично секции *Resistor Values*.

Preferences Combinations. Позволяет выбрать опции при реализации фильтра на одиночных пассивных компонентах или на их комбинациях в виде последовательно-параллельного соединения. В открывающейся при нажатии на эту панель закладке пользовательских предпочтений *Preferences*, можно указать точность компонентов и файлы рядов номиналов.

Impedance Scale Factor (масштабный множитель полного импеданса). Эта секция позволяет указать масштабный множитель, применяемый ко всем величинам пассивных компонентов. На этот коэффициент умножаются сопротивления всех резисторов и индуктивности всех катушек, и делятся емкости всех конденсаторов. Коэффициент не оказывает влияния на форму частотной характеристики, а используется для подгонки величин компонентов к более подходящим практическим величинам.

Source/Load Resistor. Секция позволяет указать значение активного сопротивления источника сигнала и нагрузки для синтезируемого фильтра. Если выбрана опция *Exact* в соответствующей секции, величина сопротивления после умножения на масштабный коэффициент будет использована для резисторов в схемной реализации. Если опция *Exact* в соответствующей секции не установлена и выбирается файл с рядами резисторов, то из ряда выбирается резистор с сопротивлением наиболее близким к указанному и используется в схемной реализации.

Options

Эта закладка имеет аналогичное содержание и использование соответствующей закладке диалогового окна синтеза активных фильтров (см. рис. 9.5).

Позволяет устанавливать величины компонентов и числовой формат для коэффициентов выбранного полинома, определять какие графики строить и как, создавать ли фильтр в виде схемы или макромодели, куда помещать синтезированную схему в текущий схемный файл или в новый, добавлять ли в заголовок текст, указывающий тип полинома.

10. ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ АНАЛОГОВЫХ КОМПОНЕНТОВ MODEL

10.1. Общие сведения о программе MODEL

Программа расчета параметров математических моделей аналоговых компонентов MODEL предназначена для создания моделей полупроводниковых приборов и магнитных сердечников по экспериментальным данным или справочным материалам. Она работает в интерактивном режиме и выполняет расчет и оптимизацию параметров математических моделей по данным, введенным в табличной или графической форме. Оптимизация выполняется в MC9 с помощью прямого метода Пауэлла. MC10 предоставляет для этой цели и 3 других метода оптимизации: Левенберга-Марквардта, Хука-Дживса, дифференциальной эволюции.

При вводе графиков должны быть заданы координаты характерных точек: от двух до пяти — чем больше данных, тем точнее вычисляются параметры моделей. Если подробные данные для нескольких экспериментальных точек отсутствуют, используется единственная доступная пара данных из справочника. Необходимые данные для полупроводниковых приборов записываются в виде чисел. Если данные отсутствуют, то принимаются их значения по умолчанию. Считается, что все экспериментальные данные о параметрах компонентов измерены при комнатной температуре.

Программа MODEL вызывается командой *Model>Open* главного меню программы. Затем в открывшемся файловом окне необходимо выбрать модельный файл (с расширением *.mdl) и нажать <OK>. При использовании поставляемого варианта программы — это бинарная библиотека Small.mdl.

Также можно вызвать программу MODEL, загрузив файл с расширением *.MDL командой *File>Open>Model data(*.mdl)*

Программа MODEL сохраняет введенные пользователем паспортные данные компонентов и рассчитанные параметры математических моделей в бинарных файлах с расширением имени .MDL. Эти файлы можно загружать в программу MODEL для уточнения параметров моделей, не повторяя ввода паспортных данных, что очень удобно в процессе отладки библиотек моделей.

10.2. Интерфейс программы MODEL

После загрузки программы MODEL на экране появляется ее меню, показанное на рис. 10.1. Окно программы организует доступ ко всем функциям, необходимым для создания файлов данных, быстрого доступа к ним и оптимизации модельных параметров. Приведем краткое описание основных компонентов окна программы.

Текстовые поля — содержит четыре строки T1, T2, T3 и T4, содержание которых переносится в библиотеку моделей Micro-Cap. Строка T1 содержит имя компонента (Part name), которое используется для сортировки в каталоге библиотеки, остальные поля — комментарии с дополнительной информацией;

Таблица данных — таблица с двумя или тремя колонками для ввода значений координат характеристик электронного компонента, опубликованных в справочниках или снятых экспериментально. Количество колонок зависит от

типа компонента и характера данных. Могут быть введены координаты от одной до пяти экспериментальных точек. При полном отсутствии экспериментальных данных, поля не заполняются, в этом случае при оптимизации соответствующих параметров берутся значения полей, принятые по умолчанию;

Окно графиков характеристик модели — отображение графиков характеристик модели. На них также отмечаются точки данных, если они вводились пользователем. Близость этих точек к построенным графикам свидетельствует о точности модели. Численно значение среднеквадратического отклонения всех экспериментальных точек в процентах указывается сверху от графиков на строке *Error*. Опорные точки на этом графике можно перемещать курсором.

Поля параметров модели (Model Parameters) — таблица параметров модели, полученных в результате обработки введенных данных и оптимизации. Допускается непосредственное редактирование полей, для оценки воздействия изменения модельных параметров на ход характеристик. Так же это может быть полезно в процессе оптимизации параметров при вводе начального приближения.

Условия измерений (Measurement Conditions) — значения дополнительных параметров, при которых приведены экспериментальные данные.

10.2.1. Панель инструментов и меню программы MODEL

Ниже приведен список команд меню MODEL. Многие команды дублируются горячими клавишами и кнопками панели инструментов.

Open... (Ctrl+O) — открытие существующего файла данных с расширением имени .MDL. Также можно воспользоваться соответствующей командой меню FILE.

Merge... () — слияние содержания текущей библиотеки с файлом, находящимся на диске. Результат слияния показывается в текущем файле данных, который сохраняется на диске только по запросу пользователя (по командам Save, Save As или при выгрузке файла).

Add These Parts to the Component Library () — создание модельных директив для всех компонентов текущего файла данных, помещение их в файл с заданным именем и расширением .LIB и включение в библиотеку компонентов Micro-Cap. После этой команды компоненты с новыми моделями становятся доступными для принципиальных схем, создаваемых с помощью схемного редактора.

Sort () — сортировка компонентов текущей библиотеки по именам, указанным в текстовом поле T1 (по алфавиту и в порядке возрастания цифровых индексов).

Change Polarity — смена типа текущего полупроводникового прибора. Для биполярного транзистора меняется тип проводимости NPN-PNP, для МОП-транзистора — тип канала N или P (NMOS или PMOS).

Change Core Units (CTRL+U, ) — смена единиц системы СГС на СИ и обратно. Используется для нелинейных магнитных сердечников. Можно за-

дать единицы системы СИ: Тесла для B и А/м для H , и единицы СГС — Гаусс для B и Эрстед для H . Полученные оптимизированные параметры модели CORE всегда будут записаны в гибридной системе единиц (см. 5.2.4).

Delete Data (CTRL+D, ) — Удаление экспериментальной точки, на которую указывает курсор, из таблицы данных. Воздействует только на поля таблицы данных, не воздействует на параметры модели. Выполняется только в том случае, если курсор находится в поле таблицы данных.

Add Part () — добавление нового компонента в текущий файл модельных данных. Тип компонента выбирается из выпадающего подменю, и его данные помещаются в начало текущего модельного файла.

Delete Part () — удаление текущего компонента из файла модельных данных.

Options — основные установки программы MODEL.

- **Global Settings ()** — глобальные параметры. Процесс оптимизации прекращается, если текущие значения ошибок аппроксимации меньше заданных:

Maximum Relative Per-iteration Error — относительная разность среднеквадратических значений ошибки аппроксимации на соседних шагах оптимизации, при достижении которых оптимизация останавливается. Типичное значение от $1E-6$ до $1E-3$.

Maximum Percentage Per-iteration Error — Разность среднеквадратических значений ошибки аппроксимации на соседних шагах оптимизации в процентах, при достижении которых оптимизация останавливается. Типичное значение от $1E-6$ до $1E-3$.

Maximum Percentage Error — среднеквадратическое значение ошибки аппроксимации в процентах, при достижении которого оптимизация останавливается. Типичное значение от 0.1 до 5.

Выше приведены параметры оптимизации для метода Пауэлла, подобные параметры задаются и для других методов оптимизации, используемых в последней версии программы MC10.

- **Model Default** — установка параметров модели по умолчанию. Для всех параметра модели каждого вида (Diode, BJT, MOSFET, JFET, Oramp, Core) устанавливаются 3 значения для работы программы оптимизации: минимальное, максимальное и начальное приближение (initial). Минимальные и максимальные значения параметров используются как предельные значения при проведении оптимизации.
- **Auto Scale (F6, )** — автоматическое масштабирование графиков.
- **Manual Scale (F9)** — задание масштабов графиков по осям вручную.
- **Step Model Parameters ()** — организация пошагового изменения одного из модельных параметров. Имя варьируемой переменной и шаг изменения задаются в окне типа *Stepping*. Изменение значения

параметра на один шаг выполняется нажатием любой клавиши — результаты сразу отображаются на графиках.

View — содержит команды просмотра содержания окон характеристик текущего компонента библиотеки и выбора другого компонента из библиотеки.

- **Parts List (CTRL+L, )** — вывод диалогового окна со списками компонентов текущих открытых библиотек модельных данных. Двойной щелчок на имени компонента открывает список его параметров. С помощью команд этого окна модели компонентов можно удалять, копировать и вставлять в другое место текущей или другой открытой библиотеки. Для этого предварительно мышью выбирается один или более компонентов в списке.
- **Previous Part (CTRL+↑, )** — переход к предыдущему компоненту в списке.
- **Next Part (CTRL+↓, )** — переход к следующему компоненту в списке.
- **First Part (CTRL+HOME, )** — переход к первому компоненту в списке.
- **Last Part (CTRL+END, )** — переход к последнему компоненту в списке.
- **Previous Graph: (CTRL + ←, )** — переход к предыдущему графику текущего компонента.
- **Next Graph: (CTRL + →, )** — переход к следующему графику текущего компонента.
- **First Graph (CTRL+SHIFT + ←, )** — переход к первому графику текущего компонента
- **Last Graph: (CTRL+SHIFT+ →, )** — переход к последнему графику текущего компонента.
- **All Graphs** — одновременный показ на экране всех графиков текущего компонента.
- **One Graph at a Time** — показ только одного графика текущего компонента.

Initialize (CTRL+I, ) — присвоение параметрам модели текущего окна начальных значений (initial). Обычно выполняется перед оптимизацией параметров.

Optimize (CTRL+T, ) — оптимизация параметров модели, оцениваемых в текущем окне, путем минимизации суммы среднеквадратических отклонений от заданных точек на текущем графике.

Initialize and Optimize All — присвоение всем параметрам моделей всех неоптимизированных компонентов начальных значений и выполнение их оптимизации. Если оптимизация параметров моделей компонентов не производилась, то это удобный способ оптимизации всех модельных параметров подготовленных компонентов.

Optimize All — Оптимизация всех параметров всех неоптимизированных моделей без установки начальных значений. Если модели компонентов уже подвергались оптимизации и необходимо повысить точность подобранных параметров модели или внесены изменения в экспериментальные точки, то это удобный способ повторной уточняющей оптимизации.

В версии MC10 имеются, кроме того, команды инициализации и оптимизации всех графиков текущего компонента: **Initialize All Graphs**, **Optimize All Graphs**.

Кроме перечисленных команд меню имеются команды для работы в среде MODEL, доступные из меню **EDIT** и дублируемые кнопками на панели инструментов:

Find () — поиск строки текста в текстовых полях компонентов. Обычно используется для поиска компонента с заданным именем.

Properties (F10, ) — вызов диалогового окна *Properties* для текущего активного окна. Позволяет задавать цвет окон, шрифтовые параметры (тип шрифта, размер, цвет, начертание), набор кнопок на панели инструментов.

10.3. Работа с программой MODEL

Проиллюстрируем работу с программой MODEL на примере биполярного транзистора 2N3903, справочные данные на который взяты из руководства фирмы Motorola.

Начнем с открытия нового файла библиотеки моделей по команде *File>New>MDL*, затем следует нажать кнопку «ОК». Создастся файл данных модели MDL1.MDL. Затем следует нажать кнопку Add Part  и выбрать из раскрывающегося списка нужный тип компонента — NPN. После этого открывается окно (рис. 10.1), в котором курсор первоначально находится в первом текстовом поле T1. После этого необходимо набрать в текстовом поле T1 имя моделируемого компонента, в нашем случае это 2N3903. Следует отметить, что имя компонента следует вводить только латинскими буквами. В следующих полях можно ввести произвольные комментарии (вот здесь можно использовать и символы кириллицы).

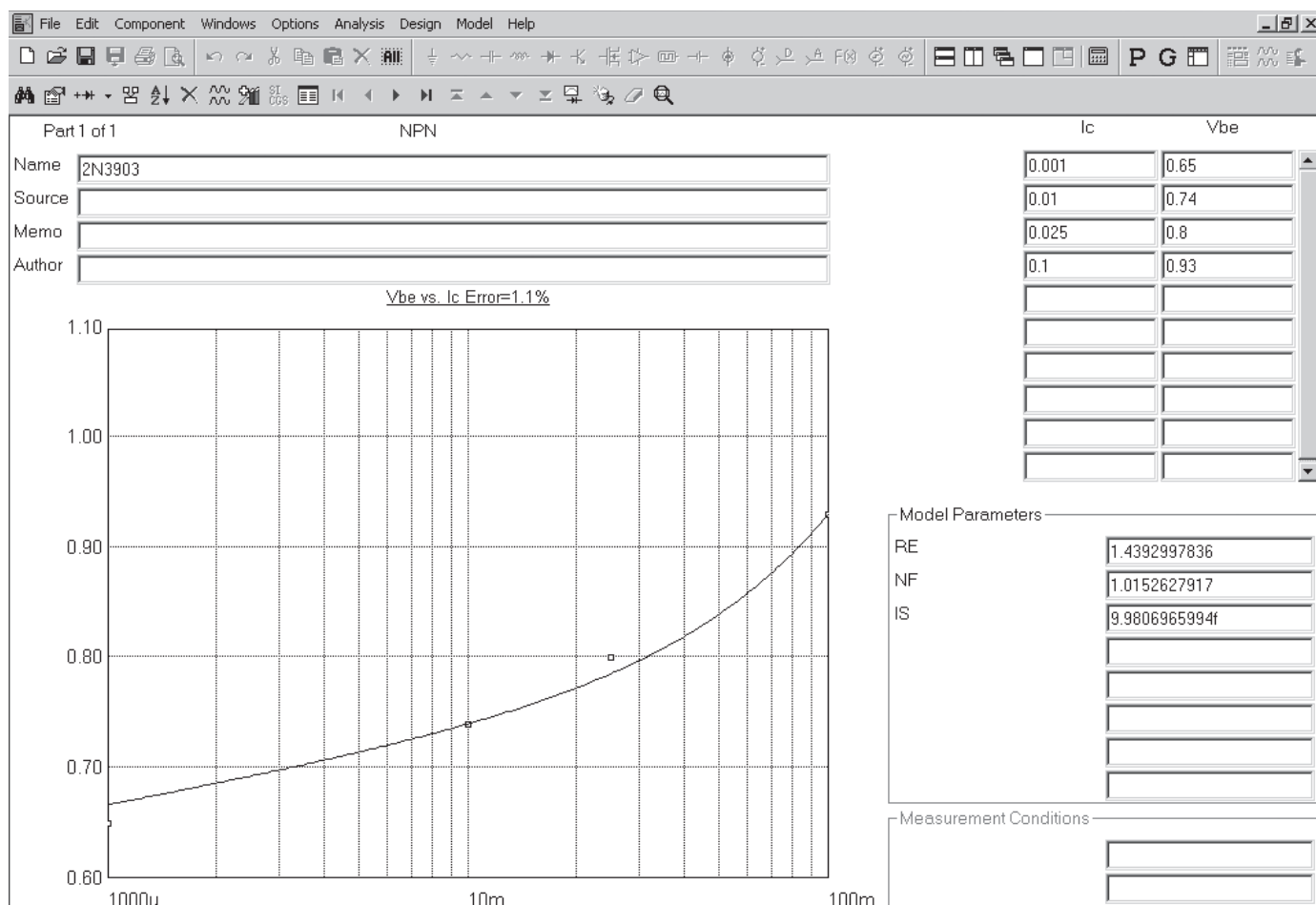


Рис. 10.1. Биполярный транзистор 2N3903. Аппроксимация зависимости напряжения база-эмиттер от тока коллектора $V_{be}(I_c)$ в режиме насыщения

При работе с первым экраном модели BJT в таблицу данных заносят значения тока коллектора I_c и напряжения база-эмиттер V_{be} в режиме насыщения:

I_c	V_{be}
.001	.65
.01	.74
.025	.80
.1	.93

Далее нажатием клавиш **Ctrl+I** () присваивают параметрам модели начальные значения (процесс инициализации) — их значения отображаются в окне *Model Parameters* (параметры модели). Следом нажатием **Ctrl+T** () выполняют оптимизацию параметров на основании введенных данных. В результате рассчитываются параметры модели **RE**, **NF** и **IS** так, чтобы график зависимости $V_{be}(I_c)$ был наиболее близок к заданным значениям, которые отмечены на рис. 10.1 прямоугольными значками. Ошибка аппроксимации составляет около 1%.

Нажатие клавиш **Ctrl+→** () открывает окно построения зависимости коэффициента передачи H-параметра H_{oe} от тока коллектора I_c . Далее необходимо ввести одну экспериментальную точку для максимального значения тока $I_c=1\text{mA}$, $H_{oe}=40\text{E-6}$ и нажать **Ctrl+T**.

Нажатие клавиш **Ctrl+→** открывает окно построения зависимости коэффициента передачи тока базы $Beta$ от тока коллектора I_c . Далее необходимо ввести таблицу координат экспериментальных точек для указанной зависимости $\beta(I_c)$ при температуре 25° из справочника:

I_c	$Beta$	I_c	$Beta$
.0001	44	.030	72
.001	77	.050	50
.005	98	.100	27
.010	100		

После ввода ряда значений I_c , $Beta$ и задания напряжения коллектор-эмиттер $V_{ce}=1.0V$ (Measurement conditions), снова выполняют команды инициализации и оптимизации **Ctrl+I**, **Ctrl+T**. В результате будет построен график зависимости $Beta(I_c)$ и рассчитаны параметры модели **NE**, **ISE**, **BF**, **IKF** с относительной среднеквадратичной ошибкой приблизительно 5%, как показано на рис. 10.2. Типичный диапазон отклонений от экспериментальных точек для этого графика от 1 до 20%.

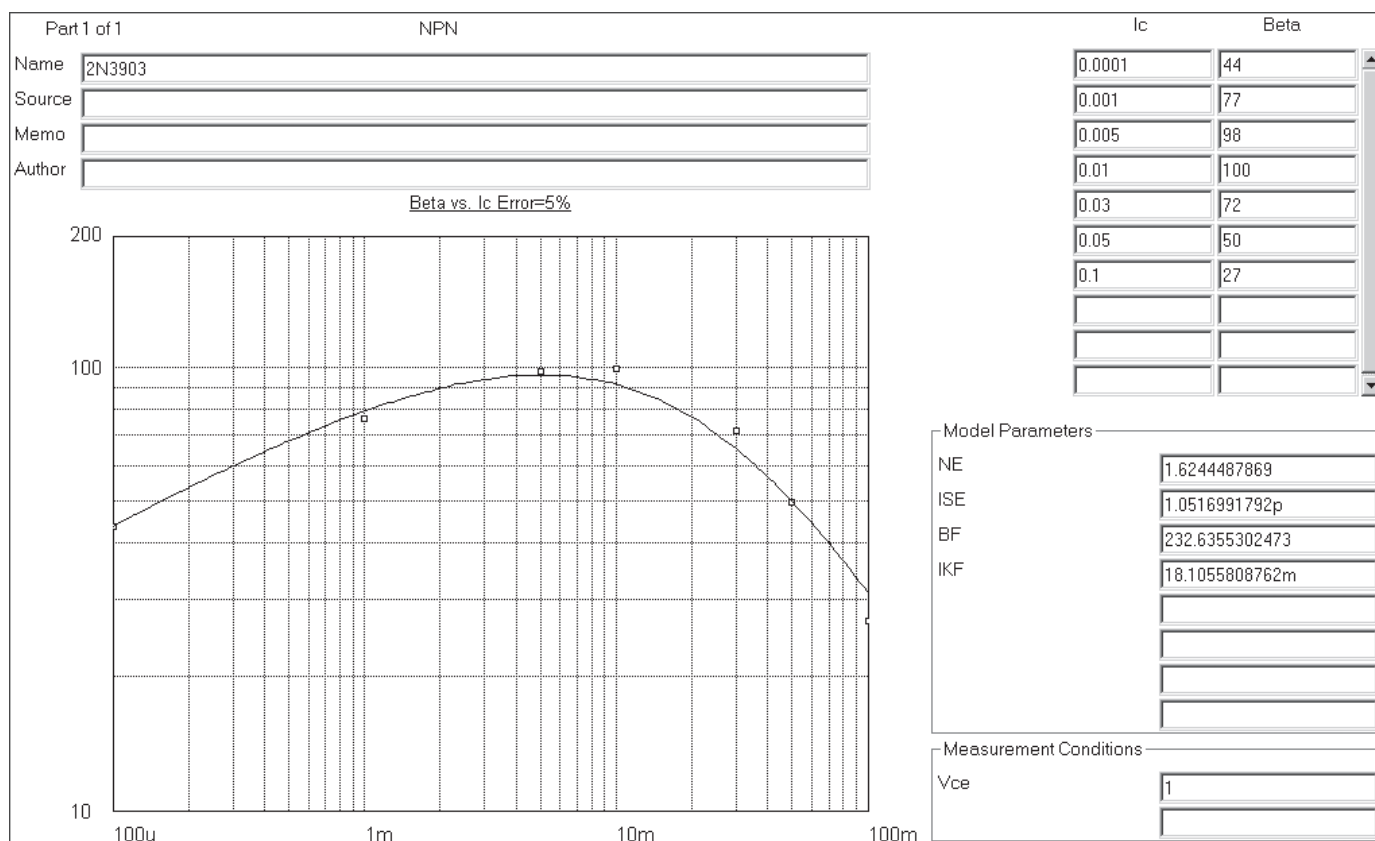


Рис. 10.2. Зависимость статического коэффициента передачи тока базы $Beta$ от тока коллектора I_c

Затем следует перейти к следующему графику, нажав **Ctrl+→** (). Появится окно графика зависимости V_{ce} от I_c . Из графиков для режима насыщения, взятых из справочных данных, вводятся следующие координаты экспериментальных точек:

I_c	V_{ce}	I_c	V_{ce}
.001	.1	.05	.2
.010	.11	.10	.35

После этого курсор устанавливается на область условий измерений и вводится значение 10 для отношения токов I_c/I_b . Последовательная инициализация и оптимизация приведут к картинке, показанной на рис. 10.3. Параметры модели **RC**, **BR**, **NC**, **ISC**, и **IKR** оптимизировались таким образом, что суммарное относительное среднеквадратическое отклонение от экспериментальных точек получилось в районе 7%. Обычно указанное отклонения для данного графика находится в диапазоне от 5% до 25%.

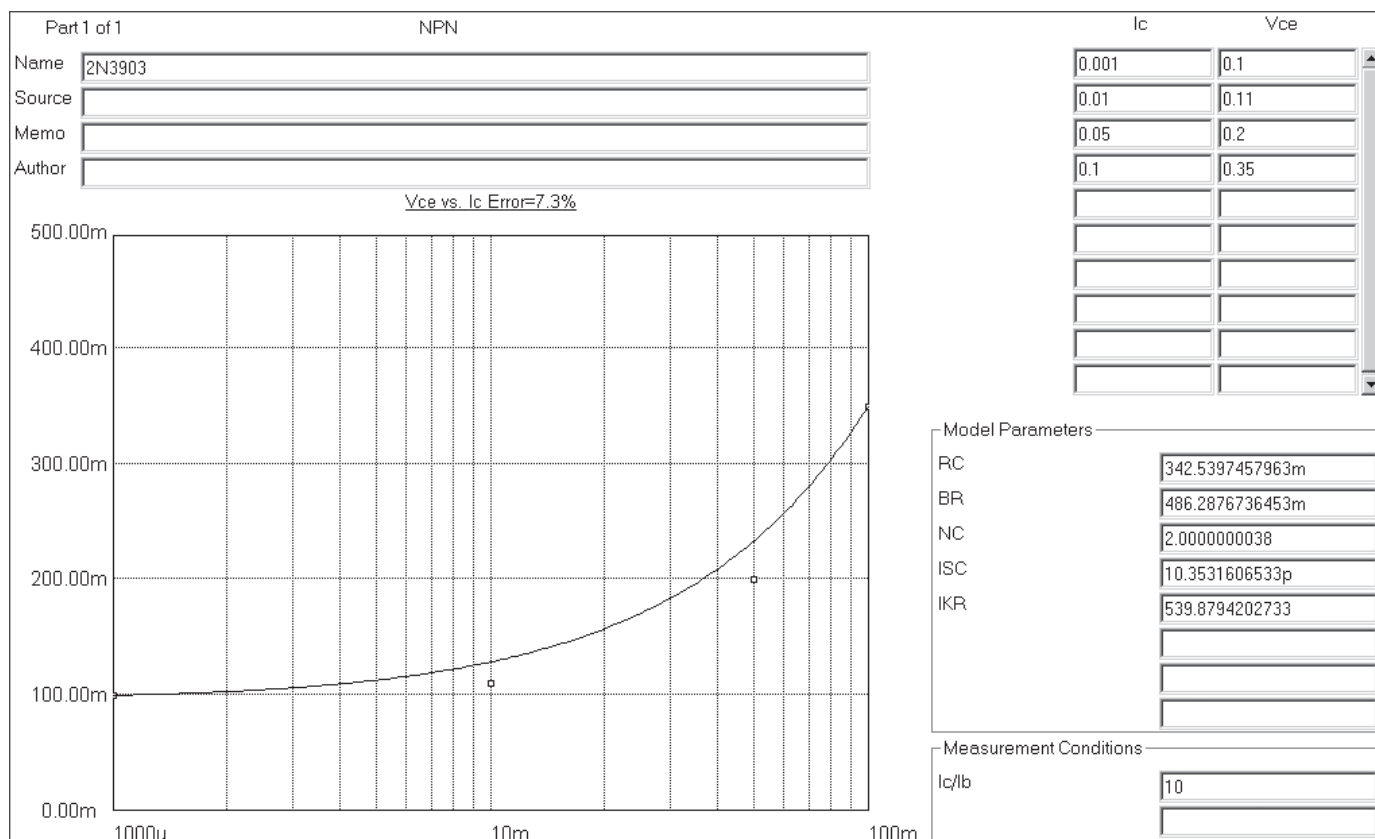


Рис. 10.3. Зависимость тока коллектора от напряжения база-эмиттер

Затем следует перейти к следующему графику, нажав **Ctrl+→** (). Появится окно графика зависимости емкости перехода база-коллектор C_{ob} от V_{cb} . Из справочника введите следующие данные:

V_{cb}	C_{ob}
0.10	3.5pf
1.00	2.7pf
10.0	1.7pf

После выполнения команд **Ctrl+I** и **Ctrl+T** программа MODEL вычисляет значения параметров **CJC**, **MJC**, **VJC**, **FC** и строит график зависимости $C_{ob}(V_{cb})$, как показано на рис. 10.4.

Далее нажатием клавиш **Ctrl+→** () переходят к окну построения зависимости барьерной емкости перехода база-эмиттер C_{ib} от напряжения смещения V_{eb} . Вводятся следующие пары экспериментальных точек из справочника:

V_{eb}	C_{ib}
.10	4.2pF
1.0	3.3pF
5.0	2.5pF

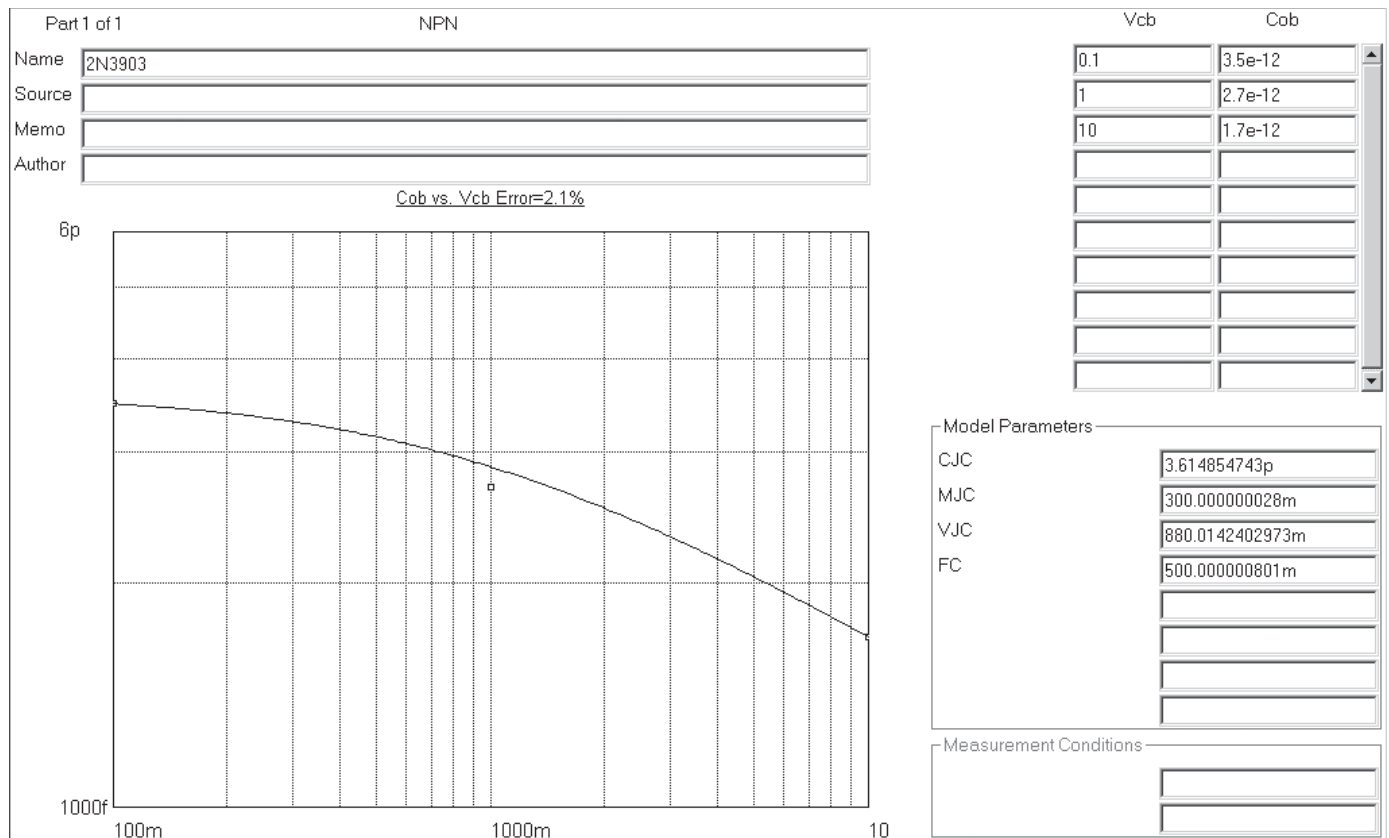


Рис. 10.4. Зависимость емкости переход коллектор-база C_{ob} от напряжения V_{cb}

После выполнения команд инициализации и оптимизации (**Ctrl+I** и **Ctrl+T**) программа MODEL вычисляет значения параметров **CJE**, **MJE**, **VJE** и строит график зависимости $C_{ib}(V_{eb})$, как показано на рис. 10.5.

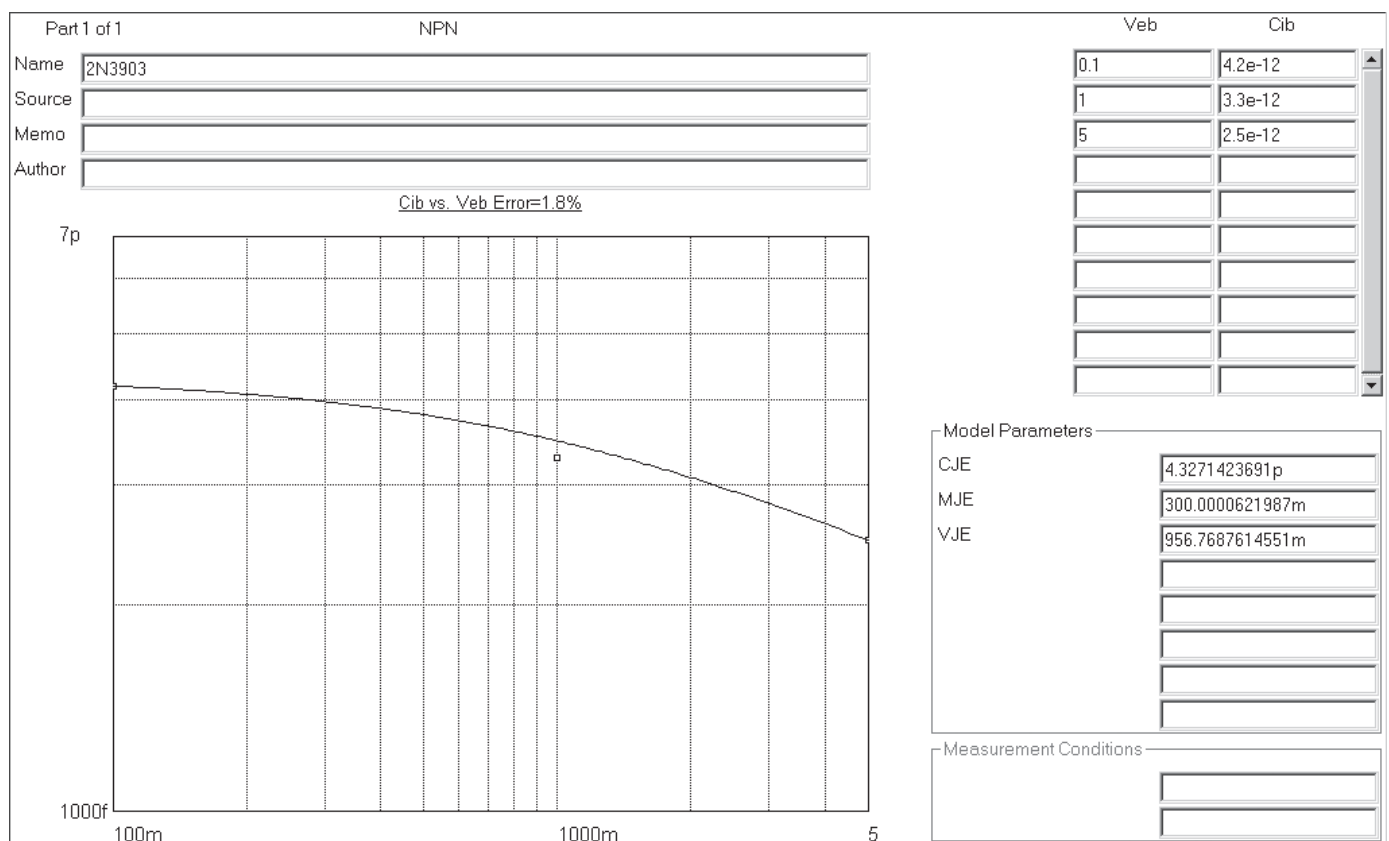


Рис. 10.5. Зависимость емкости переход эмиттер-база C_{ib} от напряжения V_{eb}

Нажатием клавиш **Ctrl+→** () переходят к окну следующего экспериментального графика — зависимости времени накопления TS от тока коллектора I_c . Далее вводятся следующие пары точек справочных экспериментальных данных:

I_c	TS
1m	100n
10m	130n
200m	53n

Затем устанавливают в позиции условий измерения значение отношения $I_c/I_b=10$ и дают команды инициализации и оптимизации. Результат должен быть таким, как показано на рис. 10.6.

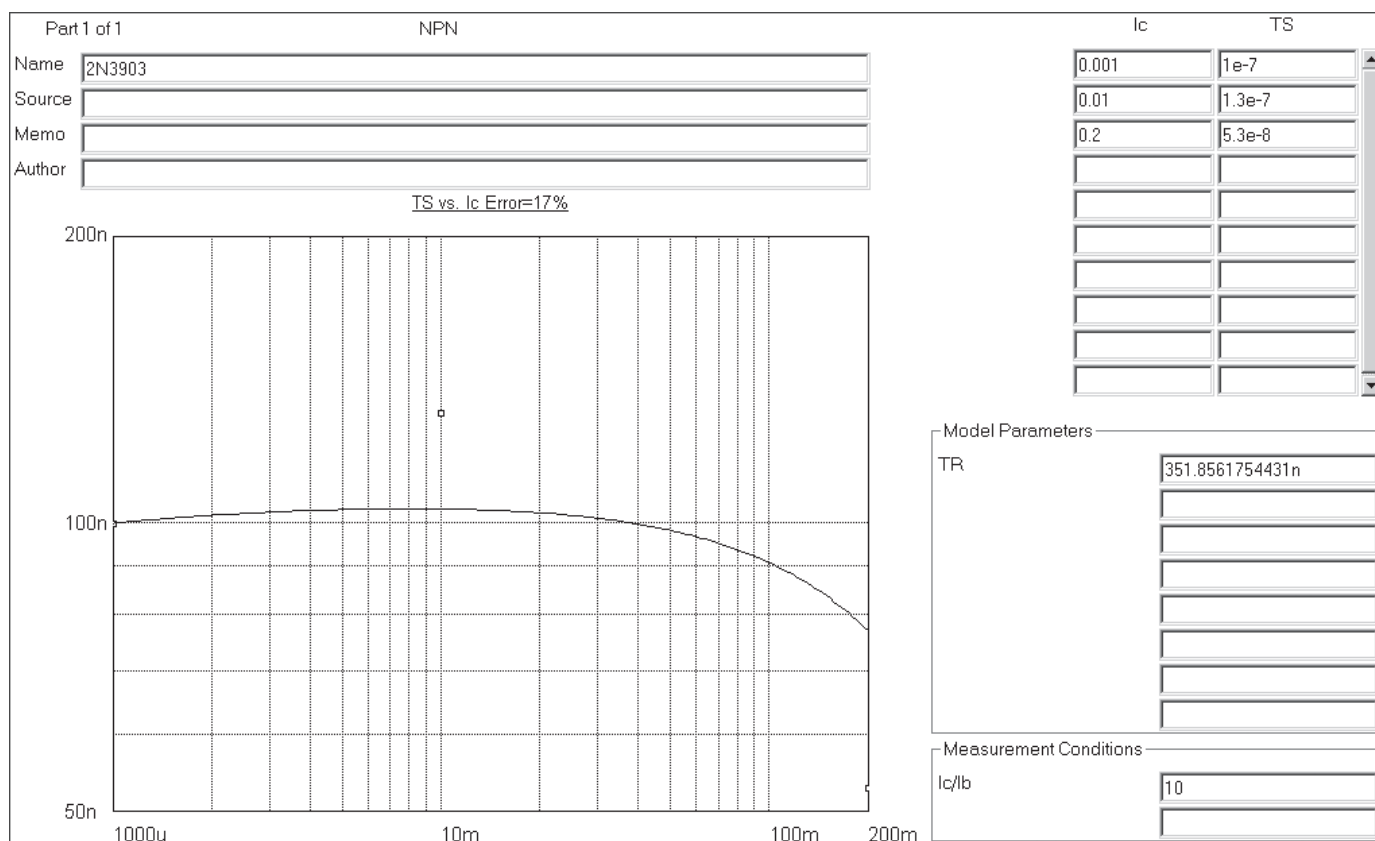


Рис. 10.6. Зависимость времени накопления TS от тока коллектора I_c

Следующий график — зависимость граничной частоты усиления тока FT от тока коллектора I_c . Для его вызова нажимают **Ctrl+→** (). Затем вводят значение справочного параметра:

I_c	FT
10m	250E6

Затем вводится значение 10 в поле V_{ce} (условия измерения), следом за этим выполняется инициализация и оптимизация, результат будет подобен показанному на рис. 10.7.

Модельные параметры **TF** и **ITF** оптимизируются с целью попадания графика в единственную экспериментальную точку. Фактически, почти всегда, используются неоптимизированные параметры **XTF** и **VTF** для большей адекватности модели реальному поведению транзистора.

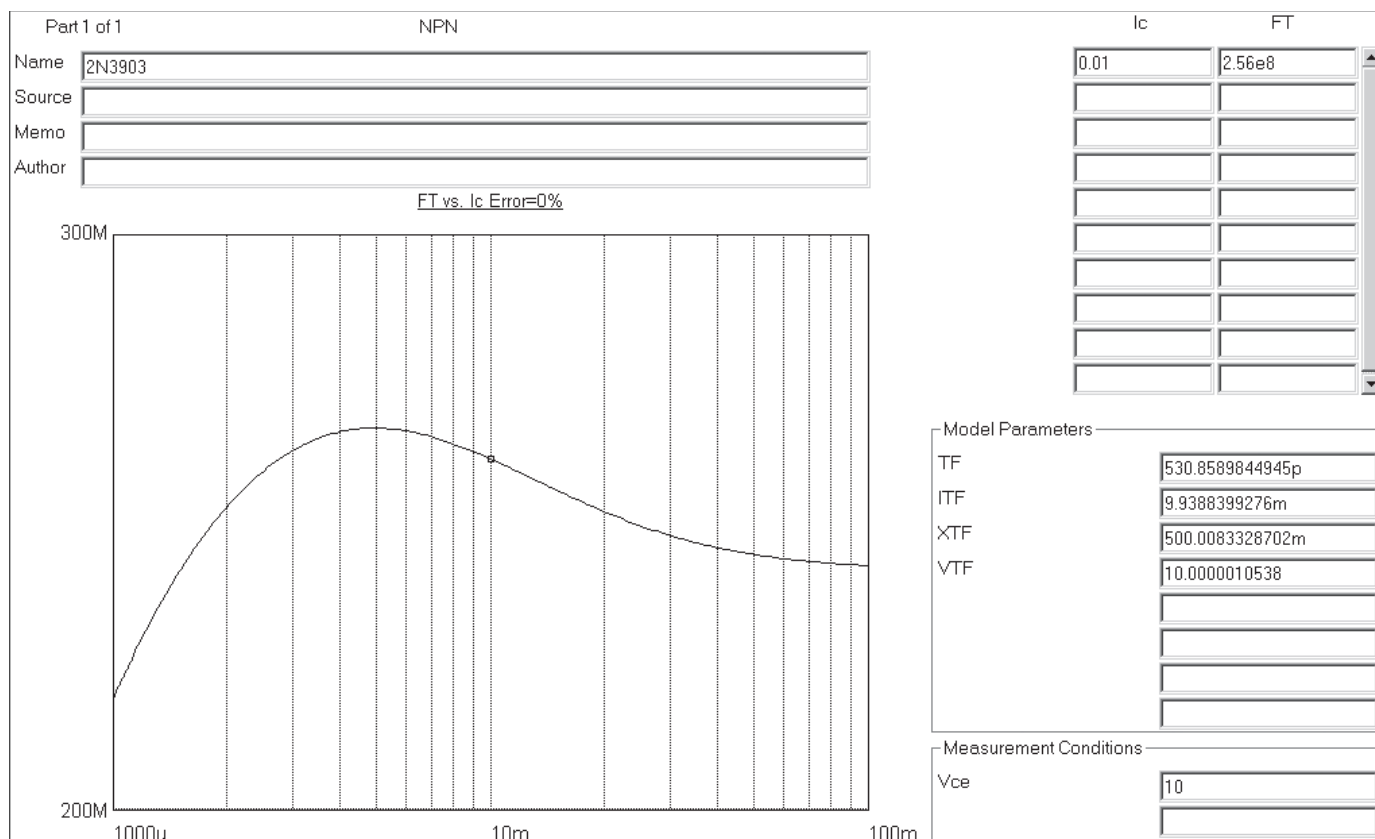


Рис. 10.7. Зависимость граничной частоты усиления тока FC от тока коллектора I_c

Транзистор в приведенном примере имел достаточно большой список экспериментальных данных. Далеко не для каждого транзистора (особенно это относится к отечественным полупроводниковым приборам) имеются подобные справочные данные.

В случае недостатка справочных данных можно дать следующие рекомендации:

1. Измерить справочные данные путем физического эксперимента на реальном приборе.
2. Для недостающих параметров использовать значения по умолчанию.
3. Использовать справочные данные от другого производителя подобного прибора с более подробными характеристиками.

В заключение оптимизации параметров модели результаты сохраняются в модельном файле с расширением *.MDL с использованием команды SAVE из меню FILE.

Заключительным шагом после достаточно точного подбора параметров модели с помощью программы MODEL может явиться добавление модели компонента в библиотеку компонентов Micro-Cap. Для этого необходимо выполнить команду *Model>Add These Parts to the Component Library*. При этом вызовется диалоговое окно, в котором следует указать путь и имя нужной библиотеки моделей. По умолчанию при нажатии «OK» используется имя текущего файла данных и расширение LIB: MDL1.LIB. После этого создается библиотечный файл и его можно использовать при моделировании в среде MC9, MC10.

Параметры других полупроводниковых приборов и нелинейного магнитного сердечника оптимизируются подобным образом. В следующей главе при описании их моделей будет приведен список графиков и оптимизируемых параметров для каждого типа модели.

11. МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ И ВЫЧИСЛЕНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ MODEL

В программе Micro-Cap в большинстве случаев используются те же математические модели полупроводниковых приборов, что и в программе PSPICE и пакете программ ORCAD [6]. При необходимости более подробную информацию о моделях активных приборов (включая специализированные модели транзисторов и диодов) можно взять из [4] (на английском языке). Описание [4] можно скачать с сайта разработчиков Micro-Cap.

Далее в этой главе приводятся перечни справочных данных для определения параметров моделей всех типов компонентов, включенных в программу MODEL, а также подробное описание их математических моделей, наиболее часто используемых в модельных библиотеках (в большинстве случаев это соответствует значению уровня модели LEVEL=1). Также приводится формат ввода компонента на языке SPICE. Последнее дается в связи с тем, что многие встроенные в программу Micro-Cap библиотеки описывают компоненты и подсистемы на языке SPICE. Для глубокого понимания результатов моделирования, часто возникает необходимость осмысленного прочтения этих библиотек.

Описываемые в настоящей главе модели имеют довольно много параметров. Для оперативной работы необходимо быстро находить параметр, редактировать его, переходить к следующему и т.д. Micro-Cap облегчает эту процедуру, позволяя с помощью панели *Find* (имеющейся в окнах атрибутов всех электронных компонентов), быстро находить необходимый модельный параметр по его имени.

11.1. Магнитный сердечник

11.1.1. Модель магнитного сердечника

Формат SPICE

K<имя> **L**<имя катушки> <**L**<имя катушки>* <коэффициент связи>

K<имя> **L**<имя катушки>* <коэффициент связи> <имя модели>

Пример:

K1 L1 L2 L3 L4 L5 L6 .98

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>

Пример:

K1

- Атрибут **INDUCTORS**: <имя катушки> <имя катушки>*

Пример:

L1 L2 L3

- Атрибут **COUPLING**: <значение коэффициента связи>

Пример:

0.99

- Атрибут **MODEL**: [имя модели]

Пример:

K_3C8

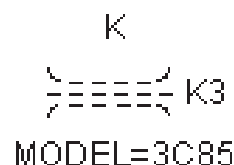


Рис. 11.1. Магнитный сердечник

На одном сердечнике помещается одна или несколько обмоток с именами Lyyy, Lzzz... Порядок перечисления имен индуктивностей Lyyy, Lzzz ... безразличен, знак взаимной индуктивности определяется положительными направлениями токов индуктивностей относительно начал обмоток. Параметром взаимной индуктивности является коэффициент связи. Все обмотки имеют одинаковое значение коэффициента связи. При хорошей магнитной связи, осуществляемой посредством замкнутого ферромагнитного сердечника, величина коэффициента связи находится в пределах 0.99...0.999. Единичное значение коэффициента связи соответствует 100%-ной магнитной связи между обмотками, что является эквивалентом отсутствия индуктивностей рассеивания. Для улучшения сходимости методов расчета между узлами начал обмоток (*plus*) всех магнитосвязанных катушек включается резистор величиной 1/GMIN.

Компонент K в обычном случае (без указания *<имени модели>* сердечника в поле атрибута MODEL) задает линейную взаимную индуктивность двух и более катушек. В этом случае в поле атрибута **INDUCTORS** должны быть указаны по крайней мере две катушки. Уравнения для моделей индуктивностей, связанных магнитно посредством линейного сердечника рассмотрены в разделе 5.2.4.

Нелинейный сердечник задается указанием в поле атрибута MODEL имени модели магнитного сердечника. В этом случае значения атрибута **INDUCTANCE** индуктивностей, связанных с сердечником, воспринимаются программой как *числа витков* соответствующих обмоток. Следовательно, в случае использования нелинейного магнитного сердечника, величина, задаваемая в позиции **INDUCTANCE** связанной с ним катушки индуктивности, не может быть выражением, а должна быть целым положительным числом. Для нелинейного магнитного сердечника в поле **INDUCTORS** должна быть указана по крайней мере одна катушка индуктивности.

Для ввода в схему одной катушки, намотанной на магнитном сердечнике (нелинейной индуктивности) необходимо выполнить следующее.

1. Поместить в схему катушку индуктивности и заполнить позиции в окне ее атрибутов, например, так:

- PART L1
- INDUCTANCE 1

Значение 1 в поле VALUE обозначает число витков катушки.

2. Ввести в схему компонент K со следующими атрибутами:

- PART K1
- INDUCTORS L1
- COUPLING 1.0
- MODEL KCORE

Шаг 2 преобразует линейную индуктивность L1 в нелинейную (связанную с нелинейным сердечником). Параметры модели нелинейного сердечника задаются модельной строкой .MODEL KCORE CORE(...). См. схемный файл *core.cir* из каталога *Components\Passive Comp* как пример задания нелинейной индуктивности и способ построения в режиме **Transient** гистерезисной зависимости B(H).

Для ввода в схему двух катушек, намотанных на магнитном сердечнике (магнитосвязанных нелинейных индуктивностей) необходимо выполнить следующее.

1. Поместить в схему 1-ю катушку индуктивности, задав ее атрибуты:

- PART L1
- INDUCTANCE <число витков первичной обмотки>

2. Поместить в схему 2-ю катушку индуктивности, задав ее атрибуты:

- PART L2
- INDUCTANCE <число витков вторичной обмотки>

3. Ввести в схему компонент K со следующими атрибутами:

- PART K1
- INDUCTORS L1 L2
- COUPLING <значение коэффициента связи обмоток> (0...1.0)
- MODEL KCORE

Указанная последовательность действий приведет к постановке в схему 2-х катушек с нелинейной магнитной связью, осуществляемой через сердечник K1. Параметры модели сердечника K1 содержатся в текстовой строке .MODEL KCORE CORE(...). Модельная строка находится в текстовой области схемы (в рассматриваемом примере) или в подключаемой библиотеке. В любом случае параметры модели индицируются в окне задания параметров

сердечника, вызываемом двойным кликом мышью в режиме Select Mode . См. схемный файл *core3.cir* из каталога *Components\Passive Comp* как пример задания нескольких катушек с нелинейной магнитной связью.

Формат текстовой директивы модели сердечника

.MODEL <имя модели> CORE([параметры модели])

Примеры:

.MODEL K1 CORE (Area=2.54 Path=.54 MS=2E5)

.MODEL K2 CORE (MS=2E5 LOT=25% GAP=.001)

Модель нелинейного магнитного сердечника представляет собой вариант модели Джилса-Атертона и имеет параметры, перечисленные в табл. 11.1.

Данная модель базируется на теории доменной структуры ферромагнетика и учитывает прогиб доменной стенки и повороты векторов намагниченности доменов при приложении к нему намагничивающей силы. Семейство петель гистерезиса при перемагничивании материала в полях с различной амплитудой напряженности магнитного поля H_m базируется на безгистерезисной кривой. Безгистерезисная кривая получается в предположении отсутствия явлений поворотов векторов и прогиба стенок доменов, связанных с потерями энергии на тепло. На самом же деле при перемагничивании ферромагнетика такие эффекты имеются, что и ведет к гистерезисным явлениям — при снятии внешнего магнитного поля намагниченность остается.

Такие необратимые эффекты в доменной структуре учитываются в модели при описании зависимости $B(H)$ дифференциальным уравнением, подобным дифференциальному уравнению сухого трения в механике, основным параметром которого является постоянная K — коэрцитивная сила (аналог

коэффициента сухого трения). В результате такой аналогии и получается гистерезисная зависимость магнитной индукции B и намагниченности M в ферромагнетике от напряженности внешнего магнитного поля H . Модель реалистично отражает поведение ферромагнитного сердечника в изменяющемся внешнем магнитном поле, однако не учитывает изменение формы петли гистерезиса в зависимости от скорости перемагничивания (частоты и формы перемагничивающего напряжения или тока). Это объясняется тем, что в дифференциальное уравнение модели Джилса-Атертона производные магнитных величин (H , B , M) по времени не входят. В реальных ферромагнетиках форма петли гистерезиса меняется с ростом частоты перемагничивающего сигнала (растет площадь петли гистерезиса), что проявляется в нелинейном росте потерь в сердечнике.

Кроме того (что более неприятно) с достаточной точностью моделируется лишь предельная симметричная петля гистерезиса, частные петли рассчитываются с большой погрешностью по площади (200–300%). Визуально это проявляется в большей прямоугольности частной модельной петли по сравнению с экспериментальной (рис. 11.2).

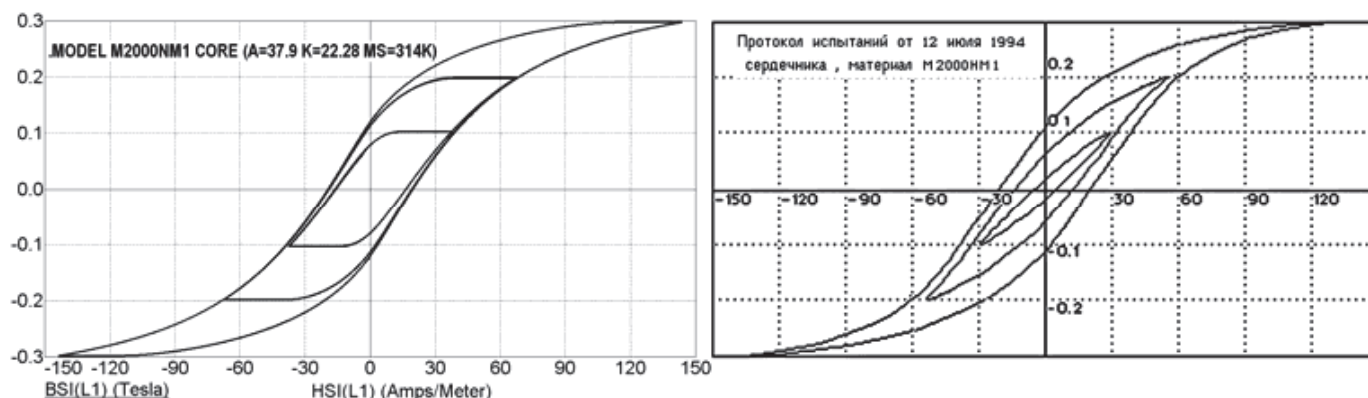


Рис. 11.2. Модельные и экспериментальные петли гистерезиса

Поэтому расчет потерь в магнитопроводе по указанной модели может оказаться очень неточным, несмотря на то, что токи и напряжения схемы будут моделироваться достоверно.

Дифференциальное уравнение модели Джилса-Атертона описывает изменение намагниченности M и магнитной индукции B в ферромагнитном сердечнике при изменении напряженности внешнего магнитного поля H . Время T в явном виде в это дифференциальное уравнение не входит. Значения напряженности магнитного поля H и магнитной индукции B , могут быть выведены в режиме анализа переходных процессов **Transient** в виде графиков зависимости их от времени. При этом программа использует зависимости, связывающие ток и напряжение обмоток сердечника с напряженностью H и индукцией B магнитного поля и точки пошагового решения дифференциального уравнения «сухого трения» (см. 11.1.3).

Построение графиков напряженности поля H и магнитной индукции B

В окне задания параметров анализа переходных процессов (**Transient Analysis Limits**) в графе Y expression можно задавать построение графиков магнитных величин в сердечнике следующим образом:

$B(L1)$ — построение графика зависимости индукции B в сердечнике катушки $L1$ в единицах системы СГС (Гауссах);

$H(L1)$ — построение графика зависимости напряженности магнитного поля H в сердечнике катушки $L1$ в единицах системы СГС (Эрстедах);

$BSI(L1)$ — построение графика зависимости индукции B в сердечнике катушки $L1$ в единицах системы СИ (Тесла);

$HSI(L1)$ — построение графика зависимости напряженности магнитного поля H в сердечнике катушки $L1$ в единицах системы СИ (А/м).

11.1.2. Параметры модели нелинейного магнитного сердечника

Для моделирования катушек с нелинейным сердечником, требуется определить параметры его модели (табл. 11.1). Для сердечников, модели которых определены в подключаемых библиотеках (их имена находятся в открываемом списке в окне задания сердечника), значения параметров показываются в нижней части окна. Если задано имя модели, которой нет в библиотеках, то ее параметрам даются значения, принятые по умолчанию. При необходимости в этом же окне их можно отредактировать.

Таблица 11.1. Параметры модели магнитного сердечника

Обозначение	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
AREA	Площадь поперечного сечения магнитопровода	см ²	1
PATH	Средняя длина магнитной силовой линии	см	1
GAP	Ширина воздушного зазора	см	0
MS	Намагниченность насыщения	А/м	$400 \cdot 10^3$
A	Параметр формы безгистерезисной кривой намагничивания	А/м	25
C	Постоянная упругого смещения доменных границ		0.001
K	Постоянная необратимой деформации доменных стенок	А/м	25

11.1.3. Основные уравнения модели нелинейного магнитного сердечника

В модели магнитного сердечника, встроенной в программу Micro-Cap безгистерезисная кривая вычисляется с использованием стандартной функции

$$M_A = \frac{MS \cdot H}{|H| + A} \quad (\text{так же как и в интегрированных пакетах программ DESIGNLAB, ORCAD}).$$

В нижеприведенных модельных уравнениях приняты следующие обозначения.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная проницаемость вакуума, Вб/(А·м);

N — количество витков выбранной обмотки сердечника;

$M_A(H)$ — зависимость безгистерезисной намагниченности от напряженности магнитного поля H (безгистерезисная кривая намагничивания), А/м

H — напряженность магнитного поля в сердечнике;

B — магнитная индукция в сердечнике;

M — намагниченность ферромагнетика сердечника, вызванная ориентацией и деформацией доменных структур, А/м;

I — ток, протекающий через выбранную обмотку сердечника, А;

V — напряжение на клеммах выбранной катушки сердечника, В;

Следует отметить, что расчеты нелинейных магнитных элементов в программе Micro-Cap осуществляются в смешанной системе единиц. Размерности геометрических параметров сердечника и параметров модели сердечника указаны в табл. 11.1. По умолчанию некоторые результаты расчетов выводятся в СИ, а некоторые в СГС: намагниченность M — в [А/м], магнитная индукция B — в [Тл], напряженность магнитного поля H — в [Э]. Исключением является явное указание единиц системы СИ в выражениях типа BSI(L1), HSI(L1). Однако при построении петли гистерезиса $B(H)$ командой PLOT в окне задания параметров магнитного сердечника используется исключительно система СГС. В промежуточных же расчетах для основных магнитных величин B и H используются единицы системы СИ: Тл и А/м соответственно, а результаты расчета автоматически переводятся программой в СГС. Поэтому для исключения путаницы в нижеследующих формулах указана размерность.

Формулы для расчета безгистерезисной кривой намагниченности $M_a(H)$

$$H = \frac{100 \cdot N \cdot I - M \cdot GAP}{PATH}, [A/m];$$

$$M_A = \frac{MS \cdot H}{|H| + A}, [A/m],$$

где I — ток, протекающий в катушке сердечника, А;

N — число витков катушки;

M — намагниченность материала сердечника в текущей точке, А/м;

GAP — ширина воздушного зазора сердечника, см;

$PATH$ — длина средней силовой линии сердечника, см.

Следует отметить, что коэффициент 100 появляется из-за перевода сантиметров в метры.

Формулы для расчета поведения нелинейной индуктивности

$$SIGN = 1, \text{ если } \frac{dH}{dt} > 0; \quad SIGN = -1, \text{ если } \frac{dH}{dt} \leq 0$$

Основное дифференциальное уравнение Джилса-Атертона, связывающее изменение намагниченности с величиной напряженности H и предысторией системы:

$$\mu - 1 = \frac{dM}{dH} = \frac{(M_A - M) \cdot Sign}{K \cdot (1 + C)} + \frac{C}{1 + C} \cdot \frac{dM_A}{dH} \quad (11.1)$$

$$B = \mu_0 \cdot (H + M), \text{ [Тл]}.$$

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \left(1 + \frac{dM}{dH}\right) \cdot N^2 \cdot AREA}{100 \cdot PATH}, \text{ [Гн]}; \quad V = L \frac{dI}{dt}, \text{ [В]}.$$

Переход от значений в системе СИ к значениям в системе СГС осуществляется с использованием соотношений:

$$1 \text{ Э} = \frac{10^3}{4\pi} \frac{\text{А}}{\text{м}}; \quad 1 \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{4\pi}{10^3} \text{ Э}; \quad 1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}.$$

Следует отметить, что согласно [6] по уравнению (11.1) ведется расчет процессов в программе PSPICE и в интегрированном пакете DESIGNLAB 8.0. Однако на самом деле это не так. Авторами проведена серия экспериментов, в результате которых установлено, что на самом деле в указанных программах решается дифференциальное уравнение «сухого трения» следующего вида:

$$\mu = \frac{dM}{dH} = \frac{(M_A - M) \cdot \text{Sign}}{K} + \frac{C}{1 + C} \cdot \frac{dM_A}{dH}. \quad (11.2)$$

Сравнивая (11.1) и (11.2) можно видеть, что при определенном сочетании параметров модели, а именно при C близком к единице, возможно сильное расхождение результатов расчета.

Таким образом, следует проявлять определенную предусмотрительность и осторожность при переносе моделей сердечников из одной системы моделирования в другую.

11.1.4. Определение параметров модели в программе MODEL

Для вычисления параметров модели магнитного сердечника по справочным данным используется программа MODEL (рис. 11.2). Программа подбирает значения параметров модели магнитного сердечника MS , A , C и K по экспериментальным данным (начальной кривой намагничивания и петле гистерезиса).

Параметры модели **AREA** (площадь поперечного сечения), **PATH** (средняя длина линии силовой магнитного поля в сердечнике) и **GAP** (ширина немагнитного зазора) вводятся согласно справочным данным на сердечник.

Многие справочные издания приводят величину магнитной индукции насыщения $BSAT$ в гауссах. Для пересчета указанного справочного параметра в значение намагниченности насыщения MS требуется $BSAT$ в Гауссах разделить на 79.577. Полученное значение будет приближенной величиной намагниченности насыщения в А/м. Переключение системы единиц для ввода экспериментальных точек осуществляется нажатием **Ctrl+U**.

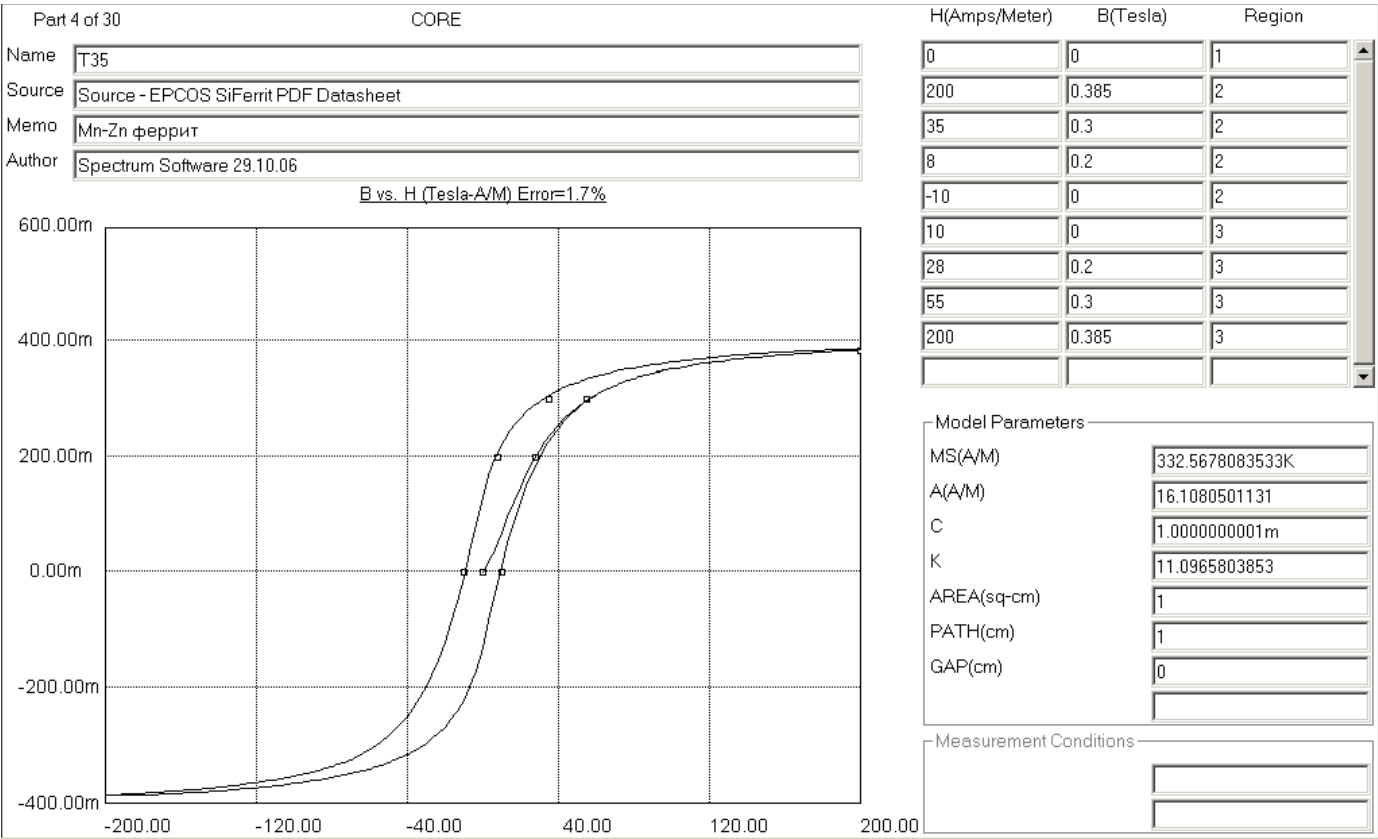


Рис. 11.3. Экран программы Model при оптимизации параметров модели сердечника

Таблица 11.2. Нахождение параметров модели сердечника. Петля гистерезиса и кривые намагничивания Core B-H

Входные данные	Таблица значений H, B с указанием области петли гистерезиса Region
Оцениваемые параметры	MS, A, C, K
Уравнения	Уравнения Джилса-Атертона модели сердечника
Комментарии	Экспериментальные точки петли гистерезиса могут вводиться в двух системах единиц. В системе СИ напряженность магнитного поля H указывается в А/м, магнитная индукция B в Тесла; в системе СГС напряженность магнитного поля H указывается в Эрстедах, магнитная индукция B в Гауссах. Систему единиц можно переключать командой меню <i>Model>Change Core Units</i> (Ctrl+U). Параметр Region принимает значения 1, 2 и 3. Значение 1 соответствует начальной кривой намагничивания при изменении H от 0 до Hmax; значение 2 — верхнему участку петли гистерезиса при изменении H от Hmax до -Hmax; значение 3 — нижнему участку петли гистерезиса при изменении H от -Hmax до Hmax. Для повышения точности результатов на всех участках задается одинаковое число точек. Параметры геометрии сердечника AREA, PATH и GAP указываются пользователем. Если экспериментальные точки начальной кривой намагничивания неизвестны, сразу вводятся точки для областей 2 и 3, для области 1 вводится единственная точка с координатами (0, 0) (см. рис. 11.3)

11.2. Диод и стабилитрон

11.2.1. Модель диода (Diode) и стабилитрона (Zener)

Формат SPICE

D<имя> <анод> <катод> <имя модели> [area] [OFF] [IC=<напряжение на диоде>]

Пример:

D1 7 8 1N914 1.0 OFF IC=.001

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART** <имя>

Пример:

D1

- Атрибут **VALUE** [area] [OFF] [IC=<Vd>]

Пример:

10.0 OFF IC=0.65

- Атрибут **MODEL** <имя модели>

Пример:

1N914

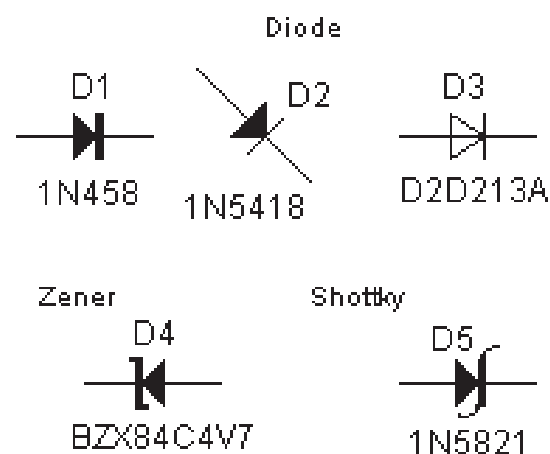


Рис. 11.4. Диоды, стабилитроны, диоды Шоттки

На масштабный множитель [area] умножаются или делятся модельные параметры, как показано в табл. 11.3. Наличие ключевого слова **OFF** приводит к отключению диода в течение первой итерации расчета режима по постоянному току. Необязательное начальное условие [IC=<Vd>] приводит к установке начального напряжения на диоде при расчете переходных процессов, если флажок *Operating Point* сброшен.

Формат текстовой директивы модели диода:

.MODEL <имя модели> D ([параметры модели]).

Пример:

.MODEL 1N4434 D (IS=1E-16 RS=0.55 TT=5N)

11.2.2. Параметры модели диода

Модель диода представляет собой стандартную PSPICE-модель с добавочным линейным сопротивлением, подсоединенным параллельно, учитывающим явления утечки (см. рис. 11.4).

Таблица 11.3. Параметры модели диода

Обозначение	Содержание	Значение по умолчанию	Единица измерения	AREA
Level	Тип модели: 1 — SPICE2G, 2 — PSPICE	1	—	
IS	Ток насыщения при температуре 27°C	10^{-14}	A	×
N	Коэффициент эмиссии (неидеальности)	1	—	
ISR	Параметр тока рекомбинации	0	A	×

Окончание табл. 11.3

Обозначение	Содержание	Значение по умолчанию	Единица измерения	AREA
NR	Коэффициент эмиссии (неидеальности) для тока ISR	2		
IKF	Предельный ток при высоком уровне инжекции	∞	A	×
BV	Обратное напряжение пробоя (положительная величина)	∞	B	
IBV	Начальный ток пробоя, соответствующий напряжению BV (положительная величина)	10^{-10}	A	×
NBV	Коэффициент неидеальности на участке пробоя	1	—	
IBVL	Начальный ток пробоя низкого уровня	0	A	×
NBVL	Коэффициент неидеальности на участке пробоя низкого уровня	1	—	
RS	Объемное сопротивление	0	Ом	/
TT	Время переноса заряда	0	с	
CJO	Барьерная емкость при нулевом смещении	0	Ф	×
VJ	Контактная разность потенциалов	1	B	
M	Коэффициент плавности р-п перехода (1/2 — для резкого, 1/3 — плавного)	0.5	—	
FC	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода	0.5	—	
EG	Ширина запрещенной зоны	1.11	эВ	
XTI	Температурный экспоненциальный коэффициент тока насыщения IS	3	—	
TIKF	Линейный температурный коэффициент IKF	0	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	
TBV1	Линейный температурный коэффициент BV	0	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	
TBV2	Квадратичный температурный коэффициент BV	0	$^{\circ}\text{C}^{-2}$	
TRS1	Линейный температурный коэффициент RS	0	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	
TRS2	Квадратичный температурный коэффициент RS	0	$^{\circ}\text{C}^{-2}$	
KF	Коэффициент фликкер-шума	0	—	
AF	Показатель степени в формуле фликкер-шума	1	—	
RL	Сопротивление утечки перехода	∞	Ом	
T_MEASURED	Температура измерений	—	$^{\circ}\text{C}$	
T_ABS	Абсолютная температура	—	$^{\circ}\text{C}$	
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	—	$^{\circ}\text{C}$	
T_REL_LOCAL	Разность между температурой диода и модели-прототипа АКО	—	$^{\circ}\text{C}$	

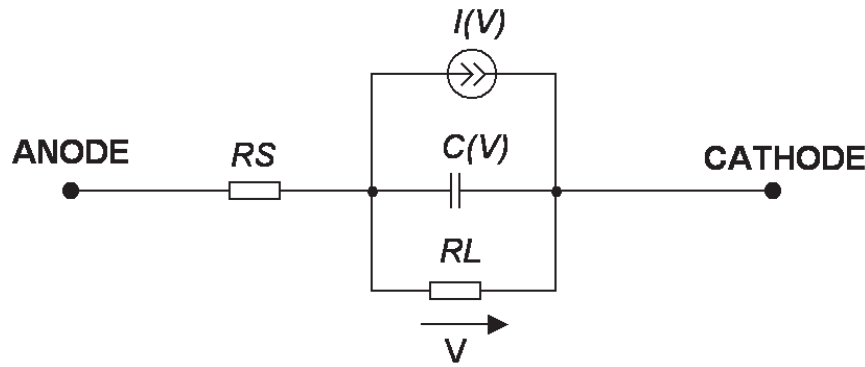


Рис. 11.5. Эквивалентная схема модели диода

11.2.3. Основные уравнения работы диода в программе

Модельные параметры **IS**, **ISR**, **IKF**, **IBV**, **IBVL**, и **CJO** умножаются на **[area]** а модельный параметр **RS** делится на **[area]** перед их использованием в модельных уравнениях диода, приведенных ниже.

T — это температура работы прибора, а **TNOM** — это температура, при которой измерены модельные параметры. Обе температуры измеряются в градусах Кельвина. Температура при которой происходит анализ **T** устанавливается в диалоговом окне *Analysis Limits* для соответствующего вида анализа. **TNOM** определяется глобальными установками *Global Settings* в позиции **TNOM**. Установка **TNOM** также может быть изменена локально для конкретной схемы с помощью директивы **.OPTIONS**. Также **T** и **TNOM** могут быть изменены для каждой конкретной модели указанием численных значений параметров модели **T_MEASURED**, **T_ABS**, **T_REL_GLOBAL**, и **T_REL_LOCAL** (см. 4.9, описание директивы **.MODEL**).

Температурные эффекты диода

$$VT = \frac{k \cdot T}{q} = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot T}{1.602 \cdot 10^{-19}} ;$$

$$IS(T) = IS \cdot e^{\left(\frac{T}{Tnom} - 1\right) \cdot \frac{Eg}{VT \cdot N}} \cdot \left(\frac{T}{Tnom}\right)^{\frac{XTI}{N}} ;$$

$$ISR(T) = Isr \cdot e^{\left(\frac{T}{Tnom} - 1\right) \cdot \frac{Eg}{VT \cdot NR}} \cdot \left(\frac{T}{Tnom}\right)^{\frac{XTI}{NR}} ;$$

$$IKF(T) = IKF \cdot (1 + TIKF \cdot (T - Tnom))$$

$$BV(T) = BV \cdot (1 + TBV1 \cdot (T - Tnom) + TBV2 \cdot (T - Tnom)^2) ;$$

$$RS(T) = RS \cdot (1 + TRS1 \cdot (T - Tnom) + TRS2 \cdot (T - Tnom)^2) ;$$

$$VJ(T) = VJ \cdot \frac{T}{Tnom} - 3 \cdot VT \cdot \ln\left(\frac{T}{Tnom}\right) - EG(Tnom) \cdot \frac{T}{Tnom} + EG(T) ,$$

где $EG(T) = 1.17 - \frac{0.000702 \cdot T^2}{T + 1108} ; \quad EG(Tnom) = 1.17 - \frac{0.000702 \cdot Tnom^2}{Tnom + 1108} .$

$$CJO(T) = CJO \cdot \left[1 + M \cdot \left(0.0004 \cdot (T - T_{nom}) + \left(1 - \frac{VJ(T)}{VJ} \right) \right) \right].$$

Уравнения для источников тока диода

$$I = I_{fwd} - I_{rev}$$

$$I_{nrm} = IS(T) \cdot (e^{\frac{V}{VT \cdot N}} - 1)$$

Если $IKF > 0$ $K_{inj} = \left(\frac{IKF}{IKF + I_{nrm}} \right)^{\frac{1}{2}}.$

Иначе $K_{inj} = 1$

$$I_{rec} = ISR(T) \cdot (e^{\frac{V}{VT \cdot NR}} - 1)$$

$$K_{gen} = \left[\left(1 - \frac{V}{VJ(T)} \right)^2 + 0.005 \right]^{\frac{M}{2}}$$

$$I_{rev} = IBV(T) \cdot (e^{-\frac{V+BV}{VT \cdot NBV}} - 1) + IBVL(T) \cdot (e^{-\frac{V+BV}{VT \cdot NBVL}} - 1)$$

$$I_{fwd} = K_{inj} \cdot I_{nrm} + K_{gen} \cdot I_{rec}$$

Уравнения для емкостей диода

Емкость, зависящая от времени пролета (Transit Time capacitance, или диффузионная ёмкость)

$$CT = TT \cdot Gd,$$

где Gd — дифференциальная проводимость диода на постоянном токе

Если $V \leq FC \cdot VJ(T)$, то $CJ = CJO(T) \cdot \left[1 - \frac{V}{VJ(T)} \right]^{-M}.$

Иначе $CJ = CJO(T) \cdot [1 - FC]^{-(1+M)} \cdot \left[1 - FC \cdot (1 + M) + M \cdot \frac{V}{VJ(T)} \right].$

$$C = CT + CJ$$

Уравнения для шумов диода

Источники тока диода генерируют дробовой и фликкер шумы. Резисторы **RS** и **RL** генерируют тепловой шум. Шумовые токи могут быть рассчитаны следующим образом:

$$I_{RS} = \left[\frac{4kT}{RS} \right]^{0.5}; \quad I_{RL} = \left[\frac{4kT}{RL} \right]^{0.5}; \quad I_I = \left[2 \cdot q \cdot I + \frac{KF \cdot I^{AF}}{Frequency} \right]^{0.5}.$$

11.2.4. Нахождение параметров модели диода

Таблица 11.4. Экраны программы MODEL для нахождения параметров модели диода

Прямая ветвь вольтамперной характеристики If vs. Vf	
Входные данные	Таблица значений I_f , V_f (используются данные для больших и малых токов)
Оцениваемые параметры	IS, N, RS
Уравнения	$V_f = V_T \cdot \ln\left(\frac{I_f}{IS}\right) + I_f \cdot RS$
Комментарии	Данные для малых токов диода I_f определяют значения параметров IS , N , больших токов — сопротивление RS
Барьерная емкость перехода Cj vs. Vr	
Входные данные	Таблица значений C_j , V_r (зависимость барьерной емкости от обратного напряжения на диоде)
Оцениваемые параметры	CJO, M, VJ, FC
Барьерная емкость перехода Cj vs. Vr	
Уравнения	$C_j = \frac{CJO}{\left(1 + \frac{V_r}{VJ}\right)^M}$
Комментарии	Напряжение обратного смещения V_r всегда положительно. Параметры EG , XTI назначаются по умолчанию
Обратная ветвь вольтамперной характеристики Id vs Vrev	
Входные данные	Таблица значений I_{rev} , V_{rev} (обратная ВАХ диода)
Оцениваемые параметры	RL
Уравнения	$I_{rev} = \frac{V_{rev}}{RL}$
Комментарии	Сопротивление RL моделирует утечку закрытого диода, напряжение пробоя BV устанавливается по умолчанию (оно редактируется пользователем) и участок пробоя на графиках учитываться не должен
Рассасывание носителей заряда Trr vs. Ir/I _f ratio	
Входные данные	Таблица значений T_{rr} , I_r/I_f (зависимость времени рассасывания от отношения прямого и обратного токов диода)
Оцениваемые параметры	TT
Уравнения	$T_{rr} = TT \cdot \log\left(1 + \frac{I_f}{I_r}\right)$
Комментарии	Среднее время пролета TT оценивается на основе зависимости времени рассасывания T_{rr} от отношения обратного и прямого тока I_r/I_f , при котором оно измерялось

Следует отметить что Micro-Cap понимает также модели диода *JUNCAP* (Level 4) и *JUNCAP2* (Level 200), которые используются в новых моделях МДП-транзистора фирмы Philips — так называемых Philips Model 11, 20, 31, и 40. Модель МДП-транзистора PSP MOSFET использует свою собственную встроенную модель диода *JUNCAP2*.

Модель диода *JUNCAP2* — это модель рп-перехода в составе MOSFET-структуры, которая учитывает емкость в режиме обеднения, токи Шокли-Рида-Холла, механизм ловушечного и межзонного туннелирования, лавинный пробой, дробовой шум.

11.3. Биполярные транзисторы BJT

11.3.1. Модель биполярного транзистора BJT

Формат SPICE

Q<имя> <коллектор> <база> <эмиттер> [подложка]
+<имя модели> [area] [OFF] [IC=<vbe>[,vce]]

Примеры:

Q1 5 7 9 2N3904 1 OFF IC=0.65,0.35

Q2 5 7 9 20 2N3904 2.0

Q3 C 20 OUT [SUBS] 2N3904

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART** <имя>

Пример:

Q1

BB1

- Атрибут **VALUE** [area] [OFF] [IC=<Vbe>[,Vce]]

Пример:

1.5 OFF IC=0.65,0.35

- Атрибут **MODEL** <имя модели>

Пример:

2N2222A

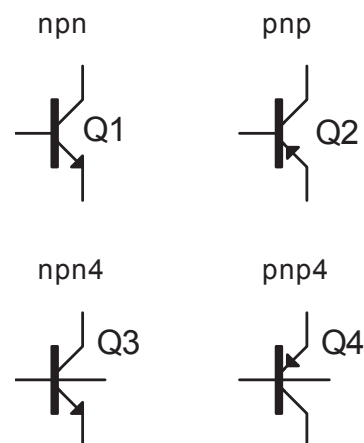


Рис. 11.6. Биполярный транзистор

На масштабный множитель [area] умножаются или делятся модельные параметры, как показано в табл. 11.5. Наличие ключевого слова **OFF** приводит к отключению транзистора во время выполнения первой итерации расчета режима по постоянному току. Необязательное начальное условие IC=<Vbe>[,Vce] приводит к установке начального напряжения на переходах транзистора при расчете переходных процессов, если флажок *Operating Point* сброшен.

Форматы текстовых директив моделей биполярного транзистора

.MODEL <имя модели> **NPN** ([параметры модели])

.MODEL <имя модели> **PNP** ([параметры модели])

.MODEL <имя модели> **LPNP** ([параметры модели])

Примеры:

.MODEL Q1 NPN (IS=1E-15 BF=55 TR=.5N)

.MODEL Q2 PNP (BF=245 VAF=50 IS=1E-16)

.MODEL Q3 LPNP (BF=5 IS=1E-17)

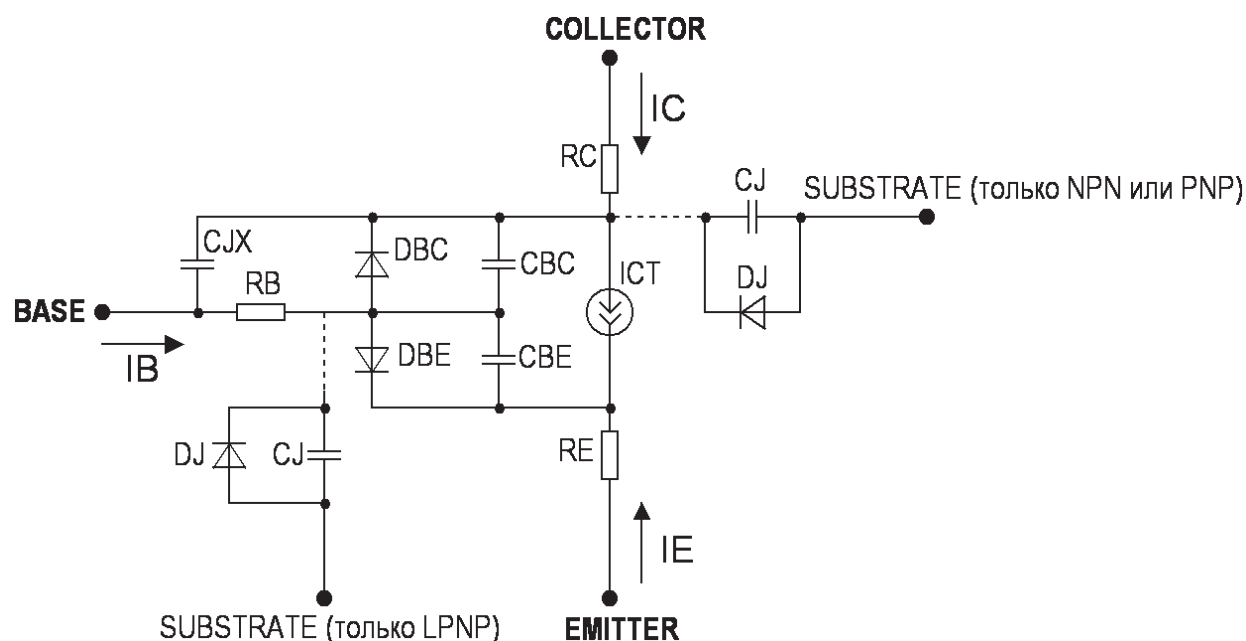


Рис. 11.7. Модель биполярного транзистора

11.3.2. Параметры модели биполярного транзистора

Таблица 11.5. Параметры модели биполярного транзистора

Обозначение	Содержание	Значение по умолчанию	Единица измерения	AREA
LEVEL	Тип модели (1 – стандартная модель Гуммеля-Пуна)	1		
IS	Ток насыщения при температуре 27°C	1E-16	A	×
BF	Максимальный коэффициент усиления тока в нормальном режиме в схеме с ОЭ	100	—	
NF	Коэффициент эмиссии (неидеальности) для нормального режима	1	—	
VAF	Напряжение Эрли в нормальном режиме	∞	B	
IKF*	Ток начала спада зависимости BF от тока коллектора в нормальном режиме	∞	A	×
ISE*	Ток насыщения утечки перехода база-эмиттер	0	A	×
NE*	Коэффициент эмиссии тока утечки эмиттерного перехода	1.5	—	
BR	Максимальный коэффициент усиления тока в инверсном режиме в схеме с ОЭ	1	—	
NR	Коэффициент эмиссии (неидеальности) для инверсного режима	1	—	
VAR*	Напряжение Эрли в инверсном режиме	∞	B	
IKR*	Ток начала спада зависимости BR от тока эмиттера в инверсном режиме	∞	A	×
ICS*	Ток насыщения утечки перехода база-коллектор	0	A	×
NC*	Коэффициент эмиссии тока утечки коллекторного перехода	2	—	

Продолжение табл. 11.5

Обозначение	Содержание	Значение по умолчанию	Единица измерения	AREA
NK	Коэффициент перегиба при больших токах	0.5	—	
ISS	Ток насыщения р-п перехода подложки	0	A	×
NS	Коэффициент эмиссии тока р-п-перехода подложки	1		
RC	Объемное сопротивление коллектора	0	Ом	/
RE	Объемное сопротивление эмиттера	0	Ом	/
RB	Объемное сопротивление базы (максимальное) при нулевом смещении перехода база-эмиттер	0	Ом	/
IRB*	Ток базы, при котором сопротивление базы уменьшается на 50% полного перепада между RB и RBM	∞	A	×
RBM*	Минимальное сопротивление базы при больших токах	RB	Ом	/
TF	Время переноса заряда через базу в нормальном режиме	0	с	
TR	Время переноса заряда через базу в инверсном режиме	0	с	
XCJC	Доля барьерной емкости, относящаяся к внутренней базе	1	—	
MJC	Коэффициент, учитывающий плавность коллекторного перехода	0.33	—	
VJC	Контактная разность потенциалов перехода база-коллектор	0.75	B	
CJC	Емкость коллекторного перехода при нулевом смещении	0	Ф	×
MJE	Коэффициент, учитывающий плавность эмиттерного перехода	0.33	—	
VJE	Контактная разность потенциалов перехода база-эмиттер	0.75	B	
CJE	Емкость эмиттерного перехода при нулевом смещении	0	пФ	×
MJS	Коэффициент, учитывающий плавность перехода коллектор-подложка	0	—	
VJS	Контактная разность потенциалов перехода коллектор-подложка	0.75	B	
CJS	Емкость перехода коллектор-подложка при нулевом смещении	0	Ф	×
VTF	Напряжение, характеризующее зависимость TF от смещения база-коллектор	∞	B	
ITF	Ток, характеризующий зависимость TF от тока коллектора при больших токах	0	A	×
XTF	Коэффициент, определяющий зависимость TF от смещения база-коллектор	0	—	

Окончание табл. 11.5

Обозначение	Содержание	Значение по умолчанию	Единица измерения	AREA
PTF	Дополнительный фазовый сдвиг на граничной частоте транзистора $f_{cp} = \frac{1}{2\pi \cdot TF}$	0	град.	
XTB	Температурный коэффициент BF и BR	0	—	
EG	Ширина запрещенной зоны	1.11	эВ	
XTI	Температурный экспоненциальный коэффициент для тока IS	3	—	
KF	Коэффициент, определяющий спектральную плотность фликкер-шума	0	—	
AF	Показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока через переход	1	—	
FC	Коэффициент нелинейности барьерных емкостей прямосмещенных переходов	0.5	—	
T_MEASURED	Температура измерений		°C	
T_ABS	Абсолютная температура		°C	
T_REL_GLOBAL	Относительная температура		°C	
T_REL_LOCAL	Разность между температурой транзистора и модели-прототипа AKO		°C	
TRE1	Линейный температурный коэффициент RE	0	°C ⁻¹	
TRE2	Квадратичный температурный коэффициент RE	0	°C ⁻²	
TRB1	Линейный температурный коэффициент RB	0	°C ⁻¹	
TRB2	Квадратичный температурный коэффициент RB	0	°C ⁻²	
TRM1	Линейный температурный коэффициент RBM	0	°C ⁻¹	
TRM2	Квадратичный температурный коэффициент RBM	0	°C ⁻²	
TRC1	Линейный температурный коэффициент RC	0	°C ⁻¹	
TRC2	Квадратичный температурный коэффициент RC	0	°C ⁻²	
* Для модели Гуммеля-Пуна (Level=1)				

11.3.3. Основные уравнения работы биполярного транзистора в MC9,10

Параметры модели транзистора **IS**, **IKF**, **ISE**, **IKR**, **ISC**, **ISS**, **IRB**, **CJC**, **CJE**, **CJS**, и **ITF** умножаются на [area], а параметры **RC**, **RE**, **RB**, **RBM** делятся на [area] перед подстановкой в уравнения модели, приведенные ниже.

T — это температура работы прибора, а **TNOM** — это температура, при которой измерены модельные параметры. Обе температуры измеряются в Кельвинах. Температура, при которой происходит анализ **T** устанавливается

в диалоговом окне *Analysis Limits* для соответствующего вида анализа. **TNOM** определяется глобальными установками *Global Settings* в позиции **TNOM**. Установка **TNOM** также может быть изменена локально для конкретной схемы с помощью директивы **.OPTIONS**. Также **T** и **TNOM** могут быть изменены для каждой конкретной модели указанием численных значений параметров модели **T_MEASURED**, **T_ABS**, **T_REL_GLOBAL**, и **T_REL_LOCAL** (см. раздел 4.9, описание директивы **.MODEL**).

Узел подложки (substrate) не является обязательным и если отдельно не указан, то подключается к общему выводу (ground). Если узел подложки специфицирован, он должен быть заключен в квадратные скобки.

Модели типов NPN и PNP используются для вертикальных транзисторных структур, LPNP — для горизонтальных (боковых, планарных) PNP структур. Изолирующий диод DJ и конденсатор CJ соединяют узел подложки с внутренней точкой коллектора для NPN и PNP моделей, и узел подложки с внутренней точкой базы — для модели типа LPNP.

При добавлении новых 4-хвыводных биполярных транзисторов в библиотеку компонентов используйте типы NPN4, PNP4 для определения типа модели.

Когда компонент с типом модели PNP4 помещен в схему, используется LPNP текстовое определение. Если необходима вертикальная четырехвыводная структура, следует изменить LPNP на PNP.

Тепловой потенциал $VT = k \cdot T / q$

VBE — напряжение между внутренними узлами базы и эмиттера

VBC — напряжение между внутренними узлами базы и коллектора

VCS — напряжение между внутренним узлом коллектора и подложкой

В нижеприведенных уравнениях обозначение X(T) означает температурную зависимость параметра X.

Температурные эффекты BJT

$$EG(T) = 1.16 - \frac{0.000702 \cdot T^2}{T + 1108}.$$

$$IS(T) = IS \cdot e^{\left(\frac{T}{Tnom} - 1\right) \cdot \frac{Eg}{VT}} \cdot \left(\frac{T}{Tnom}\right)^{XTI}.$$

$$ISE(T) = \frac{ISE}{\left[\frac{T}{Tnom}\right]^{XTB}} \cdot e^{\left(\frac{T}{Tnom} - 1\right) \cdot \frac{Eg}{NE \cdot VT}} \cdot \left(\frac{T}{Tnom}\right)^{\frac{XTI}{NE}}.$$

$$ISC(T) = \frac{ISC}{\left[\frac{T}{Tnom}\right]^{XTB}} \cdot e^{\left(\frac{T}{Tnom} - 1\right) \cdot \frac{Eg}{NC \cdot VT}} \cdot \left(\frac{T}{Tnom}\right)^{\frac{XTI}{NC}}.$$

$$BF(T) = BF \cdot \left(\frac{T}{T_{nom}} \right)^{XTB}; \quad BR(T) = BR \cdot \left(\frac{T}{T_{nom}} \right)^{XTB}.$$

$$VJE(T) = VJE \cdot \frac{T}{T_{nom}} - 3 \cdot VT \cdot \ln \left(\frac{T}{T_{nom}} \right) - EG(T_{nom}) \cdot \frac{T}{T_{nom}} + EG(T).$$

$$VJC(T) = VJC \cdot \frac{T}{T_{nom}} - 3 \cdot VT \cdot \ln \left(\frac{T}{T_{nom}} \right) - EG(T_{nom}) \cdot \frac{T}{T_{nom}} + EG(T).$$

$$VJS(T) = VJS \cdot \frac{T}{T_{nom}} - 3 \cdot VT \cdot \ln \left(\frac{T}{T_{nom}} \right) - EG(T_{nom}) \cdot \frac{T}{T_{nom}} + EG(T).$$

$$CJE(T) = CJE \cdot \left[1 + MJE \cdot \left(0.0004 \cdot (T - T_{nom}) + \left(1 - \frac{VJE(T)}{VJE} \right) \right) \right].$$

$$CJC(T) = CJC \cdot \left[1 + MJC \cdot \left(0.0004 \cdot (T - T_{nom}) + \left(1 - \frac{VJC(T)}{VJC} \right) \right) \right].$$

$$CJS(T) = CJS \cdot \left[1 + MJS \cdot \left(0.0004 \cdot (T - T_{nom}) + \left(1 - \frac{VJS(T)}{VJS} \right) \right) \right].$$

Уравнения для токов биполярного транзистора

$$Q1 = \frac{1}{1 - \frac{VBC}{VAF} - \frac{VBE}{VAR}}.$$

$$Q2 = IS(T) \cdot \frac{e^{\frac{VBE}{NF \cdot VT}} - 1}{IKF} + IS(T) \cdot \frac{e^{\frac{VBC}{NR \cdot VT}} - 1}{IKR}.$$

$$QB = \frac{Q1 \cdot (1 + (1 + 4 \cdot Q2)^{0.5})}{2}.$$

Ток источника тока

$$ICT = IS(T) \cdot \frac{e^{\frac{VBE}{NF \cdot VT}} - 1}{QB} - IS(T) \cdot \frac{e^{\frac{VBC}{NR \cdot VT}} - 1}{QB}.$$

Ток перехода база-эмиттер

$$IBE = ISE(T) \cdot \left(e^{\frac{VBE}{NE \cdot VT}} - 1 \right) + IS(T) \cdot \frac{e^{\frac{VBE}{NF \cdot VT}} - 1}{BF(T)}.$$

Ток перехода база-коллектор

$$IBC = ISC(T) \cdot \left(e^{\frac{VBC}{NC \cdot VT}} - 1 \right) + IS(T) \cdot \frac{e^{\frac{VBC}{NR \cdot VT}} - 1}{BR(T)}.$$

Ток базы $IB = IBE + IBC$

$$IB = IS(T) \frac{e^{\frac{VBE}{NF \cdot VT}} - 1}{BF(T)} + ISE(T) \left(e^{\frac{VBE}{NE \cdot VT}} - 1 \right) + IS(T) \frac{e^{\frac{VBC}{NR \cdot VT}} - 1}{BR(T)} + ISC(T) \left(e^{\frac{VBC}{NC \cdot VT}} - 1 \right).$$

Ток коллектора

$$IC = IS(T) \cdot \frac{e^{\frac{VBE}{NF \cdot VT}} - e^{\frac{VBC}{NR \cdot VT}}}{QB} - IS(T) \cdot \frac{\left(e^{\frac{VBC}{NR \cdot VT}} - 1 \right)}{BR(T)} - ISC(T) \cdot \left(e^{\frac{VBC}{NC \cdot VT}} - 1 \right).$$

Ток эмиттера

$$IE = IS(T) \cdot \frac{e^{\frac{VBE}{NF \cdot VT}} - e^{\frac{VBC}{NR \cdot VT}}}{QB} + IS(T) \cdot \frac{\left(e^{\frac{VBE}{NF \cdot VT}} - 1 \right)}{BF(T)} + ISE(T) \cdot \left(e^{\frac{VBE}{NE \cdot VT}} - 1 \right).$$

Уравнения для емкостей BJT

Емкость база-эмиттер

$$GBE = \text{проводимость база-эмиттер} = \frac{\partial I_{be}}{\partial V_{be}}.$$

$$\text{Если } VBE \leq FC \cdot VJE(T) \quad CBE1 = CJE(T) \cdot \left(1 - \frac{VBE}{VJE(T)} \right)^{-MJE}.$$

$$\text{Иначе} \quad CBE1 = CJE(T)(1 - FC)^{-(1+MJE)} \cdot \left(1 - FC \cdot (1 + MJE) + \frac{MJE \cdot VBE}{VJE(T)} \right).$$

$$R = \frac{IS(T) \cdot \left(e^{\frac{VBE}{NF \cdot VT}} - 1 \right)}{IS(T) \cdot \left(e^{\frac{VBE}{NF \cdot VT}} - 1 \right) + ITF}.$$

$$CBE2 = GBE \cdot TF \cdot \left(1 + XTF \cdot (3R^2 - 2R^3) \cdot e^{\frac{VBC}{1.44 \cdot VTF}} \right).$$

$$CBE = CBE1 + CBE2.$$

Емкость база-коллектор

$$GBC = \text{проводимость база-коллектор} = \frac{\partial I_{bc}}{\partial V_{bc}}.$$

Если $VBC \leq FC \cdot VJC(T)$ $C = CJC(T) \cdot \left(1 - \frac{VBC}{VJC(T)} \right)^{-MJC}$.

Иначе $C = CJC(T)(1 - FC)^{-(1+MJC)} \cdot \left(1 - FC \cdot (1 + MJC) + \frac{MJC \cdot VBC}{VJC(T)} \right)$.

$$CJX = C \cdot (1 - XCJC).$$

$$CBC = GBC \cdot TR + XCJC \cdot C.$$

Емкость коллектор-подложка

Если $VCS \leq 0$ $CJ = CJS(T) \cdot \left(1 - \frac{VCS}{VJS(T)} \right)^{-MJS}$.

Иначе $CJ = CJS(T)(1 - FC)^{-(1+MJS)} \cdot \left(1 - FC \cdot (1 + MJS) + \frac{MJS \cdot VCS}{VJS(T)} \right)$.

Уравнения для шумов биполярного транзистора

RE, **RB**, и **RC** генерируют тепловые шумовые токи.

$$I_e^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T}{RE} ; \quad I_b^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T}{RB} ; \quad I_c^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T}{RC} .$$

Коллекторные и базовые источники тока генерируют частотно-зависимые фликкер и дробовой шумы.

$$I_c^2 = 2 \cdot q \cdot I_c + \frac{KF \cdot ICB^{AF}}{\text{Frequency}} ; \quad I_b^2 = 2 \cdot q \cdot I_b + \frac{KF \cdot IBE^{AF}}{\text{Frequency}} ,$$

где **KF** — коэффициент фликкер шума; **AF** — экспоненциальный коэффициент фликкер-шума.

11.3.4. Нахождение параметров модели биполярного транзистора

Таблица 11.6. Экраны программы MODEL для нахождения параметров модели биполярного транзистора

Напряжение на переходе база-эмиттер в режиме насыщения Vbe vs. Ic	
Входные данные	Таблица значений V_{be} , I_c (Зависимость напряжения база-эмиттер от тока коллектора в режиме насыщения)
Оцениваемые параметры	IS, NF, RE
Уравнения	$V_{be} = V_T \cdot NF \cdot \ln\left(\frac{I_c}{IS}\right) + I_c \cdot RE$
Комментарии	Рассчитывается зависимость напряжения насыщения V_{be} от тока коллектора I_c . Параметры EG , XTI назначаются по умолчанию
Выходная проводимость hoe vs. Ic	
Входные данные	Таблица зависимости выходной проводимости Hoe от тока коллектора I_c
Условия измерения	Напряжение смещения V_{ce}
Оцениваемые параметры	VAF (Прямое напряжение Эрли)
Уравнения	$Hoe = \frac{IC}{VAF + V_{ce} - 0,7}$
Статический коэффициент передачи по току Beta vs. Ic	
Входные данные	Таблица зависимости статического коэффициента усиления тока в схеме ОЭ $Beta$ от тока коллектора I_c (при малых токах рекомбинации и больших токах высокого уровня инжекции в областях падения <i>forward Beta</i>)
Условия измерения	Напряжение смещения V_{ce}
Оцениваемые параметры	NE, ISE, BF, IKF
Уравнения	Уравнения модели Гуммеля-Пуна, описывающие зависимость $Beta = f(I_c)$
Напряжение насыщения коллектор-эмиттер Vce vs. Ic	
Входные данные	Таблица зависимости напряжения насыщения коллектор-эмиттер V_{ce} от тока коллектора I_c при низких и высоких уровнях инжекции (в областях уменьшения <i>Revers Beta</i>)
Условия измерения	Отношение $\frac{I_c}{I_b}$
Оцениваемые параметры	NC, ISC, BR, IKR, RC
Уравнения	$V_{ce} = f(I_c) + I_c \cdot (RC + RE)$

Продолжение табл. 11.6.

Барьерная емкость перехода коллектор-база Cob vs. Vcb	
Входные данные	Таблица значений Cob , Vcb (Зависимость барьерной емкости от обратного напряжения на коллекторном переходе)
Оцениваемые параметры	CJC, MJC, VJC, FC
Уравнения	$Cob = \frac{CJC}{\left(1 + \frac{Vcb}{VJC}\right)^{MJC}}$
Комментарии	Напряжение обратного смещения Vcb считается положительным
Барьерная емкость перехода эмиттер-база Cib vs. Veb	
Входные данные	Таблица значений Cib , Veb (Зависимость барьерной емкости эмиттерного перехода от обратного напряжения на нем)
Оцениваемые параметры	CJE, MJE, VJE
Уравнения	$Cib = \frac{CJE}{\left(1 + \frac{Veb}{VJE}\right)^{MJE}}$
Комментарии	Напряжение обратного смещения Veb считается положительным
Время накопления заряда TS vs. Ic	
Входные данные	Таблица зависимости времени рассасывания TS от тока коллектора Ic
Условия измерения	Отношение токов $\frac{Ic}{Ib}$
Оцениваемые параметры	TR
Уравнения	$AR = \frac{BR}{BR + 1}, \quad AF = \frac{BF}{BF + 1}, \quad k1 = \frac{1 - AF \cdot AR}{AR},$ $k2 = \frac{AF}{AR} \cdot TF, \quad TS = \frac{TR + k2}{k1} \cdot \ln \left(\frac{2}{\frac{Ic}{Ib \cdot BF} + 1} \right)$
Комментарии	Среднее время пролета TR оценивается на основе зависимости времени накопления TS от тока коллектора Ic

Окончание табл. 11.6.

Площадь усиления F_t vs. I_c	
Входные данные	Зависимость граничной частоты усиления тока F_t в схеме с ОЭ от тока коллектора I_c
Условия измерения	Напряжение V_{ce}
Оцениваемые параметры	TF, ITF, XTF, VTF
Уравнения	$V_{be} = VT \cdot N \cdot \ln\left(\frac{I_c}{I_{SS}}\right), \quad V_{bc} = V_{be} - V_{ce},$ $atf = 1 + XTF \cdot \left(\frac{I_c}{I_c + ITF}\right)^2 \cdot e^{\frac{V_{bc}}{1.44 \cdot VTF}},$ $tf = TF \cdot \left[atf + \frac{2 \cdot (atf - 1) \cdot ITF}{I_c + ITF} + \frac{VT \cdot N \cdot (atf - 1)}{1.44 \cdot VTF} \right],$ $fa = \left(1 - \frac{V_{bc}}{VAF}\right) \cdot \left(1 - \frac{V_{bc}}{VAF}\right),$ $F_t = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{tf}{fa} + \frac{VT \cdot N \cdot \left(C_{je} + C_{jc} \cdot \left(1 + \frac{I_c \cdot RC}{VT \cdot N}\right) \right)}{I_c} \right]}.$

Следует отметить, что Micro-Cap поддерживает также модели биполярных транзисторов фирмы Philips: модели PNP- и NPN-структур *Mextram* (Level= 2 или Level=21); модель PNP-структуры с боковой диффузией *Modella* (Level = 500 или Level =501).

Модель Philips *Mextram* биполярного транзистора представляет собой модель вертикальной pnp (pnp) структуры, которая учитывает насыщение скорости носителей, расширение области базы, эффект Кирка, влияние ударной ионизации и эффекта саморазогрева структуры.

Модель Philips *Modella* биполярного транзистора — модель транзистора с боковой диффузией. Она моделирует увеличение плотности тока, эффекты при высоком уровне инжекции, изменение выходного сопротивления.

11.4. Полевые транзисторы JFET

11.4.1. Модель полевого транзистора JFET

Формат SPICEt

J <имя> <сток> <затвор> <исток> <имя модели> [area] [OFF] [IC=<vds>[,vgs]]

Пример:

J1 5 7 9 2N3531 1 OFF IC=1.0,2.5

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART** <имя>

Пример:

J1

- Атрибут **VALUE** [area] [OFF] [IC=<vds>[,vgs]]

Пример:

1.5 OFF IC=0.05,1.00

- Атрибут **MODEL** <имя модели>

Пример:

JFET_MOD



Рис. 11.8. Полевой транзистор

На масштабный множитель [area] умножаются или делятся модельные параметры, как показано в табл. 11.7. Наличие ключевого слова **OFF** приводит к отключению транзистора во время выполнения первой итерации расчета режима по постоянному току. Необязательные начальные условия IC=<Vds>[,Vgs] приводят к установке начальных напряжений между стоком и истоком и между затвором и истоком. Отрицательное пороговое напряжение VTO подразумевает обедненный режим работы, а положительное VTO подразумевает обогащенный режим работы прибора. Это соответствует моделям SPICE 2G.6.

11.4.2. Параметры модели полевого транзистора

Таблица 11.7. Параметры модели полевого транзистора

Обозначение	Содержание	Значение по умолчанию	Единица измерения	AREA
VTO	Пороговое напряжение	-2	В	
BETA	Коэффициент пропорциональности (удельная передаточная проводимость)	1E-4	A/B ²	×
LAMBDA	Параметр модуляции длины канала	0	1/B	
RD	Объемное сопротивление области стока	0	Ом	/
RS	Объемное сопротивление области истока	0	Ом	/
CGS	Емкость перехода затвор-исток при нулевом смещении	0	Ф	×
CGD	Емкость перехода затвор-сток при нулевом смещении	0	Ф	×

Обозначение	Содержание	Значение по умолчанию	Единица измерения	AREA
M	Коэффициент плавности перехода затвор-исток	0.5	—	
PB	Контактная разность потенциалов р-п-перехода затвора	1	В	
IS	Ток насыщения р-п-перехода затвор-канал	1E-14	А	×
FC	Коэффициент нелинейности емкостей переходов при прямом смещении	0.5	—	
VTOTC	Температурный коэффициент VTO	0	В/°C	
BETATCE	Температурный экспоненциальный коэффициент BETA	0	%/°C	
XTI	Температурный коэффициент тока IS	3	—	
KF	Коэффициент, определяющий спектральную плотность фликкер-шума	0	—	
AF	Показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока	1	—	
T_MEASURED	Температура измерения	—	°C	
T_ABS	Абсолютная температура	—	°C	
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	—	°C	
T_REL_LOCAL	Разность между температурой транзистора и модели-прототипа AKO	—	°C	

Форматы текстовых директивы моделей полевого транзистора

.MODEL <имя модели> **NJF** ([параметры модели])

.MODEL <имя модели> **PJF** ([параметры модели])

Примеры:

.MODEL J1 NJF (VTO=-2 BETA=1E-4 LAMBDA=1E-3)

.MODEL J2 PJF (VTO= 2 BETA=.005 LAMBDA=.015)

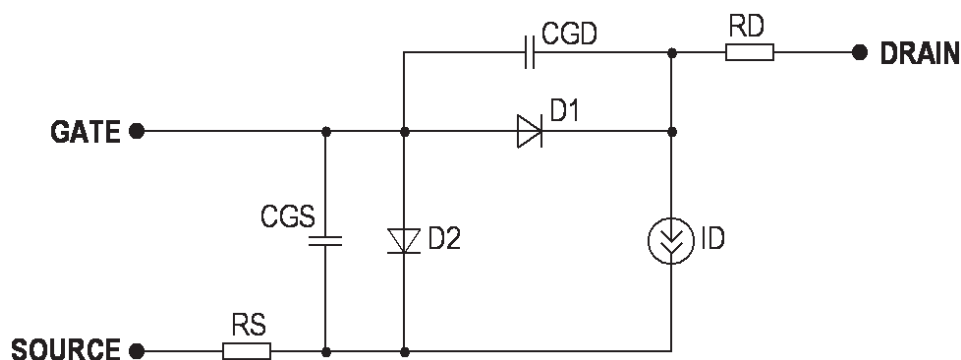


Рис. 11.9. Модель полевого транзистора с управляющим р-п переходом

11.4.3. Основные уравнения математической модели JFET

Модельные параметры **BETA**, **CGS**, **CGD**, и **IS** умножаются на [area], а модельные параметры **RD** и **RS** делятся на [area] перед подстановкой в приведенные ниже уравнения.

Vgs — внутреннее напряжение затвор-исток

Vds — внутреннее напряжение сток-исток

Id — ток стока

Температурные эффекты JFET

T — это температура работы прибора, а **Tnom** — это температура, при которой измерены модельные параметры. Обе выражаются в градусах Кельвина. **T** устанавливается по температуре анализа в диалоге *Analysis Limits* соответствующего режима анализа. **TNOM** определяется установками Global Settings и изменяется также и директивой .OPTIONS. **T** и **Tnom** могут быть подобраны для каждой модели спецификацией параметров **T_MEASURED**, **T_ABS**, **T_REL_GLOBAL**, и **T_REL_LOCAL** (см. раздел 4.9, описание директивы .MODEL).

$$VT = \frac{k \cdot T}{q} = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot T}{1.602 \cdot 10^{-19}} \cdot$$

X(T) означает температурную зависимость параметра X.

$$VTO(T) = VTO + VTOTC \cdot (T - Tnom)$$

$$BETA(T) = BETA \cdot 1.01^{BETACE \cdot (T - Tnom)}$$

$$IS(T) = IS \cdot e^{\frac{1.11 \cdot \left(\frac{T}{Tnom} - 1 \right)}{VT}} \cdot \left(\frac{T}{Tnom} \right)^{XTI}$$

$$EG(T) = 1.16 - \frac{.000702 \cdot T^2}{T + 1108}$$

$$PB(T) = PB \cdot \frac{T}{Tnom} - 3 \cdot VT \cdot \ln \left(\frac{T}{Tnom} \right) - EG(Tnom) \cdot \frac{T}{Tnom} + EG(T)$$

$$CGS(T) = CGS \cdot \left[1 + M \cdot \left(.0004 \cdot (T - Tnom) + 1 - \frac{PB(T)}{PB} \right) \right]$$

$$CDS(T) = CDS \cdot \left[1 + M \cdot \left(.0004 \cdot (T - Tnom) + 1 - \frac{PB(T)}{PB} \right) \right]$$

Уравнения для токов JFET

Область отсечки: $Vgs \leq VTO(T)$

$$Id = 0$$

Область насыщения: $V_{ds} > V_{gs} - V_{TO}(T)$

$$I_d = BETA(T) \cdot (V_{gs} - V_{TO}(T))^2 \cdot (1 + LAMBDA \cdot V_{ds})$$

Линейная область: $V_{ds} < V_{gs} - V_{TO}(T)$

$$I_d = BETA(T) \cdot V_{ds} \cdot [2 \cdot (V_{gs} - V_{TO}(T)) - V_{ds}] \cdot (1 + LAMBDA \cdot V_{ds})$$

Уравнения для емкостей JFET

Если $V_{gs} \leq FC \cdot PB(T)$, то $C_{gs} = \frac{CGS(T)}{\left(1 - \frac{V_{gs}}{PB(T)}\right)^M}$.

Иначе $C_{gs} = \frac{CGS(T) \cdot \left(1 - FC(1 + M) + M \cdot \frac{V_{gs}}{PB(T)}\right)}{(1 - FC)^{1+M}}$.

Если $V_{gd} \leq FC \cdot PB(T)$, то $C_{gd} = \frac{CGD(T)}{\left(1 - \frac{V_{gd}}{PB(T)}\right)^M}$.

Иначе $C_{gd} = \frac{CGD(T) \cdot \left(1 - FC(1 + M) + M \cdot \frac{V_{gd}}{PB(T)}\right)}{(1 - FC)^{1+M}}$.

Уравнения для шумов полевого транзистора JFET

Резисторы **RS** и **RD** генерируют тепловой шум.

$$I_{rd}^2 = \frac{4kT}{RD} \quad I_{rs}^2 = \frac{4kT}{RS}$$

Источник тока в цепи стока генерирует шумовой ток.

$$I^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot gm \cdot \frac{2}{3} + \frac{KF \cdot I_d^{AF}}{Frequency},$$

где $gm = \frac{\partial I_d}{\partial V_{gs}}$ (в рабочей точке по постоянному току)

11.4.4. Определение параметров модели полевого транзистора JFET

Таблица 11.8. Экраны программы MODEL для определения параметров модели полевого транзистора

Проходная характеристика I_d vs. V_{gs}	
Входные данные	Зависимость тока стока I_d от напряжения затвор-исток V_{gs}
Оцениваемые параметры	BETA, VTO, RS
Уравнения	$V_{gs} = RS \cdot I_d - VTO - \sqrt{\frac{I_d}{BETA}}$
Выходная проводимость G_{os} vs. I_d	
Входные данные	Зависимость статической проводимости сток-исток G_{os} от тока стока I_d
Оцениваемые параметры	LAMBDA
Уравнения	$G_{os} = I_d \cdot LAMBDA$
Проходная емкость C_{rss} vs. V_{gs}	
Входные данные	Зависимость проходной емкости C_{rss} от напряжения затвор-исток V_{gs}
Условия	Напряжение сток-исток V_{ds}
Оцениваемые параметры	CGD, PB, FC
Уравнения	$C_{rss} = \frac{CGS}{\left(1 - \frac{V_{ds} - V_{gs}}{PB}\right)^{0,5}}, \quad npu \quad \{V_{ds} - V_{gs} < FC \cdot PB\}$ $C_{rss} = \frac{CGS}{(1 - FC)^{1,5}} \left(1 - FC \cdot 1,5 + \frac{V_{ds} - V_{gs}}{2 \cdot PB}\right),$ $npu \quad \{V_{ds} - V_{gs} \geq FC \cdot PB\}$
Входная емкость C_{iss} vs. V_{gs}	
Входные данные	Таблица зависимости входной емкости C_{iss} от напряжения затвор-исток V_{gs}
Условия	Напряжение сток-исток V_{ds}
Оцениваемые параметры	CGS
Входная емкость C_{iss} vs. V_{gs}	
Уравнения	$C_{rss} = \frac{CDS}{\left(1 - \frac{V_{gs}}{PB}\right)^{0,5}}, \quad npu \quad \{V_{gs} < FC \cdot PB\},$ $C_{rss} = C_{iss} + \frac{CDS}{(1 - FC)^{1,5}} \cdot \left(1 - FC \cdot 1,5 + \frac{V_{gs}}{2 \cdot PB}\right),$ $npu \quad \{V_{ds} - V_{gs} \geq FC \cdot PB\}$

Окончание табл. 11.8.

Фликкер-шум En vs. freq	
Входные данные	Таблица зависимости корня квадратного из спектральной плотности выходного напряжения шума E_n от частоты f
Условия	Ids
Оцениваемые параметры	KF, AF
Уравнения	$V_{gs} = V_{TO} + I_d \cdot R_S + \sqrt{\frac{I_d}{BETA}}, \quad G_m = 2 \cdot BETA \cdot (V_{gs} - V_{TO})$ $E_n = \frac{1}{g_m} \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T \cdot g_m}{3} + \frac{KF \cdot I_D^{AF}}{freq}}$

11.5. МОП-транзисторы MOSFET

11.5.1. Модель транзистора с изолированным затвором MOSFET

Формат SPICE

M<имя> <сток> <затвор> <исток> <подложка> <имя модели> [M=<mval>]
+ [L=<length>] [W=<width>] [AD=<drainarea>] [AS=<sourcearea>]
+ [PD=<drainperiphery>] [PS=<sourceperiphery>]
+ [NRD=<drainsquares>] [NRS=<sourcesquares>]
+ [NRG=<gatesquares>] [NRB=<bulksquares>]
+ [OFF][IC=<vds>[,vgs[,vbs]]]

Пример:

M1 5 7 9 0 IRF350 L=1.5E-6 W=0.25 OFF IC=25.0,8.0

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART** <имя>

Пример:

M1

- Атрибут **VALUE:** [M=<mval>] [L=<length>]
+ [W=<width>] [AD=<drainarea>] [AS=<sourcearea>]
+ [PD=<drainperiphery>] [PS=<sourceperiphery>]
+ [NRD=<drainsquares>] [NRS=<sourcesquares>]
+ [NRG=<gatesquares>] [NRB=<bulksquares>]
+ [OFF] [IC=<vds>[,vgs[,vbs]]]

Примеры:

M=20 NRD=10 NRS=25 NRG=5

L=.35u IC=.1, 2.00

L=.4u W=2u OFF IC=0.05,1.00

- Атрибут **MODEL** <имя модели>

Примеры:

IRF350

MM150

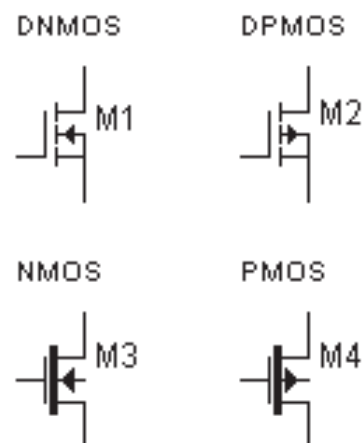


Рис. 11.10. Полевой транзистор с изолированным затвором

Модели MOSFET, поддерживаемые программой Micro-Cap

<i>Level</i>	<i>Модель</i>
1	Шихмана-Ходжеса
2	Гроува-Фромана MOS2 (SPICE 3F5)
3	Эмпирическая модель MOS3 (SPICE 3F5)
4	Оригинальная BSIM модель BSIM1 (Berkeley модель короткоканального IGFET)
5	Модель BSIM 2-го поколения BSIM2
8 или 49	Модель BSIM 3-го поколения BSIM3 v3.3 (7/29/2005)
14	Модель BSIM 4-го поколения BSIM4.5.0 (7/29/2005)
44	Зарядовая модель короткоканального прибора EKV 2.6, предложенная Швейцарским институтом технологий (Swiss Institute of Technology)
Другие	модели MOSFET фирмы Philips (MOSFET Philips Model 11, 20, 31, 40, PSP), только в MC9, MC10.

- Philips MOSFET Model 11 — популярная модель МДП-транзистора Philips, подходящая для низковольтных применений в CMOS.
- *Philips Model 20* — Высоковольтная модель МДП-транзистора с боковой диффузией (LDMOS).
- Philips Model 31 — новая высоковольтная модель МДП-транзистора.
- Philips Model 40 — новая высоковольтная модель MOSFET, а точнее структуры кремний на диэлектрике (Silicon-On-Insulator (SOI)).
- PSP — самая последняя модель, характеризующаяся компактностью, учетом поверхностного потенциала. Подходит для использования в составе цифровых, аналоговых и RF CMOS применений. Разработана совместно Philips и Penn State University. Принимает во внимание уменьшение подвижности носителей, насыщение скорости носителей, DIBL, ток затвора, и эффекты, вызванные боковой диффузией.

<width> и *<length>* — технологические размеры прибора, соответственно ширина и длина канала, которые, измеряются в метрах. При необходимости они указываются в схеме как атрибуты компонента в позиции VALUE. В этом случае заменяются соответствующие модельные параметры. Модельные параметры в свою очередь, имеют приоритет перед глобальными определениями соответствующих размеров DEFW и DEFL в *Global Settings* и локальными определениями в директивах .OPTIONS.

Начальные условия [IC=<vds>[,vgs[,vbs]]] присваивают начальные значения напряжениям сток-исток, затвор-исток, и подложка-исток в анализе переходных процессов, если не установлен флаг *Operating point*. Ключевое слово [OFF] отключает прибор из схемы на время 1-ой итерации расчета рабочей точки по постоянному току.

<sourceperiphery> и *<drainperiphery>* — периметр соответствующих диффузионных областей в метрах.

<sourcearea> и *<drainarea>* — площадь соответствующих диффузионных областей в м².

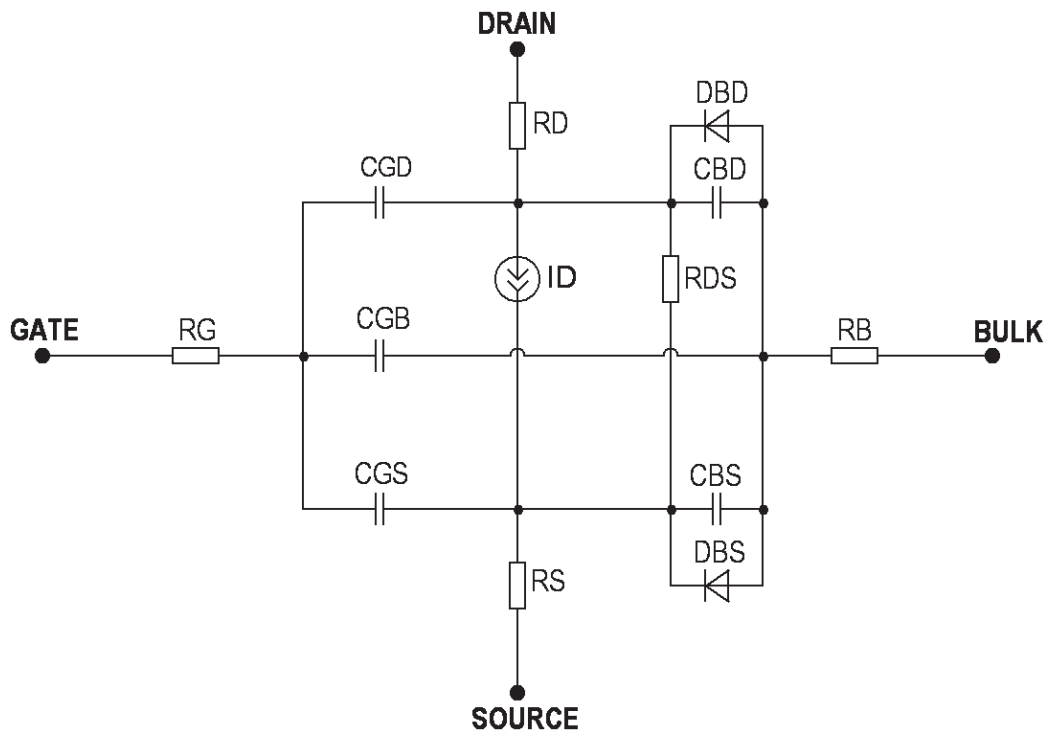


Рис. 11.11. Эквивалентная схема модели МОП-транзистора

Барьерные емкости областей истока и стока могут быть указаны непосредственно в модельных параметрах **CBS** и **CBD**. Если указанные параметры отсутствуют, они рассчитываются исходя из величин площадей и периметров областей.

Паразитные сопротивления могут быть указаны непосредственно в модельных параметрах **RS**, **RD**, **RG**, и **RB**. Если они не указаны, то рассчитываются как произведение удельного сопротивления, RSH и количества квадратов областей стока, истока, затвора и подложки соответственно (*<drainsquares>*, *<sourcesquares>*, *<gatesquares>*, и *<bulksquares>*). Если же эти величины отсутствуют или равны 0, а также модельные параметры **RS**, **RD**, **RG**, и **RB** отсутствуют или равны нулю, тогда паразитные сопротивления не включаются в модель.

Значения *<drainsquares>* и *<sourcesquares>* по умолчанию равны 1.0. Другие геометрические параметры по умолчанию принимаются равными нулю.

<width> и *<length>* по умолчанию принимаются равными **DEFW** и **DEFL**, определенными в диалоговом окне Global Settings (SHIFT+CTRL+G).

<mval> — это множитель (по умолчанию равен 1), который учитывает приборы, включенные параллельно. Путем умножения на него получаются эффективные значения ширины, перекрытий, барьерных емкостей и токов переходов. На него умножаются площади областей истока и стока, ширина канала, периметры диффузионных областей, и на него делятся 4 паразитных сопротивления **RS**, **RD**, **RG**, and **RB**.

Форматы текстовых директивы моделей полевого транзистора:

.MODEL <имя модели> NMOS ([параметры модели])

.MODEL <имя модели> PMOS ([параметры модели])

Примеры:

.MODEL M1 NMOS (W=0.2 L=0.8U KP=1E-6 GAMMA=.65)

.MODEL M2 PMOS (W=0.1 L=0.9U KP=1.2E-6 LAMBDA=1E-3)

11.5.2. Параметры модели транзистора с изолированным затвором MOSFET

Таблица 11.9. Параметры модели МОП-транзистора

Обозначение	Уровень модели LEVEL	Содержание	Значение по умолчанию	Единица измерения
LEVEL		Индекс уровня модели	1	—
L	1-3	Длина канала	DEFL	м
W	1-3	Ширина канала	DEFW	м
RDS	1-3	Сопротивление утечки сток-исток	∞	Ом
RD	1-3	Объемное сопротивление стока	0	Ом
RS	1-3	Объемное сопротивление истока	0	Ом
RG	1-3	Объемное сопротивление затвора	0	Ом
RB	1-3	Объемное сопротивление подложки	0	Ом
RSH	1-3	Удельное сопротивление диффузионных областей истока и стока	0	Ом/кв.
CGDO	1-3	Удельная емкость перекрытия затвор-сток на длину канала (за счет боковой диффузии)	0	Ф/м
CGSO	1-3	Удельная емкость перекрытия затвор-исток (за счет боковой диффузии)	0	Ф/м
CGBO	1-3	Удельная емкость перекрытия затвор-подложка (за счет выхода затвора за пределы канала)	0	Ф/м
CBD	1-3	Емкость донной части р-п-перехода сток-подложка при нулевом смещении	0	Ф
CBS	1-3	Емкость донной части р-п-перехода исток-подложка при нулевом смещении	0	Ф
CJ	1-3	Удельная емкость (на площадь перехода) донной части р-п-перехода сток(исток)-подложка при нулевом смещении	0	Ф/м ²
CJSW	1-3	Удельная емкость боковой поверхности перехода сток (исток)-подложка при нулевом смещении (на длину периметра)	0	Ф/м
MJ	1-3	Коэффициент, учитывающий плавность донной части перехода подложка-сток (исток)	0.5	
MJSW	1-3	Коэффициент, учитывающий плавность бокового перехода подложка-сток (исток)	0.33	
TT	1-3	Время переноса заряда через р-п-переходы подложки	0	с
IS	1-3	Ток насыщения р-п-перехода сток-подложка (исток-подложка)	1E-14	А
N	1-3	Коэффициент неидеальности переходов подложка-сток (исток)	1	
JS	1-3	Плотность тока насыщения переходов сток (исток)-подложка	0	А/м ²

Продолжение табл. 11.9

Обозначение	Уровень модели LEVEL	Содержание	Значение по умолчанию	Единица измерения
JSSW	1-3	Удельная плотность тока насыщения (на длину периметра)	0	A/м
PB	1-3	Контактная разность потенциалов донных р-п-переходов подложки	0.8	В
PBSW	1-3	Контактная разность потенциалов боковых р-п-переходов подложки	PB	В
FC	1-3	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода подложки	0.5	
KF	1-3	Коэффициент, определяющий спектральную плотность фликкер-шума	0	
AF	1-3	Показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока через переход	1	
GDSNOI	1-3	Коэффициент дробового шума канала	1	
NLEV	1-3	Выбор шумового уравнения	2	
T_MEASURED	1-3	Температура измерения	—	°C
T_ABS	1-3	Абсолютная температура	—	°C
T_REL_GLOBAL	1-3	Относительная температура	—	°C
T_REL_LOCAL	1-3	Разность между температурой транзистора и модели-прототипа	—	°C
Примечание. Вышеперечисленные параметры используются также и для LEVEL 4, 5, 8				
LD	1-3	Глубина области боковой диффузии	0	м
WD	1-3	Ширина области боковой диффузии	0	м
KP	1-3	Параметр удельной крутизны	2E-5	A/B ²
VTO	1-3	Пороговое напряжение при нулевом смещении	0	В
GAMMA	1-3	Коэффициент влияния потенциала подложки на пороговое напряжение	0	B ^{1/2}
PHI	1-3	Поверхностный потенциал сильной инверсии	0.6	В
LAMBDA	1, 2	Параметр модуляции длины канала	0	1/B
TOX	1-3	Толщина оксидной пленки	1E-7	м
UO	2, 3	Поверхностная подвижность носителей	600	см ² /В/с
NEFF	2	Эмпирический коэффициент коррекции концентрации примесей в канале	1	
NSUB	2, 3	Уровень легирования подложки	Нет	1/см ³
NSS	2, 3	Плотность медленных поверхностных состояний на границе кремний-подзатворный оксид	Нет	1/см ²

Окончание табл. 11.9

Обозначение	Уровень модели LEVEL	Содержание	Значение по умолчанию	Единица измерения
NFS	2, 3	Плотность быстрых поверхностных состояний на границе кремний-подзатворный оксид	Нет	1/см ²
XJ	2, 3	Глубина металлургического перехода областей стока и истока	0	м
VMAX	2, 3	Максимальная скорость дрейфа носителей	0	м/с
DELTA	2, 3	Коэффициент влияния ширины канала на пороговое напряжение	0	
THETA	3	Коэффициент модуляции подвижности носителей под влиянием вертикального поля	0	1/V
ETA	3	Параметр влияния напряжения сток-исток на пороговое напряжение (статическая обратная связь)	0	
KAPPA	3	Фактор поля насыщения (Параметр модуляции длины канала напряжением сток-исток)	0.2	
TPG	2, 3	Тип материала затвора (+1 — легирование затвора примесью того же типа, как и для подложки; -1 — примесью противоположного типа; 0 — металл)	1	
UCRIT	2	Критическая напряженность поля, при которой подвижность носителей уменьшается в два раза	1E4	В/см
UEXP	2	Экспоненциальный коэффициент снижения подвижности носителей	0	
UTRA	2	Коэффициент снижения подвижности носителей	0	м/с
XQC	2, 3	Доля заряда канала, ассоциированного со стоком	1	

11.5.3. Основные уравнения модели MOSFET

V_{gs} — внутреннее напряжение затвор-исток

V_{ds} — внутренне напряжение сток-исток

I_d — ток стока

$V_T = k \cdot T / q$ — температурный потенциал

Температурные эффекты MOSFET

T — это температура работы прибора, а **T_{nom}** — это температура, при которой измерены модельные параметры. Обе выражаются в градусах Кельвина. **T** устанавливается по значению температуры анализа в окне *Analysis Limits* соответствующего режима анализа. **T_{NOM}** — определяется установками *Global Settings*. Величину **T_{NOM}** можно изменить только с помощью директивы *.OPTIONS*. **T** и **T_{nom}** могут быть изменены для каждой модели спецификацией параметров **$T\_MEASURED$** , **T_ABS** , **T_REL_GLOBAL** , и **T_REL_LOCAL** (см. раздел 4.9, описание директивы *.MODEL*).

$$EG(T) = 1.16 - \frac{.000702 \cdot T^2}{T + 1108}$$

$$IS(T) = IS \cdot e^{\frac{EG(Tnom) \cdot \frac{T}{Tnom} - EG(T)}{VT}} \quad JS(T) = JS \cdot e^{\frac{EG(Tnom) \cdot \frac{T}{Tnom} - EG(T)}{VT}}$$

$$JSSW(T) = JSSW \cdot e^{\frac{EG(Tnom) \cdot \frac{T}{Tnom} - EG(T)}{VT}}$$

$$KP(T) = KP \cdot \left(\frac{T}{Tnom} \right)^{-1.5} \quad UO(T) = UO \cdot \left(\frac{T}{Tnom} \right)^{-1.5}$$

$$PB(T) = PB \cdot \frac{T}{Tnom} - 3 \cdot VT \cdot \ln \left(\frac{T}{Tnom} \right) - EG(Tnom) \cdot \frac{T}{Tnom} + EG(T)$$

$$PBSW(T) = PBSW \cdot \frac{T}{Tnom} - 3 \cdot VT \cdot \ln \left(\frac{T}{Tnom} \right) - EG(Tnom) \cdot \frac{T}{Tnom} + EG(T)$$

$$PHI(T) = PB \cdot \frac{T}{Tnom} - 3 \cdot VT \cdot \ln \left(\frac{T}{Tnom} \right) - EG(Tnom) \cdot \frac{T}{Tnom} + EG(T)$$

$$CBD(T) = CBD \cdot \left[1 + MJ \cdot \left(.0004 \cdot (T - Tnom) + 1 - \frac{PB(T)}{PB} \right) \right]$$

$$CBS(T) = CBS \cdot \left[1 + MJ \cdot \left(.0004 \cdot (T - Tnom) + 1 - \frac{PB(T)}{PB} \right) \right]$$

$$CJ(T) = CJ \cdot \left[1 + MJ \cdot \left(.0004 \cdot (T - Tnom) + 1 - \frac{PB(T)}{PB} \right) \right]$$

$$CJSW(T) = CJSW \cdot \left[1 + MJ \cdot \left(.0004 \cdot (T - Tnom) + 1 - \frac{PB(T)}{PB} \right) \right]$$

Паразитные сопротивления легированных областей не имеют температурной зависимости.

Уравнения для токов MOSFET

Ниже показаны только уравнения для модели уровня 1 n-канального транзистора. Уравнения для моделей уровня 2 и 3 слишком сложны для их представления в данной книге.

$$K = \frac{KP \cdot W}{L - 2 \cdot LD}$$

$$VTH = VTO + GAMMA \cdot \left(\sqrt{PHI - VBS} - \sqrt{PHI} \right)$$

Область отсечки ($V_{gs} < V_{TH}$)

$$I_d = 0.0$$

Линейная область ($V_{gs} > V_{TH}$ и $V_{ds} < (V_{gs} - V_{TH})$)

$$I_d = K \cdot (V_{gs} - V_{TH} - 0.5 \cdot V_{ds}) \cdot V_{ds} \cdot (1 + LAMBDA \cdot V_{ds})$$

Область насыщения ($V_{gs} > V_{TH}$ и $V_{ds} > (V_{gs} - V_{TH})$)

$$I_d = 0.5 \cdot K \cdot (V_{gs} - V_{TH})^2 \cdot (1 + LAMBDA \cdot V_{ds})$$

Уравнения приведены для n-канального прибора.

Уравнения для емкостей MOSFET

Для емкости затвора в модели транзистора уровней 1-3 используется модель Мейера.

Модели всех уровней используют SPICE 2G.6 модель для емкостей, предложенную Мейером, когда указан параметр XQC, больший 0.5. Когда параметр XQC указан, но его значение меньше или равно 0.5, используется модель Варда.

Инерционные процессы в цепи затвора моделируются в модели Мейера тремя нелинейными конденсаторами **Cgb**, **Cgd**, и **Cgs**.

$$C_{ox} = COX \cdot W \cdot Leff$$

Область накопления заряда ($V_{gs} < V_{on} - PHI$)

$$C_{gb} = C_{ox} + CGBO \cdot Leff$$

$$C_{gs} = CGSO \cdot W$$

$$C_{gd} = CGDO \cdot W$$

Область обеднения ($V_{on} - PHI < V_{gs} < V_{on}$)

$$C_{gb} = C_{ox} \cdot \frac{V_{on} - V_{gs}}{PHI} + CGBO \cdot Leff$$

$$C_{gs} = \frac{2}{3} \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{V_{on} - V_{gs}}{PHI} + 1 \right) + CGSO \cdot W$$

$$C_{gd} = CGDO \cdot W$$

Область насыщения ($V_{on} < V_{gs} < V_{on} + V_{ds}$)

$$C_{gb} = CGBO \cdot Leff$$

$$C_{gs} = \frac{2}{3} \cdot C_{ox} + CGSO \cdot W$$

$$C_{gd} = CGDO \cdot W$$

Линейная область ($V_{gs} > V_{on} + V_{ds}$)

$$C_{gb} = CGBO \cdot L_{eff}$$

$$C_{gs} = C_{ox} \cdot \left[1 - \left(\frac{V_{gs} - V_{ds} - V_{on}}{(2(V_{gs} - V_{on}) - V_{ds})} \right)^2 \right] + CGSO \cdot W$$

$$C_{gd} = C_{ox} \cdot \left[1 - \left(\frac{V_{gs} - V_{on}}{(2(V_{gs} - V_{on}) - V_{ds})} \right)^2 \right] + CGDO \cdot W$$

Барьерные емкости переходов

Барьерные емкости рп-переходов моделируется двумя нелинейными конденсаторами **Cbs** и **Cbd**.

Если модельные параметры CBS=0 и CBD=0, то

$$C_{bs} = CJ(T) \cdot AS \cdot f1(VBS) + CJSW(T) \cdot PS \cdot f2(VBS) + TT \cdot GBS$$

$$C_{bd} = CJ(T) \cdot AD \cdot f1(VBD) + CJSW(T) \cdot PD \cdot f2(VBD) + TT \cdot GBD$$

Иначе

$$C_{bs} = CBS(T) \cdot f1(VBS) + CJSW(T) \cdot PS \cdot f2(VBS) + TT \cdot GBS$$

$$C_{bd} = CBD(T) \cdot f1(VBD) + CJSW(T) \cdot PD \cdot f2(VBD) + TT \cdot GBD,$$

где $GBS = d(IBS)/d(VBS)$ — проводимость подложка-исток на постоянном токе, $GBD = d(IBD)/d(VBD)$ — проводимость подложка-сток на постоянном токе

$$\text{Если } VBS \leq FC \cdot PB(T) \text{ то } f1(VBS) = \frac{I}{\left(1 - \frac{VBS}{PB(T)}\right)^{MJ}}$$

$$\text{Иначе } f1(VBS) = \frac{1 - FC \cdot (1 + MJ) + MJ \cdot \frac{VBS}{PB(T)}}{(1 - FC)^{1+MJ}}$$

$$\text{Если } VBS \leq FC \cdot PBSW(T) \text{ то } f2(VBS) = \frac{I}{\left(1 - \frac{VBS}{PBSW(T)}\right)^{MJSW}}$$

$$\text{Иначе } f2(VBS) = \frac{1 - FC \cdot (1 + MJSW) + MJSW \cdot \frac{VBS}{PBSW(T)}}{(1 - FC)^{1+MJSW}}$$

$$\text{Если } VBD \leq FC \cdot PB(T), \text{ то } f1(VBD) = \frac{I}{\left(1 - \frac{VBD}{PB(T)}\right)^{MJ}}$$

$$\text{Иначе } f1(VBD) = \frac{1 - FC \cdot (1 + MJ) + MJ \cdot \frac{VBS}{PB(T)}}{(1 - FC)^{1+MJ}}$$

$$\text{Если } VBD \leq FC \cdot PBSW(T) \text{ то } f2(VBD) = \frac{1}{\left(1 - \frac{VBD}{PBSW(T)}\right)^{MJSW}}$$

$$\text{Иначе } f2(VBD) = \frac{1 - FC \cdot (1 + MJSW) + MJSW \cdot \frac{VBD}{PBSW(T)}}{(1 - FC)^{1+MJSW}}$$

Уравнения для шумов MOSFET

Уравнения для шумов, приведенные ниже, применяются в моделях уровней (Level) 1, 2, 3, 4, 5 и в модели EKV. Также они используются для моделей BSIM3 (Level 8) и BSIM4 (Level 14) в том случае, если модельный параметр NLEV указан. Если NLEV не определен, то для расчета шумов моделей указанных уровней используются исходные модели BSIM3 и BSIM4.

Паразитный тепловой шум выводов резисторов:

$$I_{RG}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T}{RG} \quad I_{RD}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T}{RD} \quad I_{RS}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T}{RS} \quad I_{RB}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T}{RB}$$

Канальный дробовой и фликкер шумы:

$$I_{channel}^2 = I_{shot}^2 + I_{flicker}^2$$

Внутренний фликкер-шум:

$$\text{Если } NLEV = 0 \quad I_{flicker}^2 = \frac{KF \cdot I_{drain}^{AF}}{COX \cdot Leff^2 \cdot f}$$

$$\text{Если } NLEV = 1 \quad I_{flicker}^2 = \frac{KF \cdot I_{drain}^{AF}}{COX \cdot Weff \cdot Leff \cdot f}$$

$$\text{Если } NLEV = 2 \text{ или } 3 \quad I_{flicker}^2 = \frac{KF \cdot Gm^{AF}}{COX \cdot Weff \cdot Leff \cdot f^{AF}}$$

Внутренний дробовой шум:

$$\text{Если } NLEV < 3, \quad I_{shot}^2 = (8/3) \cdot k \cdot T \cdot gm$$

Если $NLEV=3$

$$I_{shot}^2 = GDSNOI \cdot \frac{8}{3} \cdot k \cdot T \cdot gm \cdot beta \cdot (V_{gs} - V_{th}) \cdot \frac{1 + a + a^2}{1 + a},$$

где $a = 1 - V_{ds} / V_{dsat}$, если $V_{ds} \leq V_{dsat}$ (линейная область) и $a=0$ во всех остальных случаях.

11.5.4. Определение параметров модели МОП-транзистора

Таблица 11.10. Экраны программы MODEL для определения параметров модели МОП-транзистора

Передаточная проводимость Gfs vs. Ids	
Входные данные	Таблица зависимости проводимости прямой передачи Gfs от тока стока Id
Оцениваемые параметры	KP, RS, W, VTO, L
Уравнения	$Beta = KP \cdot \frac{W}{L}, \quad t_1 = (2 \cdot Ids \cdot beta)^{0,5},$ $Gfs = \frac{t_1}{1 + RS \cdot t_1}$
Комментарии	Требуется вводить данные для больших токов Id , что повышает точность оценки сопротивления RS
Сопротивление канала в режиме "включено" Ron vs. Id	
Входные данные	Таблица зависимости статического сопротивления сток-исток Ron от тока стока Id
Условия	Напряжение затвор-исток Vgs
Оцениваемые параметры	RD
Уравнения	$Beta = KP \cdot \frac{W}{L}, \quad Vgst = Vgs - VTO - Id \cdot RS,$ $Vds = vgst - \left(vgst^2 - \frac{2 \cdot Id}{beta} \right)^{0,5},$ $Ron = RD + RS + \frac{1}{beta \cdot (vgst - Vds)}.$
Комментарии	Требуется вводить данные для малых токов Id для повышения точности вычисления сопротивления RD

Продолжение табл. 11.10

Выходная характеристика I_{ds} vs. V_{ds}	
Входные данные	Таблицы из трех значений I_{ds} , V_{ds} и V_{gs}
Оцениваемые параметры	W, VTO, RD, RS, LAMBDA, KP, L
Уравнения	$I_{d=0} \text{ при } V_{gs} < V_{TO},$ $I_{ds} = \frac{KP \cdot W}{L} \cdot (V_{gs} - V_{TO} - 0,5 \cdot V_{ds}) \cdot V_{ds} \cdot (1 + LAMBDA \cdot V_{ds}),$ при $V_{gs} - V_{th} > V_{ds}$, $I_{ds} = \frac{0,5 \cdot KP \cdot W}{L} \cdot (V_{gs} - V_{TO})^2 \cdot (1 + LAMBDA \cdot V_{ds})$ При $V_{gs} - V_{th} < V_{ds}$
Комментарии	Если использовались предыдущие сеансы (графики) оптимизации, не следует делать инициализацию перед выполнением текущей оптимизации. Если это первый сеанс оптимизации, то инициализацию производить необходимо. Если экспериментальные данные выходных характеристик недоступны, пропустите этот сеанс (график) и далее используйте параметры, подобранные в предыдущих 3-х сеансах.
Сопротивление утечки канала при нулевом смещении на затворе I_{dss} vs. V_{ds}	
Входные данные	Пара значений: ток стока I_{dss} , напряжение сток-исток V_{ds}
Условия	Напряжение $V_{gs}=0$
Оцениваемые параметры	RDS
Уравнения	$RDS = \frac{V_{ds}}{I_{dss}}$
Выходная емкость C_{ds} vs. V_{ds}	
Входные данные	Таблица значений C_{iss} , C_{oss} , C_{rss}
Оцениваемые параметры	CBD, PB, FC, MJ
Уравнения	$C_{ds} = \frac{CBD}{\left(1 - \frac{V_{ds}}{PB}\right)^{MJ}}$

Окончание табл. 11.10

Объемный заряд в состоянии «включено» V_{gs} vs. Q_g	
Входные данные	Таблица из 2-3 значений зарядов затвора в точках излома $Q1$, $Q2$
Условия	Напряжение сток-исток V_{ds} (или напряжение питания V_{dd}) и ток стока I_d
Оцениваемые параметры	CGSO, CGDO
Уравнения	Запускается моделирование схемы и измеряются величины V_{gs} и Q_{gs}
Комментарии	Зависимость заряда области затвор-исток Q_{gs} от напряжения затвор-исток V_{gs} имеет две точки излома, соответствующие переключению канала. Значение заряда в первой точке излома обозначается как $Q1$, во второй точке — $Q2$
Сопротивление затвора (Gate Resistance)	
Входные данные	Значения времени переключения (спада тока стока) T_f от уровня 90% до уровня 10%
Условия	Напряжение питания V_{dd} и ток стока I_d
Оцениваемые параметры	RG
Уравнения	Запускается моделирование схемы в режиме переключения, измеряется время переключения и подбирается значение RG для получения заданного значения T_f .

11.6. Операционные усилители OPAMP

11.6.1. Модель операционного усилителя

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART** <имя>
Пример:
OP1
- Атрибут **MODEL** <имя модели>
Пример:
LF3511

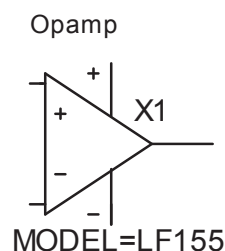


Рис. 11.12 Операционный усилитель

Для операционного усилителя существуют модели 3-х уровней. Каждый следующий уровень представляет собой более точную модель благодаря использованию более сложной эквивалентной схемы.

Модель уровня 1 (LEVEL 1) представляет собой управляемый напряжением источник тока с ограниченным выходным сопротивлением и без обратной связи.

Модель 2-го уровня (LEVEL 2) состоит из трех частей, имеет 2 полюса и ограничение скорости нарастания, конечные коэффициент усиления и выходное сопротивление.

Модель 3-го уровня (LEVEL 3) — это усовершенствованная модель Бойля, подобная модели используемой в других SPICE программах в виде подсхемы. Она, однако, не является макроопределением или подсхемой, а является полноценной встроенной в Micro-Cap моделью операционного усилителя. Она моделирует ограничение скорости нарастания и спада, ограничение коэффициента передачи, выходное сопротивление на постоянном и переменном токе, напряжения и токи смещения нуля, фазовые сдвиги, полосу пропускания, 3 вида дифференциальных входов, ограничение выходного напряжения и ограничение тока.

Формат текстовой директивы модели операционного усилителя

.MODEL <имя модели> OPA([параметры модели])

Примеры:

.MODEL LM709 OPA (A=45K VOFF=.001 SRP=250K GBW=1E6)

.MODEL LF155 OPA (LEVEL=2 TYPE=1 A=50K SRP=330K)

11.6.2. Параметры модели операционного усилителя

Таблица 11.11. Параметры моделей операционных усилителей

Обозначение	Уровень модели LEVEL	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
LEVEL	1—3	Уровень модели (1, 2, 3)	—	1
TYPE	3	Тип входного транзистора: 1 — NPN, 2 — PNP, 3 — JFET		1
C	3	Емкость коррекции	Ф	30E-12
A	1—3	Коэффициент усиления без обратной связи на постоянном токе	—	2E5
ROUTAC	1—3	Выходное сопротивление по переменному току	Ом	75
ROUTDC	1—3	Выходное сопротивление по постоянному току	Ом	125
VOFF	3	Напряжение смещения нуля	В	0.001
IOFF	3	Разность входных токов смещения	А	1E-9
SRP	2, 3	Максимальная скорость нарастания выходного напряжения	В/с	5E5
SRN	2, 3	Максимальная скорость спада выходного напряжения	В/с	5E5
IBIAS	3	Входной ток смещения	А	1E-7
VCC	3	Положительное напряжение питания	В	15
VEE	3	Отрицательное напряжение питания	В	-15

Окончание табл. 11.11

Обозначение	Уровень модели LEVEL	Содержание	Размерность	Значение по умолчанию
VPS	3	Максимальное выходное положительное напряжение	В	13
VNS	3	Максимальное выходное отрицательное напряжение	В	-13
CMRR	3	Коэффициент подавления синфазного сигнала		1E5
GBW	2, 3	Площадь усиления (равна произведению коэффициента усиления А на частоту первого полюса)		1E6
PM	2, 3	Запас по фазе на частоте единичного усиления	град.	60
PD	3	Рассеиваемая мощность	Вт	0.025
IOSC	3	Выходной ток короткого замыкания	А	0.02
T_MEASURED	3	Температура измерений	°C	—
T_ABC	3	Абсолютная температура	°C	—
T_REL_GLOBAL	3	Относительная температура	°C	—
T_REL_LOCAL	3	Разность между температурой устройства и модели-прототипа	°C	

VCC и VEE — это напряжения двуполярного питания, для которого указаны величины VPS и VNS — насыщения передаточной характеристики. Величины напряжений источников питания влияют только на рассеиваемую мощность и максимальное выходное напряжение ОУ.

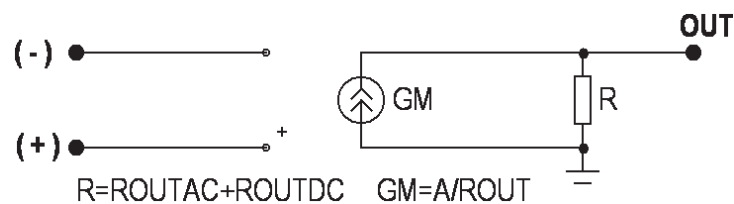


Рис. 11.13. Эквивалентная схема модели ОУ LEVEL1

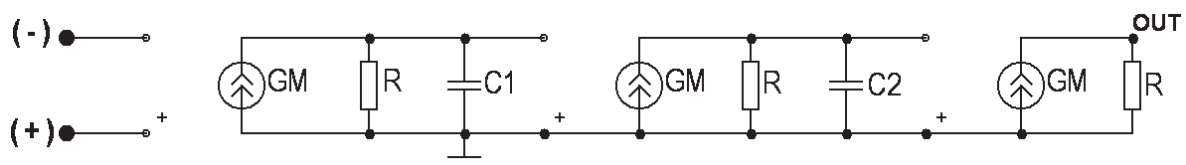


Рис. 11.14. Эквивалентная схема модели ОУ LEVEL2

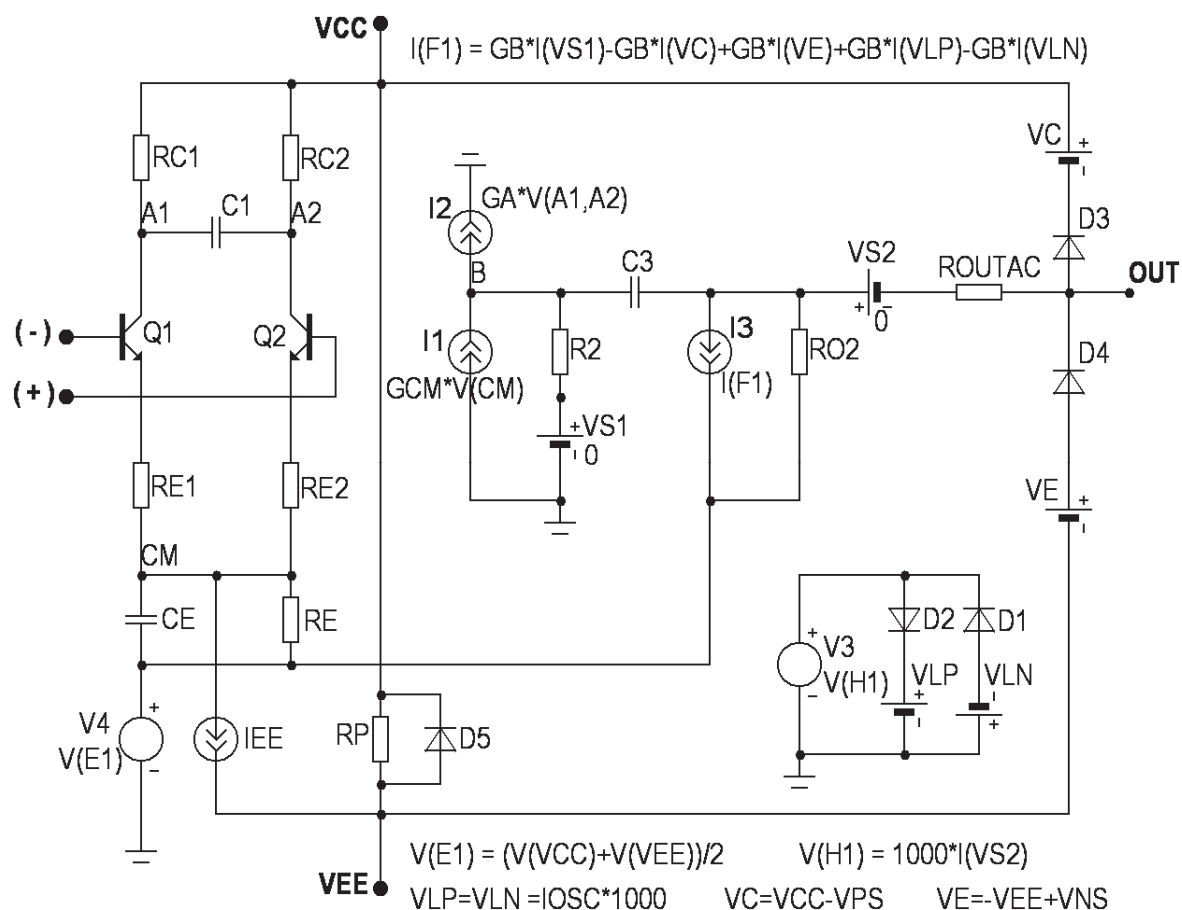


Рис. 11.15. Эквивалентная схема модели ОУ с рпн-транзисторами на входе LEVEL3

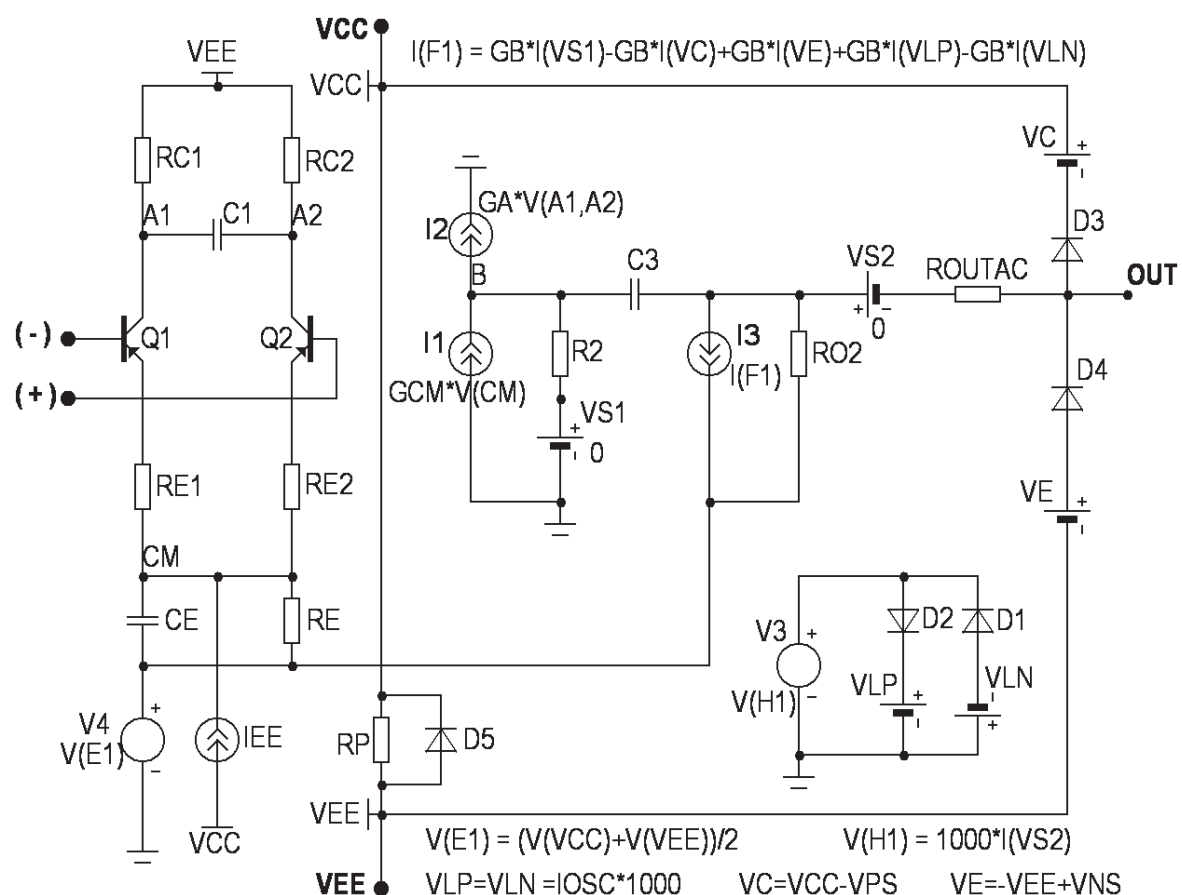


Рис. 11.16. Эквивалентная схема модели ОУ с рпн-транзисторами на входе LEVEL3

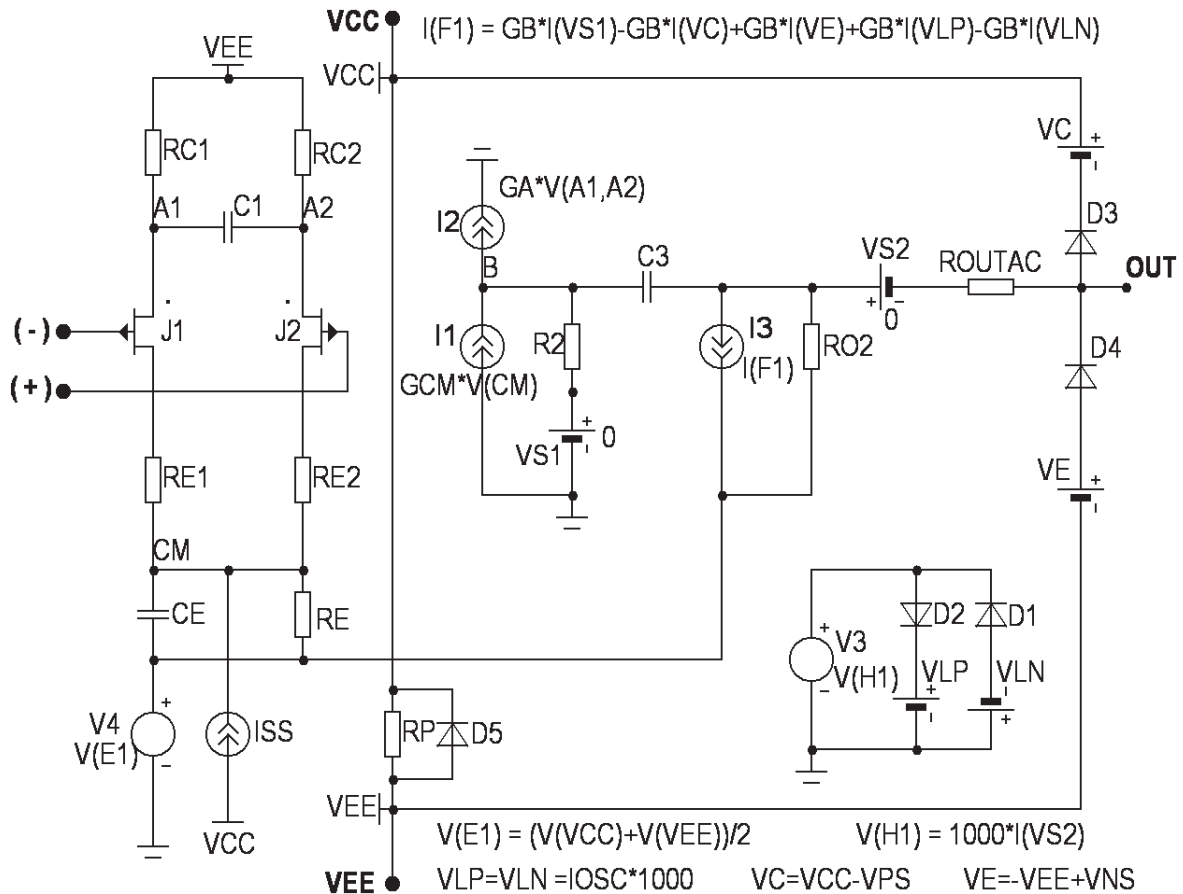


Рис. 11.17. Эквивалентная схема модели ОУ с полевыми транзисторами на входе LEVEL3

11.6.3. Уравнения модели операционного усилителя

T — температура кристалла в градусах Кельвина

$V_T = \frac{kT}{q}$ — температурный потенциал

BETA1 — прямое beta транзистора Q1

BETA2 — прямое beta транзистора Q2

BJT1IS — ток насыщения (IS) транзистора Q1

BJT2IS — ток насыщения (IS) транзистора Q2

V(A1) — напряжение в узле A1

V(A2) — напряжение в узле A2

V(CM) — напряжение в узле CM

I(VS1) — ток через источник VS1

I(VC) — ток через источник VC

I(VE) — ток через источник VE

I(VLP) — ток через источник VLP

I(VLN) — ток через источник VLN

V(VCC) — напряжение на источнике VCC

V(VEE) — напряжение на источнике VEE

I(VS2) — ток через источник VS2

I(GA) — ток через источник GA

$I(GCM)$ — ток через источник GCM

$I(F1)$ — ток источника $F1$

$V(E1)$ — напряжение источника $E1$

$V(H1)$ — напряжение источника $H1$

Температурные эффекты

Температура влияет на поведение диодов, биполярных и полевых транзисторов обычным образом, как описано в соответствующих разделах.

Уравнения для модели LEVEL 1

$$R = ROUTAC + ROUTDC \qquad GM = \frac{A}{R}$$

Уравнения для модели LEVEL 2

$$R = ROUTAC + ROUTDC \qquad GM = \frac{A^{\frac{1}{3}}}{R}$$

Частота 1-го полюса $F1 = \frac{GBW}{A}$

Частота 2-го полюса $F2 = \frac{GBW}{tg[90^\circ - PM]}$

$$C1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F1 \cdot R} \qquad C2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F2 \cdot R}$$

Уравнения для модели LEVEL 3

$$C3 = C;$$

$$C1 = 0.5 \cdot C \cdot tg[90^\circ - PM];$$

$$R_{C1} = \frac{1}{2\pi \cdot GBW \cdot C3};$$

$$R_{C2} = R_{C1}$$

$$R2 = 1E5;$$

$$GA = \frac{1}{R_{C1}}.$$

NPN и PNP входные части эквивалентной схемы:

$$VAF = 200.$$

NPN входы:

$$IC1 = \frac{SRP \cdot C3}{2}; \qquad CE = \frac{2 \cdot IC1}{SRN} - C3.$$

PNP входы:

$$IC1 = \frac{SRN \cdot C3}{2}; \quad CE = \frac{2 \cdot IC1}{SRP} - C3.$$

$$BETA1 = \frac{IC1}{IBIAS + \frac{IOFF}{2}}; \quad BETA2 = \frac{IC1}{IBIAS - \frac{IOFF}{2}}.$$

$$IEE = \left(\frac{BETA1 + 1}{BETA1} + \frac{BETA2 + 1}{BETA2} \right) \cdot IC1.$$

$$RE1 = \frac{BETA1 + BETA2}{BETA1 + BETA2 + 2} \cdot \left(RC1 - \frac{VT}{IC1} \right); \quad RE2 = RE1.$$

$$RP = \frac{(|VCC| + |VEE|)^2}{PD - |VCC| \cdot 2 \cdot IC1 - |VEE| \cdot IEE}; \quad RE = \frac{VAF}{IEE}.$$

$$BJT1IS = 1E-16; \quad BJT2IS = BJT1IS \cdot \left(1 + \frac{VOFF}{VT} \right).$$

Входы на полевых транзисторах JFET:

$$IEE = C3 \cdot SRN$$

$$CE = \frac{IEE}{SRP} - C3$$

$$RE = \frac{VAF}{IEE}; \quad RE1 = 1; \quad RE2 = 1;$$

$$BETA1 = \frac{0,5 \cdot GA^2}{IEE}; \quad BETA2 = BETA1$$

$$RP = \frac{(|VCC| + |VEE|)^2}{PD}.$$

Для всех типов входов

$$RO2 = ROUTDC - ROUTAC;$$

$$GCM = \frac{1}{CMRR \cdot RC1}; \quad GB = \frac{RC1 \cdot A}{RO2}$$

$$VLP = IOSC \cdot 1000; \quad VLN = VLP;$$

$$VC = VCC - VPS; \quad VE = -VEE + VNS.$$

Уравнения для управляемых источников

$$I(GA) = GA \cdot (V(A1) - V(A2));$$

$$I(GCM) = GCM \cdot V(CM);$$

$$I(F1) = GB \cdot I(VS1) - GB \cdot I(VC) + GB \cdot I(VE) + GB \cdot I(VLP) - GB \cdot I(VLN);$$

$$V(E1) = \frac{V(VCC) + V(VEE)}{2};$$

$$V(H1) = 1000 \cdot (I(VS2));$$

$$V(VS1) = 0.0 \text{ (Используется только для измерения тока);}$$

$$V(VS2) = 0.0 \text{ (Используется только для измерения тока).}$$

Отметим, что модели LEVEL 2 и LEVEL 3 используют входной параметр GBW, называемый площадью усиления — произведение полосы пропускания на коэффициент усиления. Соответствующая модель операционного усилителя будет иметь на частоте $F = GBW$ при разомкнутой цепи обратной связи запас по фазе равный PM и коэффициент усиления -3.01 дБ. При этом пересечение асимптоты средней части ЛАЧХ (с наклоном -20 дБ/дек) с прямой линией $F = GBW$ происходит в точке 0,0 дБ.

Следует отметить, что параметр запас по фазе PM связан с фазовым сдвигом PHA выходного напряжения следующим образом:

$$PM = PHA + 180^\circ.$$

Следовательно, для того чтобы построить запас по фазе PM в режиме AC анализа необходимо в качестве *Y expression* использовать выражение $PH(V(OUT)) + 180$.

11.6.4. Определение параметров модели операционного усилителя

Программа MODEL не строит каких-либо графиков характеристик операционных усилителей (ОУ). Пользователь на трех экранах вводит паспортные данные ОУ, на основании которых рассчитываются (вводятся) параметры его макромодели (табл. 11.12).

Таблица 11.12. Экраны программы MODEL для определения параметров модели операционного усилителя

Экран 1	
Входные данные	Вводятся значения параметров, оптимизация не производится: LEVEL — тип модели, всегда назначается тип 3; TYPE — тип входных транзисторов: 1 — NPN, 2 — PNP, 3 — NJFET; C — емкость коррекции (30 пФ); A — коэффициент усиления на постоянном токе (200K); ROUTAC — выходное сопротивление переменному току (75 Ом); ROUTDC — выходное сопротивление постоянному току (125 Ом); VOFF — напряжение смещения нуля (1 мВ)

Экран 2	
Входные данные	Вводятся значения параметров, оптимизация не производится: IOFF — разность входных токов смещения (1 нА); SRP — максимальная скорость нарастания выходного напряжения ($5 \cdot 10^5$ В/с); SRN — максимальная скорость спада выходного напряжения ($5 \cdot 10^5$ В/с); IBIAS — входной ток смещения (0,1 мкА); VEE — напряжение отрицательного питания (–15 В); VCC — напряжение положительного питания (15 В); VPS — максимальное выходное положительное напряжение (13 В)
Экран 3	
Входные данные	Вводятся значения параметров, оптимизация не производится: VNS — максимальное выходное отрицательное напряжение (–13 В); CMRR — коэффициент подавления синфазного сигнала (10^5); GBW — площадь усиления (равна произведению коэффициента усиления А на частоту первого полюса) (10^6 Гц); PM — запас по фазе на частоте единичного усиления, град. (60); PD — потребляемая мощность (25 мВт); IOSC — выходной ток короткого замыкания (20 мА)

Примечание. В скобках указаны значения по умолчанию

11.7. Арсенид-галлиевые полевые транзисторы GaAsFET

11.7.1. Модель арсенид-галлиевого полевого транзистора

Формат SPICE

B<имя> <сток> <затвор> <исток> <имя модели> [area] [OFF] [IC=<vds>[,vgs]]

Пример:

B1 5 7 9 2N3531 1 OFF IC=1.0,2.5

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART** <имя>

Пример:

B1

- Атрибут **VALUE** [area] [OFF] [IC=<vds>[,vgs]]

Пример:

1.5 OFF IC=0.05,1.00

- Атрибут **MODEL** <имя модели>

Пример:

GFX_01

GaAsFET

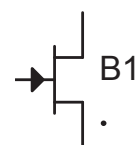


Рис. 11.18

Арсенид-галлиевый полевой транзистор

Прибор является n-канальным. Нет разновидностей с каналом p-типа. LEVEL 1 специфицирует модель Куртиса, LEVEL 2 — модель Рэйтеона или Стаца, LEVEL 3 — модель Триквинта. Ключевое слово OFF отключает прибор от схемы на первой итерации вычисления рабочей точки по постоянному току (Operating point). Ввод начальных условий с помощью [IC=Vds[,Vgs]] присваивает начальные значения напряжениям сток-исток и затвор-исток.

Формат текстовой директивы модели арсенид-галлиевого полевого транзистора:

.MODEL <имя модели> GASFET([параметры модели])

Пример:

.MODEL B1 GASFET (VTO=-2 ALPHA=2 BETA=1E-4 LAMBDA=1E-3)

11.7.2. Параметры модели арсенид-галлиевого полевого транзистора

Таблица 11.13. Параметры модели арсенид-галлиевого полевого транзистора

Обозначение	LEVEL	Содержание	Значение по умолчанию	Единица измерения	AREA
LEVEL	1–3	Тип модели: 1 — модель Куртиса, 2 — модель Рэйтеона, 3 — модель TriQuint	1		
VTO	1–3	Барьерный потенциал перехода Шоттки или пороговое напряжение	–2.5	В	
ALPHA	1–3	Коэффициент для напряжения насыщения тока стока	2.0	1/В	
BETA	1–3	Удельная крутизна (удельная передаточная проводимость)	0.1	A/B ²	×
B	2	Параметр легирования	0.3	1/В	
LAMBDA	1–3	Параметр модуляции длины канала	0	1/В	
GAMMA	3	Параметр статической обратной связи	0	—	
DELTA	3	Параметр выходной обратной связи	0	(A·B) ^{–1}	
Q	3	Показатель степени	2	—	
RG	1–3	Объемное сопротивление области затвора	0	Ом	/
RD	1–3	Объемное сопротивление области стока	0	Ом	/
RS	1–3	Объемное сопротивление области истока	0	Ом	/
IS	1–3	Ток насыщения р-п-перехода затвор-канал	1E-14	А	
N	1–3	Коэффициент эмиссии р-п-перехода затвор-канал	1	—	
M	1–3	Коэффициент плавности р-п-перехода затвора	0.5	—	
VBI	1–3	Контактная разность потенциалов р-п-перехода затвора	1	В	
CGD	1–3	Емкость затвор-сток при нулевом смещении	0	Ф	×
CGS	1–3	Емкость затвор-исток при нулевом смещении	0	Ф	×
CDS	1–3	Емкость сток-исток фиксированная	0	Ф	×
FC	1–3	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямо смещенного р-п-перехода затвора	0.5	—	
VDELTA	2, 3	Напряжение, входящее в выражения для емкостей переходов	0.2	В	

Окончание табл. 11.13

Обозначение	LEVEL	Содержание	Значение по умолчанию	Единица измерения	AREA
VMAX	2, 3	Максимальное напряжение, входящее в выражения для емкостей переходов	0.5	В	
EG	1–3	Ширина запрещенной зоны	1.11	эВ	
XTI	1–3	Температурный коэффициент тока IS	0	—	
VTOTC	1–3	Температурный коэффициент VTO	0	В/°C	
BETATCE	1–3	Температурный экспоненциальный коэффициент BETA	0	%/°C	
TRG1	1–3	Линейный температурный коэффициент RG	0	1/°C	
TRD1	1–3	Линейный температурный коэффициент RD	0	1/°C	
TRS1	1–3	Линейный температурный коэффициент RS	0	1/°C	
KF	1–3	Коэффициент, определяющий спектральную плотность фликкер-шума	0	—	
AF	1–3	Показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока через переход	1	—	
T_MEASURED	1–3	Температура измерения	—	°C	
T_ABS	1–3	Абсолютная температура	—	°C	
T_REL_GLOBAL	1–3	Относительная температура	—	°C	
T_REL_LOCAL	1–3	Разность между температурой транзистора и модели-прототипа АКО		°C	

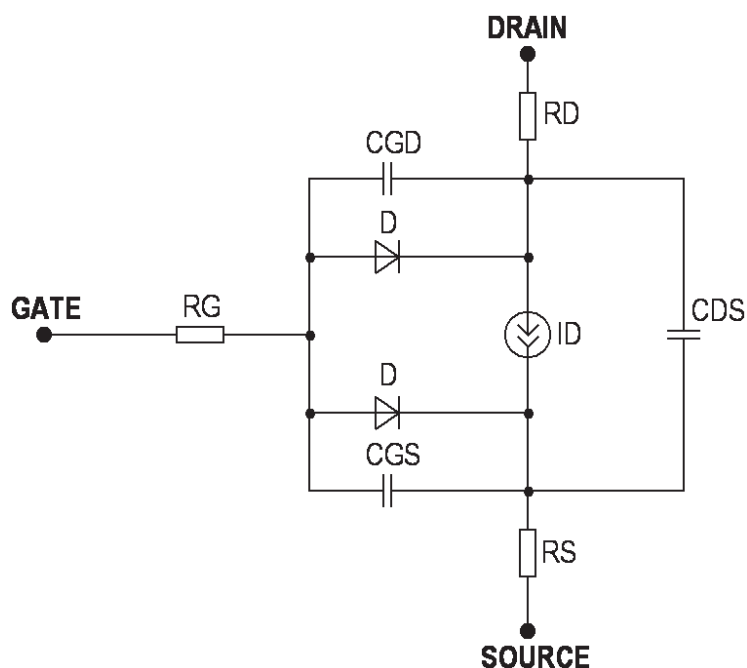


Рис. 11.19. Модель арсенидгаллиевого полевого транзистора

11.7.3. Уравнения математической модели GaAsFET

Модельные параметры **BETA**, **CGS**, **CGD**, и **CDS** умножаются на [area], а модельные параметры **RG**, **RD** и **RS** делятся на [area] перед началом их использования в нижеприведенных уравнениях.

T — это температура работы прибора, а **Tnom** — это температура, при которой измерены модельные параметры. Обе выражаются в градусах Кельвина. **T** устанавливается по значению температуры анализа в диалоге *Analysis Limits* соответствующего режима анализа. **TNOM** — определяется установками *Global Settings*. Величину **TNOM** можно изменить только с помощью директивы .OPTIONS. **T** и **Tnom** могут быть подобраны для каждой модели спецификацией параметров **T_MEASURED**, **T_ABS**, **T_REL_GLOBAL**, и **T_REL_LOCAL** (см. раздел 4.9, описание директивы .MODEL).

Vgs — внутреннее напряжение затвор-исток

Vds — внутреннее напряжение сток-исток

Id — ток стока

$$VT = \frac{k \cdot T}{q} = \frac{1.38E-23 \cdot T}{1.602E-19}$$

X(T) означает температурную зависимость параметра X.

Температурная зависимость

$$BETA(T) = BETA \cdot 1,01^{BETATCE \cdot (T - Tnom)}$$

$$EG(T) = 1,16 - \frac{0,000702 \cdot T^2}{T + 1108}$$

$$VTO(T) = VTO + VTOTC \cdot (T - Tnom)$$

$$IS(T) = IS(Tnom) \cdot e^{\frac{EG \cdot (T/Tnom - 1)}{VT \cdot N}}$$

$$RG(T) = RG \cdot (1 + TRG1 \cdot (T - Tnom))$$

$$RD(T) = RD \cdot (1 + TRD1 \cdot (T - Tnom))$$

$$RS(T) = RS \cdot (1 + TRS1 \cdot (T - Tnom))$$

$$VBI(T) = VBI \cdot \frac{T}{Tnom} - 3 \cdot VT \cdot \ln\left(\frac{T}{Tnom}\right) - EG(Tnom) \cdot \frac{T}{Tnom} + EG(T)$$

$$CGS(T) = CGS \cdot \left[1 + M \cdot \left(.0004 \cdot (T - Tnom) + 1 - \frac{VBI(T)}{VBI} \right) \right]$$

$$CGD(T) = CGD \cdot \left[1 + M \cdot \left(.0004 \cdot (T - Tnom) + 1 - \frac{VBI(T)}{VBI} \right) \right]$$

Уравнения для токов модели LEVEL 1

Область отсечки ($Vgs \leq VTO(T)$)

$$Id = 0$$

Область линейного режима и режима насыщения ($V_{gs} > V_{TO}(T)$):

$$I_d = BETA(T) \cdot (1 + LAMBDA \cdot V_{ds}) \cdot (V_{gs} - V_{TO}(T))^2 \cdot \tanh(ALPHA \cdot V_{ds}).$$

Уравнения для токов модели LEVEL 2

Область отсечки ($V_{gs} \leq V_{TO}(T)$):

$$I_d = 0$$

Область линейного режима и режима насыщения ($V_{gs} > V_{TO}(T)$):

$$\text{Если } 0 < V_{ds} < \frac{3}{ALPHA}, \quad K_t = 1 - \left(1 - \frac{V_{ds} \cdot ALPHA}{3}\right)^3.$$

$$\text{Иначе } K_t = 1$$

$$I_d = BETA(T) \cdot (1 + LAMBDA \cdot V_{ds}) \cdot (V_{gs} - V_{TO}(T))^2 \cdot \frac{K_t}{1 + B \cdot (V_{gs} - V_{TO}(T))}.$$

Уравнения для токов модели LEVEL 3

Область отсечки ($V_{gs} \leq V_{TO}(T)$):

$$I_d = 0$$

Область линейного режима и режима насыщения ($V_{gs} > V_{TO}(T)$):

$$\text{Если } 0 < V_{ds} < \frac{3}{ALPHA}, \quad K_t = 1 - \left(1 - V_{ds} \cdot \frac{ALPHA}{3}\right)^3$$

$$\text{Иначе } K_t = 1$$

$$I_{dso} = BETA \cdot (V_{gs} - (V_{TO} - GAMMA \cdot V_{ds}))^2 \cdot K_t$$

$$I_d = \frac{I_{dso}}{1 + DELTA \cdot V_{ds} \cdot I_{dso}}$$

Уравнения для емкостей модели LEVEL 1

$$\text{Если } V_{gs} \leq FC \cdot V_{BI}(T), \quad C_{gs} = \frac{CGS}{\left(1 - \frac{V_{gs}}{V_{BI}(T)}\right)^M}$$

$$\text{Иначе } C_{gs} = \frac{CGS \cdot \left(1 - FC(1 + M) + M \cdot \frac{V_{gs}}{V_{BI}(T)}\right)}{(1 - FC)^{1+M}}.$$

$$\text{Если } V_{ds} \leq FC \cdot V_{BI}(T), \quad C_{gd} = \frac{CGD}{\left(1 - \frac{V_{gd}}{V_{BI}(T)}\right)^M}.$$

Иначе
$$C_{gd} = \frac{CGD \cdot \left(1 - FC(1 + M) + M \cdot \frac{V_{gd}}{V_{BI}(T)} \right)}{(1 - FC)^{1+M}} .$$

Уравнения для емкостей модели LEVEL 2 и LEVEL 3

$$V_e = \frac{V_{gs} + V_{gd} + ((V_{gs} - V_{gd})^2 + ALPHA^{-2})^{\frac{1}{2}}}{2}$$

Если
$$\frac{V_e + V_{TO}(T) + ((V_e - V_{TO}(T))^2 + DELTA^2)^{\frac{1}{2}}}{2} < V_{MAX} ,$$

то
$$V_n = \frac{V_e + V_{TO}(T) + ((V_e - V_{TO}(T))^2 + DELTA^2)^{\frac{1}{2}}}{2} .$$

Иначе $V_n = V_{MAX}$

$$K1 = \frac{1}{2} + \frac{V_e - V_{TO}(T)}{2 \cdot ((V_e - V_{TO}(T))^2 + DELTA^2)^{\frac{1}{2}}} ;$$

$$K2 = \frac{1}{2} + \frac{V_{gs} - V_{gd}}{2 \cdot ((V_{gs} - V_{gd})^2 + ALPHA^{-2})^{\frac{1}{2}}} ;$$

$$K3 = \frac{1}{2} - \frac{V_{gs} - V_{gd}}{2 \cdot ((V_{gs} - V_{gd})^2 + ALPHA^{-2})^{\frac{1}{2}}} ;$$

$$C_{gs} = \frac{CGS \cdot K2 \cdot K1}{\left(1 - \frac{V_n}{V_{BI}(T)} \right)^{\frac{1}{2}}} + CGD \cdot K3 ; \quad C_{gd} = \frac{CGS \cdot K3 \cdot K1}{\left(1 - \frac{V_n}{V_{BI}(T)} \right)^{\frac{1}{2}}} + CGD \cdot K2 .$$

Уравнения для шумов полевого транзистора GaAsFET

Паразитные сопротивления **RG**, **RD**, и **RS**, генерируют токи теплового шума:

$$I_g^2 = \frac{4kT}{RG} \quad I_d^2 = \frac{4kT}{RD} \quad I_s^2 = \frac{4kT}{RS}$$

Источник тока в цепи стока генерирует тепловой шум:

$$I^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot gm \cdot \frac{2}{3} + \frac{KF \cdot Id^{AF}}{Frequency} ,$$

где $gm = \frac{\partial Id}{\partial V_{gs}}$ (в рабочей точке по постоянному току).

11.8. Биполярный транзистор с изолированным затвором IGBT

11.8.1. Модель IGBT-транзистора

Формат SPICE

Z<имя> <затвор> <коллектор> <эмиттер> <имя модели>

+ [AREA=<area>] [WB=<base_width>] [AGD=<agd>] [KP=<kp>] [TAU=<tau>]

+ [OFF] [IC=[vgs[,vae[,vds[,veb]]]]]

Примеры:

Z1 1 2 0 IXGH10N170

+ AREA=1E-4 WB=100U AGD=.1N KP=1E-5

+ TAU=100N OFF IC=1,2,3,4

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART** <имя>

Пример:

Z1

- Атрибут **VALUE** [AREA=<area>] [WB=<base_width>] [AGD=<agd>] [KP=<kp>] [TAU=<tau>] [OFF] [IC=[vgs[,vae[,vds[,veb]]]]]

Пример:

AREA=2E-7 WB=10u

- Атрибут **MODEL** <имя модели>

Пример:

IXGH10N170

Модель этого прибора базируется на реализации Грегори Озиемкевича (Gregory Oziemkiewicz) модели IGBT, основанной на модели Аллена Хефнера (Allen R. Hefner) из национального Института стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology). Названия параметров, значения по умолчанию и единицы измерения совместимы с большинством версий этой же самой модели на языке SPICE.

Атрибуты <area>, <base_width>, <agd>, <kp>, и <tau>, если указываются, то предшествуют модельным параметрам с теми же самыми именами.

Ключевое слово **[OFF]** приводит к отключению прибора в течение первой итерации расчета режима по постоянному току. Начальные условия, задаваемые как **IC=[vgs[,vae[,vds[,veb]]]]**, присваивают начальные напряжения внешним выводам модели прибора.

Дополнительная информация по моделям IGBT находится в следующих источниках:

- Implementation and Development of the NIST IGBT Model in a SPICEbased Commercial Circuit Simulator*, Gregory Todd Oziemkiewicz, Engineer's Thesis, University of Florida, December 1995.
- Modelling Buffer Layer IGBT's for Circuit Simulation*, Allen R. Hefner Jr, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, No. 2, March 1995.

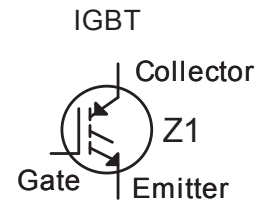


Рис. 11.20
IGBT-транзистор

- *An Experimentally Verified IGBT Model Implemented in the Saber Circuit Simulator*, Allen R. Hefner, Jr., Daniel M. Diebolt, IEE Transactions on Power Electronics, Vol. 9, No. 5, September 1994.

Формат текстовой директивы модели IGBT-транзистора:

.MODEL <имя модели> NIGBT ([параметры модели])

Таблица 11.14. Параметры модели IGBT транзистора

Обозначение	Содержание	Значение по умолчанию
AGD	Площадь области перекрытия затвор-сток	5u
AREA	Площадь прибора	10u
BVF	Лавинный фактор (Avalanche uniformity factor)	1
BVN	Коэффициент лавинного умножения (показатель экспоненты)	4
CGS	Удельная емкость затвор-исток на единицу площади	12.4n
COXD	Удельная емкость затвор-сток на единицу площади	35n
JSNE	Плотность тока насыщения эмиттера	650f
KF	Фактор триодной области	1
KP	Передаточная проводимость МДП-структуры	380m
MUN	Подвижность электронов	1.5K
MUP	Подвижность дырок	450
NB	Степень легирования базы (Base doping)	200T
T_ABS	Абсолютная температура	—
T_MEASURED	Температура измерения	—
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	—
T_REL_LOCAL	Разность между температурой транзистора и модели-прототипа АКО	—
TAU	Постоянная времени жизни амбиполярной рекомбинации	7.1u
THETA	Фактор поперечного поля (Transverse field factor)	20m
VT	Пороговое напряжение	4.7
VTD	Порог обеднения области перекрытия затвор-сток	1m
WB	Металлургическая ширина базы	90u

11.8.2. Уравнения математической модели IGBT

IMOS — ток канала MOSFET-транзистора (A)

IC = IT — коллекторный или анодный ток (A)

ICSS — установившееся значение тока коллектора биполярной структуры в рабочей точке по постоянному току (A)

IBSS — ток базы биполярной структуры в рабочей точке на постоянном токе (А)

IMULT — ток лавинного умножения (А)

b — коэффициент (доля) амбиполярной подвижности

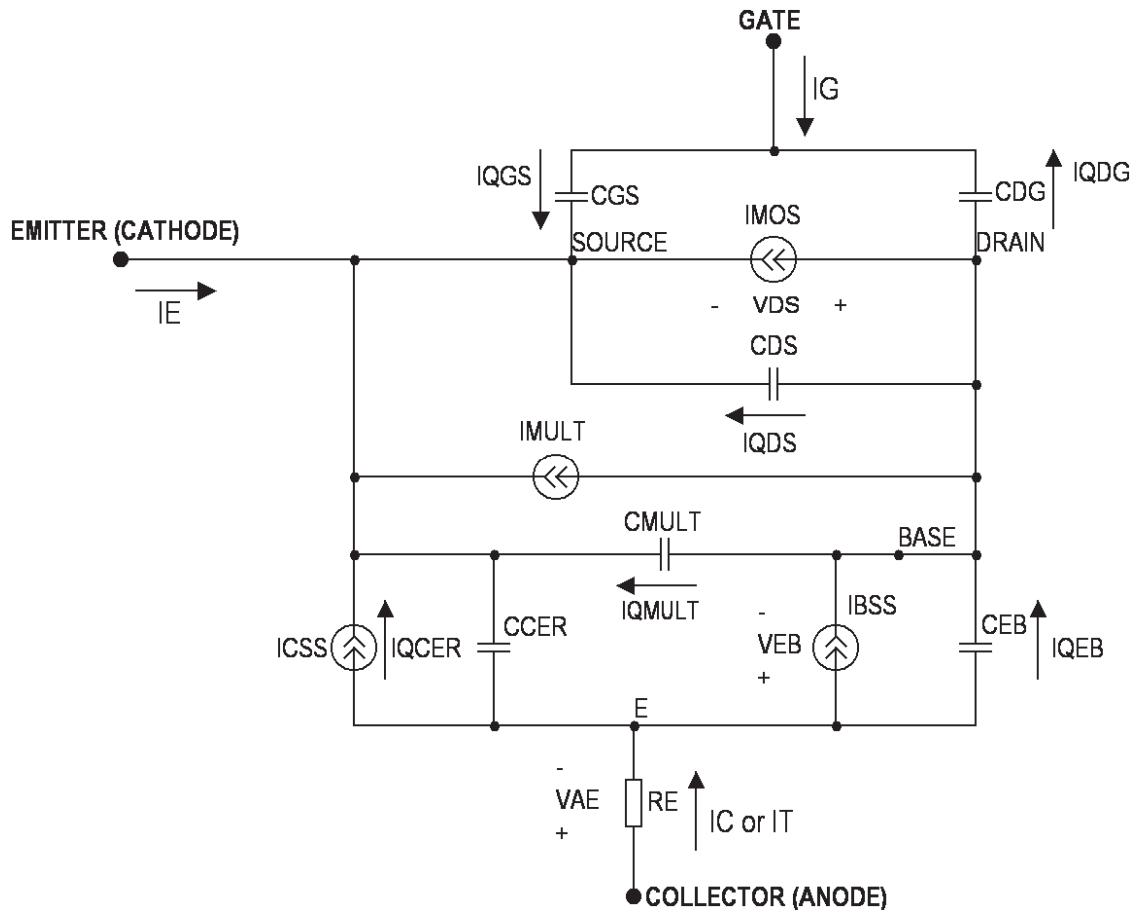


Рис. 11.21. Модель IGBT-транзистора

Dp — коэффициент диффузии дырок (см²/с)

Qeb — мгновенное значение заряда избыточных носителей базовой области (Кл)

Qb — Фоновый заряд носителей (Кл)

NI — собственная концентрация носителей

M — коэффициент лавинного умножения

Igen — ток термогенерации перехода коллектор-база (А)

Esi — диэлектрическая проницаемость кремния

q=1.6e-19 — заряд электрона (Кл)

$$wb = 100 \cdot WB \text{ (см)}$$

$$wbcj = \sqrt{\frac{2 \cdot Esi \cdot (0.6 + vbc)}{q \cdot NB}} \text{ (см)}$$

W=wb-wbcj — ширина квазинейтральной базы (См)

Rb — сопротивление базы с модулируемой проводимостью (Ом)

Vgst = Vgs – VT (В)

Уравнения для источников постоянного тока

Источник тока **IMOS**

$$V_{gst} < 0, \quad IMOS = 0.$$

$$V_{ds} \leq \frac{V_{gst}}{KF}, \quad IMOS = KF \cdot KP \cdot \frac{V_{gst} \cdot V_{ds} - 0.5 \cdot KF \cdot V_{ds}^2}{1 + THETA \cdot V_{gst}}.$$

$$\text{Для } V_{ds} > V_{gst}/KF, \quad IMOS = \frac{KP \cdot V_{gst}^2}{2 \cdot (1 + THETA \cdot V_{gst})}.$$

Источник тока **IC** (или **IT**)

$$V_{gst} < 0, \quad IC = IT = \frac{V_{ae}}{Rb}$$

Источник тока **ICSS**

$$V_{eb} \leq 0, \quad ICSS = 0$$

$$V_{eb} > 0, \quad ICSS = \frac{IT}{1+b} + b \cdot 4 \cdot \frac{Dp}{W^2} \cdot \frac{Q_{eb}}{1+b}$$

Источник тока **IBSS**

$$V_{eb} \leq 0, \quad IBSS = 0$$

$$V_{eb} > 0, \quad IBSS = \frac{Q_{eb}}{TAU} + \frac{Q_{eb}^2}{QB} \cdot \frac{4 \cdot NB^2}{Ni^2} \cdot JSNE \cdot AREA$$

Источник тока **IMULT**

$$Imult = (M - 1) \cdot (IMOS + ICSS) + M \cdot Igen$$

Уравнения, связывающие заряды с емкостями

Емкость затвор-исток (Gate-source)

$$C_{gs} = CGS$$

$$Q_{gs} = CGS \cdot V_{GS}$$

Емкость сток-исток (Drain-source)

$$W_{dsj} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{si} \cdot (V_{ds} + .6)}{q \cdot NB}}$$

$$C_{ds} = \frac{(AREA - AGD) \cdot E_{si}}{W_{dsj}}$$

$$Q_{ds} = q \cdot (AREA - AGD) \cdot NB \cdot W_{dsj}$$

Емкость сток-затвор (Drain-gate)

$$V_{ds} < V_{gs} - V_{TD}$$

$$C_{dg} = \frac{C_{dgj} \cdot COXD}{C_{dgj} + COXD}$$

$$W_{dgj} = \sqrt{\frac{2 \cdot Esi \cdot (V_{dg} + .6)}{q \cdot NB}}$$

$$C_{dgj} = \frac{AGD \cdot Esi}{W_{dgj}}$$

$$C_x = \frac{COXD \cdot W_{dgj}}{Esi \cdot AGD}$$

$$Q_{dg} = \frac{q \cdot NB \cdot Esi \cdot AGD^2}{COXD} \cdot C_x - \log(1 + C_x) - COXD \cdot VTD$$

Емкость **Ccer**

$$W_{bcj} = \sqrt{\frac{2 \cdot Esi \cdot (V_{bc} + .6)}{q \cdot NB}}$$

$$C_{bcj} = \frac{AREA \cdot Esi}{W_{bcj}}$$

$$C_{cer} = \frac{Q_{eb} \cdot C_{bcj}}{3 \cdot QB}$$

Емкость **Cmult**

$$C_{mult} = (M-1) \cdot C_{cer}$$

$$Q_{mult} = (M-1) \cdot Q_{cer}$$

Емкость эмиттер-база

$$C_{eb} = \frac{d(Q_{eb})}{d(V_{eb})}$$

$$Q_{mult} = (M-1) \cdot Q_{cer}$$

12. ТРАНСЛЯТОР IBIS

12.1. Что такое IBIS-транслятор

IBIS — это сокращение по первым буквам английского названия *Input output Buffer Information Specification* (Спецификация буфера ввода-вывода).

Представляет собой метод описания характеристик устройств на уровне интерфейса ввода-вывода, без подробного описания схемотехнической реализации, которая обеспечивает этот интерфейс.

IBIS-модель — это разновидность поведенческой модели, предназначенная для анализа процессов в линиях передачи сигналов цифровых систем. Логические функции компонента IBIS-модель не рассматривает, поэтому такие модели нельзя использовать для анализа работы устройства. Они предназначены лишь для моделирования распространения сигналов между выводами компонентов.

Большинство программ схемотехнического анализа не могут использовать IBIS-файл непосредственно. Они требуют предварительного перевода его на используемый язык моделирования. Обычно преобразование происходит в SPICE-совместимый формат.

Micro-Cap также предоставляет такую возможность. Программа переводит IBIS-файлы в SPICE-модель, которая может использоваться как программой Micro-Cap, так и другими программами схемотехнического анализа.

12.2. Использование IBIS-транслятора

IBIS-транслятор запускается командой *File>Translate>IBIS To SPICE File*. После этого на экране появляется окно транслятора **IBIS to SPICE** (рис. 12.1). Приведем его описание, пояснив назначение соответствующих полей.

Имена файлов

Input File. В этом поле указывается имя входного файла. Он должен иметь соответствующее расширение *.IBS. Для поиска необходимого файла можно воспользоваться панелью *Browse*.

Output File. В этом поле указывается имя выходного файла. Ему обычно присваивается расширение *.LIB, чтобы подчеркнуть его будущее использование в качестве библиотечного файла, несмотря на то, что он содержит также SPICE-код для построения графиков сигналов интерфейсных буферов.

Управление транслятором

Select All. Эта панель выбирает все выводы для показа в окне *IBIS* и последующего создания SPICE-модели.

View By. Определяет, что будет перечислено в списке: выводы микросхемы (pin), наименования сигналов (signal) или имена моделей (models) для них.

Show Warnings. Когда транслятор читает IBIS файл, он автоматически анализирует его синтаксис с помощью модуля "Golden Parser". Эта часть программного кода создана сотрудниками комитета IBIS для установления соответствия стандарту и идентификации ошибок формата данных. Если транслятор обнаруживает ошибку, он печатает соответствующее сообщение в окне *сообщений*.

Points: Определяет количество точек данных, которое транслятор использует в таблицах PWL для линейной интерполяции сигнала. Обычно используется число 500.

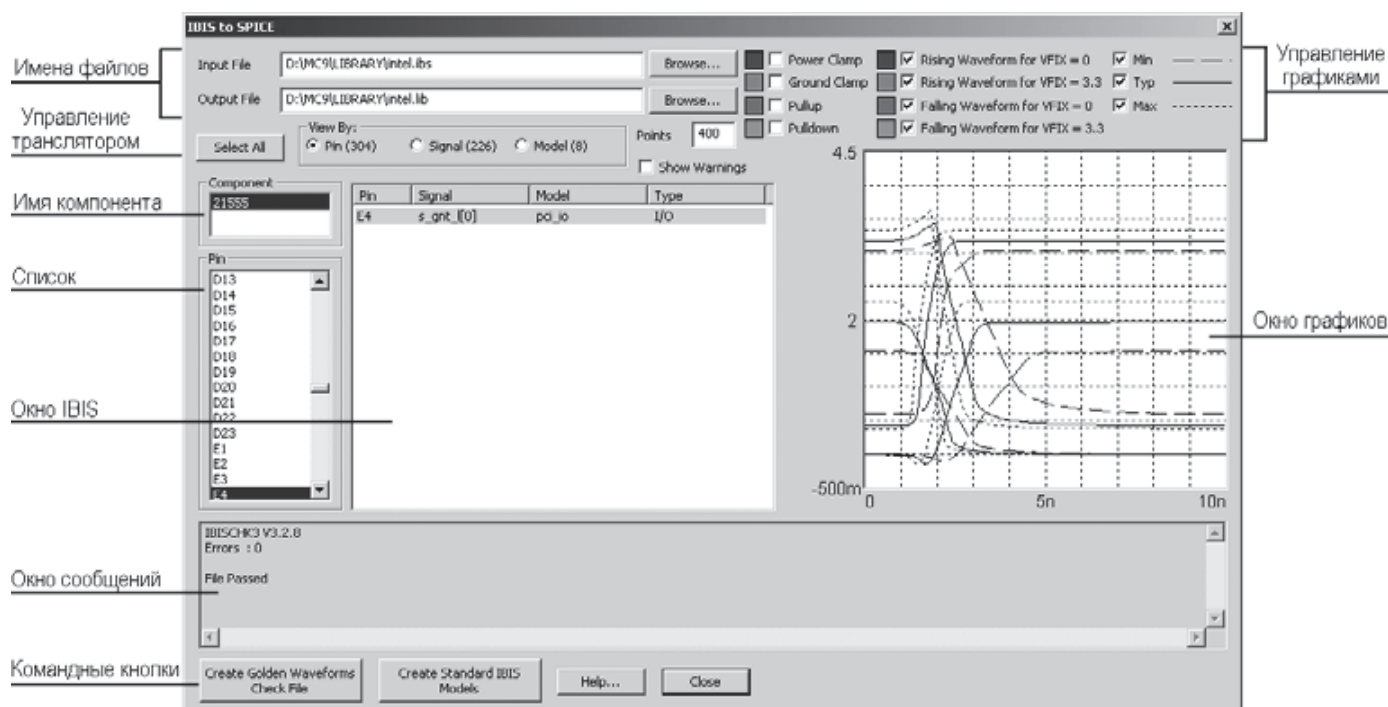


Рис. 12.1. Окно транслятора IBIS

Имя компонента (Component)

Позволяет выбрать имя конкретного электронного компонента из файла. Обычно в файле описывается один компонент.

Список (выводы, сигналы, модели — Pin, Signal, Model)

Показывает выводы, сигналы или модели в зависимости от установок панели **View By: Pin, Signal, Model**. Выбор одного или нескольких позиций в выбранном списке приведет к показу соответствующих строк таблицы (pin, signal, model, type) в соседнем окне справа (окно IBIS).

Управление графиками

Power Clamp: Вызывает показ графика зависимости I(V) фиксатора напряжения питания для выбранного вывода. Если файл не содержит операторов фиксаторов питания для вывода, эта опция не устанавливается.

Ground Clamp: Вызывает показ графика зависимости I(V) фиксатора земли для выбранного вывода. Если файл не содержит операторов фиксаторов земли для вывода, эта опция не устанавливается.

Pullup: Вызывает показ графика зависимости I(V) компонента, подтягивающего вывод к высокому уровню (pullup). Если файл не содержит операторов подтягивающих компонентов высокого уровня для вывода, эта опция не устанавливается.

Pulldown: Вызывает показ графика зависимости I(V) компонента, подтягивающего потенциал вывода к низкому уровню (pulldown). Если файл не содержит операторов подтягивающих компонентов низкого уровня для вывода, эта опция не устанавливается.

Rising Waveform (For V_{fixture}): Вызывает показ графика переднего фронта сигнала для выбранного вывода. Если файл не содержит операторов описывающих передний фронт сигнала для выбранного вывода, эта опция не устанавливается. V_{fixture} обозначает напряжение, приложенное к выходному выводу через резистор величиной R_{fixture} во время проведения измерения. Обычно показываются 2 графика, один для $V_{\text{fixture}}=0$ и другой для $V_{\text{fixture}}=VCC$.

Falling Waveform (For V_{fixture}): Вызывает показ графика заднего фронта сигнала для выбранного вывода. Если файл не содержит операторов, описывающих задний фронт сигнала для выбранного вывода, эта опция не устанавливается. V_{fixture} обозначает напряжение, приложенное к выходному выводу через резистор величиной R_{fixture} во время проведения измерения. Обычно показываются 2 графика, один для $V_{\text{fixture}}=0$ и другой для $V_{\text{fixture}}=VCC$.

Min: Показывает версию графика с наименьшими значениями сигналов.

Typical: Показывает версию графика с типовыми (средними) значениями сигналов.

Max: Показывает версию графика с наибольшими значениями сигналов.

Окно графиков

Место в диалоговом окне, куда выводятся графики зависимостей, содержащихся в IBIS-файле.

Командные кнопки

Create Golden Waveforms Check File. Создание тестового текстового файла с моделями, содержащими специфицированные выходные тестовые компоненты (*RFIX, CFIX, LFIX, VFIX и пр.*) выходных сигналов. В нем так же создаются источники сигналов для управления буферами для показа соответствия образцовым сигналам (Golden Waveforms). При этом создается по одной модели буфера для каждого вывода микросхемы для минимального, типового и максимального вариантов. А для каждого из перечисленных вариантов по две модели: 1) при подключении вывода через резистор к шине питания (*high v_fixture*) и 2) при подключении вывода через резистор к шине земли (*low v_fixture*). Таким образом, для каждого выхода устройства может быть создано до 6 моделей буферов. Если запустить анализ переходных процессов для созданного *.LIB-файла, можно увидеть для каждого уникального выходного буфера следующие сигналы:

1) входной импульс

2) подразумеваемый образцовый сигнал (Golden Waveform) из оригинального IBIS-файла.

3) Действительную форму сигнала созданной модели буфера.

Образцовые (Golden Waveform) и смоделированные сигналы должны очень точно соответствовать друг другу.

Графики для других буферов включаются в файл моделирования, но не указываются для показа. Включить их показ можно, указав в окне *Transient Analysis Limits* в графе *P* номер графика для соответствующего сигнала.

Create Standard IBIS Models: Создает текстовый файл, содержащий стандартные модели буферов для выбранных моделей, загруженных с указанными паразитными значениями сопротивления, индуктивности, емкости вывода (*RPIN*, *LPIN*, *CPIN* и пр.). При этом также создаются модели входов. Если запустить анализ переходных процессов для созданного LIB-файла можно увидеть графики моделирования первого типа буферов (выходных) для следующих сигналов:

- 1) Входной тестовый импульс.
- 2) реакция модели буфера на входной тестовый импульс.

Стандартный модельный файл представляет собой файл, который можно использовать для тестирования систем.

12.3. Пример трансляции IBIS-файла

Сначала необходимо выполнить команду *FILE>Translate>IBIS to SPICE File*. Данная команда загружает в память IBIS-транслятор. Воспользуйтесь кнопкой *Browse* и выберите файл *INTEL.IBS* из папки *LIBRARY*. Загрузите его. Файл представляет собой модель формата IBIS для микросхемы Intel 21555. Примерный вид экрана после загрузки файла будет таким, как показано на рис. 12.1.

После первой загрузки файла, транслятор читает файл, проверяет его на наличие синтаксических ошибок и при наличии таковых выдает сообщения в нижнюю область диалогового окна в *окно сообщений* (см. рис. 12.1). В рассматриваемом примере ошибки отсутствуют. Затем транслятор сканирует файл на наличие моделей сигналов, которые имеют передний и задний фронт и показывает один из выводов микросхемы, который использует подобную модель (вывод E4 на рис. 12.1).

Щелкните далее на кнопке *Select All*, затем — на кнопке *Create Golden Waveforms Check File*. Это приведет к созданию файла *INTEL.LIB*. После этого закройте окно IBIS-транслятора, нажав кнопку *Close*.

Новый созданный файл *INTEL.LIB* содержит следующие 12 моделей (ниже приведен фрагмент из созданного библиотечного файла, содержащий комментарии):

```
* Output Buffer Models:
*   PB4_TYP_LOWVFIX
*   PB4_TYP_HIGHVFIX
*   PB4_MIN_LOWVFIX
*   PB4_MIN_HIGHVFIX
*   PB4_MAX_LOWVFIX
*   PB4_MAX_HIGHVFIX
*   PCI_IO_TYP_LOWVFIX
*   PCI_IO_TYP_HIGHVFIX
*   PCI_IO_MIN_LOWVFIX
*   PCI_IO_MIN_HIGHVFIX
*   PCI_IO_MAX_LOWVFIX
*   PCI_IO_MAX_HIGHVFIX
```

В созданном файле имеются 2 модели выводов PCI_IO и PB4. Для каждой из двух моделей имеются минимальные, типовые и максимальные варианты, а внутри каждого варианта — разновидности при подсоединении вывода через резистор к напряжению питания (high v_fixture), и к общей шине (low v_fixture.). В итоге имеем общее количество моделей:

Total models=2 output models*3(min, typ, max) cases*2 V_Fixture cases=12

Полученные модели являются тестовыми моделями. Единственная цель создания подобного файла состоит в том, чтобы можно было запустить анализ переходных процессов и убедиться в том, что действительные сигналы созданной модели соответствуют образцовым (спецификации "Golden Waveforms"). Запустите TRANSIENT-анализ, на экране отобразятся следующие графики (рис. 12.2).

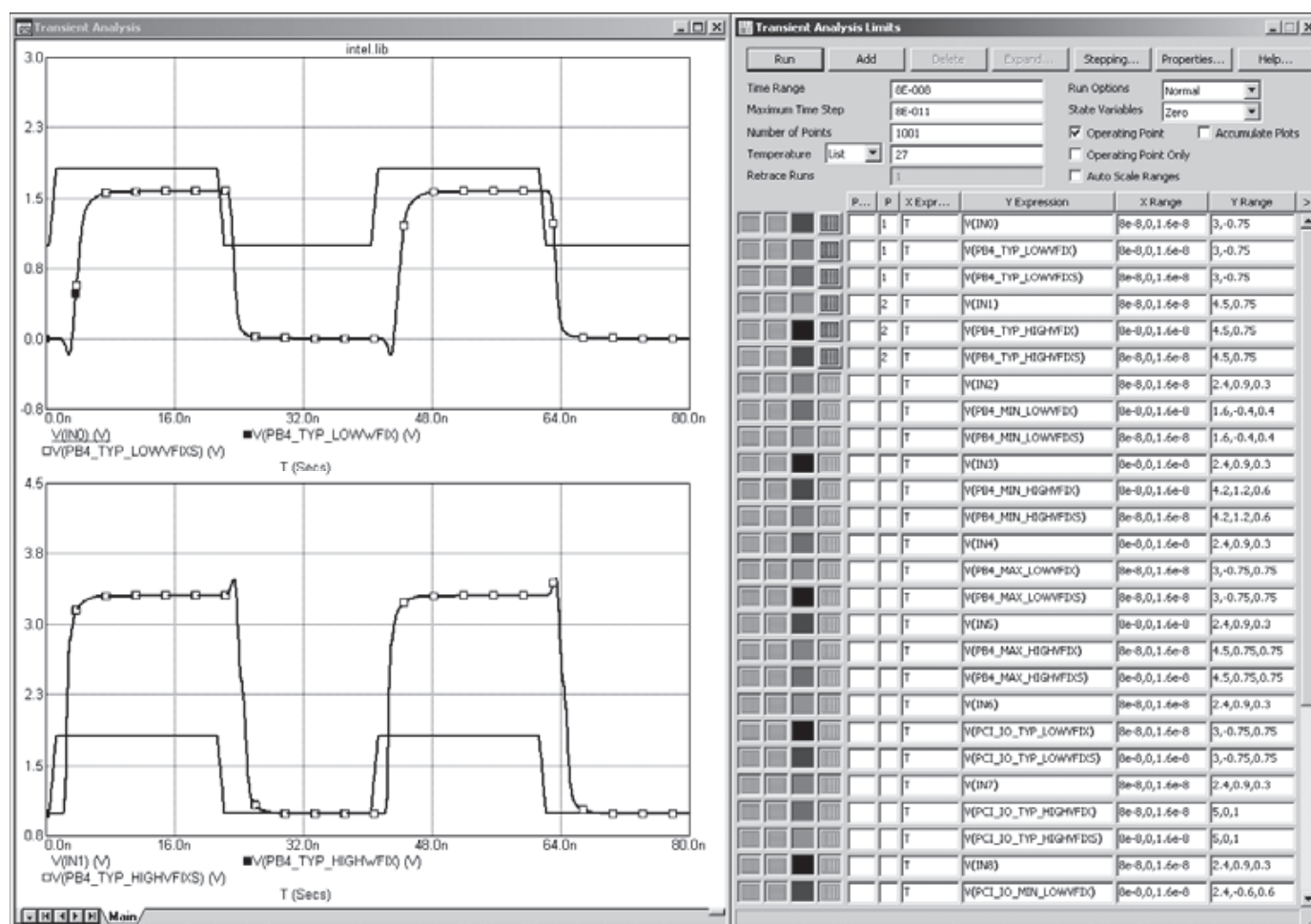


Рис. 12.2. Результаты TRANSIENT-анализа тестового файла INTEL.LIB

Транслятор синтезировал графики для сигналов на входах, на выходах типовых (TYP) буферов и соответствующие образцовые сигналы, повторяющие форму из оригинального IBIS-файла, для двух случаев:

- PB4_TYP_LOWVFIX (типовой вариант, подключение вывода через резистор на землю);
- PB4_TYP_HIGHVFIX (типовой вариант, подключение вывода через резистор на шину питания).

Можно видеть, что действительная и образцовая (с индексом S) формы сигнала полностью совпадают (графики с метками в виде прямоугольников одинаковы).

Транслятор создает графики для всех комбинаций всех выходных сигналов модели, но в задании на моделирование на языке SPICE предоставляет вывод только первых двух сигналов. Можно вывести любые другие графики путем ввода номера группы графиков в колонке *P* для необходимого вывода микросхемы (рис. 12.2).

Для всех графиков может быть сгенерирован выходной файл численных данных, путем установки соответствующего поля в группе формата вывода окна *Transient Analysis Limits* (рис. 12.2).

Нажмите клавишу **F3** для завершения анализа. Затем нажмите комбинацию **CTRL+SHIFT+I** для приглашения IBIS-транслятора снова. Файл INTEL.IBS все еще загружен. Нажмите сначала кнопку *Select All*, а затем — *Create Standard IBIS Models*. После этих действий будет создан файл INTEL.LIB. Нажмите на кнопку *Close*. Файл INTEL.LIB будет содержать 672 модели. Ниже приведены фрагменты этого файла.

```
* Output Buffer Models:
*   PB4_J1_TYP
*   PB4_J1_MIN
*   PB4_J1_MAX
*
*   . . . .
*   PCI_IO_Y21_MAX
*   PCI_IO_Y22_TYP
*   PCI_IO_Y22_MIN
*   PCI_IO_Y22_MAX
* Input Buffer Models:
*   PIU_H3_TYP
*   PIU_H3_MIN
*   PIU_H3_MAX
*
*   . . .
*   PCI_IN_U21_TYP
*   PCI_IN_U21_MIN
*   PCI_IN_U21_MAX
*
* Total: 672 Pin Models Created
```

Поскольку каждый вход и каждый выход может управлять или управляться уникальной схемой, программа создает 3 модели для каждого из 224 входных и выходных выводов микросхемы, что в итоге приводит к созданию 672 моделей. В этом файле описываются все 304 вывода микросхемы, из них 224 вывода представляют входные и выходные сигналы, 80=304-224 представляют собой выводы питания и земли и не имеют определенных моделей.

Запустите анализ переходных процессов. Результат анализа представлен на рис. 12.3.

Транслятор создает SPICE код для входного импульса, управляющего моделью буфера для всех комбинаций выходных моделей, также генерирует команду .PRINT для печати формы результирующих сигналов, но задает вывод в виде графика и численных таблиц вариантов только первых двух сигналов (в рассматриваемом случае PB4_J1, PCI_IO_A1). Выбор двух сигналов для вывода в этом случае зависит от установок поля *View By* (Pin, Signal, Model).

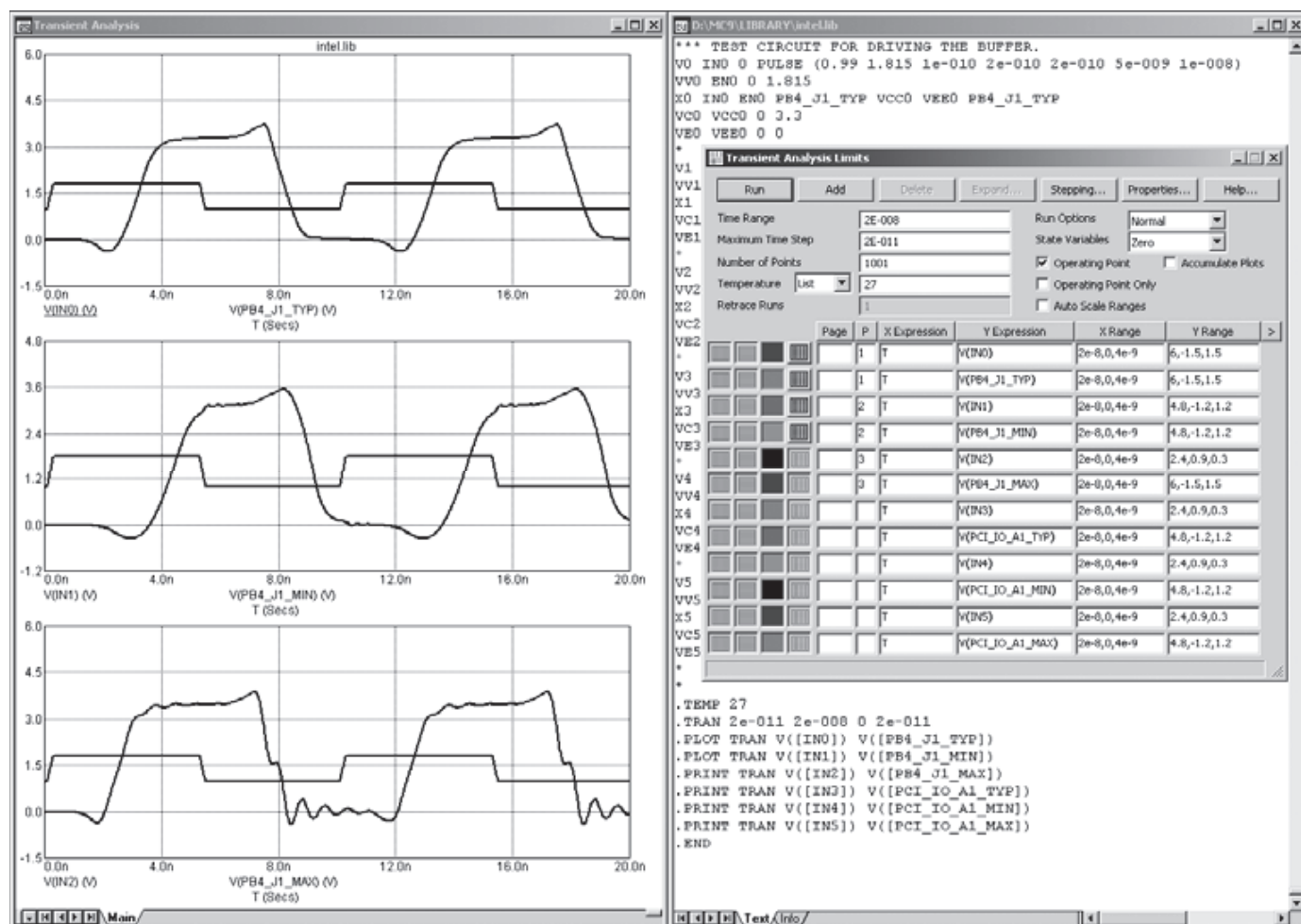


Рис. 12.3. Результаты анализа файла, содержащего стандартные модели IBIS при установках транслятора Select All, Pins

Следует отметить, что поскольку файл содержит сотни моделей входов и выходов, только 6 сигналов могут быть выведены в файл формата numeric output (можно нажать **F5** для того чтобы их увидеть), и из них только 2 могут быть выведены в виде графиков. Так же как и в случае с файлом Golden Waveforms, можно вывести другие сигналы установкой номера группы графиков в графе P для соответствующего сигнала, в рассматриваемом случае так сделано для варианта PB4_J1_MAX (рис. 12.3). Для любого графика может быть сгенерирован выходной файл численных данных.

Эта информация приведена для иллюстрации построения графиков. В режиме реального тестирования, возможно, будут добавляться одна или несколько линий передачи и другие элементы, включенные в качестве нагрузки. В любом случае команды построения графиков находятся в конце текстового файла (рис. 12.3).

Если необходимо получить SPICE-модель для одного вывода микросхемы, можно поступить следующим образом. Нажмите клавишу **F3** для завер-

шения анализа. Затем нажмите комбинацию **CTRL+SHIFT+I** для приглашения IBIS-транслятора снова. Файл INTEL.IBS все еще загружен. Выберите в списке вывод микросхемы, для которого необходимо создать модель. Пусть, например, это будет вывод E4. Затем нажмите панель *Create Standard IBIS Models*. После этих действий будет создан файл INTEL.LIB. Нажмите на кнопку *Close*. Файл INTEL.LIB будет содержать одну модель выходного буфера PCI_IO_E4 для вывода E4. Ниже (рис. 12.4) приведены результаты анализа переходных процессов в нем.

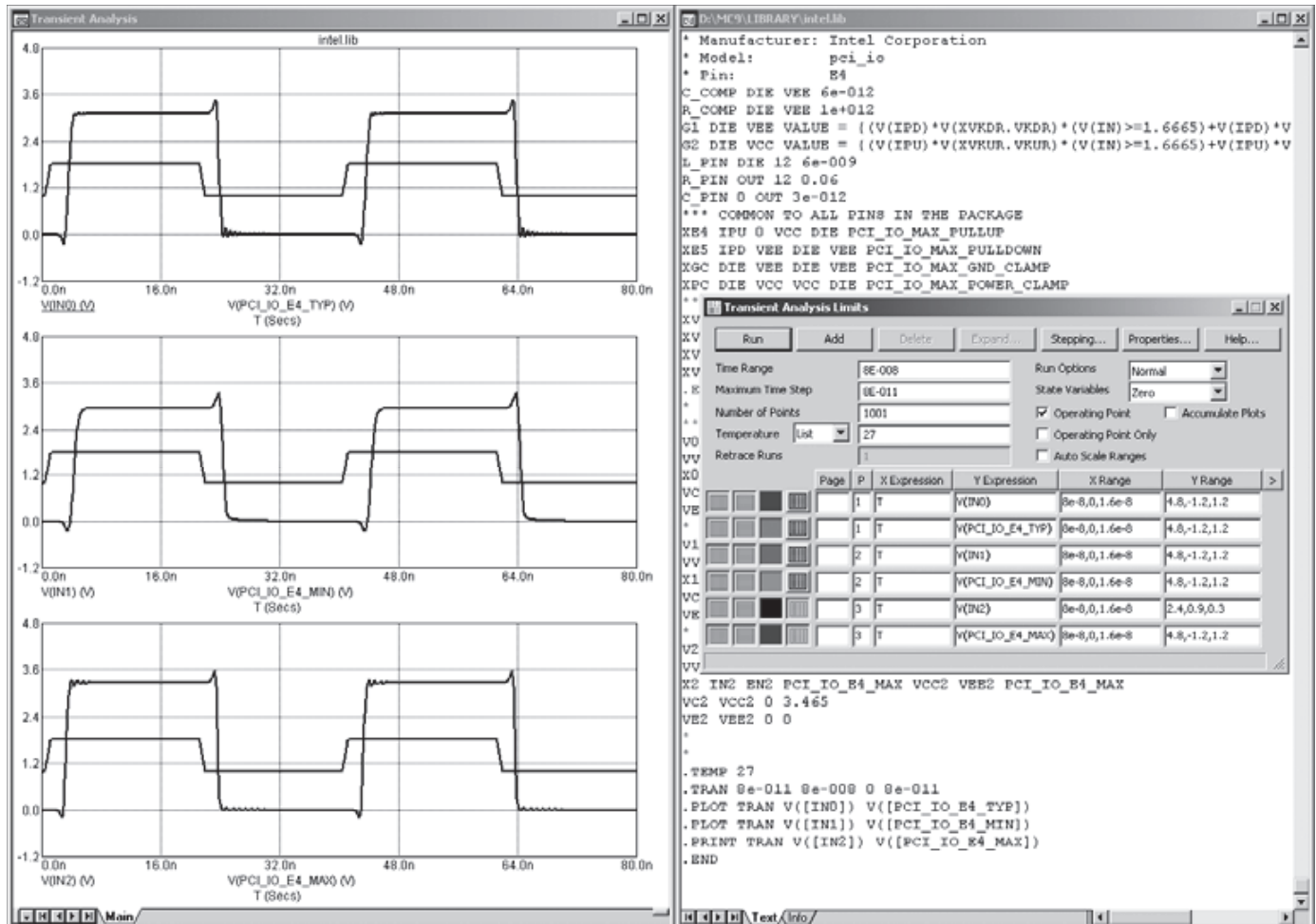


Рис. 12.4. Результаты анализа файла, содержащего модели IBIS для вывода E4

12.4. Пример использования компонентов IBIS

Модельный формат IBIS создан для моделирования входных и выходных буферных формирователей интегральных схем, без моделирования внутренней функциональной структуры микросхемы. Модели этого типа доступны у изготовителей ИС и могут быть использованы в различных видах моделирования, таких, как например, моделирование работы на линию передачи или моделирование полного прохождения сигнала.

Общее заблуждение большинства пользователей состоит в том, что они считают, что IBIS-модель моделирует реальную микросхему полностью. *IBIS-модель не моделирует внутреннюю логику устройства.* Она моделирует лишь работу схем буферов ввода-вывода. Для полного моделирования работы микросхемы должна быть использована ее SPICE-модель. Типовая IBIS-

модель содержит вольтамперные характеристики, совокупное влияние паразитных параметров, защитные функции для буферов ввода-вывода.

Поскольку Micro-Cap содержит так называемый IBIS-транслятор, который конвертирует IBIS-файлы в SPICE-библиотеки, наиболее простой способ использования IBIS-моделей в схеме — использовать специальные IBIS-компоненты, находящиеся в разделе *Components>Analog Primitives>IBIS* (в меню компонентов).

Включение одного из данных IBIS-компонентов в принципиальную схему приглашает диалоговое окно создания IBIS-моделей (*IBIS Model Creator*, см. рис. 12.5), которое позволяет выбрать определенный вывод микросхемы в указанном IBIS-файле. После этого создается модель в виде SPICE-подсхемы для выбранного вывода из информации, содержащейся в IBIS-файле. Эта модель в виде подсхемы на языке SPICE записывается в текстовую страницу *Models* текущего схемного файла Micro-CAP непосредственно в тот момент, когда IBIS-компонент помещается в схему.

В программе Micro-Cap имеются 4 встроенных IBIS-компонента:

IBIS_Input1 — модель входного буфера с внутренним источником питания;

IBIS_Input3 — модель входного буфера с внешним источником питания;

IBIS_Output3 — модель выходного буфера с внутренним источником питания;

IBIS_Output5 — модель выходного буфера с внешним источником питания.

Для компонентов IBIS_Input1 и IBIS_Output3, источник питания создается внутри подсхемы с использованием напряжений питания, указанных в IBIS-файле. Для компонентов IBIS_Input3 и IBIS_Output5, источники питания добавляются пользователем путем подсоединения к соответствующим выводам компонента.

Первый шаг в использовании IBIS-компонентов — получение подходящего IBIS-файла от изготовителя микросхемы. Такие файлы обычно размещаются на сайтах фирм-производителей, и легко могут быть скачаны. Для рассматриваемого примера используется IBIS-файл от NXP, который содержит IBIS-модели для входных (выходных) буферов микросхемы 74AHC00 (4 двух-входовых элемента И-НЕ). Сам IBIS-файл должен быть размещен в папке LIBRARY каталога в котором размещается исполнимый модуль программы Micro-Cap 9 (D:\Micro-Cap\LIBRARY).

Следующий шаг — ввести один из IBIS-компонентов в схему. В данном случае используется IBIS_Input3 компонент, выбираемый из секции *Analog Primitives>IBIS*. После вставки IBIS-компонента, появляется диалоговое окно создания IBIS-моделей *IBIS Model Creator*, показанное ниже на рисунке.

Диалоговое окно (рис. 12.5) имеет следующие разделы:

Input File (Входной файл): В этом поле указывается имя IBIS-файла. Данный файл должен иметь расширение .IBS. Кнопка *Browse* используется для нахождения в каталогах различных входных IBIS-файлов.

Add (Добавление): Данное поле определяет, какие величины входного IBIS-файла будут использоваться при создании SPICE-модели — минимальные, типовые или максимальные (minimum, typical, maximum).

View By (Показ): Определяет, будут ли в списке выводиться имена выводов, сигналов или имен моделей.

Поле *View By* имеет установленный флаг *Pin*, таким образом, все входные выводы микросхемы 74АНС00 показываются в списке *Item List*. Выбирая вывод 1 (pin 1) в списке мы видим, что доступны 2 модели в IBIS-файле для этого вывода: АНС_IN_50 и АНС_IN_33. Модель АНС_IN_50 используется при 5-вольтовом питании, а модель АНС_IN_33 используется при напряжении питания 3.3V.

Описания, упомянутые выше для компонентов и моделей могут быть найдены среди комментариев IBIS-файла. IBIS-файл может просматриваться любым текстовым редактором.

При выбранной модели АНС_IN_50 для pin 1, нажмите кнопку ОК в диалоговом окне *IBIS Model Creator*, это приведет к вызову стандартного окна атрибутов для компонентов. В этом месте создается модель в виде SPICE-подсхемы и ей дается имя АНС_IN_50_1_TYP, которое является комбинацией имени модели, имени вывода ИМС, и вида используемых параметров: минимальных, максимальных и типовых (minimum, typical, maximum). Кнопка *IBIS* в диалоговом окне атрибутов компонента может использоваться для нового приглашения диалогового окна создателя моделей (*IBIS Model Creator*). Нажатие ОК в диалоговом окне атрибутов добавит IBIS-компонент и поместит SPICE-подсхему в текстовую страницу *Models* текущего схемного файла Micro-Cap.

Для построения модели IBIS выходного буфера, используется аналогичная процедура. В этом случае, выбирается IBIS_Output5 компонент из секции *Analog Primitives>IBIS* и помещается в текущую схему. При этом опять файл АНС00.IBS используется в качестве входного файла.

В поле *View By* устанавливается флажок *Pin*, таким образом, все выходные выводы ИМС 74АНС00 будут показаны в списке. При выборе pin 3 можно видеть, что доступно две модели в IBIS-файле для этого вывода: АНС_OUT1_50 и АНС_OUT1_33, которые соответствуют моделям выходного буфера с питанием 5В и 3.3В.

Выбираем модель АНС_OUT1_50 для вывода 3 ИМС, нажимаем кнопку ОК — вызывается диалоговое окно атрибутов компонента. SPICE-подсхема, создаваемая в этот момент будет названа АНС_OUT1_50_3_TYP. Опять нажимаем ОК, при этом добавляется условное графическое обозначение (УГО) и модель в виде SPICE-подсхемы помещается в текущую схему.

Используя IBIS модели входных и выходных буферов, которые были созданы путем вышеописанной процедуры, построена простая схема для моделирования характеристик I/O микросхемы 74АНС00 (рис. 12.6).

Компонент IBIS_Output5 (X2) моделирует выходной буфер компонента 74АНС00. Этот компонент имеет 5 выводов. Входной вывод подсоединен к источнику импульсного сигнала V1, который выдает 40нс импульс с амплитудой 5V, который используется для испытания передачи через выходной буфер как переднего так и заднего фронтов. Источник отрицательного напряжения заземлен. Источник положительного напряжения совместно со входом разрешения (enable pin) подсоединен к источнику 5V. Выход через резистор сопротивлением 30.1 Ом подсоединен ко входам линии передачи. Линия передачи имеет атрибут VALUE, определенный как:

L=5n C=3p Len=20

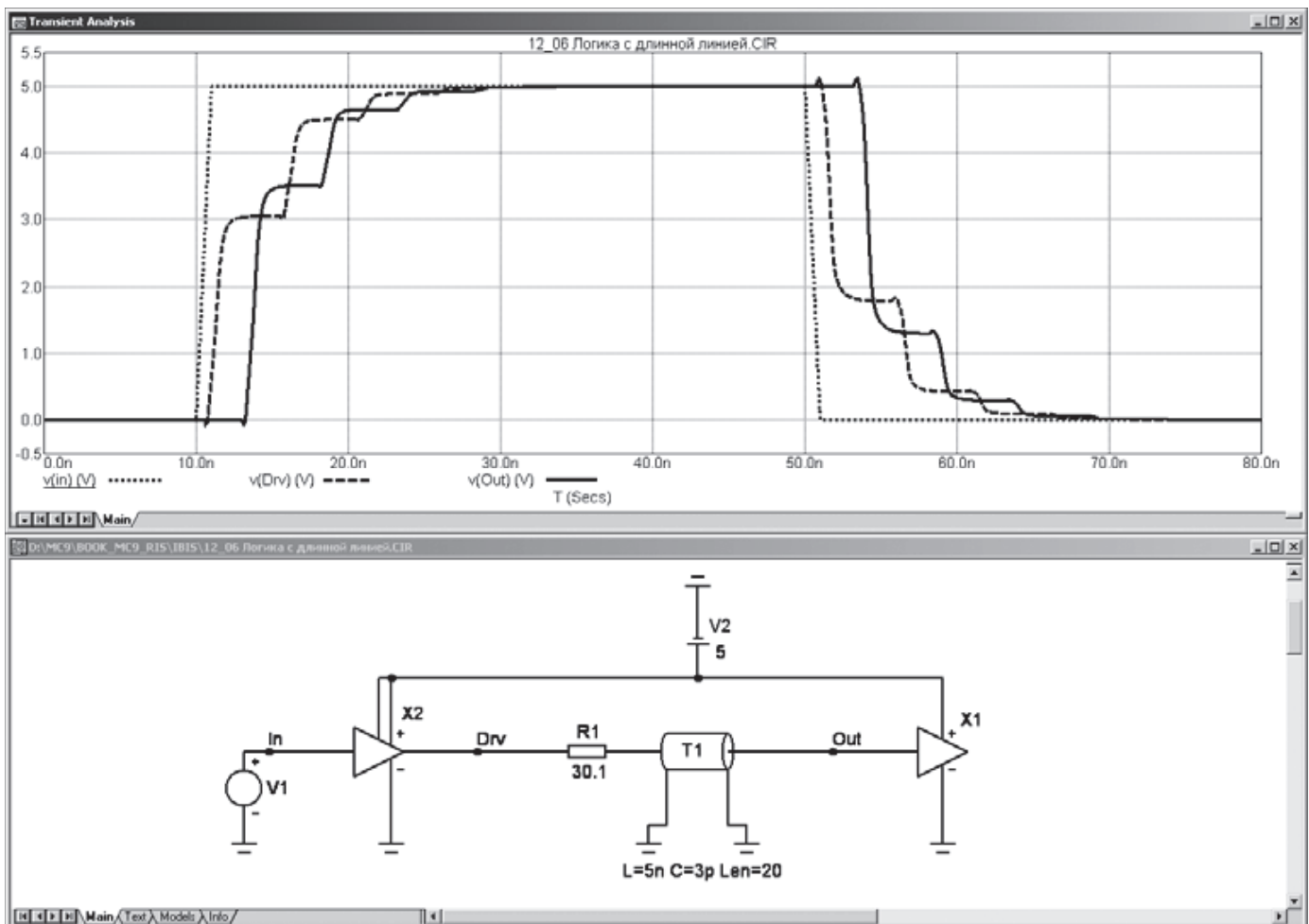


Рис. 12.6. Моделирование схемы с IBIS-компонентами

Это имитирует погонную индуктивность и емкость при прохождении сигнала от выходного буфера к входному буферу. Наконец, компонент IBIS_Input3 (X1), моделирует входной буфер микросхемы 74АНС00. Эта модель имеет 3 вывода. Входной вывод подсоединяется к концу линии передачи. Вывод отрицательного источника питания заземляется, положительный источник берется равным 5В. IBIS-модель входного буфера не имеет выходного вывода, поскольку он используется как нагрузка для источника сигнала, когда к нему подсоединяется выход микросхемы.

Цель подобного моделирования состоит в том, чтобы посмотреть, как сигнал распространяется между выходом микросхемы 74АНС00 и одним из входов такой же микросхемы 74АНС00, проходя по линии, моделируемой активным сопротивлением и линией передачи (с распределенными параметрами).

Результаты анализа переходных процессов (рис. 12.6) показывают задержку и искажение формы прямоугольного импульса. Построены 3 графика. V(In) — сигнал импульсного источника сигнала V1. V(Drv) — график выходного напряжения выходного буфера X2. V(Out) — напряжение на входе входного буфера.

13. МОДЕЛИ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

13.1. Основные понятия цифрового моделирования

Micro-Cap позволяет выполнять для цифровых схем те же виды анализа, что и для аналоговых, но практическое применение, как правило, имеет только анализ переходных процессов. При моделировании можно использовать почти все разновидности цифровых компонентов, включая мультиплексоры и программируемые логические матрицы, а также обширную библиотеку цифровых микросхем (см. рис. 3.10). Однако моделирование схем, использующих микросхемы памяти и микропроцессоры, в Micro-Cap невозможно, для этого следует использовать специализированные программы.

Micro-Cap допускает использование аналоговых и цифровых устройств в одной схеме (смешанное моделирование). Однако при этом необходимо помнить, что цифровые модели не в полной мере отражают схемотехнику реальных цифровых микросхем, поэтому при попытках моделирования устройств, использующих аналоговые свойства цифровых компонентов, результаты моделирования могут сильно отличаться от экспериментальных. К примеру, проблемы могут возникнуть даже при моделировании тривиального генератора импульсов на цифровых инверторах. Достоверные результаты получаются только при использовании цифровых компонентов в паспортном режиме.

Это ограничение обусловлено структурой цифровых моделей. Они строятся по модульному принципу. Основа — логический модуль, описывающий алгоритм работы цифрового компонента. При проведении логического моделирования к нему подключаются модули, формирующие задержки прохождения цифровых сигналов внутри компонента (временная модель) и проверяющие результирующий выходной логический сигнал при объединении выходов (интерфейсная модель). Кроме того, интерфейсная модель может учитывать входную и выходную емкость, а также сопротивление выходов в обоих логических состояниях (рис. 13.1).

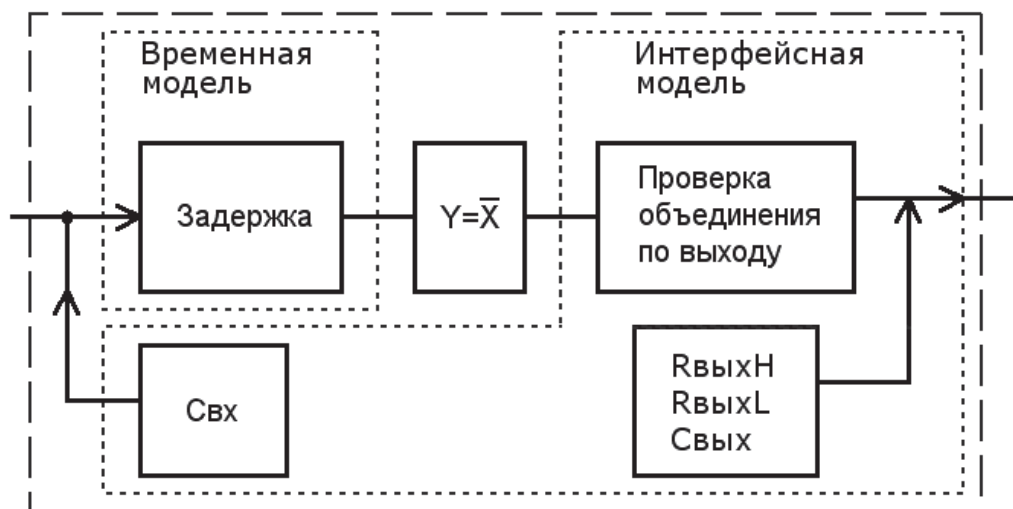


Рис. 13.1. Структура модели инвертора в цифровой схеме

При проведении смешанного моделирования в интерфейсную модель дополнительно подключаются интерфейсные схемы, осуществляющие преобразование входных аналоговых сигналов во входные логические уровни, а

выходных логических уровней — в выходные аналоговые сигналы. Кроме того, к входам и выходам подключаются схемы, имитирующие входные и выходные аналоговые цепи реального цифрового компонента. Они также входят в состав интерфейсной модели (рис. 13.2). Однако эти схемы лишь упрощенно повторяют схемотехническую реализацию входных и выходных цепей реальных микросхем, и предназначены в основном для учета при моделировании паразитных параметров входных и выходных цепей (сопротивлений, емкостей, токов утечки). Поэтому при моделировании устройств, в которых цифровые микросхемы работают в аналоговом режиме (т.е. используются свойства их внутренней схемотехнической реализации) могут быть получены неверные результаты.

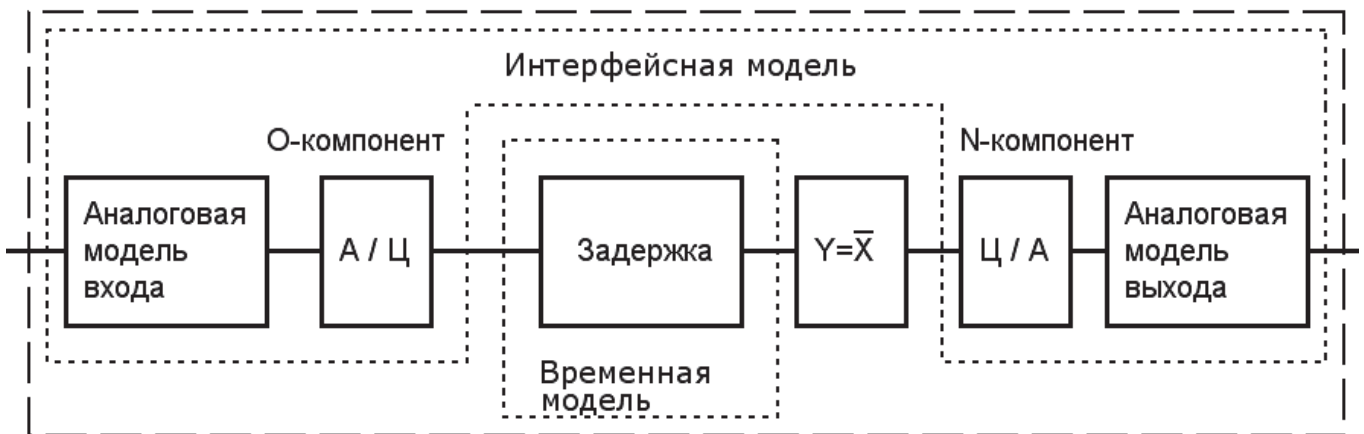


Рис. 13.2. Структура модели инвертора в аналоговой схеме

Аналоговые модели входа и выхода, а также модели преобразования аналоговых сигналов в цифровые и цифровых сигналов в аналоговые у разных серий микросхем различные. Варианты построения этих моделей будут рассмотрены ниже (см. раздел 13.5)

При смешанном моделировании возможны ситуации, когда цифровой компонент подключен к аналоговому только входом или только выходом. Также возможна ситуация, когда его вход или выход одновременно подключен и к цифровым, и к аналоговым компонентам. Тогда используются комбинации из приведенных функциональных блоков и структура модели становится еще более сложной. Однако пользователь никаких внешних проявлений всех этих преобразований модели не видит, за исключением так называемого «расщепления узлов», в результате которого в точке сопряжения цифровых и аналоговых компонентов могут появляться сразу два узла — и цифровой, и аналоговый.

При моделировании цифровых схем в значительно большей степени нежели для аналоговых используются директивы SPICE, поэтому материал этой части книги сложнее для восприятия, чем описание аналогового моделирования. Все функциональные блоки модели цифрового компонента заданы в виде подсхем SPICE, которые вызываются из базового SPICE-описания модели этого компонента, поэтому, чтобы разобраться в структуре моделей, необходимо знать язык SPICE. Но при использовании цифровых примитивов Micro-Cap их параметры задаются через стандартные окна программы.

Следует также отметить, что в моделях цифровых компонентов не учитывается их нагрузочная способность. Т.е. при моделировании к одному вы-

ходу можно подключить гораздо больше входов, чем допускает реальный компонент.

13.1.1. Цифровые узлы

Существуют два типа узлов: аналоговые и цифровые. В общем случае узел — это точка соединения двух и более компонентов. Если соединяются аналоговые компоненты, то это аналоговый узел, если цифровые — то цифровой. В точке соединения цифрового и аналогового компонента возникают сразу оба узла, причем непосредственная связь между ними разрывается в место разрыва добавляется невидимая пользователю интерфейсная схема.

Цифровые узлы представляются на схеме подобно аналоговым узлам. Сослаться на них можно по номеру или текстовому наименованию. Узлы нумеруются автоматически программой Micro-Cap, а текстовые имена им присваиваются путем добавления в непосредственной близости к узлу латинского текста. Номера цифровых узлов показываются на схеме внутри прямоугольников с *заостренными углами*, в то время как номера аналоговых узлов помещаются внутрь прямоугольников со *скругленными углами*.

13.1.2. Цифровые состояния

Логическое состояние цифрового узла — это сочетание логического уровня (или перехода) и нагрузочной способности узла. Логическое состояние обозначается с помощью символов, как показано в табл. 13.1.

Таблица 13.1. Логические состояния

Состояние	Описание
0	Низкий уровень
1	Высокий уровень
R	Положительный фронт (Rising — переход из лог. «0» в лог. «1»)
F	Отрицательный фронт (Falling — переход из лог. «1» в лог. «0»)
X	Неизвестное состояние (Уровень может быть 0, а может быть и 1, нестабильное состояние)
Z	Состояние высокого импеданса (уровень может быть 0, 1, R, F, X, или нестабильным)
	

Логические уровни

Для обозначения всех состояний цифровых узлов используются 6 буквенных символов.

Первые пять символов {0, 1, R, F, X} (см. табл. 13.1) описывают все состояния за исключением высокоимпедансного. Символ Z обозначает любой уровень в высокоимпедансном состоянии вывода микросхемы.

Логические уровни соответствуют диапазону напряжений, определенному в интерфейсной модели цифрового компонента. Они не являются строго определенным значением напряжения. Например «1» может быть определена в модельных директивах, как диапазон напряжений от 1.7 до 7 Вольт. Если цифровой узел переключается из нулевого в единичное состояние, то об аналоговом напряжении в данном узле можно сказать, что оно возросло, как минимум, до 1.7 В, но может быть и больше.

Логическое состояние объединенных выходов

Для определения результирующего состояния двух и более объединенных вместе выходов, находящихся в разных логических состояниях, в Micro-Cap вводится понятие «логической силы выхода» (Logic strengths). Она определяется выходным сопротивлением (импедансом) цифрового компонента, но в отличие от классического понятия нагрузочной способности (которое тоже определяется выходным импедансом) используется только при определении логического состояния объединенных выходов, а не числа входов, которые можно подключить к этому выходу.

Когда два или более цифровых выходов объединяются вместе, Micro-Cap определяет состояние объединенного узла следующим образом:

1) Если логические уровни всех выходов одинаковые, тогда цифровое состояние объединенного узла соответствует этому логическому уровню и максимальной логической силе (логической силе самого мощного из объединенных выходов);

2) Если логические уровни объединяемых выходов неодинаковы, тогда:

- Если выходной импеданс самого мощного из объединяемых выходов меньше выходного импеданса всех остальных объединяемых выходов по крайней мере в DIGOVRDRV раз (а может быть и в большее число раз), тогда объединенному узлу присваиваются логический уровень и логическая сила этого выхода;
- Если указанное условие не выполняется, объединенному узлу присваивается неопределенное состояние «X».

Наименьшая логическая сила соответствует состоянию высокого импеданса выхода «Z». Она определяется величиной DIGDRVZ. Любому цифровому выходу (трехстабильному или нет) присваивается состояние «Z», если его выходное сопротивление превышает величину DIGDRVZ.

Наивысшая логическая сила, определяемая величиной DIGDRVF, называется принужденным импедансом (forcing impedance). Логическая сила выхода устройства, в общем случае, зависит от того, в каком логическом состоянии находится узел — низким (LOW) или высоким (HIGH). Соответственно в модели цифрового устройства определяются логическая сила для высокого (DRVH) и низкого (DRVL) уровней. Значения DRVH и DRVL берутся из интерфейсной модели цифрового компонента и ограничиваются следующим образом:

$$DIGDRVF \leq \text{Impedance} \leq DIGDRVZ.$$

Указанный диапазон выходного сопротивления имеет логарифмическую шкалу подуровней, включающий 64 значения выходного сопротивления от максимального DIGDRVZ (подуровень 0) до минимального DIGDRVF (подуровень 63). Перед началом моделирования каждому цифровому выходу присваивается соответствующий индекс импеданса от 0 до 63, в пределах полного диапазона от DIGDRVF до DIGDRVZ. Значения индексов уровней импеданса вычисляются следующим образом:

$$LZ = \ln(DIGDRVZ)$$

$$LF = \ln(DIGDRVF)$$

$$DRVH\_STRENGTH = \frac{63 \cdot [\ln(DRVH) - LZ]}{LF - LZ}$$

$$DRVL\_STRENGTH = \frac{63 \cdot [\ln(DRVL) - LZ]}{LF - LZ}$$

Во время выполнения анализа каждому цифровому узлу присваивается значение соответствующего индекса сопротивления *DRVH_Strength* или *DRVL_Strength* в зависимости от его текущего логического состояния.

DIGOVRDRV, *DIGDRVF*, и *DIGDRVZ* задаются в установках диалогового окна *Global Settings* и могут быть изменены для конкретной схемы с помощью директивы *.OPTIONS*.

Трехстабильные цифровые выходы

Распространенной ситуацией при проектировании и моделировании цифровых устройств является использование трехстабильных шин. В этой ситуации несколько устройств с трехстабильными выходами подключатся к общему узлу. Каждое из устройств имеет вход разрешения работы *Enable*. Если на этом входе присутствует сигнал, запрещающий работу выхода компонента, то его выходное сопротивление принимается равным *DIGDRVZ*, и ему присваивается индекс логической силы, равный нулю. Типичной ситуацией работы таких устройств является запрещение работы всех выходов (индекс их логической силы равен 0), кроме выхода одного компонента (индекс его логической силы больше нуля). В такой ситуации состояние объединенного узла будет определяться состоянием выхода цифрового компонента, который имеет разрешающий сигнал на входе *Enable*. Важно отметить, что дополнительным условием такого результата, является превышение уровней *DRVH* и *DRVL* выхода разрешенного компонента уровня *DIGDRVZ* на значение параметра *DIGOVRDRV*.

Цифровые выходы с открытым коллектором (Open-collector outputs)

Другим распространенным случаем объединения выходов цифровых компонентов является объединение выводов с открытым коллектором. Типичные значения импедансов таких выходов *DRVL*=100Ом и *DRVH*=20К. В этом случае к объединенному узлу подключается общий подтягивающий резистор (*PULLUP device*). Типичная величина подтягивающего резистора равна 1кОм и он обеспечивает единичный логический уровень со слабой логической силой. Если состояние хотя бы одного из объединенных выходов – логический ноль, то и состояние объединенного узла – тоже логический ноль. Это объясняется тем, что импеданс выхода в состоянии логического нуля много меньше сопротивления подтягивающего резистора и тем более импеданса всех остальных выходов (находящихся в единичном состоянии).

Если все объединенные выходы имеют единичное логическое состояние (с выходным импедансом 20 кОм), тогда подтягивающего резистора 1 кОм достаточно для обеспечения уровня логической единицы и состояние объединенного узла будет соответствовать логической единице с выходным импедансом приблизительно 1 кОм.

13.1.3. Временные модели (Timing models)

Все цифровые примитивы (за исключением PULLUP, PULLDN, CONSTRAINT, и PINDLY) имеют модель для временной области, параметры которой задают поведение этого компонента при выполнении моделирования. Эти параметры включают в себя: задержку распространения сигнала (propagation delay), ширину импульса (pulse width), время установки (setup time), время удержания (hold time) и время переключения (switching time). Перечисленные параметры модели обозначаются сложными аббревиатурами, толкование составных частей которых представлено в табл. 13.2.

Таблица 13.2. Аббревиатуры параметров цифровых временных моделей

Аббре- виатура	Полное наименование	Комментарий
TP	Propagation delay	Задержка распространения сигнала
TW	Pulse width	Ширина импульса активного уровня
TSU	Setup time	Время установки
THD	Hold time	Время удержания сигнала
TSW	Switching time	Время переключения
MN	Minimum	Минимальный
TY	Typical	Типовой
MX	Maximum	Максимальный
LH	Low to high transition	Переключение из низкого в высокое (0→1)
HL	High to low transition	Переключение из высокого в низкое (1→0)
ZL	Z to low transition	Переключение из высокоимпедансного в низкое состояние (Z→0)
ZH	Z to high transition	Переключение из высокоимпедансного в высокое состояние (Z→1)
LZ	Low to Z transition	Переключение из низкого в высокоимпедансное состояние (0→Z)
HZ	High to Z transition	Переключение из высокого в высокоимпедансное состояние (1→Z)

Примеры:

TPLHMN — минимальная задержка распространения при переключении из низкого в высокое состояние для стандартных и трехстабильных вентилях.

TWPCLTY — типовая длительность импульса низкого уровня для установки и сброса по асинхронным входам триггеров. Входы P или PREBAR — асинхронные входы установки. Входы C или CLEARBAR — асинхронные входы сброса.

THDCLKMN — минимальная длительность удержания сигнала на информационных входах триггеров (J, K или D входы) после начала действия активного уровня синхросигнала.

Ниже приведен пример временной модели стандартного вентиля:

```
.MODEL DL_01 UGATE (TPLHMN=8NS TPLHTY=11NS
+ TPLHMX=13NS TPHLMN=6NS TPHLTY=9NS TPHLMX=12NS)
```

Если значение параметра не указано в модельной директиве, то оно принимается равным нулю.

Случай неуказанных временных задержек распространения сигнала

Временные модели должны включать в себя определение минимальной, типовой и максимальной величин для задержки распространения сигнала через компонент. Имена всех указанных модельных параметров начинаются с букв «ТР». В справочниках обычно указывается одно или два из требуемых значений. Поскольку программа в данном случае не может присвоить неизвестному параметру нулевое значение, то значения недостающих параметров рассчитываются по следующим правилам:

1) Типовая величина известна.

Если минимальное значение не указано:

$TPXXMN = DIGMNTYSCALE \cdot TPXXTY$

Если максимальное значение не указано:

$TPXXMX = DIGTYMXSCALE \cdot TPXXTY$

2) Типовая величина неизвестна.

Если и минимальное и максимальное значения указаны:

$TPXXTY = (TPXXMN + TPXXMX) / 2$

Если указано только минимальное значение:

$TPXXTY = TPXXMN / DIGMNTYSCALE$

Если указано только максимальное значение:

$TPXXTY = TPXXMX / DIGTYMXSCALE$

3) Не указано ни одно из 3-х значений:

$TPXXMN = TPXXTY = TPXXMX = 0$

Умолчательные значения параметров `DIGMNTYSCALE` и `DIGTYMXSCALE` берутся из установок диалогового окна **Global Settings**. Они могут быть изменены для конкретной схемы использованием директивы `.OPTIONS`. Например:

`.OPTIONS DIGMNTYSCALE=.35`

При помещении подобной директивы в схемный файл (либо в текстовую область, либо непосредственно на поле схемы) соответствующим образом изменяется параметр `DIGMNTYSCALE`.

Следует отметить, что вышеперечисленные правила применимы только к задержкам распространения сигнала (*propagation delay*).

Случай неуказанных длительностей сигналов для триггеров (*timing constraints*)

Значения *Timing constraints* включают в себя следующие параметры триггерных элементов: ширину импульса (сброса или установки), время установки и время удержания. Типовые и максимальные значения этих параметров часто опускаются в справочных изданиях. В отличие от задержек распространения (см. предыдущий пункт), рассматриваемые величины не могут быть вычислены простыми операциями масштабирования. В этом случае Micro-Cap рассчитывает недостающие параметры по следующим правилам:

1) Если не указано минимальное значение: `minimum=0`

2) Если не указано максимальное значение:

- Если указано типовое значение `maximum=typical`

- Если типовое значение не указано `maximum=minimum`

3) если типовое значение не указано: $\text{typical} = (\text{maximum} + \text{minimum}) / 2$

Неуказанный параметр — это тот параметр, который отсутствует в модельной директиве.

Например, в модельной директиве .MODEL TOR UGATE() все параметры модели неуказанные.

Другой способ присвоения значений неизвестным параметрам, состоит в присвоении им специфического значения, равного -1. В этом случае модельная директива выглядит следующим образом:

```
.MODEL TOR UGATE ( TPLHMN=-1 TPLHTY=-1 TPLHMX=-1
+ TPHLMN=-1 TPHLTY=-1 TPHLMX=-1 )
```

Любой параметр, установленный в -1 рассматривается программой как неуказанный и, следовательно, рассчитывается исходя из других параметров согласно вышеприведенным правилам. Таким образом, для программы анализа две вышеприведенные директивы эквивалентны. Использование имен неуказанных параметров со специфическим значением (-1) — удобный способ напомнить пользователю о том, какие параметры не заданы и должны быть по возможности введены на место значений (-1).

13.1.4. Задержки распространения сигналов (Propagation delays)

Емкостные задержки (Loading delays)

Задержки распространения сигнала через цифровой компонент указываются во временной модели (*timing model*) через параметры серии *propagation delay* (TP). Интерфейсная модель (*I/O model*) также может влиять на задержки сигналов через параметры емкостных задержек сигнала (*loading delay*). Перед выполнением моделирования рассчитываются два параметра емкостных задержек:

1) Loading delay low to high (для перехода из низкого в высокое состояние);

2) Loading delay high to low (для перехода из высокого в низкое состояние).

Эти параметры рассчитываются исходя из значений емкостей нагрузки. Емкость нагрузки вычисляется из параметров интерфейсных моделей элементов, подсоединенных к рассматриваемому узлу. Общая емкость нагрузки цифрового узла (CTOTAL) получается как сумма параметров INLD устройств, входы которых подключены к рассматриваемому узлу и параметров OUTLD устройств, выходы которых подключены к этому же узлу. Предполагается, что компонент работает на данную емкостную нагрузку, имея выходное сопротивление DRVH или DRVL (в зависимости от возникающего нового цифрового состояния). Рассматриваемые две емкостные задержки рассчитываются следующим образом:

$$\text{Loading delay low to high} = \ln(2) \cdot \text{DRVH} \cdot \text{CTOTAL}$$

$$\text{Loading delay high to low} = \ln(2) \cdot \text{DRVL} \cdot \text{CTOTAL}$$

Во время выполнения анализа, одна из этих задержек, в зависимости от перехода добавляется к задержке временной модели, когда происходит событие (смена состояний).

Инерционные задержки (Inertial delays)

Micro-Cap моделирует два вида задержек цифровых устройств: инерционные и транспортные. Но чаще всего используется инерционная задержка. Она задается при помощи инерционной модели. Инерционные модели базируются на том принципе, что сигнал должен воздействовать на устройство не менее определенного времени, чтобы устройство прореагировало на его возникновение. Этот принцип может быть выражен условием:

Если ширина импульса меньше, чем задержка цифрового компонента, то на выходе импульс не появляется.

Вышесказанное справедливо, если включен флажок **Inertial Cancellation** закладки **Options** диалогового окна **Preferences**.

В нижеприведенной схеме (см. рис. 13.3, а) ширина импульса, подаваемого на вход вентиля, составляет 10. Это значение больше, чем задержка, равная 5, поэтому импульс проходит через вентиль. На следующем рисунке (см. рис. 13.3, б) ширина импульса равна 2, это меньше вносимой задержки 5, поэтому импульс будет проигнорирован из-за инерционности.

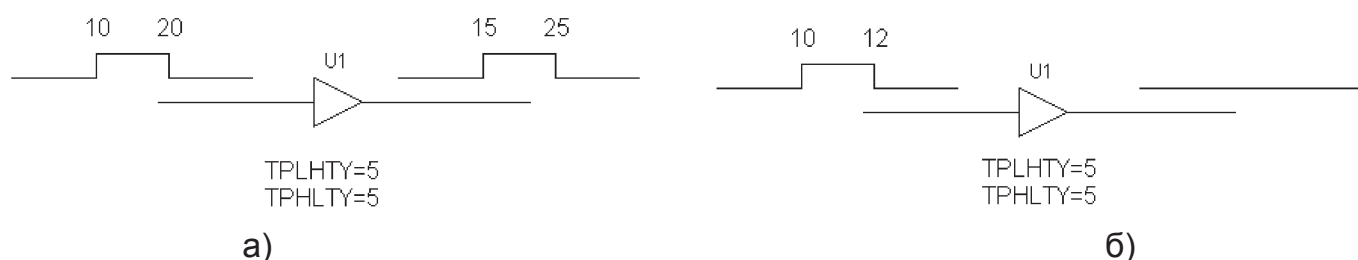


Рис. 13.3. Инерционность цифровых компонентов

Опция учета инерционности (Inertial cancellation) может быть установлена/сброшена в диалоговом окне *Preferences*. По умолчанию флажок учета инерционности (Inertial cancellation) установлен. См. пример *Inertial_Cancell.cir* из каталога *Components\Digital*.

Транспортные задержки (Transport delay)

Транспортная задержка — это когда все импульсы проходят через устройство, независимо от их длительности, но с временным сдвигом относительно исходного сигнала. Импульс проходит через цифровой компонент и в том случае, если его длительность меньше задержки, вносимой компонентом. Этот тип задержки используется, если необходимо сдвинуть сигнал на некоторый фиксированный временной интервал, без потери даже самых коротких импульсов (рис. 13.4). Такого рода задержку формирует только один компонент — цифровая задержка DLYLINE (цифровой компонент Delay1). Все задержки других компонентов, кроме указанного, трактуются программой как инерционные, за исключением случая когда флажок *Inertial Cancellation* в окне *Preferences* сброшен.

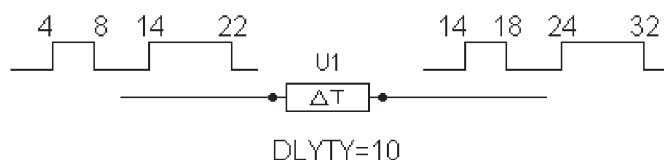


Рис. 13.4. Работа элемента цифровой задержки

13.1.5. Цифровые задержки и интервалы неоднозначности сигналов

Для каждого параметра временной модели задаются минимальное, типовое и максимальное значение. Это справедливо и для величины задержки. Какое именно значение цифровой задержки должно использоваться при моделировании — определяется параметром MNTYMXDLY (табл. 13.3).

Таблица 13.3. Определение цифровых задержек при моделировании

MNTYMXDLY	Используемые задержки
0	MNTYMXDLY устанавливается равным параметру DIGMNTYMX окна <i>Global Settings</i>
1	Использовать минимальные значения
2	Использовать типовые значения
3	Использовать максимальные значения
4	Использовать сочетания для наихудшего случая (минимальные и максимальные)

Когда в расчетах используется сочетания для наихудшего случая, Micro-Cap создает неоднозначную область между минимальными и максимальными задержками, которая представляет собой интервал времени, в течение которого сигнал может меняться (т.е. не определен). В течение этого промежутка времени нельзя с уверенностью утверждать, находится ли сигнал в предыдущем состоянии или уже перешел в новое, он просто находится в переходном положении между двумя состояниями. Эта неоднозначная область представляет собой условно возрастающее или условно спадающее состояние.

Например, на рис. 13.5, а, входной сигнал в момент времени равный 10, изменяется из состояния «0» в «1». Если MNTYMXDLY=4, для результирующего наихудшего случая условно возрастающее состояние возникнет в момент времени 15 и закончится в момент времени 20 в соответствии с минимальной TPLHMN=5 и максимальной TPLHMX=10 задержками перехода из низкого в высокое состояние. TPLHMN=5 означает, что задержка по крайней мере будет равна 5, но может быть и больше. TPLHMX=10 означает, что указанная задержка не может превосходить значения 10, но может быть и меньше. Условно возрастающее состояние между моментами 15 и 20 (см. рис. 13.5, а) и отражает эту неопределенность.

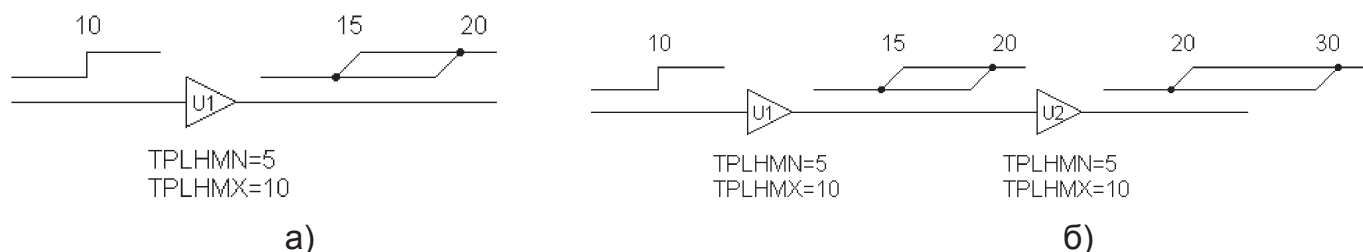


Рис. 13.5. Области неоднозначности при наихудшем случае сочетаний задержек

Область неоднозначности расширяется при прохождении сигнала через последовательность элементов. Например, на рис. 13.5, б длительность условно возрастающей области возрастает до 10 в результате последовательного прохождения сигнала через 2 буферных элемента.

Неоднозначность может приводить не только к размыванию момента переключения логических состояний. Она может кардинально менять результаты моделирования. В примере, показанном на рис. 13.6, а, неоднозначность сигнала на информационном входе D-триггера, может привести к возникновению неопределенного состояния «X» его выхода после воздействия на синхровход *CLK* синхросигнала. Если передний фронт тактового импульса закончится до изменения состояния на D-входе, выход триггера *Q* останется в состоянии «0». Если передний фронт тактового импульса закончится после изменения сигнала на D-входе, выход триггера *Q* установится в состояние «1».

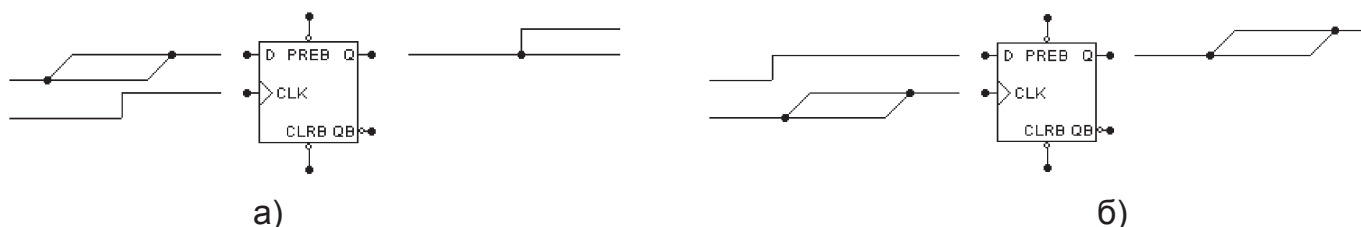


Рис. 13.6. Влияние неоднозначности на работу элементов памяти

Так как возможны 2 противоположных состояния *Q*-выхода триггера, зависящие от времени смены сигнала на информационном *D*-входе, выходу *Q* после воздействия тактового сигнала присваивается неопределенное состояние «X». Смена состояния на входе *D* необязательно приводит к неопределенному состоянию. Если передний фронт синхросигнала приходит в момент стабильного состояния *D*-входа (как, например, показано на рис. 13.6, б, неопределенности не возникает, и состояние *Q* выхода предсказуемо).

13.1.6. Паразитные импульсы вследствие логических состязаний

Если момент смены логических состояний на входах цифрового устройства точно неизвестен, то на выходе может возникать паразитный короткий импульс (glitch) или неопределенное состояние «X». Такие ситуации называют временными состязаниями или логическими гонками.

Существует несколько типов логических гонок:

- Гонки сходимости.
- Гонки в результате накопления неопределенности.
- Критические гонки.

Гонки сходимости (Convergence hazards)

Гонки сходимости наступают в случае, когда два сигнала, приходящие на входы логического вентиля, имеют перекрытие неопределенности времен их прихода (см. рис. 13.7). Подобные гонки выражаются для данного случая возникновением на выходе паразитных 0-X-0 или 0-R-0 переходов. Эти паразитные переходы можно рассматривать как возможные короткие импульсы, ширина которых может увеличиваться при увеличении времени перекрытия неопределенных состояний двух входных сигналов логического вентиля.

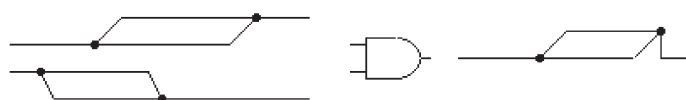


Рис. 13.7. Логические гонки сходимости

Гонки из-за накопления неопределенности (*Cumulative ambiguity hazards*)

Если установить параметр MNTYMXDLY=4, то выполняется моделирование для случая наихудшего сочетания задержек. При этом программа анализирует добавляет между заданными минимальной и максимальной задержками условно нарастающее состояние «R» при каждом переходе из «0» в «1» и условно спадающее состояние при каждом переходе из «1» в «0».

Если сигнал проходит через вентиль с наихудшим сочетанием задержек (MNTYMXDLY=4), то интервалы времени условно-нарастающего и условно-спадающего состояния увеличиваются (рис. 13.8, а).

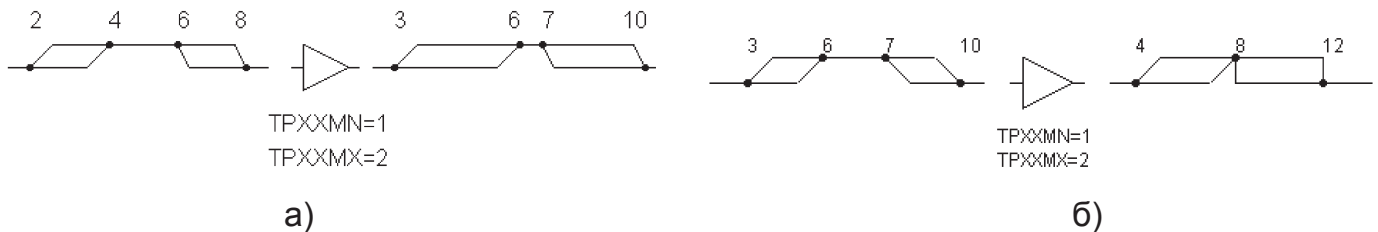


Рис. 13.8. Гонки в результате накопления неопределенности

При этом может возникнуть ситуация, когда при прохождении сигнала через вентиль длительности условно-нарастающего и условно-спадающего состояния увеличатся настолько, что суммарно превысят время действия сигнала и перекроют друг друга (рис. 13.8, б). В этот момент на выходе вентиль возникнет неопределенное состояние, которое можно рассматривать как вероятность появления паразитного импульса.

Накапливаемая неопределенность — основная проблема схем, имеющих обратную связь через инвертор с выхода на вход (генераторы импульсов). Для анализа таких схем параметр MNTYMXDLY вентиляей, образующих генератор, должен отличаться от 4 (т.е. расчет не должен вестись на наихудший случай).

Критические гонки (*Critical hazards*)

Гонки сходимости и накопления задержек показывают потенциальные проблемы, возникающие при проектировании и моделировании цифровых схем. Если возникающие в результате гонок паразитные импульсы вызывают переключение триггеров или других устройств с памятью в непредусмотренные состояния, то они становятся критическими, поскольку могут нарушить алгоритм работы всего устройства.

Рассмотренные проблемы цифровых схем при наихудшем сочетании задержек распространения (MNTYMXDLY=4) иллюстрируют схемные примеры *Dig_Dly_Amb_01... Dig_Dly_Amb_04*, *Conv_Haz_01*, *Cumul_Haz_01* из каталога *Components\Digital*.

13.1.7. Интерфейсная модель

Когда цифровые и аналоговые компоненты схемы соединяются между собой, то программа автоматически вставляет между ними подсхему сопряжения (интерфейсную модель — I/O model), определяющую правила взаимодействия цифровой и аналоговой части. Эта подсхема не отображается на схеме моделирования, но в точке соединения цифрового и аналогового ком-

понентов появляются не один, а два узла – цифровой и аналоговый. Интерфейсная подсхема сопряжения содержит аналоговые компоненты (резисторы, конденсаторы, диоды и транзисторы), а также SPICE-описания аналого-цифровых либо цифро-аналоговых преобразований и аналоговый источник питания преобразовательных схем (более подробно см. 13.5). Эти подсхемы обеспечивают трансляцию аналоговых сигналов на цифровые входы и цифровых сигналов на аналоговые узлы, т.е. осуществляют «перевод» сигналов между аналоговыми и цифровыми компонентами схемы.

Возможно также дополнительное изменение источника питания любого выбранного интерфейса. Это осуществляется путем модификации его подсхемы.

Micro-Cap также создает добавочные узлы в интерфейсе между аналоговой и цифровой схемой. Создание и обозначение этих узлов чрезвычайно важно для понимания способов вывода на экран графиков сигналов.

Варианты аналого-цифрового преобразования в интерфейсной модели

В точке соединения цифрового и аналогового компонента возникают сразу два узла (цифровой и аналоговый), причем непосредственная связь между ними разрывается в место разрыва добавляется невидимая пользователю интерфейсная схема. Эта схема описывается одной из интерфейсных моделей (I/O model), которая выбирается из возможных разновидностей в соответствии со значением атрибута **IO_LEVEL**. Этот параметр определяет варианты используемого аналого-цифрового преобразования (варианты O-компонента интерфейсной модели). Варианты моделей аналого-цифрового интерфейса представлены в табл. 13.4.

Таблица 13.4. Выбор модели аналого-цифрового интерфейса

Уровень IO_LEVEL	Подсхема	Поведение
1	AtoD1/DtoA1	AtoD создает R, F, и X уровни
2	AtoD2/DtoA2	AtoD не создает R, F, и X уровни
3	AtoD3/DtoA3	Так же как и Level 1
4	AtoD4/DtoA4	Так же как и Level 2

Если **IO_LEVEL=0**, то тип модели аналого-цифрового интерфейса задается параметром **DIGIOLVL** диалогового окна *Global Settings*.

Интерфейсы Level 1. Модели аналого-цифрового интерфейса уровня 1 генерируют на своем выходе уровни логического 0 и 1, а также промежуточные логические уровни (R, F, X), если входной сигнал плавно меняется внутри диапазона **VILMAX...VIHMIN**. Входной сигнал, плавно изменяющийся от значения, меньшего **VILMAX** до значения большего **VIHMIN** и обратно, создает на выходе такой модели последовательность цифровых состояний 0, R, 1, F, 0. Состояние «X» генерируется в том случае, если входной сигнал меняет направление изменения внутри области, ограниченной **VILMAX** и **VIHMIN** (рис. 13.9).

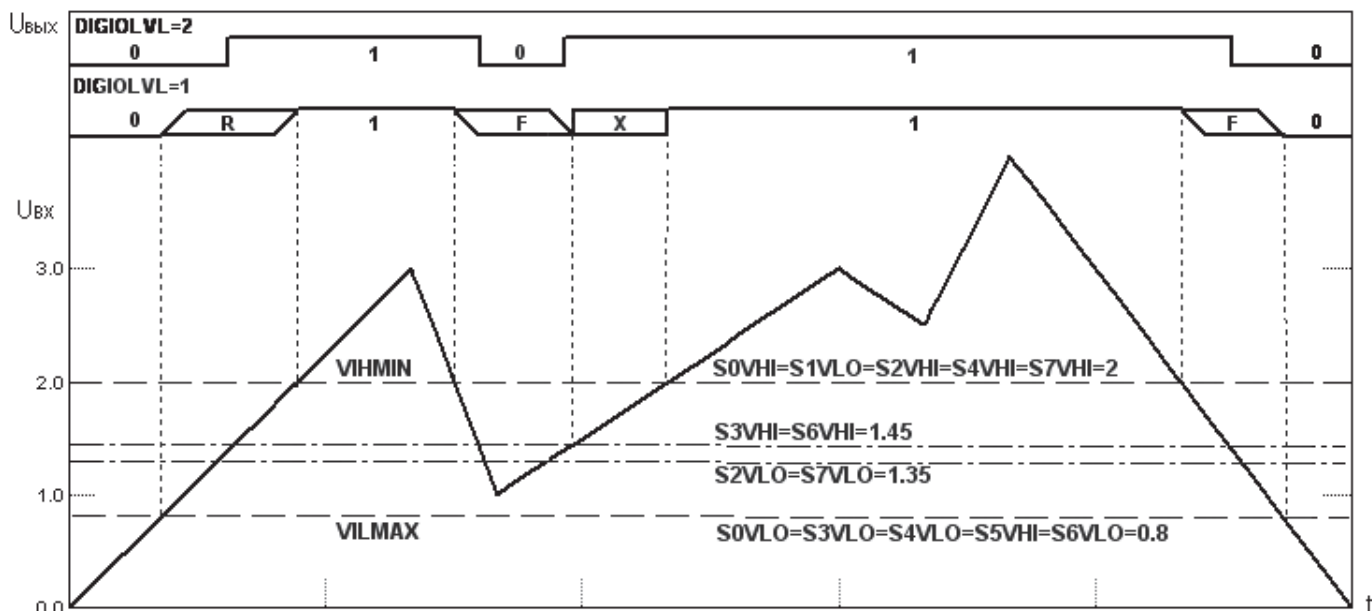


Рис. 13.9. Формирование логических уровней интерфейсной моделью

Интерфейсы Level 2. Модели аналого-цифрового интерфейса 2-го уровня генерируют только основные цифровые состояния (0, 1). Неопределенные состояния (R, F, X), которые потенциально ведут к возникновению проблем при моделировании, этот тип интерфейсов не использует.

Интерфейсы 2-го уровня менее точны, но обеспечивают лучшую сходимость при выполнении расчетов. Именно этот интерфейс используется по умолчанию при моделировании цифровых схем.

Интерфейсы Level 3, Level 4. Это эквиваленты интерфейсов уровней 1 и 2 соответственно. Они не используются в стандартной библиотеке цифровых компонентов и служат для обеспечения совместимости с внешними SPICE-моделями.

Схемы источников питания модели аналого-цифрового интерфейса. Источник питания модели аналого-цифрового интерфейса подключается автоматически в соответствии со значением параметра DIGPOWER интерфейсной модели конкретной серии цифровых микросхем, например 7400 TTL. Данный параметр указывает имя используемой подсхемы источника питания интерфейса. Основная подсхема для питания всех ТТЛ-микросхем называется "DIGIFPWR" и располагается в файле DIGIO.LIB. Эта подсхема обеспечивает напряжение питания для интерфейсных схем в случае использования ТТЛ-компонентов. Можно, конечно же, изменить интерфейсную схему питания указанием другой подсхемы или изменить саму подсхему. Однако, рекомендуется этого не делать, и оставить оригинальную подсхему "DIGIFPWR" без изменений. В случае необходимости можно клонировать с нее новые версии с модифицированными именами, как, например "DIGIFPW1". Это позволит быстро вернуться к исходной версии простым изменением параметра модели DIGPOWER="DIGIFPWR" в интерфейсной модели.

Для других серий (КМОП, ЭСЛ) имеются другие подсхемы с другими именами, расположенные в этом же файле DIGIO.LIB.

Библиотечный файл моделей DIGIO.LIB. Это файл содержит директивы интерфейсных моделей (I/O model), схемы для преобразования аналогового сигнала в цифровой (ATOD) и цифрового в аналоговый (DTOA), директи-

вы моделей О-компонента (ATOD) и N-компонента (DTOA) и источники питания для всех цифровых компонентов библиотеки.

Варианты соединения цифровых и аналоговых компонентов

Возможны три варианта соединения компонентов:

- аналоговый компонент подключается к входу цифрового компонента;
- аналоговый компонент подключается к выходу цифрового компонента;
- аналоговый компонент подключается к точке соединения выхода и входа цифровых компонентов.

Если аналоговый компонент (например, резистор) подсоединяется к цифровому выходу (рис. 13.10, а), то используется подсхема интерфейса преобразования из цифрового сигнала в аналоговый DtoA. При этом создается новый цифровой узел 2\$DTOA на выходе цифровой схемы и интерфейсная схема DTOA, определяемая параметром IO_LEVEL. Интерфейсная схема включается между новым цифровым выходным узлом и аналоговым узлом (рис. 13.10, а).

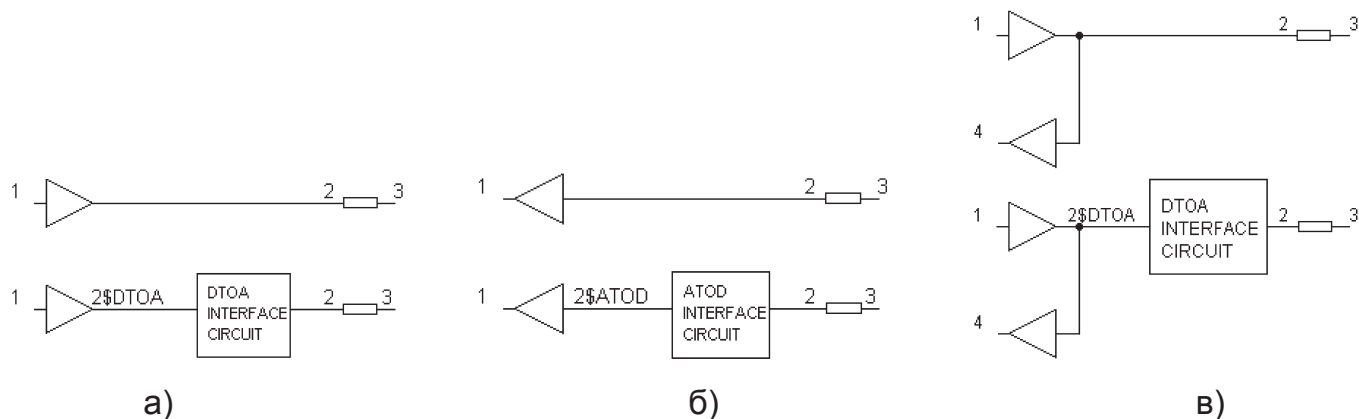


Рис. 13.10. Расщепление схемных узлов при соединении аналогового и цифрового компонентов

Если аналоговый компонент подсоединяется к цифровому входу, то используется подсхема интерфейса преобразования аналогового сигнала в цифровой. При этом создается новый цифровой узел 2\$ATOD и интерфейсная схема ATOD, определяемая параметром IO_LEVEL. Интерфейсная схема включается между новым цифровым узлом и аналоговым узлом (рис. 13.10, б).

Если аналоговый компонент подсоединяется к точке соединения цифрового входа и выхода, то используется подсхема преобразования цифрового сигнала в аналоговый. При этом создается новый цифровой узел 2\$DTOA и интерфейсная схема DTOA, определяемая параметром IO_LEVEL. Интерфейсная схема включается между новым цифровым узлом и аналоговым узлом (рис. 13.10, в). При этом потенциал аналогового узла на цифровой вход не воздействует. Состояние цифрового входа определяется исключительно состоянием цифрового выхода.

Особенности использования моделей трехстабильных схем

Про описанную выше особенность подключения интерфейса в случае присоединения аналогового компонента к точке соединения входа и выхода цифровых компонентов необходимо помнить в первую очередь при использовании трехстабильных логических компонентов.

Если в этом случае для формирования логической единицы на выходе трехстабильной логики (например, вентиля с открытым коллектором) использовать обычный резистор, то он окажется электрически отсоединен от выхода и уровень логической единицы не сформируется. Это связано с тем, что между резистором и выходом трехстабильной логики включится цифроаналоговый интерфейс, который отсоединит резистор и оттранслирует на его вывод сигнал с цифрового выхода. А должно быть наоборот — аналоговый сигнал с вывода резистора должен быть аналого-цифровым интерфейсом подан на выход цифрового компонента. Таким образом, в этом случае аналоговый резистор не выполняет «подтягивающую» функцию. Для преодоления этой проблемы существуют следующие правила организации интерфейса с трехстабильными схемами:

- В трехстабильных узлах, подключенных к цифровым входам, ни в коем случае нельзя использовать аналоговые резисторы (рис. 13.11, а);
- В трехстабильных узлах следует использовать специальные подтягивающие резисторы *pullup* или *pulldown* (рис. 13.11, б);

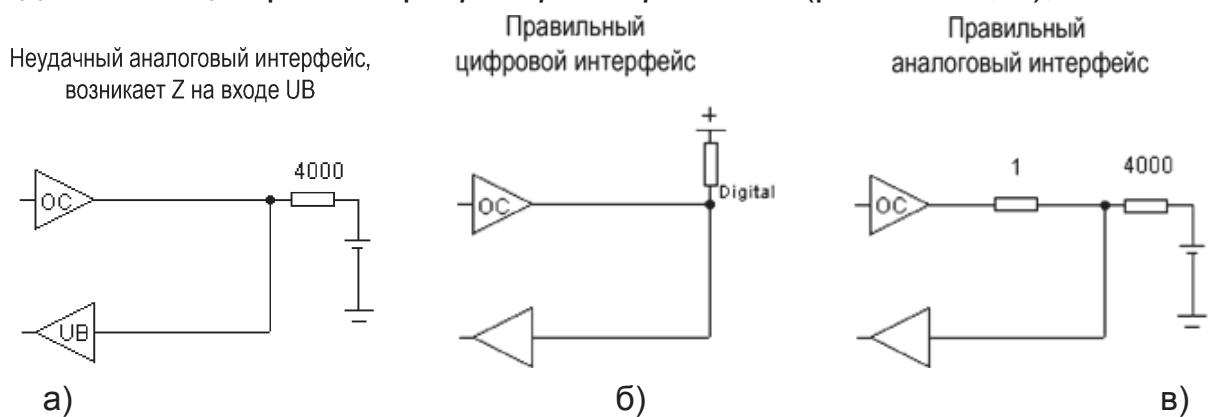


Рис. 13.11. Обеспечение аналого-цифрового интерфейса для схем с открытым коллектором и трехстабильных схем

- Если аналоговый резистор все же необходим, следует отделить цифровой трехстабильный выход от цифрового входа низкоомным резистором (см. рис. 13.11, в).

13.2. Модели цифровых компонентов

13.2.1. Общий формат цифровых примитивов

Формат задания цифровых компонентов и их моделей в Micro-Cap соответствует общепринятому формату SPICE. Цифровые компоненты Micro-Cap разделяются на два типа: цифровые примитивы и библиотечные компоненты. Цифровые примитивы (буфер, инвертор, элемент 2ИЛИ-НЕ, триггер и т.п.) описываются обобщенными моделями, без привязки к какой-либо конкретной серии реальных микросхем. Библиотечные компоненты заданы моделями с параметрами, соответствующими реально существующей цифровой микросхеме (например, 74AC00).

Цифровые примитивы и библиотечные компоненты описываются SPICE-моделями с соответствующими параметрами (основными и дополнительными) и условными графическими обозначениями. Модели библиотечных компонентов, как правило, строятся на основе моделей цифровых примитивов,

поэтому в первую очередь целесообразно рассмотреть формат задания цифрового примитива.

Модель цифрового компонента (в том числе и примитива) состоит из двух частей: временной модели (timing model) и интерфейсной модели (I/O model). Временная модель определяет задержки распространения цифровых состояний и ограничения снизу на длительности действия цифровых сигналов. Интерфейсная модель определяет сопротивления, эквивалентные схемы и времена переключения аналого-цифрового интерфейса.

Интерфейсная модель (I/O model) используется в основном при соединении аналоговых и цифровых узлов. Кроме того, с ее помощью решается вопрос о цифровом состоянии и динамике его изменения в зависимости от нагрузочной способности микросхемы (при объединении выходов нескольких устройств).

Как правило, интерфейс в пределах одной серии цифровых микросхем стандартизирован. Например, все компоненты серии 74LS имеют одинаковые интерфейсные спецификации, поэтому большинство библиотечных компоненты этой серии будут иметь одну и ту же интерфейсную модель. Исключения из большинства будут относиться к компонентам с открытым коллектором, трехстабильным схемам, логике с триггерами Шмитта на входе.

Временная модель (Timing model) описывает уникальные особенности каждой отдельно взятой цифровой микросхемы, поэтому большинство цифровых компонентов имеют различные временные модели даже в пределах одной серии цифровых микросхем.

Формат задания цифрового примитива

```
U<имя> <тип примитива> [(<значение параметра>*)]
+<цифровой узел питания> <цифровой узел земли> <узел>*
+<имя временной модели> <имя интерфейсной модели>
+[MNTYMXDLY=<селектор задержки>]
+[IO_LEVEL=<селектор подсхемы интерфейса>]
```

Примеры:

```
U1 JKFF(1) $G_DPWR $G_DGND PR CLB CKB J K Q QB D0_74 IO_STD
U1 NOR(3) $G_DPWR $G_DGND 10 20 30 40 D0_74 IO_STD
```

Определения

U<имя> — представляет собой позиционное обозначение компонента.

<тип примитива> — указывает тип цифрового компонента по принципу действия (логической функции), как, например:

- NAND — логический элемент И-НЕ;
- NOR — логический элемент ИЛИ-НЕ,
- JKFF — JK-триггер, переключающийся по заднему фронту синхросигнала;
- PLA — программируемая логическая матрица.

[(*<значение параметра>)]** — зависит от типа цифрового примитива, может отсутствовать или содержать одно или несколько целых чисел. Обычно представляет собой число выводов (pin) цифрового компонента и (или) число примитивов в массиве.

<цифровой узел питания> <цифровой узел земли> — данные узлы обеспечивают питание схем аналого-цифрового интерфейса, необходимого, когда аналоговые узлы соединяются с цифровыми. Обычно используются имена глобальных узлов \$G_DPWR и \$G_DGND

<узел>* — имена узлов компонента, количество перечисляемых узлов зависит от типа примитива.

Например, для вентилей порядок следующий:

IN1 IN2 INN ENABLE OUT;

Здесь перечислены имена узлов N входов вентиля, входа разрешения работы (ENABLE), выхода вентиля (OUT).

Для D-триггера:

PRESETBAR CLEARBAR CLOCK D Q QB

Здесь перечислены имена узлов асинхронной предустановки (PRESETBAR) и сброса (CLEARBAR), тактового входа (CLOCK), информационного входа D, прямого (Q) и инверсного (QB) выходов.

<имя временной модели> (Timing model) — указанное в этой строке имя задает ссылку на соответствующую модельную директиву, которая содержит значения задержек распространения сигнала и ограничения на длительность сигналов. Каждая временная модель имеет минимальные, типовые и максимальные значения соответствующих параметров. Параметр MNTYMXDLY выбирает одно из значений или разрешает использование глобального параметра DIGMNTYMX (из установок диалогового окна *Global Settings*).

<имя интерфейсной модели> (I/O model) — указанное в этой позиции имя задает ссылку на соответствующую модельную директиву, которая определяет импедансы микросхемы и схему аналого-цифрового интерфейса.

[MNTYMXDLY=<селектор задержки>] — задает использование для всех цифровых компонентов минимальной, типовой, максимальной задержек или их наихудшего сочетания:

- 0 — текущее значение параметра DIGMNTYMX диалогового окна *Global Settings* (по умолчанию DIGMNTYMX=2).
- 1 — минимальная
- 2 — типовая
- 3 — максимальная
- 4 — наихудший случай. Использование минимальной и максимальной задержек.

[IO_LEVEL=<селектор подсхемы интерфейса>] — выбирает один из 4-х типов интерфейсных моделей (табл. 13.4), используемых в смешанном моделировании.

Формат директивы временной модели (Timing model):

.MODEL <имя модели> <тип модели> (<параметр модели>*)

Каждый тип примитивов имеет уникальный <тип модели> и набор параметров модели.

Формат директивы интерфейсной модели (I/O model):

.MODEL <имя модели> UIO (<параметр модели>*) — общая структура интерфейсной модели, используемая всеми примитивами.

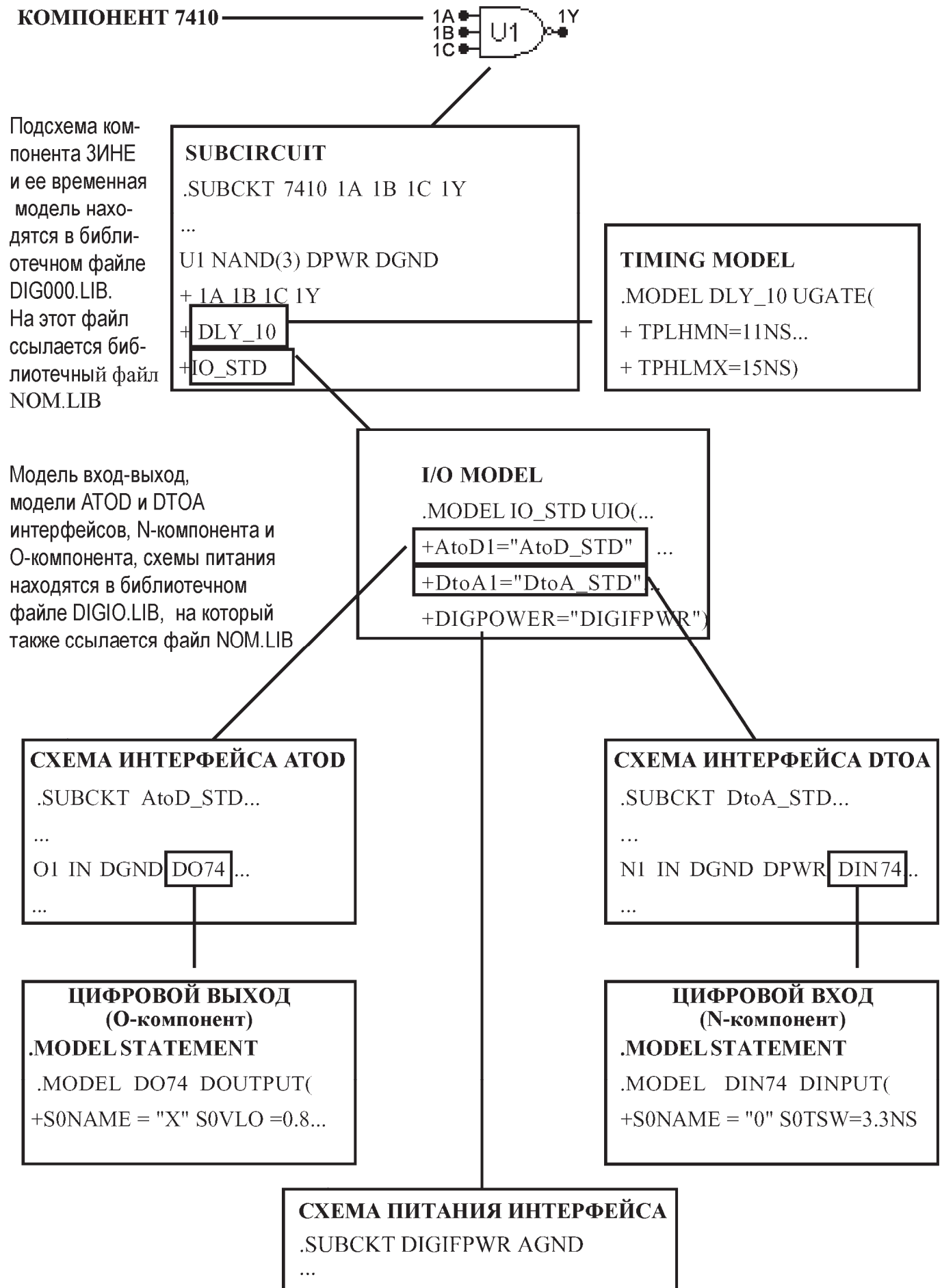


Рис. 13.12. Структура модели цифрового компонента 7410

13.2.2. Структура модели цифрового компонента

При использовании цифровых примитивов необходимо каждый раз задавать (выбирать из списка) временную модель (TIMING MODEL) и интерфейсную модель (I/O MODEL). При использовании библиотечных компонентов этого не требуется, поскольку описание библиотечного компонента, заданное в библиотеке DIGXXXX.LIB, уже содержит ссылки на соответствующие временные и интерфейсные модели.

SPICE-описание цифрового компонента строится по модульному принципу. Существует определенный набор подсхем для формирования временных и интерфейсных моделей. Разная комбинация этих подсхем и разный набор их параметров формирует полную модель конкретного компонента. Структура полной модели на примере цифрового компонента 7410 представлена на рис. 13.12.

Подсхема компонента 7410 (3И-НЕ) и ее временная модель (TIMING MODEL) находятся в библиотечном файле DIG000.LIB. Для того чтобы Micro-Cap мог воспользоваться этой библиотекой, она обязательно должна быть входить в список используемых библиотек, который задается файлом NOM.LIB. Любую новую библиотеку перед использованием необходимо прописать в этом файле при помощи текстового редактора либо собственного редактора Micro-Cap.

Интерфейсная модель (I/O MODEL), модели ATOD и DTOA интерфейсов, модели N-компонента и O-компонента и подсхемы питания интерфейса находятся в библиотечном файле DIGIO.LIB, который также содержится в списке NOM.LIB.

13.2.3. Цифровые SPICE-примитивы, используемые в Micro-Cap

Цифровые SPICE-примитивы, используемые в Micro-Cap, представлены в таблице 13.5.

Таблица 13.5. Цифровые SPICE-примитивы

Класс примитива	Тип	Описание
Стандартные вентили	BUF	Буфер
	INV	Инвертор
	AND	Схема И
	NAND	СХЕМА И-НЕ
	OR	Схема ИЛИ
	NOR	Схема ИЛИ-НЕ
	XOR	Схема Исключающее-ИЛИ
	NXOR	Схема Исключающее ИЛИ-НЕ
	XXXXA	Массив вентилей XXXX (вместо XXXX — BUF, INV, AND, NAND, OR, NOR, XOR, NXOR)
	AO	Составной вентиль И-ИЛИ
	OA	Составной вентиль ИЛИ-И
	AOI	Составной вентиль И-(ИЛИ-НЕ)
	OAI	Составной вентиль ИЛИ-(И-НЕ)

Окончание табл. 13.5

Класс примитива	Тип	Описание
Трехстабильные вентили	BUF3	3-стабильный буфер
	INV3	3-стабильный инвертор
	AND3	3-стабильный вентиль И
	NAND3	3-стабильный вентиль И-НЕ
	OR3	3-стабильный вентиль ИЛИ
	NOR3	3-стабильный вентиль ИЛИ-НЕ
	XOR3	3-стабильный вентиль Исключающее-ИЛИ
	NXOR3	3-стабильный вентиль Исключающее-ИЛИ-НЕ
	XXXX3A	Массив 3-стабильных вентилях XXXX, (вместо XXXX — BUF, INV, AND, NAND, OR, NOR XOR, NXOR)
Триггеры	JKFF	JK-триггер, переключаемый отрицательным фронтом синхросигнала
	DFF	D-триггер, переключаемый положительным фронтом синхросигнала
	SRFF	RS-триггер, переключаемый по уровню синхросигнала (защелка)
	DLTCH	D-триггер, переключаемый по уровню синхросигнала (защелка)
Подтягивающие компоненты (Pullups/Pulldowns)	PULLUP	Резистор, подтягивающий потенциал вывода к напряжению питания
	PULLDN	Резистор, подтягивающий потенциал вывода к земле
Цифровые линии задержки	DLYLINE	Безинерционная линия задержки цифрового сигнала
Программируемые логические матрицы	PLAND	Матрица И
	PLOR	Матрица ИЛИ
	PLXOR	Матрица Исключающее-ИЛИ
	PLNXOR	Матрица Исключающее-ИЛИ-НЕ
	PLNAND	Матрица И-НЕ
	PLNOR	Матрица ИЛИ-НЕ
	PLANDC	Комплиментарная матрица И
	PLORC	Комплиментарная матрица ИЛИ
	PLXORC	Комплиментарная матрица Исключающее-ИЛИ
	PLNANDC	Комплиментарная матрица И-НЕ
	PLNORC	Комплиментарная матрица ИЛИ-НЕ
	PLNXORC	Комплиментарная матрица Исключающее-ИЛИ-НЕ
N-битные преобразователи	ADC	Аналого-цифровой преобразователь
	DAC	Цифроаналоговый преобразователь
Поведенческие модели	LOGICEXP	Логическое выражение
	PINDLY	Задержка между выводами
	CONSTRAINT	Контроль временных ограничений

Следует отметить, что цифровые примитивы, имеющиеся в составе Micro-Cap (выбираемые из раздела *COMPONENT>Digital Primitives*), имеют названия, отличающиеся от приведенных в табл. 13.5. Однако в качестве модели они также используют цифровой SPICE-примитив. Например, сказанное относится к цифровому примитиву *Xnor_T* (раздел *COMPONENT>Digital Primitives>Tri-State Gates>Xnor_Tri Gates*). Если, зайдя в редактор компонентов (*WINDOWS>Component Editor*) посмотреть в графе *Definition* его определение, то можно увидеть имя соответствующего SPICE-примитива *NXOR3*.

13.2.4. Логические вентили (Gates)

В программе Micro-Cap существуют модели двух типов вентиляей: стандартные и с тремя состояниями выходов:

У стандартных вентиляей работа выходов разрешена все время. Их выходное сопротивление определяется следующим образом:

Выходное состояние	Выходное сопротивление стандартного вентиля
0	DRV L (из I/O model)
1	DRV H (из I/O model)

Элементы с открытым коллектором моделируются как разновидность стандартных вентиляей с очень большим значением DRVH в интерфейсной модели (I/O Model).

У трехстабильных вентиляей имеется вход разрешения работы выходных буферов *Enable*. Фактически появление логического сигнала на выходе разрешаются при активном уровне *Enable*. Выходное сопротивление такого вентиля определяется следующим образом:

Состояние вывода Enable	Выходное состояние	Выходное сопротивление трехстабильного вентиля
1	0	DRV L (из I/O model)
1	1	DRV H (из I/O model)
0	Z	DIGDRVZ (из Global Settings)

Стандартные и трехстабильные вентили могут задаваться либо в виде одиночных вентиляей, либо в виде массива.

К рассматриваемым вентилям применяются правила операций алгебры логики. Если один из входов вентиля имеет неопределенное состояние, уровень на выходе вычисляется для двух вариантов состояния данного входа: «0» и «1», согласно обычным Булевым правилам. Если состояния выхода для этих двух вариантов различаются, тогда считается, что на выходе состояние «X». Сказанное можно выразить приведенными ниже расширенными правилами:

$$0 \text{ AND } X = 0$$

$$1 \text{ AND } X = X$$

$$0 \text{ NAND } X = 1$$

$$1 \text{ NAND } X = X$$

$$0 \text{ OR } X = X$$

$$0 \text{ NOR } X = X$$

$$1 \text{ NOR } X = 0$$

$$1 \text{ XOR } X = X$$

$$0 \text{ XOR } X = X$$

$$1 \text{ OR } X = 1$$

Типы стандартных и трехстабильных вентилях приведены в табл. 13.6. В ней приняты следующие обозначения:

- **en** — вход разрешения работы выходных буферов в трехстабильных схемах
- **in** — один входной вывод
- **in*** — один или более входных выводов
- **out** — один выходной вывод
- **out*** — один или более выходных выводов

Таблица 13.6. Типы логических вентилях

Тип	Параметр	Порядок перечисления узлов	Описание
Стандартные вентили			
BUF		in, out	Буфер
INV		in, out	Инвертор
AND	<кол. выводов>	in*, out	Вентиль И
NAND	<кол. выводов>	in*, out	Вентиль И-НЕ
OR	<кол. выводов>	in*, out	Вентиль ИЛИ
NOR	<кол. выводов>	in*, out	Вентиль ИЛИ-НЕ
XOR	<кол. выводов>	In1, in2, out	Схема Исключающее-ИЛИ
NXOR	<кол. выводов>	In1, in2, out	Схема Исключающее-ИЛИ-НЕ
BUFA	<кол. вентилях>	in*, out*	Массив буферов
INVA	<кол. вентилях>	in*, out*	Массив инверторов
ANDA	<кол. выводов>, <кол. вентилях>	in*, out*	Массив вентилях И
NANDA	<кол. выводов>, <кол. вентилях>	in*, out*	Массив вентилях И-НЕ
ORA	<кол. выводов>, <кол. вентилях>	in*, out*	Массив вентилях ИЛИ
NORA	<кол. выводов>, <кол. вентилях>	in*, out*	Массив вентилях ИЛИ-НЕ
XORA	<кол. вентилях>	in*, out*	Массив вентилях исключающее-ИЛИ
NXORA	<кол. вентилях>	in*, out*	Массив вентилях исключающее-ИЛИ-НЕ
AO	<кол. выводов>, <кол. вентилях>	in*, out	Элементы И, объединенные по ИЛИ
OA	<кол. выводов>, <кол. вентилях>	in*, out	Элементы ИЛИ, объединенные по И
AOI	<кол. выводов>, <кол. вентилях>	in*, out	Элементы И, объединенные по ИЛИ-НЕ
OAI	<кол. выводов>, <кол. вентилях>	in*, out	Элементы ИЛИ, объединенные по И-НЕ

Тип	Параметр	Порядок перечисления узлов	Описание
Трехстабильные вентили			
BUF3		in, en, out	Буфер
INV3		in, en, out	Инвертор
AND3	<кол. выводов>	in*, en, out	Вентиль И
NAND3	<кол. выводов>	in*, en, out	Вентиль И-НЕ
OR3	<кол. выводов>	in*, en, out	Вентиль ИЛИ
NOR3	<кол. выводов>	in*, en, out	Вентиль ИЛИ-НЕ
XOR3		in1, in2, en, out	Схема Исключающее-ИЛИ
NXOR3		in1, in2, en, out	Схема Исключающее-ИЛИ-НЕ
BUF3A	<кол. вентиляей>	in*, en, out*	Массив буферов
INV3A	<кол. вентиляей>	in*, en, out*	Массив инверторов
AND3A	<кол. выводов>, <кол. вентиляей>	in*, en, out*	Массив вентиляей И
NAND3A	<кол. выводов>, <кол. вентиляей>	in*, en, out*	Массив вентиляей И-НЕ
OR3A	<кол. выводов>, <кол. вентиляей>	in*, en, out*	Массив вентиляей ИЛИ
NOR3A	<кол. выводов>, <кол. вентиляей>	in*, en, out*	Массив вентиляей ИЛИ-НЕ
XOR3A	<кол. вентиляей>	in*, en, out*	Массив вентиляей исключающее-ИЛИ
NXOR3A	<кол. вентиляей>	in*, en, out*	Массив вентиляей исключающее-ИЛИ-НЕ

Формат SPICE

U<имя> <тип вентиля>[(<параметры>)*]
 +<цифровой узел питания> <цифровой узел земли>
 +<узел входа>* [<узел входа разрешения enable>]<узел выхода>*
 +<имя временной модели> <имя интерфейсной модели>
 +[MNTYMXDLY=<селектор задержки>]
 +[IO_LEVEL=<селектор подсхемы интерфейса>]

Примеры:

5-входовой элемент ИЛИ-НЕ:

```
U1 NOR(5) $G_DPWR $G_DGND IN1 IN2 IN3 IN4 IN5 OUT
D0_GATE IO_STD MNTYMXDLY=0 IO_LEVEL=2
```

3 двухвходовых элемента И-НЕ:

```
U17 NANDA(2,3) $G_DPWR $G_DGND 1A 1B 2A 2B 3A 3B O1 O2 O3
DLY1 IO_ACT
```

2 элемента 3И, объединенных по ИЛИ:

```
UCMPD AO(3,2) $G_DPWR $G_DGND i1a i1b i1c i2a i2b i2c out
dlymod io_hc_oc MNTYMXDLY=3
```

Элемент ЗИЛИ-НЕ с трехстабильным выходом:

U20 NOR3(3) \$G_DPWR \$G_DGND IN1 IN2 IN3 ENABLE OUT
D0_GATE IO_STD MNTYMXDLY=0 IO_LEVEL=2

Массив из трех элементов 2И-НЕ:

UBX AND3A(2,3) \$G_DPWR \$G_DGND 1A 1B 2A 2B 3A 3B EN O1 O2 O3
DLY1 IO_ACT

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример: U1
- Атрибут **TIMING MODEL**: <имя временной модели>
Пример: 74LS
- Атрибут **I/O MODEL**: < имя интерфейсной модели>
Пример: IO_STD
- Атрибут **MNTYMXDLY**: <селектор задержки>
Пример: 2
- Атрибут **IO_LEVEL**: <селектор подсхемы интерфейса>
Пример: 1
- Атрибут **POWER NODE**: <цифровой узел питания>
Пример: \$G_DPWR
- Атрибут **GROUND NODE**: <цифровой узел земли>
Пример: \$G_DGND

Таблица 13.7. Параметры временной модели вентилях, с

Параметр	Описание
TPLHMN	Минимальная задержка перехода от низкого к высокому
TPLHTY	Типовая задержка перехода от низкого к высокому
TPLHMX	Максимальная задержка перехода от низкого к высокому
TRHLMN	Минимальная задержка перехода от высокого к низкому
TRHPTY	Типовая задержка перехода от высокого к низкому
TRHLMX	Максимальная задержка перехода от высокого к низкому
TPLZMN	Минимальная задержка перехода от низкого к 3-му состоянию
TPLZTY	Типовая задержка перехода от низкого к 3-му состоянию
TPLZMX	Максимальная задержка перехода от низкого к 3-му состоянию
TRHZMN	Минимальная задержка перехода от высокого к 3-му состоянию
TRHZTY	Типовая задержка перехода от высокого к 3-му состоянию
TRHZMX	Максимальная задержка перехода от высокого к 3-му состоянию
TPZLMN	Минимальная задержка перехода от 3-го состояния к низкому
TPZPTY	Типовая задержка перехода от 3-го состояния к низкому
TPZLMX	Максимальная задержка перехода от 3-го состояния к низкому
TPZHMN	Минимальная задержка перехода от 3-го состояния к высокому
TPZHPT	Типовая задержка перехода от 3-го состояния к высокому
TPZHMX	Максимальная задержка перехода от 3-го состояния к высокому

Формат директивы временной модели (Timing Model)

Для стандартного вентиля:

.MODEL <имя временной модели> **UGATE** ([параметры временной модели])

Для трехстабильного вентиля:

.MODEL <имя временной модели> **UTGATE** ([параметры временной модели])

Примеры:

.MODEL TOR UGATE (TPLHMN=3ns TPLHTY=5ns TPLHMX=7ns

+ TPHLMN=4ns TPHLTY=6ns TPHLMX=7ns)

.MODEL TRIG UTGATE (TPLHMN=2ns TPLHTY=3ns TPLHMX=5ns

+ TPZLMN=4ns TPZLTY=6ns TPZLMX=8ns)

13.2.5. Триггеры

В составе библиотеки цифровых примитивов имеются триггеры с динамическим входом, меняющие состояние по фронту (срезу) синхроимпульса (Flip-flops). К таким триггерам относятся элементы: DFF — D-триггер, переключающийся по фронту синхроимпульса; JKFF — JK-триггер, переключающийся по срезу синхроимпульса. Оба типа триггеров с динамическим синхровходом имеют статические асинхронные входы установки (setbar) и сброса (clearbar) с активным низким уровнем. В табл. 13.8 и 13.9 показан алгоритм функционирования триггеров JKFF и DFF. В них имя выхода триггера со штрихом обозначает его предыдущее состояние.

Таблица 13.8. Таблица истинности триггера JKFF

J	K	CLKB	PREB	CLRB	Q	QB
X	X	X	1	0	0	1
X	X	X	0	1	1	0
X	X	X	0	0	Нестабильное	Нестабильное
X	X	0	1	1	Q'	QB'
X	X	1	1	1	Q'	QB'
0	0	↓	1	1	Q'	QB'
0	1	↓	1	1	0	1
1	0	↓	1	1	1	0
1	1	↓	1	1	QB'	Q'

Таблица 13.9. Таблица истинности триггера DFF

D	CLK	PREB	CLRB	Q	QB
X	X	1	0	0	1
X	X	0	1	1	0
X	X	0	0	Нестабильное	Нестабильное
X	0	1	1	Q'	QB'
X	1	1	1	Q'	QB'
0	↑	1	1	0	1
1	↑	1	1	1	0

Также в состав библиотеки примитивов входят триггеры, переключающиеся по уровню сигнала на синхровходе, или так называемые защёлки (latches). Это синхронный RS-триггер (SRFF), и D-триггер-защелка (DLTCH). Выходы этих триггеров устанавливаются в соответствии с входными информационными сигналами, в течение всего времени присутствия активного уровня (высокого) на разрешающем входе GATE и не меняют своего состояния при низком уровне сигнала на данном входе. Алгоритм функционирования этих триггеров приведен в табл. 13.10, 13.11. В них имя выхода триггера со штрихом обозначает его предыдущее состояние.

Таблица 13.10. Таблица истинности триггера SRFF

S	R	GATE	PREB	CLRB	Q	QB
X	X	X	1	0	0	1
X	X	X	0	1	1	0
X	X	X	0	0	Нестабильное	Нестабильное
X	X	0	1	1	Q'	QB'
0	0	1	1	1	Q'	QB'
0	1	1	1	1	0	1
1	0	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	Нестабильное	Нестабильное

Таблица 13.11. Таблица истинности триггера LATCH

D	GATE	PREB	CLRB	Q	QB
X	X	1	0	0	1
X	X	0	1	1	0
X	X	0	0	Нестабильное	Нестабильное
X	0	1	1	Q'	QB'
0	1	1	1	0	1
1	1	1	1	1	0

Начальная установка триггеров. Триггеры с динамическим синхровходом могут быть установлены в необходимое начальное состояние соответствующей установкой параметра DIGINITSTATE в окне *Global Settings*. Для конкретной схемы это можно сделать с помощью директивы .OPTIONS.

DIGINITSTATE	Flip-flop Q output
0	0
1	1
Любое другое число	X

Неопределенные X уровни на входах предустановки. Неопределенные состояния X не распространяются на выход, если любое состояние этого входа не может повлиять на состояние триггера. Например, если clearbar=X и Q=0, то выход Q останется в низком состоянии, поскольку любые возможные уровни на входе сброса (clearbar=0 и clearbar=1) не изменят низкий уровень выхода Q=0.

Если неопределенный уровень X поступает на вход, который способен повлиять на состояние триггера, то на выходе триггера появляется неопре-

деленное состояние. Например, если clearbar=X и Q=1, то Q изменит свое состояние на неопределенное X, поскольку два возможных уровня на входе сброса (clearbar=0 и clearbar=1) вызывают разные выходные состояния Q (Q=0 и Q=1).

Нарушение временных ограничений. Временные ограничения, приведенные в таблицах 13.12–13.13 проверяются лишь в том случае, если их величины отличны от нуля. Если временные ограничения нарушаются, Micro-Cap создает предупреждающее сообщение в окне численного вывода *Numeric Output* и в текстовом файле <Имя_схемы>.TNO.

Массивы триггеров. Массивы триггеров доступны только через SPICE-текст, или библиотеку SPICE-подсхем. Для массивов триггеров Flip-Flops тактовый вход (CLOCK) и входы предустановки-сброса (PRESETBAR, CLEARBAR) являются *общими* для всех элементов массива. Для массивов триггеров-защелок (Latches) вход разрешения (GATE) и входы предустановки-сброса (PRESETBAR, CLEARBAR) являются *общими* для всех элементов массива.

Таблица 13.12. Параметры модели триггеров, переключаемых фронтом синхросигнала (JKFF, DFF), с

Параметр	Описание
Триггер JKFF	
TPPCQLHMN	Минимальная задержка переключения из 0 в 1 по входам PREB/CLRB
TPPCQLHTY	Типовая задержка переключения из 0 в 1 по входам PREB/CLRB
TPPCQLHMX	Максимальная задержка переключения из 0 в 1 по входам PREB/CLRB
TPPCQHLMN	Минимальная задержка переключения из 1 в 0 по входам PREB/CLRB
TPPCQHLY	Типовая задержка переключения из 1 в 0 по входам PREB/CLRB
TPPCQHLMX	Максимальная задержка переключения из 1 в 0 по входам PREB/CLRB
TWPCLMN	Минимальная длительность низкого уровня на входах PREB/CLRB
TWPCLTY	Типовая длительность низкого уровня на входах PREB/CLRB
TWPCLMX	Максимальная длительность низкого уровня на входах PREB/CLRB
TPCLKQLHMN	Минимальная задержка переключения из 0 в 1 по синхровходу CLK/CLKB
TPCLKQLHTY	Типовая задержка переключения из 0 в 1 по синхровходу CLK/CLKB
TPCLKQLHMX	Максимальная задержка переключения из 0 в 1 по синхровходу CLK/CLKB
TPCLKQHLMN	Минимальная задержка переключения из 1 в 0 по синхровходу CLK/CLKB
TPCLKQHLY	Типовая задержка переключения из 1 в 0 по синхровходу CLK/CLKB
TPCLKQHLMX	Максимальная задержка переключения из 1 в 0 по синхровходу CLK/CLKB
Триггер DFF	
TWCLKLMN	Минимальная длительность импульса низкого уровня на входе CLK/CLKB
TWCLKLY	Типовая длительность импульса низкого уровня на входе CLK/CLKB
TWCLKLMX	Максимальная длительность импульса низкого уровня на входе CLK/CLKB

Окончание табл. 13.12

Параметр	Описание
Триггер DFF	
TWCLKHMN	Минимальная длительность импульса высокого уровня на входе CLK/CLKB
TWCLKHTY	Типовая длительность импульса высокого уровня на входе CLK/CLKB
TWCLKHMX	Максимальная длительность импульса высокого уровня на входе CLK/CLKB
TSUDCLKMN	Минимальная задержка установки сигналов J/K/D относительно фронта CLK/CLKB
TSUDCLKTY	Типовая задержка установки сигналов J/K/D относительно фронта CLK/CLKB
TSUDCLKMX	Максимальная задержка сигналов J/K/D относительно фронта CLK/CLKB
TSUPCCLKHMN	Минимальная задержка установки 1 на входах PREB/CLRB относительно фронта CLK/CLKB
TSUPCCLKHTY	Типовая задержка установки 1 на входах PREB/CLRB относительно фронта CLK/CLKB
TSUPCCLKHMX	Максимальная задержка установки 1 на входах PREB/CLRB относительно фронта CLK/CLKB
THDCLKMN	Минимальная длительность удержания сигнала на входах J/K/D после фронта CLK/CLKB
THDCLKTY	Типовая длительность удержания сигнала на входах J/K/D после фронта CLK/CLKB
THDCLKMX	Максимальная длительность удержания сигнала на входах J/K/D после фронта CLK/CLKB

Таблица 13.13. Параметры модели триггеров, переключаемых уровнем синхросигнала (SRFF, DLTCH), с

Параметр	Описание
Триггер SRFF	
TPPCQLHMN	Минимальная задержка переключения из 0 в 1 по входам PREB/CLRB
TPPCQLHTY	Типовая задержка переключения из 0 в 1 по входам PREB/CLRB
TPPCQLHMX	Максимальная задержка переключения из 0 в 1 по входам PREB/CLRB
TPPCQHLMN	Минимальная задержка переключения из 1 в 0 по входам PREB/CLRB
TPPCQHLY	Типовая задержка переключения из 1 в 0 по входам PREB/CLRB
TPPCQHLMX	Максимальная задержка переключения из 1 в 0 по входам PREB/CLRB
TWPCLMN	Минимальная длительность низкого уровня на входах PREB/CLRB
TWPCLTY	Типовая длительность низкого уровня на входах PREB/CLRB
TWPCLMX	Максимальная длительность низкого уровня на входах PREB/CLRB
TPGQLHMN	Минимальная задержка переключения из 0 в 1 по синхровходу GATE
TPGQLHTY	Типовая задержка переключения из 0 в 1 по синхровходу GATE
TPGQLHMX	Максимальная задержка переключения из 0 в 1 по синхровходу GATE
TPGQHLMN	Минимальная задержка переключения из 1 в 0 по синхровходу GATE
TPGQHLY	Типовая задержка переключения из 1 в 0 по синхровходу GATE
TPGQHLMX	Максимальная задержка переключения из 1 в 0 по синхровходу GATE

Параметр	Описание
Триггер DLTCH	
TPDQLHMN	Минимальная задержка переключения из 0 в 1 по входам S/R/D
TPDQLHTY	Типовая задержка переключения из 0 в 1 по входам S/R/D
TPDQLHMX	Максимальная задержка переключения из 0 в 1 по входам S/R/D
TPDQHLMN	Минимальная задержка переключения из 1 в 0 по входам S/R/D
TPDQHLY	Типовая задержка переключения из 1 в 0 по входам S/R/D
TPDQHLMX	Максимальная задержка переключения из 1 в 0 по входам S/R/D
TWGHMN	Минимальная длительность высокого уровня на входе GATE
TWGHLY	Типовая длительность высокого уровня на входе GATE
TWGHMX	Максимальная длительность высокого уровня на входе GATE
TSUDGMN	Минимальная задержка установки сигнала S/R/D относительно фронта GATE
TSUDGTY	Типовая задержка установки сигнала S/R/D относительно фронта GATE
TSUDGMX	Максимальная задержка установки сигнала S/R/D относительно фронта GATE
TSUPCGHMN	Минимальная задержка установки 1 на PREB/CLRB относительно фронта GATE
TSUPCGHTY	Типовая задержка установки 1 на PREB/CLRB относительно фронта GATE
TSUPCGHMX	Максимальная задержка установки 1 на PREB/CLRB относительно фронта GATE
THDGMN	Минимальное время удержания сигнала на S/R/D после фронта GATE
THDGTY	Типовое время удержания сигнала на S/R/D после фронта GATE
THDGMX	Максимальное время удержания сигнала на S/R/D после фронта GATE

Формат SPICE

U<имя> JKFF(<количество триггеров flip-flops >
 +<цифровой узел питания> <цифровой узел земли>
 +<вход presetbar> <вход clearbar> <вход clockbar>
 +<первый вход J>...<последний вход J>
 +<первый вход K>...<последний вход K>
 +<первый выход Q>...<последний выход Q>
 +<первый выход Qbar>...<последний выход Qbar>
 +<имя временной модели> <имя интерфейсной модели>
 +[MNTYMXDLY=<селектор задержки>]
 +[IO_LEVEL=<селектор подсистемы интерфейса>]

U<имя> DFF(<количество триггеров flip-flops>
 +<цифровой узел питания> <цифровой узел земли>
 +<вход presetbar> <вход clearbar> <вход clock>
 +<первый вход D>...<последний вход D>
 +<первый выход Q>...<последний выход Q>
 +<первый выход Qbar>...<последний выход Qbar>
 +<имя временной модели> <имя интерфейсной модели>
 +[MNTYMXDLY=<селектор задержки>]
 +[IO_LEVEL=<селектор подсистемы интерфейса>]

U<имя> SRFF(<количество триггеров latches>
 +<цифровой узел питания> <цифровой узел земли>
 +<вход presetbar> <вход clearbar> <вход gate>
 +<первый вход S>...<последний вход S>
 +<первый вход R>...<последний вход R>
 +<первый выход Q>...<последний выход Q>
 +<первый выход Qbar>...<последний выход Qbar>
 +<имя временной модели> <имя интерфейсной модели>
 +[MNTYMXDLY=<селектор задержки>]
 +[IO_LEVEL=<селектор подсхемы интерфейса>]
U<имя> DLTCH(<количество триггеров latches>
 +<цифровой узел питания> <цифровой узел земли>
 +<вход presetbar> <вход clearbar> <вход gate>
 +<первый вход D>...<последний вход D>
 +<первый выход Q>...<последний выход Q>
 +<первый выход Qbar>...<последний выход Qbar>
 +<имя временной модели> <имя интерфейсной модели>
 +[MNTYMXDLY=<селектор задержки>]
 +[IO_LEVEL=<селектор подсхемы интерфейса>]

Примеры:

```

U1 JKFF(2) $G_DPWR $G_DGND
+ PREBAR CLRBAR CLKBAR J1 J2 K1 K2 Q1 Q2 Q1BAR Q2BAR
+D0_EFF IO_STD IO_LEVEL=1

U4 DFF(1) $G_DPWR $G_DGND
+PREB CLR B CLK DIN Q QBAR DLY_DFF IO_ACT

U1 SRFF(2) $G_DPWR $G_DGND
+ PREBAR CLRBAR CLK S1 S2 R1 R2 Q1 Q2 Q1BAR Q2BAR
+D0_SRFF IO_STD IO_LEVEL=1

U4 DLTCH(1) $G_DPWR $G_DGND
+PREB CLR B GATE D1 Q QBAR D_DLTCH IO_ALS'
  
```

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример: U10
- Атрибут **TIMING MODEL**: <имя временной модели>
Пример: 74XX
- Атрибут **I/O MODEL**: <имя интерфейсной модели>
Пример: IO_STD
- Атрибут **MNTYMXDLY**: <селектор задержки>
Пример: 1
- Атрибут **IO_LEVEL**: <селектор подсхемы интерфейса>
Пример: 0
- Атрибут **POWER NODE**: <цифровой узел питания>
Пример: \$G_DPWR
- Атрибут **GROUND NODE**: <цифровой узел земли>

Пример: \$G_DGND

Формат директивы временной модели (Timing Model)

Для триггеров, переключаемых фронтом (JKFF, DFF):

.MODEL <имя временной модели> **UEFF** ([параметры временной модели])

Для триггеров, переключаемых уровнем (SRFF, DLTCH):

.MODEL <имя временной модели> **UGFF** ([параметры временной модели])

Примеры:

.MODEL JKDLY UEFF (tpqcqlhty=10ns tpqcqlhmx=25ns tpclkqlhty=12ns
+twpcclty=15ns tsudclky=4ns)

.MODEL SR1 UGFF (tpqcqlhty=10ns tpqcqlhmx=25ns tpgqlhty=12ns
+twpcclty=15ns tsudgty=4ns)

13.2.6. Подтягивающие резисторы Pullup и Pulldown

Эти компоненты используются для задания логических уровней с определенной нагрузочной способностью. Выходы данных компонентов обеспечивают следующие цифровые уровни:

Компонент	Уровень	Нагрузочная способность
Pullup	1	DRVH (из интерфейсной модели)
Pulldn	0	DRVL (из интерфейсной модели)

Следует отметить, что эти компоненты – чисто цифровые устройства (а не аналоговые). Основная цель их использования – обеспечение логической единицы для выходов с открытым коллектором и объединения этих выходов по схеме «монтажное И».

Компоненты PULLUP и PULLDN не используют временную модель, поскольку не вносят задержку в распространение сигнала. Однако они нуждаются в определении интерфейсной модели, поскольку по сути остаются цифровыми приборами.

Формат SPICE

U<имя> <тип резистора>(<количество резисторов>)

+<цифровой узел питания> <цифровой узел земли>

+<выход>*

+<имя интерфейсной модели>

+<IO_LEVEL=<селектор подсхемы интерфейса>]

<тип резистора> может быть двух видов:

PULLUP — массив цифровых резисторов, подтягивающих к высокому уровню.

PULLDN — массив цифровых резисторов, подтягивающих к низкому уровню.

<количество резисторов> — количество резисторов в матрице.

Пример:

U1 PULLUP(8) \$G_DPWR \$G_DGND A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 IO_STD

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **I/O MODEL**: <имя интерфейсной модели>
- Атрибут **IO_LEVEL**: <селектор подсхемы интерфейса>
- Атрибут **POWER NODE**: <цифровой узел питания>
- Атрибут **GROUND NODE**: <цифровой узел земли>

13.2.7. Цифровая безынерционная линия задержки Dlyline

Этот компонент задерживает цифровой сигнал на постоянную величину в соответствии с параметрами временной модели (табл. 13.14). В отличие от других цифровых компонентов он не обладает инерционным аннулированием сигнала (Inertial Cancellation). Через него с заданной задержкой проходят сколь угодно короткие импульсы.

Формат SPICE

U<имя> **DLYLINE**

+<цифровой узел питания> <цифровой узел земли>

+<вход> <выход>

+<имя временной модели> <имя интерфейсной модели>

+**[MNTYMXDLY=<селектор задержки>]**

+**[IO_LEVEL=<селектор подсхемы интерфейса>]**

Пример:

U1 DLYLINE \$G_DPWR \$G_DGND IN OUT DMOD IO1

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **TIMING MODEL**: <имя временной модели>
- Атрибут **I/O MODEL**: <имя интерфейсной модели>
- Атрибут **MNTYMXDLY**: <селектор задержки>
- Атрибут **IO_LEVEL**: <селектор подсхемы интерфейса>
- Атрибут **POWER NODE**: <цифровой узел питания>
- Атрибут **GROUND NODE**: <цифровой узел земли>

Таблица 13.14. Параметры модели цифровой линии задержки, с

Параметр	Описание
DLYMN	Задержка минимальная
DLYTY	Задержка типовая
DLYMX	Задержка максимальная

13.2.8. Программируемые логические матрицы

Программируемые логические матрицы введены в программу для моделирования широкого класса устройств с программируемой логикой. Модель выполнена с возможностью определения пользователем количества входов, визуализации запрограммированных столбцов, определения количества вы-

ходов, которые формируют ряды. Каждый выход (ряд) — это вентиль, входы которого выбираются входными сигналами (столбцами), как показано на рис. 13.13. Устройство программируется выбором входов, которые будут являться частью выходного вентиля. Тип выходного вентиля определяется типом программируемой матрицы. Матрица PLNAND имеет выходные вентиля И-НЕ (NAND), PLOR — ИЛИ (OR). Компонент PLA обеспечивает программируемую сердцевину для моделирования реальных выпускаемых промышленностью приборов с программируемой логикой.

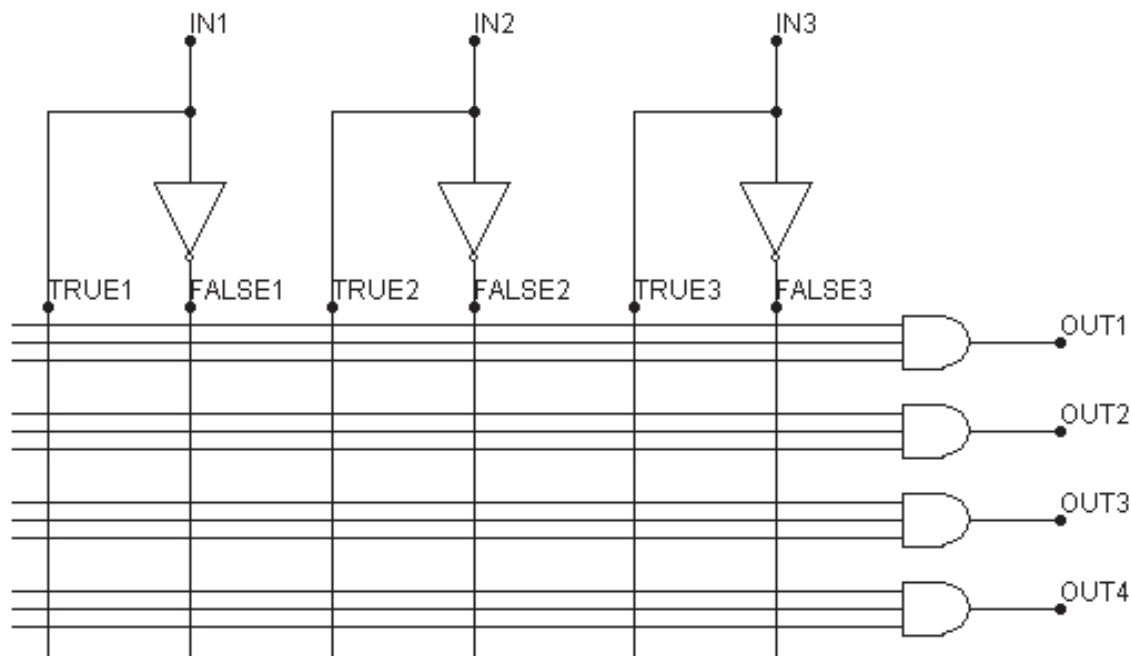


Рис. 13.13. Программируемая логическая матрица PLANDC 3X4

Существуют 2 способа программирования матриц. Первый — это запись данных в файл формата JEDEC. Такие файлы обычно являются первичным продуктом системы проектирования устройств на основе программируемых логических матриц. Второй способ состоит в непосредственной записи данных в командную строку SPICE-текста для схемы.

Формат SPICE

```
U<имя> <тип PLD>(<кол. входов>,<кол. выходов>)
+<цифровой узел питания> <цифровой узел земли>
+<входной узел>* <выходной узел>*
+<имя временной модели> <имя интерфейсной модели>
+[FILE=<"константа имени файла" | |выражение имени файла|>]
+[DATA=<константа данных>|<признак системы счисления>$<таблица
данных>$]
+[MNTYMXDLY=<селектор задержки>]
+[IO_LEVEL=<селектор подсхемы интерфейса>]
```

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **TIMING MODEL**: <имя временной модели>
- Атрибут **I/O MODEL**: <имя интерфейсной модели>
- Атрибут **FILE**: <"константа имени файла" | |выражение имени файла|>

Примеры:

"JED_FILE" ; константа имени заключается в кавычки "".

|FILEVAR| ; выражение имени заключается в ||.

- Атрибут **DATA**: <константа данных> | <признак системы счисления>\$
<таблица данных>\$

Примеры:

data_table ; таблица данных определена где-то еще с помощью директивы .define

b\$010101 ; многострочные данные программирования матрицы в двоичном (B) коде

+101011

+011001\$

- Атрибут **MNTYMXDLY**: <селектор задержки>
- Атрибут **IO_LEVEL**: <селектор подсхемы интерфейса>
- Атрибут **POWER NODE**: <цифровой узел питания>
- Атрибут **GROUND NODE**: <цифровой узел земли>

Специальные поля редактора компонентов

- **Inputs** <количество входов>
- **Outputs** <количество выходов>

Редактор компонентов имеет специальные поля для программируемых логических матриц: 'Inputs' и 'Outputs'. Когда вы вводите эти величины, Micro-Cap помещает специфицированные входные и выходные выводы на экран, которые можно перетаскивать мышью на изображение матрицы.

Определения

<mul PLD> — выбирает тип вентиля матрицы из списка, приведенного в табл. 13.15.

Таблица 13.15. Тип вентиля программируемой логической матрицы

Тип	Описание
PLAND	Массив элементов И
PLOR	Массив элементов ИЛИ
PLNAND	Массив элементов И-НЕ
PLNOR	Массив элементов ИЛИ-НЕ
PLXOR	Массив элементов исключающее-ИЛИ
PLNXOR	Массив элементов исключающее-ИЛИ-НЕ
PLANDC	Массив элементов И с прямыми и инверсными входами
PLORC	Массив элементов ИЛИ с прямыми и инверсными входами
PLNANDC	Массив элементов И-НЕ с прямыми и инверсными входами
PLNORC	Массив элементов ИЛИ-НЕ с прямыми и инверсными входами
PLXORC	Массив элементов исключающее-ИЛИ с прямыми и инверсными входами
PLNXORC	Массив элементов исключающее-ИЛИ-НЕ с прямыми и инверсными входами

FILE=<"константа имени файла" | |выражение имени файла|>] — обозначает имя файла формата JEDEC одним из следующих 2-х способов:

- Константа имени файла заключается в кавычки (" ");
- Выражение имени файла заключается в разделители (|||).

Текстовые SPICE-файлы и библиотеки могут использовать как *[выражение имени файла]*, так и *"константу имени файла"*. *[Выражение имени файла]* может быть только простым именем текста из директивы определения подсхемы вида *TEXT: оператор*. Таков способ представления коммерческих устройств с программируемой логикой, моделируемых подсхемой программируемой логической матрицы, содержащей имя JEDEC-файла. Например:

```
.SUBCKT PLD24 I1 I2 O1 O2 O3 O4
+ TEXT: JFILE="JD.STM"
```

```
...
U1 PLOR(2,4)
+ $G_DPWR $G_DGND
+ I1 I2 O1 O2 O3 O4
+ PLAMODEL
+ IO_STD_PLD
+ FILE=|JFILE|
```

Здесь, подсхема матрицы использует имя присвоенное JEDEC-файлу (JFILE).

JEDEC-файлу может быть присвоено имя при использовании подсхемы в схемном файле или SPICE-файле путем использования атрибута FILE. Имя может и не присваиваться, в этом случае JFILE будет использовать умолчательное имя "JD.STM". Матрицы в схемных файлах, у которых заполняется атрибут FILE, должны использовать *"константу имени файла"*, поскольку в этом случае нет способа определения *[выражения имени файла]*. Если используется атрибут FILE, игнорируется атрибут DATA. При этом распределение данных в JEDEC-файле связывается с параметрами временной модели.

<Константа данных> позволяют создавать таблицу данных в текстовой области или непосредственно на поле схемы. Они создаются посредством директивы .DEFINE. Значение символьной переменной из этой директивы подставляется в качестве таблицы данных при запуске анализа. Например:

```
.DEFINE TAB1 B$01 01 10 11 01 11 01 10 01$
```

Если программируемая матрица использует константу данных TAB1, текст "B\$01 01 10 11 01 11 01 10 01\$" будет подставлен на место TAB1 при запуске анализа. Директивы .DEFINE могут быть использованы для перемещения длинных определений в атрибуте DATA в текстовую область, или просто для создания компактных табличных констант.

<признак системы счисления>\$ — признак системы счисления, в которой записана таблица данных:

B	двоичная
O	восьмеричная
X	шестнадцатеричная

<таблица данных>\$ — текстовая строка, содержащая данные программирования ПЛМ. Если значение данных для соответствующего входного столбца равно 0, данный столбец не включается в заключительную операцию

(столбец не подсоединяется к выходному вентилю). Если данные равны 1, соответствующий входной столбец подключается к вентилю. Данные начинают записываться с нулевого адреса. Например:

U1 PLOR(3,4)	;Матрица ИЛИ с 3-мя входами, 4-мя выходами
+ \$G_DPWR \$G_DGND	;Выводы питания
+ I1 I2 I3	;Имена 3-х входных узлов
+ O1 O2 O3 O4	;Имена 4-х выходных узлов
+ PLAMODEL	;Имя временной модели матрицы
+ IO_STD_PLD	;Имя интерфейсной модели матрицы
+ DATA=B\$	;Данные программирования в двоичном коде
+ 1 1 1	;O1 = I1 I2 I3
+ 0 1 0	;O2 = I2
+ 1 0 1	;O3 = I1 I3
+ 0 0 1\$	;O4 = I3
...	

Матрицы с прямыми входами TRUE ONLY (PLAND, PLOR, PLNAND, PLNOR, PLXOR, PLNXOR). Нулевой адрес обозначает первый вход, подключенный (или нет) к первому выходному вентилю. Следующий адрес в таблице обозначает 2-ой вход ПЛМ подключенный (или нет) к первому выходному вентилю и т.д. до тех пор, пока не будут указаны все входы для первого выходного вентиля. Далее перечисление повторяется для всех входов, подключенных во 2-му выходному вентилю и так до тех пор, пока не будет запрограммирован последний выходной вентиль.

Матрицы с прямыми и инверсными входами TRUE&COMPLEMENT (PLANDC, PLORC, PLNANDC, PLNORC, PLXORC, PLNXORC). Программируются подобным же образом, только с чередованием прямого и инверсного входов (см. рис. 13.13), причем бит для инверсного входа помещается после бита для прямого входа. По нулевому адресу таблицы помещается первый прямой вход подсоединенный «1» (или нет «0») к первому выходному вентилю. По следующему адресу помещается первый инверсный вход подсоединенный «1» (или нет «0») ко входу первого выходного вентиля. Затем второй прямой вход подключенный (или нет) к первому выходному вентилю и так далее до тех пор, пока все входы (прямые и инверсные) для первого выходного вентиля не будут описаны. Затем процесс описания повторяется для второго выходного вентиля и так до тех пор, пока последний выходной вентиль не будет запрограммирован.

Таблица данных должна быть ограничена с двух сторон знаками (\$). Они должны быть отделены от данных пробелом.

Примеры моделирования программируемых логических матриц см. в схемном файле *PLA3.CIR* каталога *Components\Digital*.

Формат директивы временной модели (Timing Model) для ПЛМ:

.MODEL <имя временной модели> UPLD ([параметры временной модели])

Пример:

.MODEL PLD1 UPLD (TPLHMN=10ns TPLHTY=25ns TPLHMX=35ns)

Таблица 13.16. Параметры временной модели ПЛМ

Параметр	Описание	Значение по умолчанию
TPLHMN	Минимальная задержка при переходе из низкого в высокое состояние	0
TPLHTY	Типовая задержка при переходе из низкого в высокое состояние	0
TPLHMX	Максимальная задержка при переходе из низкого в высокое состояние	0
TRHLMN	Минимальная задержка при переходе из высокого в низкое состояние	0
TRHLY	Типовая задержка при переходе из высокого в низкое состояние	0
TRHLMX	Максимальная задержка при переходе из высокого в низкое состояние	0
OFFSET	Адрес данных, управляющих подключением первого входа к первому выходному вентилю в файле JEDEC	0
COMPOFFSET	Адрес данных, управляющих подключением первого инверсного входа к первому выходному вентилю в файле JEDEC	1
INSCALE	Количество адресов (в файле JEDEC) для программирования состояния каждого входа	true only (только прямые): 1 ; true & comp (прямые и инверсные): 2
OUTSCALE	Количество адресов (в файле JEDEC) для программирования состояния каждого выхода (вентиля)	true only (только прямые): <кол. входов>; true & comp (прямые и инверсные): 2*<кол. входов>

13.2.9. Многоразрядные аналого-цифровые преобразователи

Формат SPICE

U<имя> ADC(<количество выходных двоичных разрядов>)
 +<цифровой узел питания> <цифровой узел земли>
 +<аналоговый вход> <опорное напряжение> <общий> <запуск>
 +<конец преобразования> <переполнение>
 +<выход старшего бита>...<выход младшего бита>
 +<имя временной модели> <имя интерфейсной модели>
 +[MNTYMXDLY=<селектор задержки>]
 +[IO_LEVEL=<селектор подсхемы интерфейса>]

Примеры:

```

U10 ADC(8) $G_DPWR $G_DGND
+analog_in reference 0 convert status over B7 B6 B5 B4 B3 B2 B1 B0
+IO_STD_OC_ST
  
```

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **TIMING MODEL**: <имя временной модели>
- Атрибут **I/O MODEL**: <имя интерфейсной модели>
- Атрибут **MNTYMXDLY**: <селектор задержки>
- Атрибут **IO_LEVEL**: <селектор подсхемы интерфейса>
- Атрибут **POWER NODE**: <цифровой узел питания>
- Атрибут **GROUND NODE**: <цифровой узел земли>

Содержит стандартные атрибуты, которые заполняются в окне задания параметров по общим правилам.

Специальные поля редактора компонентов:

Address <количество выходных двоичных разрядов>

В редакторе компонентов имеется специальное поле *Address* для аналого-цифровых преобразователей. В нем указывается количество выходных двоичных разрядов АЦП. При вводе в поле соответствующего значения, программа помещает дополнительные выводы в окно прорисовки компонента, которые можно перетаскивать мышью на нужную позицию.

Названия выводов АЦП, присваиваемые редактором компонентов:

In	Аналоговый вход
Convert	Запуск преобразования
Ref	Опорное напряжения
Gnd	Общий
Status	Конец преобразования
Over-range	Переполнение
Out0	Выходной бит 0 (самый младший)
Out1	Выходной бит 1
...	
OutN-1	Выходной бит (N-1) (самый старший)

Если задан N-битовый АЦП, то выходных выводов будет N: Out0...OutN-1. АЦП преобразует аналоговое напряжение между узлами <аналоговый вход> и <общий> в цифровой эквивалент. Цифровой выходной код представляет следующую округленную до ближайшего целого величину:

$$\frac{V(in, gnd)}{V(ref, gnd)} \cdot 2^N.$$

Если аналоговое напряжение на входе $V(in, gnd)$ отрицательно, тогда все выходные биты данных установятся в 0, а на выходе переполнения *over-range* установится 1. Если аналоговая величина на входе превышает опорное напряжение $V(ref, gnd)$, тогда все биты данных установятся в 1, и выход переполнения также установится в 1.

Преобразование входного аналогового напряжения начинается по переднему фронту сигнала *CONVERT*. После каждого переднего фронта сигнала *CONVERT* совершается только одно аналого-цифровое преобразование аналогового входного напряжения. Спустя TPCS секунд после начала действия

фронта *CONVERT*, цифровые выходы переходят в неопределенные состояния и одновременно возникает единичное состояние на выходе *STATUS*. Спустя *TPSD* секунд после начала переднего фронта сигнала *STATUS* выходы данных начинают устанавливаться в соответствии с преобразуемым напряжением, а еще через интервал *TPDS* выход *STATUS* перейдет в состояние «0», сигнализируя о готовности новых данных на цифровых выходах. Описанную последовательность сигналов иллюстрирует рис. 13.14.



Рис. 13.14. Временные диаграммы работы АЦП

Формат директивы модели АЦП

.MODEL <имя временной модели> **UADC** ([параметры модели])

Пример:

.MODEL A1 UADC (TPCSMN=5ns TPCSTY=15ns TPCSMX=25ns)

Параметры временной модели АЦП приведены в табл. 13.17.

Таблица 13.17. Параметры моделей АЦП и ЦАП, с

Параметр	Описание
Параметры АЦП	
TPCSMN	Минимальная задержка сигнала STATUS относительно переднего фронта сигнала CONVERT
TPCSTY	Типовая задержка сигнала STATUS относительно переднего фронта сигнала CONVERT
TPCSMX	Максимальная задержка сигнала STATUS относительно переднего фронта сигнала CONVERT
TPSDMN	Минимальная задержка достоверных сигналов на выходах относительно переднего фронта сигнала STATUS
TPSDTY	Типовая задержка достоверных сигналов на выходах относительно переднего фронта сигнала STATUS
TPSDMX	Максимальная задержка достоверных сигналов на выходах относительно переднего фронта сигнала STATUS
TPDSMN	Минимальная задержка заднего фронта STATUS относительно момента появления достоверных данных
TPDSTY	Типовая задержка заднего фронта STATUS относительно момента появления достоверных данных
TPDSMX	Максимальная задержка заднего фронта STATUS относительно момента появления достоверных данных
Параметры ЦАП	
TSWMN	Минимальное время установления аналогового напряжения на выходе
TSWTY	Типовое время установления аналогового напряжения на выходе
TSWMX	Максимальное время установления аналогового напряжения на выходе

13.2.10. Многоразрядные цифроаналоговые преобразователи

Формат SPICE

U<имя> **DAC**(<количество входных двоичных разрядов>)
 +<цифровой узел питания> <цифровой узел земли>
 +<аналоговый выход> <опорное напряжение> <общий>
 +<вход старшего бита> <вход младшего бита>
 +<имя временной модели> <имя интерфейсной модели>
 +[MNTYMXDLY=<селектор задержки>]
 +[IO_LEVEL=<селектор подсхемы интерфейса>]
 Пример:
 U10 DAC(8) \$G_DPWR \$G_DGND
 +analog_out reference 0 B7 B6 B5 B4 B3 B2 B1 B0
 + D0_EFF IO_STD_ST

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
- Атрибут **TIMING MODEL**: <имя временной модели>
- Атрибут **I/O MODEL**: <имя интерфейсной модели>
- Атрибут **MNTYMXDLY**: <селектор задержки>
- Атрибут **IO_LEVEL**: <селектор подсхемы интерфейса>
- Атрибут **POWER NODE**: <цифровой узел питания>
- Атрибут **GROUND NODE**: <цифровой узел земли>

Специальные поля редактора компонентов:

Address <количество входных двоичных разрядов>

Редактор компонентов имеет специальное поле *Address* для цифроаналоговых преобразователей. В нем указывается количество входных двоичных разрядов ЦАП. При вводе в поле соответствующего значения, программа помещает дополнительные выводы в окно прорисовки компонента, которые можно перетаскивать мышью на нужную позицию.

Названия выводов ЦАП, присваиваемые редактором компонентов:

Out	аналоговый выход
Ref	опорное напряжение
Gnd	общий
In0	Бит0 входного цифрового кода
In1	Бит1 входного цифрового кода
...	
In<N-1>	Бит (N-1) входного цифрового кода

ЦАП преобразует десятичный эквивалент двоичного входного кода в аналоговое выходное напряжение между узлами <out> и <gnd>. Аналоговое напряжение на выходе для n-битного входного кода $b_{n-1}, \dots, b_2, b_1, b_0$, будет определяться по следующей формуле:

$$V_{out} = \frac{V_{ref} \cdot (b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + b_1 \cdot 2 + b_0)}{2^n}.$$

Неопределенное X состояние входа ЦАП приводит добавлению в выходное напряжение 0.5 веса соответствующего разряда, т.е. если на входе i уровень «X», то вклад этого разряда в выходное аналоговое напряжение будет определяться по следующей формуле:

$$V_{out}(i) = \frac{V_{ref} \cdot 0.5 \cdot 2^i}{2^n}.$$

При изменении цифрового кода на входах ЦАП, напряжение на аналоговом выходе будет изменяться по линейному закону от предыдущего аналогового эквивалента к новому в течение времени TSW (рис. 13.15).

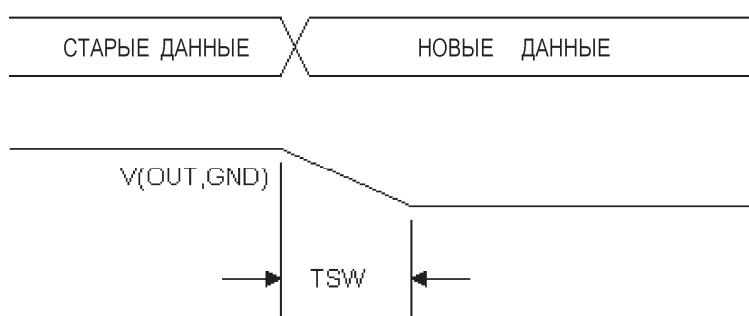


Рис. 13.15. Временные диаграммы работы модели ЦАП

Формат директивы модели ЦАП:

.MODEL <имя временной модели> **UDAC** ([параметры модели]).

Пример:

.MODEL DAC1 UDAC (TSWMN=5ns TSWTY=15ns TSWMX=25ns)

Для иллюстрации работы моделей АЦП и ЦАП см. моделирование схемного файла *AD16.cir* из каталога *Components\Digital*.

13.3. Функциональные цифровые блоки

Функциональные цифровые блоки упрощают моделирование сложных цифровых устройств. Они состоят из трех разновидностей:

Логические выражения (Logic Expressions). Поведение этих блоков описывается с помощью логических выражений.

Задержка распространения сигнала между двумя узлами (Pin-to-pin delays) [3, 6]. Позволяет задавать правила вычисления задержек распространения сигнала между двумя выводами. Указанные правила представляют собой логические выражения, основанные на свойствах входов блока.

Блоки проверки временных соотношений (Constraints) [3, 6]. Позволяют проверить соблюдение временных ограничений и выдать предупреждающие сообщения в случае их нарушения. Временные ограничения включают минимальную длительность импульса (pulse width), максимальную частоту импульсов, время установки триггера, время удержания сигнала и другие ограничения, определяемые пользователем.

Перечисленные блоки широко используются в библиотеке цифровых интегральных схем программы Micro-Cap (Digital Library). Следовательно, нет особой необходимости овладевать правилами их построения, поскольку можно просто использовать модели необходимой серии интегральных схем. Однако, если необходимо построить модель цифрового компонента, которого нет в библиотеке Digital Library, то информация, приведенная ниже, может оказаться востребованной.

13.3.1. Логические выражения (Logic Expressions)

Примитив *logic expression* позволяет описать поведение достаточно сложного цифрового устройства. Позволяет определить выходные сигналы функциями стандартной булевой алгебры, используя в качестве переменных для этих выражений входные состояния, временные состояния и выходные состояния.

Формат SPICE:

```
U<имя> LOGICEXP(<кол. входов>,<кол. выходов>)
+<узел цифрового питания> <узел цифровой земли>
+<первый входной узел>...<последний входной узел>
+<первый выходной узел>...<последний выходной узел>
+<имя временной модели>
+<имя интерфейсной модели>
+[MNTYMXDLY=<селектор временной задержки>]
+[IO_LEVEL=<селектор подсхемы интерфейса>]
+ LOGIC:<логические выражения>*
```

Формат схем Micro-Cap:

- Атрибут **PART:** <имя>
- Атрибут **TIMING MODEL:** <имя временной модели>
- Атрибут **I/O MODEL:** <имя интерфейсной модели>
- Атрибут **LOGIC:** LOGIC:{<логическое выражение>}
- Атрибут **MNTYMXDLY:** <селектор временной задержки>
- Атрибут **IO_LEVEL:** <селектор подсхемы интерфейса>
- Атрибут **POWER NODE:** <цифровой узел питания>
- Атрибут **GROUND NODE:** <цифровой узел земли>

Компоненты типа Logic expressions обычно создаются в виде текстового SPICE-файла. Они не часто используются в виде схемного компонента, однако такие случаи есть (Logic2X1, Logic2X2). Именно эти примитивы с логическими выражениями включены в библиотеку компонентов Micro-Cap.

Как видно, атрибут, специфичный для рассматриваемого компонента — **LOGIC**. Все остальные атрибуты стандартные и повторяют перечисленные ранее при описании логических элементов.

Значение атрибута представляет собой полное логическое выражение или его имя, раскрытое в текстовой области директивой .DEFINE. Следует отметить обязательное присутствие ключевого слова 'LOGIC:' перед {<логическим выражением>}.

Примеры заполнения полей атрибута LOGIC:

LOFEXP1 ;должно быть определено директивой .define в текстовой области

LOGIC: C = {A | B & C } ; обязательно ключевое слово 'LOGIC:'

LOGIC: TEMP11 = {IN1 ^ IN2 & IN3 ^ IN4 }

LOGIC: TEMP12 = {IN1 ^ IN2 | IN3 ^ IN4 }

LOGIC: OUT1 = { TEMP11 & TEMP12 }

Специальные поля для редактора компонентов

Pins <число входов, число выходов>

Редактор компонентов Micro-Cap (Component editor) имеет специальное поле 'Pins' для рассматриваемого класса блоков. Это поле нельзя редактировать непосредственно. Вместо этого необходимо щелкнуть мышью и просто добавить входной или выходной вывод.

Теперь о том, как следует определять имена и расположение выводов данных компонентов. Данные компоненты используются преимущественно для моделирования реальных серий ИС, поэтому хранятся главным образом в виде подсхем в текстовых библиотечных SPICE-файлах. Поскольку все они имеют различное количество входных и выходных выводов, то используется неограниченное количество комбинаций выводов для формирования логических функций. Так как компонент в библиотеке компонентов требует указания имен и расположения выводов, размещение примитива с произвольным логической функцией в библиотеке невозможно. Поэтому в составе библиотеки имеются только 2 подобных компонента (Logic2x1, Logic2x2) и то, главным образом, для иллюстративных целей.

Основное назначение компонентов logic expression — использование в составе текстового файла библиотеки Digital Library. Поскольку компоненты из этой библиотеки могут использоваться в составе моделируемых схем непосредственно, реальная мощь элементов logic expression проявляется при создании моделей коммерческих интегральных схем (дешифраторов, мультиплексоров, АЛУ и т.п.).

Формат логических выражений

LOGIC. Отмечает начало одного (или серии) логических выражений.

<логическое выражение> имеет одну из следующих форм:

<промежуточная переменная> = {<логическое выражение>}

<имя выходного узла> = {<логическое выражение>}

<промежуточная переменная> — переменная, значение которой не используется для функции выходного узла компонента, создается для временного использования в промежуточных <логических выражениях>. Использование промежуточных переменных упрощает и улучшает читабельность и понимание логической функции компонента как единого целого, также позволяет снизить количество возможных ошибок.

<имя выходного узла> — имя одного из выходных узлов. Присвоение данному узлу <логического выражения> приведет к формированию его на данном выходном выводе с временными параметрами, определяемыми временной моделью (timing model).

<логическое выражение> — произвольное логическое выражение, записанное в соответствии с правилами, указанными в табл. 13.18, принимаю-

щее в зависимости от состояния входящих в него переменных одно из следующих пяти цифровых уровней {0, 1, R, F, X}. Выражение должно быть заключено в фигурные скобки. Если выражение слишком длинное, его можно переносить на следующую строку, используя в ее начале символ продолжения предыдущей строки (+).

Операндами логического выражения могут быть:

- <входные узлы>
- Ранее определенные <промежуточные переменные>
- Ранее определенные <выходные узлы>
- Логические константы: '0, '1, 'R, 'F, и 'X. Именам постоянных логических состояний (констант) обязательно предшествует апостроф.

Круглые скобки также могут использоваться при записи логических выражений.

Таблица 13.18. Обозначения логических операций

Операция	Определение	Приоритет
~	Логическое отрицание	1
&	И (AND)	2
^	Исключающее ИЛИ (Exclusive OR)	3
	ИЛИ (OR)	4

Формат временной модели (Timing model)

Временная модель имеет стандартный формат для вентиля UGATE.

.MODEL <имя модели> **UGATE** ([параметры модели])

Поведение компонента при моделировании. Серия операторов, расположенная за ключевым словом LOGIC, выполняется при каждом изменении цифрового состояния любого входного (выходного) вывода компонента.

Каждый оператор логического присваивания вычисляется в порядке расположения его в этом блоке. Выражения в операторах не имеют временных задержек, за исключением операторов присваивания значений выходным узлам. Значение функции в любом выходном узле ассоциируется с временными задержками из временной модели. Следует отметить, что обычно все задержки временной модели устанавливаются в нулевое значение. Вместо них, реальные задержки цифрового компонента из библиотеки моделируются постановкой выходного буфера — компонента pin-to-pin delay. Эти компоненты обеспечивают логическое управление задержками, используя справочные параметры микросхемы. При этом внутренние обратные связи (в серии операторов после ключевого слова LOGIC) запрещаются. Т.е., переменные, используемые в логических выражениях должны быть заранее известны, т.е. рассчитаны предварительно.

В качестве примера см. определение полного сумматора 7483A в библиотеке цифровых SPICE-подсхем DIG000.LIB.

13.4. Генераторы цифровых сигналов (Stimulus generators)

Цифровые схемы обычно требуют наличия источников цифровых сигналов для моделирования работы устройства и его тестирования. Такие источники должны генерировать последовательность цифровых состояний. Генераторы цифровых сигналов являются цифровыми эквивалентами источников аналогового сигнала: SIN, PULSE, USER, Voltage Source, и Current Source. В Micro-Cap существуют 2 типа таких генераторов: самостоятельные генераторы цифровых сигналов (STIM) и файловые генераторы цифровых сигналов (FSTIM). STIM-генератор использует командный язык для создания цифрового сигнала любой формы. FSTIM-генератор для создания цифрового сигнала считывает данные из внешнего файла, где заранее запрограммирована форма этого сигнала. Рассматриваемые компоненты не имеют временной модели, поскольку соответствующая информация является свойством самих генерируемых сигналов.

13.4.1. Генераторы сигналов типа STIM

Генераторы STIM имеют гибкий командный язык для создания предельно сложных цифровых последовательностей.

Формат SPICE

```
U<имя> STIM(<разрядность>,<формат массива>)
+<узел цифрового питания> <узел цифровой земли> <узел>*
+<имя интерфейсной модели>]
+[IO_LEVEL=<селектор подсхемы интерфейса>]
+[TIMESTEP=<временной шаг>] <команда>*
```

Формат схем Micro-Cap

Ниже перечислены атрибуты, специфичные для STIM генератора цифровых сигналов.

- Атрибут **FORMAT**: <формат массива>

Пример:

1111 ; число, состоящее из четырех двоичных цифр

- Атрибут **COMMAND**: <имя команды>

Пример:

BINARY1/6

- Атрибут **TIMESTEP**: [<временной шаг>]

Пример:

10ns

Определения

<разрядность> — в SPICE-файле этот атрибут обозначает число выходных сигналов генератора, по сути это разрядность в битах. Для схем Micro-Cap разрядность генератора устанавливается, когда генератор помещается в библиотеку компонентов, поэтому простой выбор генератора типа STIM из библиотеки сразу заполняет этот атрибут.

<формат массива>. Строка <команда> использует поле <значение> для описания выходных состояний генератора (см. ниже формат <команды>).

<Формат массива> представляет собой цепочку символов, которые определяют используемый формат данных в поле **<значение>** строки **<команды>**. Это последовательность цифр, сумма которых равна количеству выходных сигналов генератора. Каждая цифра обозначает количество выходов генератора, значение которых равно символу в соответствующей системе счисления в поле **<значение>**.

Предполагается, что каждый символ в поле **<значение>** — это число в системе счисления с основанием 2^m , где m — соответствующий символ в строке **<формат массива>**. Каждое **<значение>** имеет число символов, соответствующее **<формату массива>**.

То есть, если формат массива '1111', каждое **<значение>**, используемое в строке **<команда>** также должно быть длиной в 4 символа, каждый из которых в этом случае либо 0, либо 1. Общее количество символов в строке **<формат массива>** должно соответствовать **<разрядности>**, и каждый символ в ней отражает тип используемых данных (1 — двоичные, 3 — восьмеричные, 4 — шестнадцатеричные).

<узел>* — для компонента SPICE определяет имена всех выходов генератора. Для схемного компонента узлы именуются автоматически при постановке компонента в схему и не нуждаются в обозначении.

<временной шаг> — определяет длительность одного такта в секундах. Время одного состояния сигнала может быть указано в тактах с использованием символа «с» (clock). В этом случае действительное время состояния выхода равно числу тактов, умноженному на **<временной шаг>**.

<имя команды> — это имя для последовательности цифровых сигналов генератора. Для схем команда обычно определяется в текстовой области в виде следующей директивы:

.DEFINE <имя команды> <команда>*, где **<команда>*** — это серия строк на специальном языке, которые определяется следующим образом:

```
<команда>*
<<время> <значение>>
<LABEL=<имя метки>>
REPEAT FOREVER
REPEAT <n> TIMES
<<время> GOTO <имя метки> <n> TIMES>
<< время> GOTO <имя метки> UNTIL GT <значение>>
<< время> GOTO <имя метки> UNTIL GE <значение>>
<< время> GOTO <имя метки> UNTIL LT <значение>>
<< время> GOTO <имя метки> UNTIL LE <значение>>
<< время> INCR BY <значение>>
<< время> DECR BY <значение>>
ENDREPEAT
```

<Время> — время возникновения нового события, или выполнения команды INCR, DECR или GOTO. **<Время>** может быть указано в двух единицах (тактах и секундах) и в двух формах (абсолютной и относительной). Чтобы выразить **<время>** в тактах надо добавить суффикс «С» к числу, как, например '5С'. Для использования секунд используйте суффикс 'S' или ничего не добавляйте. Относительное время отсчитывается от момента последнего

события. Абсолютное время исчисляется от момента начала моделирования. Для использования относительного времени используется префикс '+' перед значением <времени>, как, например '+10ns, или '+23C'. Обратите внимание, что при переносе на следующую строку SPICE-текста также ставится символ '+', поэтому в этом случае можно увидеть два символа '++' в начале строки описания события с относительным временем. Это относится к определению цифровых сигналов в текстовой области схемного файла, т.е. в окне *Text* (см. пример *Stim_Demo.CIR* из каталога *Components\Digital*). Второй знак «+» при обозначении относительного времени не ставится в начале строки, если определение командной последовательности дается на поле схемы, в этом случае весь текст блока воспринимается как одна строка (см. пример *Stim_Examples.CIR*, приведенный на рис. 13.16).

<Значение> — определяет новое цифровое состояние для каждого выходного узла, интерпретированное в соответствии с <форматом массива>. <Значение> выбирается из возможных двоичных значений {0, 1, R, F, X, Z, ?}, восьмеричных значений {0-7}, и шестнадцатеричных значений {0-F}. Символ '?' указывает случайным образом взятый бит (0 или 1). Слово RND обозначает массив произвольных двоичных состояний, по одному на каждый выходной узел.

<имя метки> — обозначает место перехода по оператору GOTO. GOTO <имя метки> вызывает переход к оператору, помеченному этой меткой.

<n> — это число повторов цикла, замыкаемого оператором GOTO. Значение -1 соответствует бесконечному числу повторений.

Примечания:

1. Абсолютное время внутри циклов преобразуется в относительное, отсчитываемое от последнего используемого момента времени и последнего сделанного инкремента.
2. Метки для оператора цикла GOTO должны быть определены до этого оператора. Ссылка на вперед идущую метку не допускается.
3. Абсолютные моменты времени должны следовать в возрастающем порядке, кроме момента времени, следующего за оператором GOTO, который может быть таким же, как и время GOTO.
4. Когда по команде GOTO начинается выполнение первой командной строки, следующей за указанной в операторе меткой, программа игнорирует время этой первой команды.
5. UNTIL GT <значение> означает, что цикл выполняется до тех пор пока состояние узла больше чем <значение>. Аналогично GE — до тех пор, пока больше или равно, LT — до тех пор пока меньше чем, и LE — до тех пор пока меньше или равно <значению>.

Примеры задания генераторов типа STIM

Примеры, приведенные ниже демонстрируют, как программировать генераторы цифровых сигналов. Примеры 1, 2, и 3 используют STIM1 (генератор с одним выходом). Пример 4 использует STIM2 (два выхода). Пример 5 использует генератор STIM8 (8 выходов).

Для примера, приведенного ниже (*STIM_examples.CIR* из каталога *Components\Digital*, рис. 3.16) в полях атрибутов FORMAT и COMMAND генераторов содержатся следующие строки:

Позиционное обозн.	FORMAT	COMMAND
U1	1	IN1
U2	1	IN2
U3	1	IN3
U4	11	IN4
U5	44	IN5

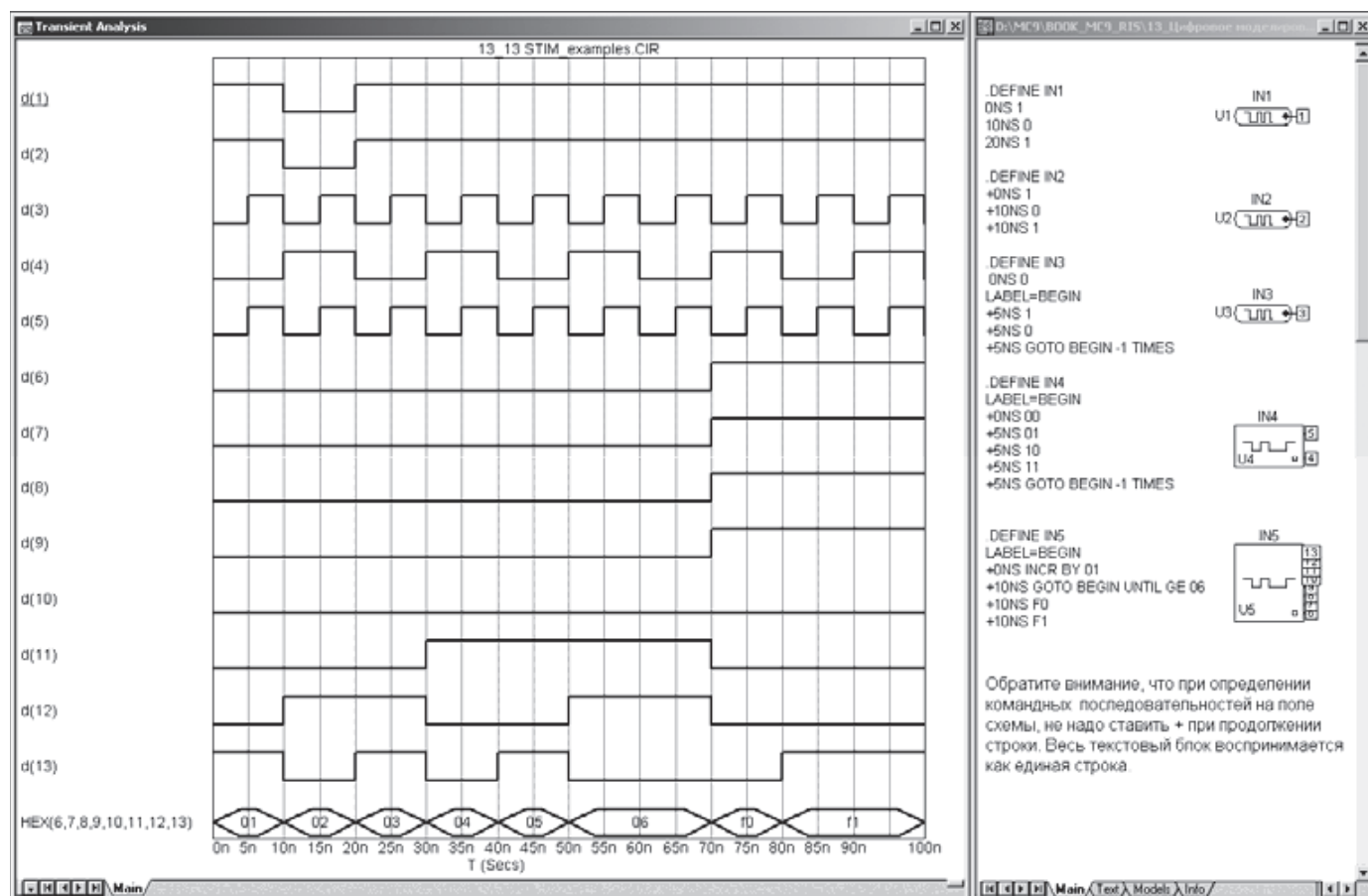


Рис. 13.16. Примеры генераторов типа STIM

Командные последовательности определяются директивами .DEFINE в текстовой области схемы, на самом схемном поле в свободном месте, в файле MCAP.INC следующим образом:

```

.DEFINE IN1
+0NS 1
+10NS 0
+20NS 1

.DEFINE IN2
+ +0NS 1
+ +10NS 0
+ +10NS 1

.DEFINE IN3
+ 0NS 0
+ LABEL=BEGIN
+ +5NS 1
+ +5NS 0
+ +5NS GOTO BEGIN -1 TIMES
  
```

```
.DEFINE IN4
+LABEL=BEGIN
+ +0NS 00
+ +5NS 01
+ +5NS 10
+ +5NS 11
+ +5NS GOTO BEGIN -1 TIMES
.DEFINE IN5
+LABEL=BEGIN
+ +0NS INCR BY 01
+ +10NS GOTO BEGIN UNTIL GE 06
+ +10NS F0
+ +10NS F1
```

Примечание. Выше показаны командные последовательности при определении их в текстовой области (TEXT). Здесь в начале каждой новой строки определения .DEFINE ставится '+' — признак перехода на другую строку. Обратите внимание, что при определении командных последовательностей на поле схемы (см. рис. 13.16), не надо ставить '+' при продолжении строки. Весь текстовый блок, касающийся командной последовательности для одного генератора, воспринимается как единая строка.

См. примеры программирования цифровых генераторов в схемных файлах *stim_examples.cir*, *stim_demo.cir*, *stimst2.cir*, *stimst3.cir*, *stimst4.cir* из каталога *Components\Digital*.

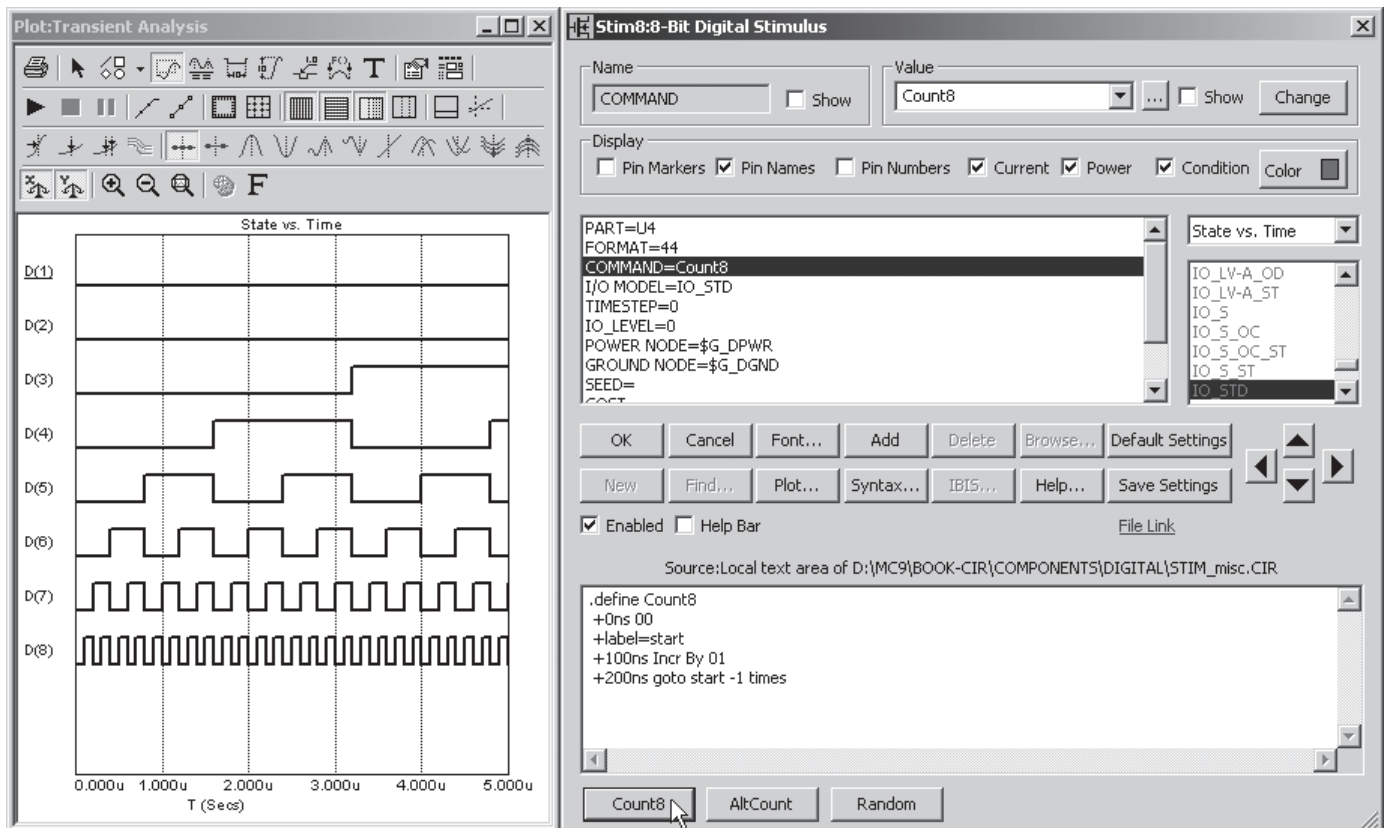


Рис. 13.17. Окно задания параметров генератора цифровых сигналов STIM8

Следует отметить, что Micro-Cap предоставляет существенные дополнительные удобства для программирования генераторов цифровых сигналов типа STIM. В окне атрибутов генераторов имеются панели, вызывающие различные заготовки цифровых последовательностей (рис. 13.17), причем эти

заготовки различны для генераторов различной разрядности. Они соответствуют наиболее востребованным последовательностям при выполнении цифрового и смешанного моделирования.

См. примеры использования цифровых последовательностей-заготовок в схемном файле *stim_misc.cir* из каталога *Components\Digital*.

13.4.2. Цифровые файловые генераторы сигналов FSTIM

Позволяют импортировать форму сигнала для цифрового генератора из текстового файла. Позволяют также использовать файлы из других программ схемотехнического анализа и выходной файл числовых данных (numeric output) Micro-Cap после небольшого предварительного редактирования.

Формат входного файла для FSTIM

Генератор цифровых сигналов FSTIM требует файл следующего формата для задания формы цифровых сигналов:

<Заголовок>

Одна или более пустых строк

<Таблица сигналов>

Определения

<Заголовок> состоит из следующих строк

[TIMESCALE=<временной масштабный множитель>]

[<имя первого сигнала>...<имя последнего сигнала>]

ОСТ(<3-ий бит сигнала>...<1-ый бит сигнала>)...

HEX(<4-ый бит сигнала>...<1-ый бит сигнала>)...

<Заголовок> содержит необязательный параметр [TIMESCALE=<временной масштабный множитель>] и строку перечисления имен сигналов. Имена сигналов могут разделяться между собой пробелами, запятыми, знаками табуляции. Длинная строка может продолжаться на следующей строке с предваряющим символом '+'. Строка может содержать до 256 имен сигналов. Имена сигналов должны быть связаны со значениями сигналов одинаковым порядком следования в строке перечисления имен и <таблице сигналов>.

Необязательная строка ОСТ(<бит 3>, <бит 2>, <бит 1>) определяет восьмеричную систему счисления при указании значений сигнала. Строка приводит к преобразованию восьмеричной цифры в соответствующем столбце таблицы данных в 3 двоичных бита и присвоении соответствующих бит входным сигналам, перечисленным в строке ОСТ. Строка должна описывать 3 выходных сигнала генератора, которые в таблице данных будут представлены столбцом из восьмеричных цифр (0...7).

Необязательная строка HEX(<бит4>, <бит3>, <бит2>, <бит1>) определяет шестнадцатеричную систему счисления при указании значений сигнала. Строка приводит к преобразованию шестнадцатеричной цифры в соответствующем столбце таблицы данных в 4 двоичных бита и присвоении соответствующих бит входным сигналам, перечисленным в строке HEX. Строка должна описывать 4 выходных сигнала генератора, которые в таблице данных будут представлены столбцом из шестнадцатеричных цифр (0...F).

Полное число выходных сигналов генератора *Outputs* определяется по следующей формуле:

$$Outputs = binary\ names + 3 \cdot octal\ names + 4 \cdot hex\ names$$

Количество значений (цифр в разных системах счисления) в одной строке таблицы данных *Digits* определяется согласно следующей формуле:

$$Digits = binary\ names + OCT\ statements + HEX\ statements$$

<Таблица сигналов> имеет следующий формат:

<время> <цифровое состояние>*

<Таблица сигналов> начинается на первой непустой строке следом за заголовком. Каждая строка таблицы должна содержать **<время>** и отделенные от него пробелами или знаками табуляции одно или более значений цифровых состояний выходов.

<Время> всегда представляется целым числом. Оно может быть абсолютным, или относительным (если его значение предваряет префикс '+') по отношению к предыдущему событию. Истинное значение времени получается умножением **<времени>** на **<временной масштабный множитель>**.

<Цифровое состояние>. Каждая цифра этого значения представляет один сигнал в двоичном формате, 3 сигнала — в восьмеричном формате, и 4 сигнала — в шестнадцатеричном формате. Каждый элементарный (однобитный) сигнал получается из таблицы сигналов и присваивается сигнальной линии с соответствующим именем в порядке слева направо. В табл. 13.19 показаны возможные символы для обозначения выходных сигналов.

Таблица 13.19. Обозначения выходных сигналов
в различных системах счисления

Состояние	Двоичный	Восьмеричный	Шестнадцатеричный
Логическое	0, 1	0–7	0–F
Неопределенное	X	X	X
Высокоимпедансное	Z	Z	Z
Передний фронт (Rising)	R	R	—
Задний фронт (Falling)	F	F	—

Пример:

TIMESCALE=1NS

A B C D HEX(A4,A3,A2,A1) OCT(D3,D2,D1)

0 0000F3 ; время события =0

1 000104 ; время события =1NS

+2 001015 ; время события =3NS (1NS+2NS)

5 001126 ; время события =5NS

Формат SPICE

U<имя> FSTIM(<кол. выходов>)

+<цифровой узел питания> <Цифровой узел земли> <узел>*

+<имя интерфейсной модели>

+ FILE=<имя файла данных>

+ [IO_LEVEL=<селектор подсхемы интерфейса>]

+ [SIGNALS=<имена сигналов из файла данных>]

Формат схем Micro-Cap

Ниже перечислены атрибуты, специфичные для FSTIM генератора цифровых сигналов.

- Атрибут **FILE**: <имя файла данных>
Пример: MYFILE.STM
- Атрибут **REPEAT**: <число повторов>
Пример: 1
- Атрибут **SIGNAMES**: <имена сигналов из файла данных>
Пример:
CLEAR PRESET Q QB
- Атрибут **TIMESTEP**: [<временной шаг>]
Пример:
10ns

Определения

<Кол. выходов> — в SPICE-файле указывает количество выходных сигналов генератора. Для схемных файлов Micro-Cap количество выходов определяется, когда генератор вводится в библиотеку компонентов. Поэтому при создании принципиальных схем достаточно просто выбрать генератор цифровых сигналов FSTIM с нужным количеством выходов из библиотеки компонентов, воспользовавшись иерархическим меню *Component*.

<узел>* — Для SPICE-схемы представляет собой перечисление обозначений выходных узлов генератора. Для схем Micro-Cap эти данные получают автоматически при постановке компонента в принципиальную схему. Можно определить пользовательские обозначения узлов, поместив рядом с соответствующими выходами источника сигналов текстовые наименования (не содержащие кириллических символов). Основным требованием здесь является соответствие количества выводов используемого источника специфицированному <кол. выходов>.

FILE=<файл данных>. Представляет собой имя файла, заключенное с двух сторон в кавычки "<" ">".

[SIGNAMES=<имена сигналов из файла данных>]. Указывает одно или более имен сигналов из заголовка файла данных для определения одного или более выходов генератора. Сигналы файла данных связываются с выходами генератора в соответствии с порядком их описания. Если имена сигналов не указаны, тогда программа будет искать их в <файле данных> в соответствии с наименованиями выходных узлов генератора. Эта команда — последняя команда определения генератора в формате SPICE.

Пример 1:

```
U1 FSTIM(3) $G_DPWR $G_DGND  
+ A B C  
+IO_FS  
+FILE="PATTERN.STM"
```

В этом примере нет команды SIGNAMES, следовательно, файл данных PATTERN.STM должен содержать имена узлов генератора A, B, и C в <заголовке>.

Сигналы для А, В, и С будут связаны с выходами FSTIM-генератора А, В, и С.

Пример 2:

```
U2 FSTIM(3) $G_DPWR $G_DGND
```

```
+ A B C
```

```
+IO_FS
```

```
+FILE="PATTERN.STM"
```

```
+ SIGNAMES=X Y Z
```

В этом примере команда SIGNAMES имеется, следовательно, файл данных PATTERN.STM должен содержать имена сигналов X, Y, и Z в <заголовке>. Сигналы X, Y, и Z будут связаны с выходами генератора А, В, и С.

Пример 3:

```
U3 FSTIM(4) $G_DPWR $G_DGND
```

```
+ TOM RAY CAR TALK
```

```
+IO_FS
```

```
+FILE="PATTERN.STM"
```

```
+ SIGNAMES=CLIK CLAK
```

Файл данных PATTERN.STM должен содержать имена сигналов CLIK, CLAK, CAR, и TALK. Сигнальные последовательности для CLIK и CLAK будут связаны с выходами FSTIM-генератора TOM и RAY соответственно. Сигнальные последовательности для CAR и TALK будут связаны с выходами генератора CAR и TALK соответственно.

Для иллюстрации использования FSTIM-генераторов цифровых сигналов см. схемный файл *FSTIM8.cir* из каталога *Components\Digital*.

13.5. Интерфейсная модель (I/O model)

Интерфейсная модель содержит информацию, необходимую для определения нагрузочной способности цифрового компонента при подсоединении к его выходу выходов других компонентов. Кроме того, она используется для сопряжения цифровых и аналоговых компонентов при смешанном моделировании.

Каждая серия цифровых микросхем, как правило, имеет собственные интерфейсные модели. Внутри серии, содержащей десятки–сотни компонентов, используется только 4–5 разновидностей интерфейсной модели. Эти разновидности обусловлены различной схемотехникой входов и выходов цифровых микросхем, как например, элементы с открытым коллекторным выводом или элементы с тремя состояниями выхода, входы с триггерами Шмитта.

Всего Micro-Cap использует свыше 50 разновидностей интерфейсных моделей.

В общем случае интерфейсная модель цифрового компонента состоит из аналоговой модели входа, аналого-цифрового интерфейса (О-компонента), цифро-аналогового интерфейса (N-компонента), аналоговой модели выхода и схемы питания интерфейсов (см. рис. 13.1 и 13.2)

Формат интерфейсной модели:

```
.MODEL <имя интерфейсной модели> UIO ([параметры модели])
```

Таблица 13.20. Параметры интерфейсной модели

Параметр	Описание	Ед. изм.	Значение по умолчанию
INLD	Входная емкость (между входным узлом и землей)	Фарада	0
OUTLD	Выходная емкость (между выходным узлом и землей)	Фарада	0
DRVH	Выходное сопротивление для высокого уровня	Ом	50
DRVL	Выходное сопротивление для низкого уровня	Ом	50
DRVZ	Выходное сопротивление 3-го состояния выхода	Ом	250K
INR	Входное сопротивление утечки	Ом	30K
TSTOREMN	Минимальное время сохранения заряда цепи, моделируемой как цепь хранения заряда	с	1E-3
AtoD1	Модель аналого-цифрового интерфейса 1-го уровня		AtoDDefault
DtoA1	Модель цифро-аналогового интерфейса 1-го уровня		DtoADefault
AtoD2	Модель аналого-цифрового интерфейса 2-го уровня		AtoDDefault
DtoA2	Модель цифро-аналогового интерфейса 2-го уровня		DtoADefault
AtoD3	Модель аналого-цифрового интерфейса 3-го уровня		AtoDDefault
DtoA3	Модель цифро-аналогового интерфейса 3-го уровня		DtoADefault
AtoD4	Модель аналого-цифрового интерфейса 4-го уровня		AtoDDefault
DtoA4	Модель цифро-аналогового интерфейса 4-го уровня		DtoADefault
TSWLH1	Время переключения из низкого в высокое состояние для модели ЦА интерфейса 1-го уровня	с	0
TSWLH2	Время переключения из низкого в высокое состояние для модели ЦА интерфейса 2-го уровня	с	0
TSWLH3	Время переключения из низкого в высокое состояние для модели ЦА интерфейса 3-го уровня	с	0
TSWLH4	Время переключения из низкого в высокое состояние для модели ЦА интерфейса 4-го уровня	с	0
TSWHL1	Время переключения из высокого в низкое в состояние для модели ЦА интерфейса 1-го уровня	с	0
TSWHL2	Время переключения из высокого в низкое в состояние для модели ЦА интерфейса 2-го уровня	с	0
TSWHL3	Время переключения из высокого в низкое в состояние для модели ЦА интерфейса 3-го уровня	с	0
TSWHL4	Время переключения из высокого в низкое в состояние для модели ЦА интерфейса 4-го уровня	с	0
TPWRT	Пороговое значение длительности импульса	с	prop delay
DIGPOWER	Имя подсхемы источника питания		DIGIFPWR

INLD и **OUTLD** используются при расчете дополнительного времени задержки, вызванного подключением к выходу одного или нескольких входов, имеющих паразитную емкость по отношению к земле.

DRVH и **DRVL** — определяют «логическую силу» выхода при высоком и низком уровне. По ним вычисляются результирующие логические состояния, если несколько цифровых выходов соединены между собой.

DRVZ, **INR**, и **TSTOREMN** используется для узлов, трактуемых как узлы с накоплением заряда. В настоящих версиях Micro-Cap данные параметры не используются.

AtoD1...AtoD4 и **DtoA1...DtoA4** используются для имен соответствующих интерфейсных схем. **INLD** и **AtoD** не используются в источниках цифровых сигналов, поскольку последние не имеют входов.

Времена переключения **TSWLH1... TSWLH4** и **TSWHL1...TSWHL4** вычитаются из времени распространения сигналов к выходам, которые подключены к аналоговым устройствам. Цель такой операции состоит в том, чтобы компенсировать время, требуемое для переключения интерфейсной схемы из цифры в аналог. При такой компенсации аналоговый сигнал на другом конце цифроаналогового интерфейса достигнет уровня переключения точно спустя время задержки распространения. Величины перечисленных задержек переключения измеряются при подключении номинальной нагрузки к цифровому выходу. Если время переключения больше, чем специфицированная задержка распространения, используется нулевая задержка распространения (а не равная отрицательному значению). Указанные параметры используются только тогда, когда аналоговые узлы подсоединяются к цифровым узлам.

Параметр **DIGPOWER** указывает имя подсхемы интерфейса, который должен быть использован, когда требуется использование цифроаналогового или аналого-цифрового интерфейсов. По умолчанию используется имя **DIGIFPWR**. Эта подсхема находится в библиотечном файле DIGIO.LIB и представляет собой стандартную схему для ТТЛ-схем.

Отметим, что параметр **TPWRT** не включен в текущую версию. Под него зарезервировано имя, но реально он не используется.

13.5.1. Цифроаналоговый интерфейс

Компонент с цифровым входом (N-компонент)

Если при построении схемы цифровой выход подключается к аналоговому узлу, Micro-Cap автоматически разрывает электрическую связь и вставляет в разрыв невидимую пользователю цифроаналоговую (DtoA) интерфейсную схему. Эта интерфейсная схема в качестве составной части всегда использует N-компонент. Его функции — преобразовать цифровые логические уровни в аналоговые напряжения, которые будут воздействовать на компоненты аналоговой части схемы. Кроме того, он задает выходное сопротивление и выходную емкость цифрового компонента. Эквивалентная схема N-компонента представлена на рис. 13.18.

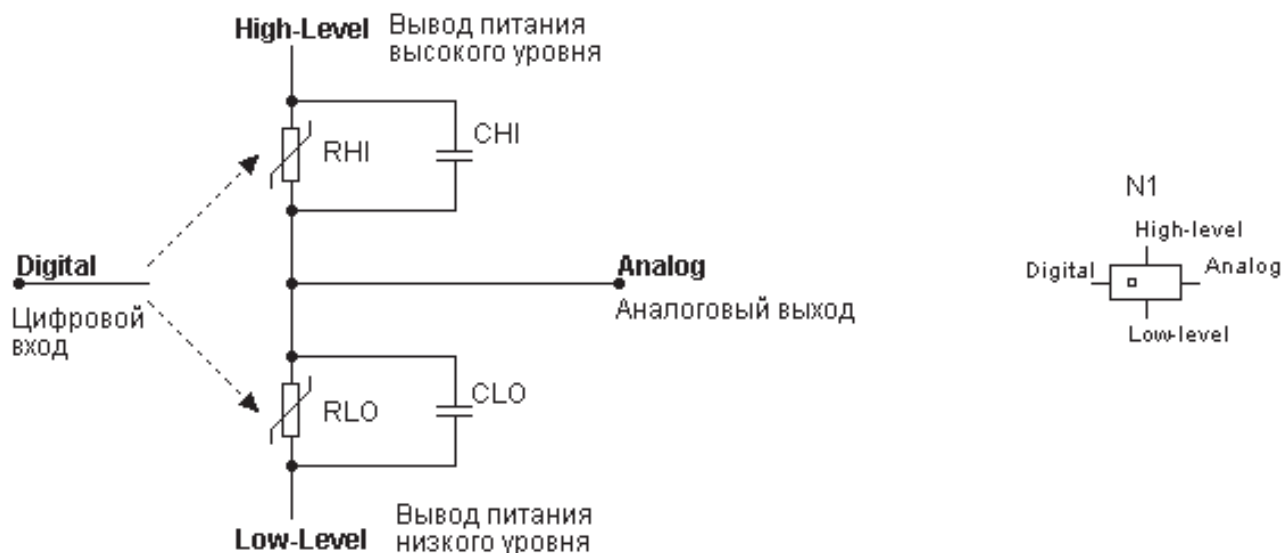


Рис. 13.18. Эквивалентная схема N-компонента

Формат SPICE

N<имя> <узел интерфейса> <узел низкого уровня> <узел высокого уровня>
 +<имя модели>
 + DGTNET=<имя цифрового узла>
 +<имя интерфейсной модели>
 +[IS=<начальное состояние>]

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример: FS1
- Атрибут **MODEL**: <имя модели>
Пример: D0_AD
- Атрибут **I/O MODEL**: <имя интерфейсной модели>
Пример: IO_STD
- Атрибут **IS**: <начальное состояние>
Пример: 1

Формат директивы модели N-компонента

.MODEL <имя модели> **DINPUT** ([параметры модели])

N-компонент содержит 2 управляемых резистора и 2 необязательных конденсатора. Величины резисторов устанавливаются в зависимости от состояния цифрового входа компонента N. В SPICE-схемах входному цифровому узлу N-компонента присвоено <имя цифрового узла>. В схемах Micro-Cap, цифровой входной узел — это узел, связанный с выводом 'Digital' N-компонента (см. рис. 13.18). Когда состояние входного цифрового узла изменяется от «0» к «1», величина RHI изменяется линейно во времени от значения RHI в состоянии «0» (S0RHI) до значения RHI в состоянии «19» (S19RHI). Аналогично, величина RLO изменяется линейно во времени от значения RLO в состоянии «0» (S0RLO) до значения RLO в состоянии «19» (S19RLO).

Таблица 13.21. Параметры модели N-компонента (цифроаналоговый интерфейс)

Параметр	Описание	Ед. изм.	Значение по умолчанию
CLO	Емкость между выходным узлом и землей	Фарада	0
CHI	Емкость между выходным узлом и источником питания	Фарада	0
S0NAME	Сокращенное имя состояния '0'		
S0TSW	Время переключения в состояние '0'	с	
S0RLO	Сопротивление между выходным узлом и землей в состоянии '0'	Ом	
S0RHI	Сопротивление между выходным узлом и источником питания в состоянии '0'	Ом	
S1NAME	Сокращенное имя состояния '1'		
S1TSW	Время переключения в состояние '1'	с	
S1RLO	Сопротивление между выходным узлом и землей в состоянии '1'	Ом	
S1RHI	Сопротивление между выходным узлом и источником питания в состоянии '1'	Ом	
...	...		
S19NAME	Сокращенное имя состояния '19'	Ом	
S19TSW	Время переключения в состояние '19'	с	
S19RLO	Сопротивление между выходным узлом и землей в состоянии '19'	Ом	
S19RHI	Сопротивление между выходным узлом и источником питания в состоянии '19'	Ом	

Переход от прежних значений сопротивлений к новым значениям сопротивлений осуществляется по линейному закону в течение времени переключения, указанного в модели DINPUT N-компонента. Выходное напряжение изменяется от старого уровня к новому уровню в течение специфицированного времени переключения. Кривая выходного напряжения имеет вид близкий к экспоненциальному, благодаря одновременному изменению обоих резисторов. Величины резисторов для каждого состояния (в том числе и промежуточного) берутся из параметров модели DINPUT. Обычно <вывод питания низкого уровня> и <вывод питания высокого уровня> подсоединяются к соответствующим выводам источника питания. Указанное соединение выполняется в соответствии с особенностями цифроаналоговой интерфейсной схемы, описанной в интерфейсной модели (I/O model).

Цифровые входы могут находиться в любом из состояний {0, 1, R, F, X, Z}. N-компонент генерирует сообщение об ошибке, если состояние отличается от вышеперечисленных.

Начальные условия цифрового входа N-компонента определяются во время расчета рабочей точки по постоянному току. Для того, чтобы сделать по-другому, необходимо использовать команду IS:

IS=<начальное состояние>

Данная команда устанавливает цифровой вход при $T=t_{min}$ в соответствии с командой и оставляет его в этом состоянии, пока один из компонентов, подсоединенных к данному узлу, не изменит его.

13.5.2. Аналого-цифровой интерфейс

Компонент с цифровым выходом (О-компонент)

Если при построении схемы к аналоговой части подключается вход цифрового компонента, то в разрыв также вставляется невидимая пользователю интерфейсная схема. Но в этом случае она строится на основе О-компонента. Его основная функция состоит в преобразовании входных аналоговых напряжений в цифровые уровни для их последующего использования цифровой частью схемы.

Формат SPICE

O<имя> <узел интерфейса> <узел отсчета>
 +<имя модели>
 + DGTNET=<цифровой узел>
 +<имя интерфейсной модели>

Формат схем Micro-Cap

- Атрибут **PART**: <имя>
Пример: FS1
- Атрибут **MODEL**: <имя модели>
Пример: D_AD
- Атрибут **I/O MODEL**: <имя интерфейсной модели>
Пример: IO_STD

Формат директивы модели О-компонента

.MODEL <имя модели> **DOUTPUT** ([параметры модели])

Эквивалентная схема О-компонента представлена на рис. 13.19. Она содержит параллельное соединение резистора RLOAD и конденсатора CLOAD. Они включаются между <аналоговым входом> и <общим выводом>. В качестве <общего вывода> обычно выступает узел аналоговой земли.

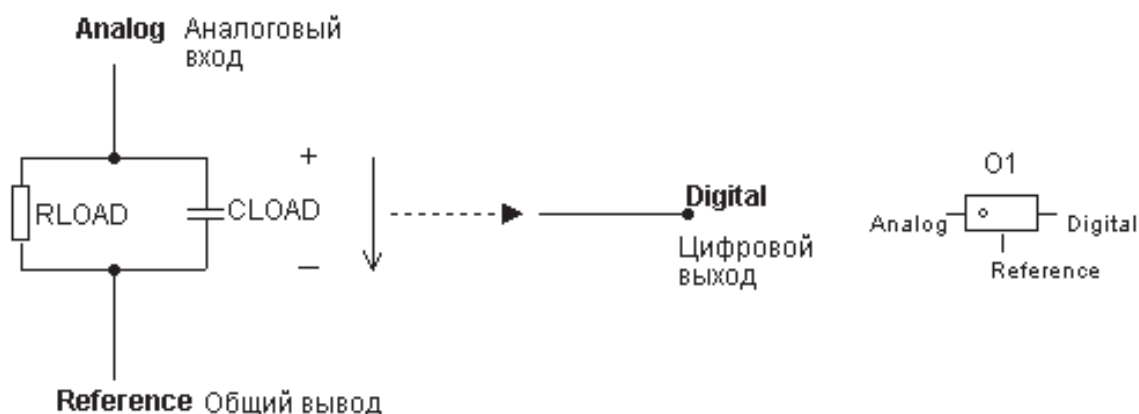


Рис. 13.19. Эквивалентная схема О-компонента (аналого-цифрового интерфейса)

Аналоговое напряжение на параллельной RC-цепи управляет поведением О-компонента. Цифровой выход О-компонента устанавливается в состояние 'N', которое принадлежит следующему диапазону: SNVLO–SNVHI (от 'Нижний уровень для состояния N' до 'Верхний уровень для состояния N'). Для определения, какое именно из 20 возможных цифровых состояний устанавливать на цифровом выходе Digital на следующем шаге моделирования,

производится анализ текущего значения входного напряжения. Анализ начинается с проверки на соответствие текущему цифровому состоянию. Если напряжение на аналоговом входе О-компонента соответствует диапазону входных напряжений для текущего цифрового состояния, то это состояние не меняется. Если напряжение на аналоговом входе вышло за пределы, определенные для текущего цифрового состояния, происходит переход к проверке на соответствие диапазону для следующего (более высокого) состояния и т.д. до состояния 19. Если входное напряжение не соответствует всем этим состояниям, проверка начинается с диапазона напряжений, соответствующих состоянию 0 и далее в сторону увеличения вплоть до текущего состояния. Если при проверке всех 20 диапазонов соответствие не найдено, используется состояние SXNAME (в том случае, если оно определено). Если SXNAME не определено, на цифровом выходе устанавливается состояние, ближайшее по уровням напряжения (0 или 19).

Таблица 13.22. Параметры модели О-компонента (аналого-цифрового интерфейса)

Параметр	Описание	Ед. изм.	Значение по умолчанию
RLOAD	Выходное сопротивление	Ом	1/Gmin
CLOAD	Емкость нагрузки Capacitance to high level node	Фарада	0
SONAME	Сокращенное имя состояния 0		
SOVLO	Нижний уровень напряжения состояния 0	Вольт	
SOVHI	Верхний уровень напряжения состояния 0	Вольт	
S1NAME	Сокращенное имя состояния 1		
S1VLO	Нижний уровень напряжения состояния 1	Вольт	
S1VHI	Верхний уровень напряжения состояния 1	Вольт	
...	...		
S19NAME	Сокращенное имя состояния 19		
S19VLO	Нижний уровень напряжения состояния 19	Вольт	
S19VHI	Верхний уровень напряжения состояния 19	Вольт	
SXNAME	Имя логического состояния, когда напряжение на аналоговом узле находится вне заданных границ		

Приведенный алгоритм определения цифрового состояния <цифрового узла> основан на введении небольшой гистерезисной зависимости. Рассмотрим следующие модельные директивы:

S0NAME='0' SOVLO=-1.5 SOVHI=1.7

S1NAME='1' S1VLO=0.9 S1VHI=7.0

Например, в начальный момент времени напряжение на аналоговом входе равно нулю. Цифровой уровень на цифровом узле — состояние '0'. При возрастании аналогового напряжения должно произойти его превышение порога 'SOVHI=1.7' для ухода из текущего '0' состояния. Когда это происходит, цифровой выход переходит в состояние '1'. Если напряжение начинает спадать, оно должно упасть ниже 'S1VLO =0.9' для перехода цифрового узла в состояние '0'.

Это обеспечивает гистерезисный порог $S0VHI-S1VLO=1.7-0.9=0.8$. Подобные пороги могут быть установлены и для других цифровых состояний.

Обозначения логических состояний, используемые в модельной директиве должны быть выбраны из списка {0, 1, R, F, X, Z}. Состояние Z обычно не используется, поскольку оно не передает информацию об уровне, а только об импедансе. Другие символы вызовут сообщение об ошибке и процесс моделирования прервется.

13.5.3. Интерфейсные модели основных серий цифровых интегральных схем

Как правило, чисто цифровых схем на практике не бывает. Поэтому практический интерес представляет анализ цифровых компонентов с аналоговой нагрузкой (резисторы, оптоэлектронные приборы, входы транзисторных каскадов и пр). Кроме того на вход цифрового устройства всегда подаются сигналы, имеющие аналоговую природу, а не два возможных состояния — низкого уровня и высокого. Зачастую также (особенно в радиолюбительских схемах) цифровые компоненты используются в нештатных режимах, как например в массе схем генераторов прямоугольных импульсов используется обратная связь через резистор с выхода на вход.

Как уже отмечалось, для корректного моделирования перечисленных ситуаций используется интерфейсная модель цифрового компонента. При этом Micro-Cap автоматически разрывает электрическую связь и вставляет в разрыв невидимую пользователю интерфейсную схему преобразования аналогового сигнала в цифровой AtoD (если аналоговый выход подсоединяется к цифровому входу) или интерфейсную схему преобразования цифрового сигнала в аналоговый DtoA (если цифровой выход подсоединяется к аналоговому входу). Каждая серия цифровых микросхем, как правило, имеет собственные интерфейсные модели. Всего их более 50. Здесь будут приведены лишь интерфейсные модели основных серий цифровых интегральных микросхем. Остальные модели можно посмотреть на сайте www.microcap-model.narod.ru.

Интерфейсная модель ТТЛ

Интерфейсную модель микросхем серии ТТЛ можно рассмотреть на примере подключения цифрового инвертора к транзисторному каскаду.

Если подключить вход инвертора к выходу транзисторного каскада, то на схеме ничего не появляется, но на самом деле между выходом транзисторного каскада (аналоговый узел 3) и входом вентиля подключается интерфейсная модель ТТЛ (рис. 13.20). Она состоит из модели аналого-цифрового интерфейса AtoD_STD и модели питания интерфейса DIGIFPWR. В свою очередь модель AtoD_STD включает в себя компонент аналого-цифрового преобразования O1 (О-компонент) и схему, имитирующую входной каскад ТТЛ-вентиля (транзистор, резистор, диоды и конденсатор). На проводнике, соединяющем аналоговый узел 3 со входом вентиля, появляется цифровой узел 3\$ATOD. При моделировании сигналы в двух этих узлах будут различны, несмотря на то, что они соединены проводником.

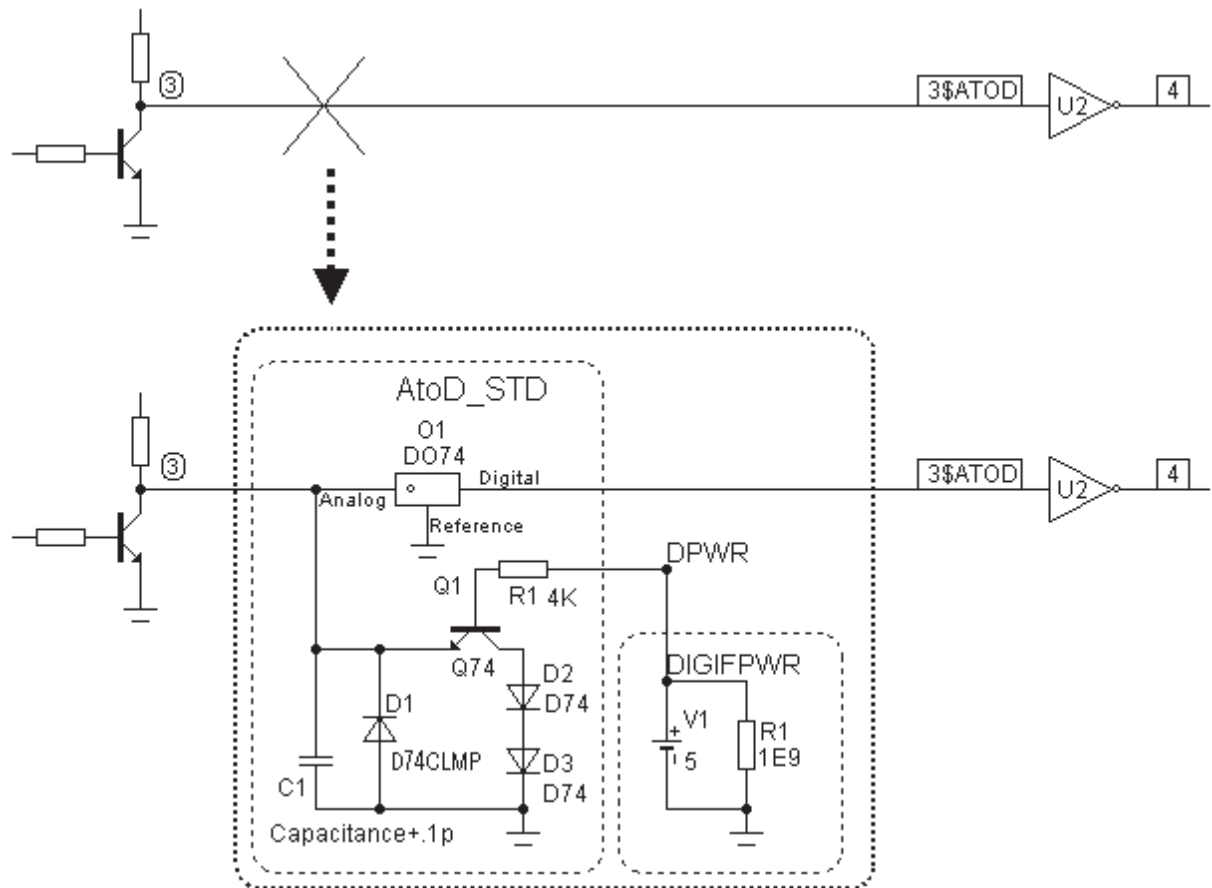


Рис. 13.20. Входная интерфейсная модель ТТЛ-вентилля.

Если же подключить выход инвертора ко входу транзисторного каскада, то Micro-Cap вновь добавит невидимую пользователю интерфейсную модель, но уже другую (рис. 13.21). Теперь она состоит из модели цифроаналогового интерфейса DtoA_STD и питания интерфейса DIGIFPWR. В состав цифроаналогового интерфейса входит модель цифро-аналогового преобразования N1 (N-компонента) и выходная емкость.

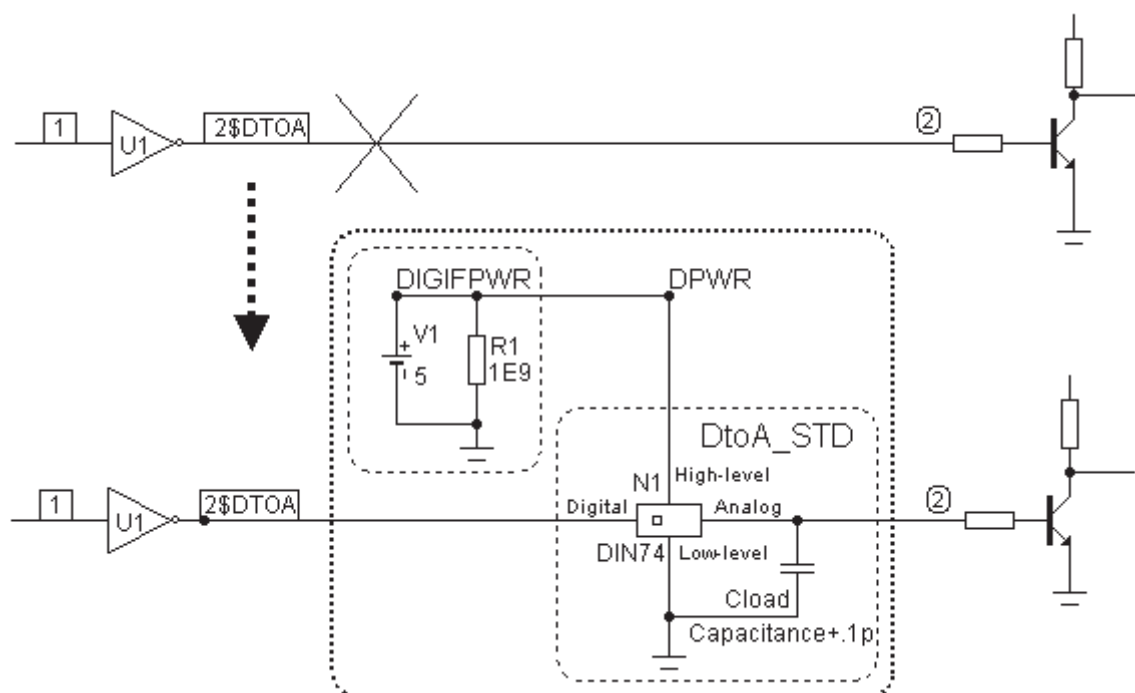


Рис. 13.21. Выходная интерфейсная модель ТТЛ-вентилля

Таким образом, модель любой серии микросхем содержит входные и выходные интерфейсные модели. Эти модели, кроме того, могут содержать несколько вариантов интерфейсов AtoD и DtoA.

Интерфейсная модель высокоскоростной ТТЛ-серии

Входная и выходная интерфейсные модели, а также схема питания интерфейса для высокоскоростной ТТЛ-серии представлены на рис. 13.22.

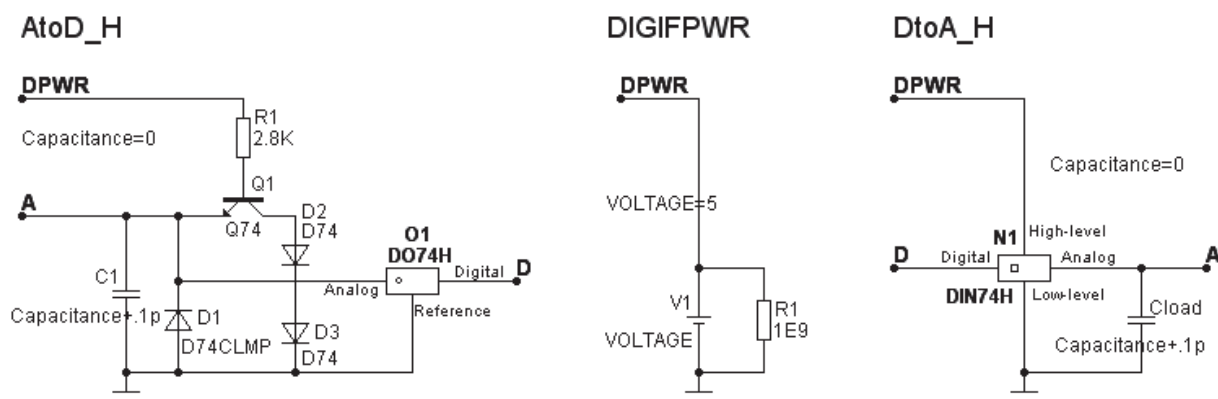


Рис. 13.22. Интерфейсная модель микросхем серии 74HXXX (K131)

Интерфейсная модель микросхем ТТЛШ

Входная и выходная интерфейсные модели, а также схема питания интерфейса для микросхем ТТЛШ представлены на рис. 13.23.

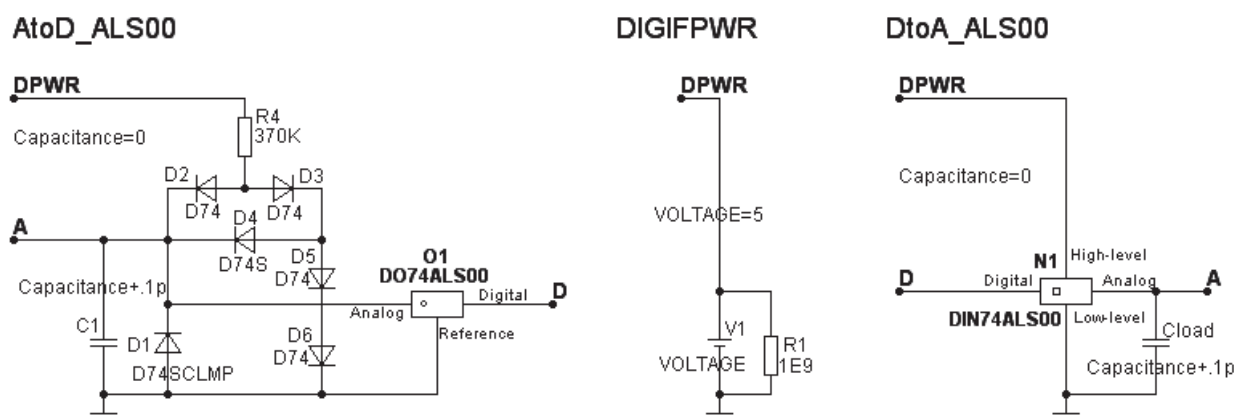


Рис. 13.23. Интерфейсная модель микросхем серии 74ALSXXX (K1533)

Интерфейсная модель микросхем КМОП-серии

Входная и выходная интерфейсные модели, а также схема питания интерфейса для микросхем КМОП-серии представлены на рис. 13.24.

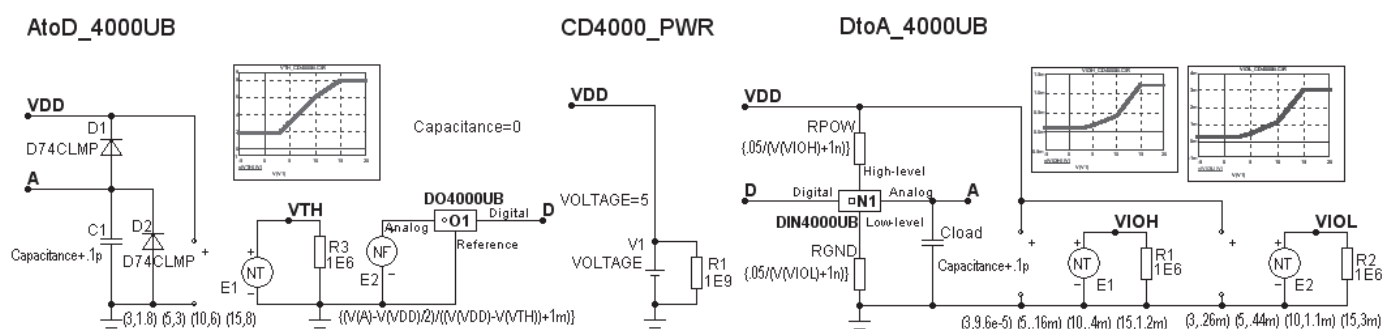


Рис. 13.24. Интерфейсная модель микросхем серии CD40XX (K176, K561)

Интерфейсная модель микросхем улучшенной КМОП-серии

Входная и выходная интерфейсные модели, а также схема питания интерфейса для микросхем улучшенной КМОП-серии представлены на рис. 13.25.

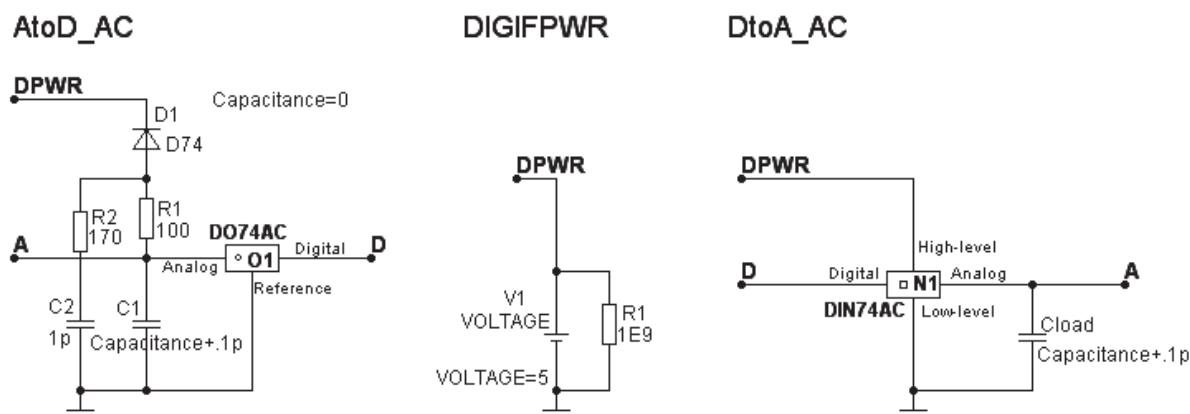


Рис. 13.25. Интерфейсная модель микросхем серии 74ACXXX (KP1554)

Интерфейсная модель микросхем низковольтной КМОП-серии

Входная и выходная интерфейсные модели, а также схема питания интерфейса для микросхем низковольтной КМОП-серии представлены на рис. 13.26.

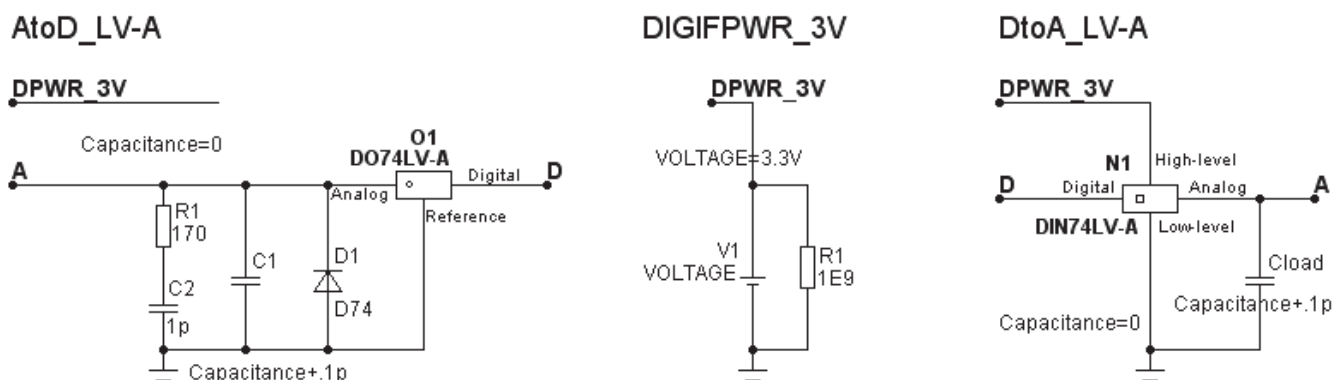


Рис. 13.26. Интерфейсная модель микросхем серии 74LVXXX

Интерфейсная модель микросхем ЭСЛ-серии

Входная и выходная интерфейсные модели, а также схема питания интерфейса для микросхем ЭСЛ-серии представлены на рис. 13.27.

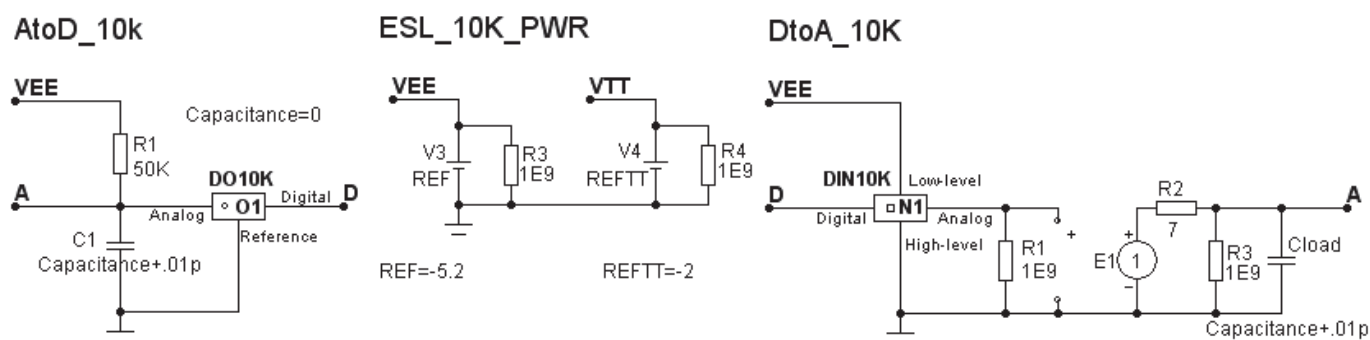


Рис. 13.27. Интерфейсная модель микросхем серии MC10XXX, MC100XXX (K500, K1500).

ЛИТЕРАТУРА

1. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-CAP 7. — Горячая линия-Телеком, 368 с.
2. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 464 с.: ил.
3. Micro-Cap 9 Electronic Circuit Analysis Program Reference Manual Copyright 1982-2007 by Spectrum Software 1021 South Wolfe Road Sunnyvale, CA 94086 Internet:www.spectrum-soft.com
4. Micro-Cap 10 Electronic Circuit Analysis Program Reference Manual Copyright 1982-2010 by Spectrum Software 1021 South Wolfe Road Sunnyvale, CA 94086 Internet:www.spectrum-soft.com
5. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение.— Москва: Солон-Р, 2001. —726 с.
6. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств Design Lab 8.0. — Москва, «Солон», 1999.
7. Robert W. Erickson, Dragan Maksimovich Fundamentals of Power Electronics. Second Edition. University of Colorado, Boulder Colorado USA: Kluwer Academic Publishers, 2000
8. Поликарпов А.Г., Сергиенко Е.Ф. Однотактные преобразователи напряжения в устройствах электропитания РЭА. — М.: Радио и связь, 1989. - 160с.
9. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование.: Пер. с англ. — К.: «МК-Пресс», 2007. — 288 с., ил.
10. Christophe P. Basso Switch-Mode Power Supplies: SPICE Simulations and Practical Design — McGraw-Hill Companies, 2008.
11. Четти П. Проектирование ключевых источников электропитания: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990.
12. Хоуп Г. Проектирование цифровых вычислительных устройств на интегральных схемах: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 400 с., ил.
13. А.Б. Сергиенко Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов – СПб.: Питер, 2002 – 608 с.: ил.
14. П. Хоровиц, У. Хилл Искусство схемотехники: Пер. с англ. Издание 5-е. — М.: Мир, 1998. — 704 с., ил.
15. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике: Пер. с нем. — М.: Мир, 1991. — 446 с: ил.
16. Г.И. Волович Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. — 528 с., ил.
17. Разевиг В.Д. Применение программ PCAD и PSpICE для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: в 4-х выпусках. М.: Радио и связь, 1992. - 327 с.: ил.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	7
1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММАХ MICRO-CAP 9, 10	9
1.1. Возможности программ Micro-Cap 9, 10	9
1.1.1. Графические возможности	9
1.1.2. Моделирование	10
1.1.3. Синтез аналоговых фильтров	12
1.1.4. Создание новых моделей компонентов	12
1.1.5. Основные возможности обработки результатов анализа	13
1.2. Отличительные особенности Micro-Cap 9, 10 по сравнению с Micro-Cap 8	14
2. КРАТКИЙ ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ЭКСКУРС	24
2.1. Основные возможности Micro-Cap	24
2.2. Идеология работы с программой Micro-Cap	25
2.2.1. Терминология	25
2.2.2. Порядок анализа электронных устройств при помощи Micro-Cap	25
2.2.3. Создание схемы для моделирования	26
2.2.4. Особенности построения схем для моделирования	30
2.2.5. Основные виды анализа электронных схем	31
2.2.6. Дополнительные виды анализа электронных схем	34
2.2.7. Вывод результатов расчетов	36
2.2.8. Особенности моделирования схем с отечественными компонентами	36
2.2.9. Моделирование неэлектрических воздействий	38
2.2.10. Особенности анализа цифровых схем	38
2.2.11. Совместное использование цифровых и аналоговых компонентов	39
2.3. Основные правила моделирования электронных устройств с использованием программ схемотехнического анализа	39
2.4. Русификация Micro-Cap и выбор стандартов УГО	43
2.4.1. Использование русскоязычного интерфейса	43
2.4.2. Использование разных стандартов УГО	43
2.5. Примеры построения и анализа электронных схем	45
2.5.1. Транзисторный каскад по схеме с общим эмиттером	45
2.5.2. Получение семейства ВАХ биполярного транзистора при помощи Stepping ...	50
2.5.3. Получение семейства ВАХ биполярного транзистора при помощи DC Analysis.	53
2.5.4. Использование функциональных блоков	53
2.5.5. Создание собственных макромоделей	54
2.5.6. Тиристорный регулятор мощности	57
2.5.7. Анализ процессов в двухтактном преобразователе напряжения	59
2.5.8. Использование макромоделей ШИМ-контроллера для моделирования импульсного стабилизатора напряжения	63
2.5.9. Использование непрерывной модели преобразователя напряжения	68
2.5.10. Синтез и моделирование цифрового автомата	71
2.5.11. Расчет интермодуляционных искажений усилителя	76
2.5.12. Использование wav-файлов	81

3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОГРАММЕ	84
3.1. Установка Micro-Cap.....	84
3.2. Основные файлы каталога Micro-Cap	85
3.3. Описание графического интерфейса	89
3.3.1. Главное окно программы.....	89
3.3.2. Основные команды меню	91
3.3.3. Пункт меню FILE	91
3.3.4. Пункт меню EDIT	94
3.3.5. Пункт меню COMPONENT	100
3.3.6. Пункт меню WINDOWS	109
3.3.7. Пункт меню OPTIONS	110
3.3.8. Пункт меню ANALYSIS.....	130
3.3.9. Пункт меню DESIGN.....	132
3.3.10. Пункт меню MODEL	132
4. ФОРМАТЫ ЗАДАНИЯ КОМПОНЕНТОВ.....	133
4.1. Общие сведения	133
4.2. Схемный текст.....	137
4.3. Числа.....	138
4.4. Переменные.....	138
4.5. Параметры моделей, внутренние узлы и компоненты схемных макро и подсхем	142
4.6. Примеры выражений, используемых в Micro-Cap	143
4.7. Математические выражения и функции	143
4.7.1. Арифметические операции	144
4.7.2. Операции с логическими переменными	144
4.7.3. Трансцендентные функции	144
4.7.4. Булевы операции и операции отношения	146
4.7.5. Предельные и условные операторы	146
4.7.6. Операторы обработки сигналов	147
4.7.7. Операторы численного интегрирования и дифференцирования.....	148
4.7.8. Специальные функции	149
4.7.9. Функции генерации случайных чисел RND	151
4.7.10. Функции статистического анализа Monte Carlo (MC10)	151
4.7.11. Примеры использования выражений с переменными в MC9, MC10.....	151
4.8. Правила использования выражений и переменных.....	152
4.9. Текстовые директивы.....	154
.AC — малосигнальный частотный анализ схемы.....	154
.ARRAY — объявление массива чисел	155
.DC — анализ на постоянном токе	156
.DEFINE — присвоение значений и задание функций	156
.ELIF — условный оператор	157
.ELSE — условный оператор.....	158
.END — конец текстового файла.....	158
.ENDIF — окончание условного блока	158
.ENDS — конец определения подсхемы	159
.ENDSPICE — конец SPICE-текста	159
.FUNC — определение функции	159
.HELP — текстовая подсказка	159
.IC — задание начальных условий.....	160

.IF — условный оператор	160
.INCLUDE — включение текстового файла	161
.LIB — подключение файлов библиотек компонентов	161
.MACRO — задание определений макросов	163
.MODEL — описание модели компонента	163
.NODESET — задание начального приближения для режима по постоянному току	166
.NOISE — задание параметров режима анализа шумов	167
.OP — вывод результатов рабочей точки	167
.OPTIONS — установки значений глобальных параметров	167
.PARAM — задание параметров	167
.PARAMETERS — задание параметров схем	168
.PATH — указание путей расположения информации	168
.PLOT — построение графиков	169
.PRINT — управление файлом числового вывода	169
.SENS — установки анализа чувствительности	169
.SPICE — начало SPICE-текста	169
.STEP — параметры многовариантного анализа	170
.SUBCKT — директива определения подсхемы на языке SPICE	170
.TEMP — задание температуры анализа	172
.TF — установки анализа малосигнальных передаточных функций	172
.TIE — соединение одноименных выводов компонентов одного типа	172
.TR — задание максимальных шагов по времени в режиме TRANSIENT	172
.TRAN — установки анализа переходных процессов	173
.WARNING — вывод предупреждающих сообщений	173
.WATCH	174

5. МОДЕЛИ АНАЛОГОВЫХ КОМПОНЕНТОВ..... 175

5.1. Общие сведения о моделях компонентов..... 175

5.2. Пассивные компоненты 176

5.2.1. Резистор (Resistor)	177
5.2.2. Конденсатор (Capacitor)	181
5.2.3. Катушка индуктивности (Inductor)	185
5.2.4. Взаимная индуктивность и магнитный сердечник (K)	189
5.2.5. Трансформатор (Transformer)	193
5.2.6. Длинная линия (Tline)	194

5.3. Источники сигналов 197

5.3.1. Независимые источники постоянного напряжения и тока	197
Точка нулевого потенциала или общий провод (Ground)	197
Источник постоянного напряжения (Battery)	197
Фиксированное смещение для аналоговых цепей (Fixed Analog)	197
Источник постоянного тока (Isource)	197
5.3.2. Источники сигнала, зависящего от времени (в формате Micro-Cap)	198
Источник импульсного напряжения (Pulse source)	198
Источник синусоидального напряжения (Sine source)	199
Источник напряжения, задаваемый пользовательским файлом (User source) ..	201
Источник напряжения, задаваемый WAV-файлом (MC10)	203
5.3.3. Независимые источники напряжения и тока сложной формы формата SPICE ..	204
Источник импульсного сигнала (PULSE)	205
Источник синусоидального сигнала (SIN)	206
Источник одиночного импульса с экспоненциальными фронтами (EXP)	207
Источник синусоидального сигнала с частотной модуляцией (SFFM)	209

Источник кусочно-линейного сигнала (PWL)	210
Источник шумового сигнала (NOISE)	211
Источник импульсов Гаусса (Gaussian)	213
5.4. Линейные и нелинейные зависимые источники	214
5.4.1. Линейные и полиномиальные зависимые источники (рис. 5.40)	214
5.4.2. Линейные управляемые источники, задаваемые преобразованием Лапласа и Z-преобразованием	218
5.4.3. Функциональные источники сигналов	223
5.5. Специальные компоненты	225
5.5.1. Ключи типа Switch	225
5.5.2. S-ключ (V-switch), управляемый напряжением	226
5.5.3. W-ключ (I-switch), управляемый током	229
5.5.4. Устройство выборки-хранения (Sample and Hold)	230
5.5.5. Таймер (Timer)	232
5.5.6. Стрелки (Arrow) и контакты (Bubble)	233
5.6. Макромодели	233
5.6.1. Макромодели в виде схемы формата Micro-Cap (MACRO circuit)	233
5.6.2. Макромодели в виде текстовой подсхемы на языке SPICE	235
5.7. Элементы анимации	241
5.7.1. Аналоговая индикаторная линейка (Animated analog bar)	241
5.7.2. Цветные светодиоды (Animated analog LED)	242
5.7.3. Двигатель постоянного тока (Animated DC motor)	242
5.7.4. Ключи типа DPST, SPDT, SPST (Animated DPST Switch, Animated SPDT Switch, Animated SPST switch)	243
5.7.5. Вольтамперметр (Animated meter)	244
5.7.6. Электромагнитное реле (Animated relay)	245
5.7.7. Трехцветный индикатор (Animated traffic light)	246
5.7.8. Цифровой сигнальный ключ (Animated Digital switch)	246
5.7.9. Цифровой индикатор (Animated Digital LED)	246
5.7.10. Семисегментный индикатор (Animated Seven segment)	247
5.8. N-полюсники	248
5.9. IBIS-компонент	250
5.10. Встроенные схемные макромодели и подсхемы	250
6. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ	259
6.1. Анализ переходных процессов	259
6.1.1. Краткие теоретические сведения	259
6.1.2. Задание параметров моделирования Transient Analysis Limits	261
6.1.3. Меню режимов расчета переходных процессов Transient	269
6.1.4. Задание начальных значений и редактирование переменных состояния	272
6.1.5. Использование команды печати данных (P)	274
6.1.6. Использование числового (табличного) вывода данных	275
6.1.7. Методы расчета режима по постоянному току (Operating Point Methods)	276
6.1.8. Использование при моделировании движковых регуляторов (Sliders)	278
6.2. Анализ по переменному току на малом сигнале	279
6.2.1. Краткие теоретические сведения	279
6.2.2. Правила составления задания для частотного анализа	281
6.2.3. Задание параметров моделирования AC Analysis Limits	282
6.2.4. Меню режимов расчета частотных характеристик AC	290
6.2.5. Расчет уровня внутреннего шума	291
6.2.6. Дополнительная информация по проведению AC анализа	297

6.3. Анализ передаточных функций по постоянному току.....	299
6.3.1. Задание параметров моделирования DC Analysis Limits	300
6.3.2. Меню режимов расчета передаточных функций DC	305
6.3.3. Использование табличного вывода данных	306
6.3.4. Проблемы сходимости.....	307
6.4. Динамический анализ режима по постоянному току	307
6.4.1. Особенности использования кнопок отображения режима по постоянному току в Transient, AC и DC анализе	309
6.4.2. Окно Dynamic DC Limits	309
6.5. Динамический анализ малосигнальных передаточных функций в частотной области.....	311
6.6. Анализ чувствительностей на постоянном токе.....	316
6.7. Анализ малосигнальных передаточных функций на постоянном токе	319
6.8. Анализ нелинейных искажений в MC9	320
6.9. Анализ искажений в MC10	324
6.9.1. Анализ гармонических искажений Harmonic Distortion.....	325
6.9.2. Анализ интермодуляционных искажений Intermodulation Distortion	336
6.10. Проблемы сходимости при выполнении моделирования	349
6.10.1. Определение сходимости	349
6.10.2. Что вызывает проблемы сходимости методов расчета	350
6.10.3. Контроль сходимости на этапе постановки задачи.....	351
7. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОСНОВНЫХ ВИДОВ АНАЛИЗА ..	356
7.1. Многовариантный анализ (Stepping)	356
7.2. Статистический анализ по методу Монте-Карло.....	362
7.2.1. Основные сведения об анализе Монте-Карло	363
7.2.2. Диалоговое окно Monte Carlo Options	369
7.2.3. Использование функций Performance и построение гистограмм	372
7.3. Параметрическая оптимизация	374
7.4. Спектральный анализ (анализ Фурье)	382
7.4.1. Принцип работы функций спектрального анализа.....	382
7.4.2. Функции на основе быстрого преобразования Фурье (FFT-функции).....	384
7.4.3. Пример использования FFT функций	387
7.4.4. Закладка FFT диалогового окна Plot Properties	390
7.4.5. Окно для построения спектральных функций FFT window.....	393
7.5. Нахождение стационарного режима работы схем с периодическими воздействиями (опция PSS).....	395
8. ПРОСМОТР И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ	398
8.1. Дополнительные возможности при построении графиков.....	398
8.1.1. Окно отображения результатов моделирования	398
8.1.2. Панорамирование и масштабирование окна результатов моделирования ...	399
8.1.3. Нанесение на графики размерных линий и координат отдельных точек.....	400
8.1.4. Режим Cursor mode	402
8.2. Режим электронной лупы Scope	403
8.2.1. Возможности меню Scope	403
8.2.2. Использование буфера графиков	408
8.3. Диалоговое окно Properties	409
Plot.....	409

Scales and Formats	410
Colors, Fonts, and Lines	412
SCOPE	413
FFT	413
Header	414
Numeric Output	414
Save Curves	414
Tool Bar	415
8.4. Использование функций Performance	415
8.4.1. Обработка результатов моделирования в режиме Go to Performance	416
8.4.2. Использование функций Performance и построение их графиков	417
8.4.3. Функции Performance	419
8.5. Вывод графиков характеристик в режиме Probe	423
8.5.1. Принципы работы постпроцессора Probe	423
8.5.2. Команды режима Probe	424
8.6. Анимация	429
8.7. Трехмерные графики	431
9. СИНТЕЗ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОВ	435
9.1. Математическое описание различных типов фильтров	435
9.2. Синтез активных фильтров	437
9.2.1. Окно диалога синтеза активных фильтров.	438
9.2.2. Списки компонентов (Component lists)	449
9.2.3. Задание параметров фильтра в режиме Mode 1	451
9.2.4. Задание параметров фильтра в режиме Mode 2	454
9.3. Синтез пассивных фильтров.	455
9.3.1. Математическое описание фильтров	456
9.3.2. Диалоговое окно синтеза пассивных фильтров	458
10. ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ АНАЛОГОВЫХ КОМПОНЕНТОВ MODEL	462
10.1. Общие сведения о программе MODEL	462
10.2. Интерфейс программы MODEL	462
10.3. Работа с программой MODEL	466
11. МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ И ВЫЧИСЛЕНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ MODEL	473
11.1. Магнитный сердечник	473
11.1.1. Модель магнитного сердечника	473
11.1.2. Параметры модели нелинейного магнитного сердечника	477
11.1.3. Основные уравнения модели нелинейного магнитного сердечника	477
11.1.4. Определение параметров модели в программе MODEL	479
11.2. Диод и стабилитрон	481
11.2.1. Модель диода (Diode) и стабилитрона (Zener)	481
11.2.2. Параметры модели диода	481
11.2.3. Основные уравнения работы диода в программе	483
11.2.4. Нахождение параметров модели диода	485
11.3. Биполярные транзисторы BJT	486
11.3.1. Модель биполярного транзистора BJT	486
11.3.2. Параметры модели биполярного транзистора	487

11.3.3. Основные уравнения работы биполярного транзистора в MC9,10	489
11.3.4. Нахождение параметров модели биполярного транзистора	494
11.4. Полевые транзисторы JFET	497
11.4.1. Модель полевого транзистора JFET	497
11.4.2. Параметры модели полевого транзистора	497
11.4.3. Основные уравнения математической модели JFET	499
11.4.4. Определение параметров модели полевого транзистора JFET	501
11.5. МОП-транзисторы MOSFET	502
11.5.1. Модель транзистора с изолированным затвором MOSFET	502
11.5.2. Параметры модели транзистора с изолированным затвором MOSFET	505
11.5.3. Основные уравнения модели MOSFET	507
11.5.4. Определение параметров модели МОП-транзистора	512
11.6. Операционные усилители OPAMP	514
11.6.1. Модель операционного усилителя	514
11.6.2. Параметры модели операционного усилителя	515
11.6.3. Уравнения модели операционного усилителя	518
11.6.4. Определение параметров модели операционного усилителя	521
11.7. Арсенид-галлиевые полевые транзисторы GaAsFET	522
11.7.1. Модель арсенид-галлиевого полевого транзистора	522
11.7.2. Параметры модели арсенид-галлиевого полевого транзистора	523
11.7.3. Уравнения математической модели GaAsFET	525
11.8. Биполярный транзистор с изолированным затвором IGBT	528
11.8.1. Модель IGBT-транзистора	528
11.8.2. Уравнения математической модели IGBT	529
12. ТРАНСЛЯТОР IBIS	533
12.1. Что такое IBIS-транслятор	533
12.2. Использование IBIS-транслятора	533
12.3. Пример трансляции IBIS-файла	536
12.4. Пример использования компонентов IBIS	540
13. МОДЕЛИ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ	545
13.1. Основные понятия цифрового моделирования	545
13.1.1. Цифровые узлы	547
13.1.2. Цифровые состояния	547
13.1.3. Временные модели (Timing models)	550
13.1.4. Задержки распространения сигналов (Propagation delays)	552
13.1.5. Цифровые задержки и интервалы неоднозначности сигналов	554
13.1.6. Паразитные импульсы вследствие логических состязаний	555
13.1.7. Интерфейсная модель	556
13.2. Модели цифровых компонентов	560
13.2.1. Общий формат цифровых примитивов	560
13.2.2. Структура модели цифрового компонента	564
13.2.3. Цифровые SPICE-примитивы, используемые в Micro-Cap	564
13.2.4. Логические вентили (Gates)	566
13.2.5. Триггеры	570
13.2.6. Подтягивающие резисторы Pullup и Pulldown	576
13.2.7. Цифровая безынерционная линия задержки Dlyline	577
13.2.8. Программируемые логические матрицы	577
13.2.9. Многоразрядные аналого-цифровые преобразователи	582
13.2.10. Многоразрядные цифроаналоговые преобразователи	585

13.3. Функциональные цифровые блоки	586
13.4. Генераторы цифровых сигналов (Stimulus generators).....	590
13.4.1. Генераторы сигналов типа STIM	590
13.4.2. Цифровые файловые генераторы сигналов FSTIM.....	595
13.5. Интерфейсная модель (I/O model).....	598
13.5.1. Цифроаналоговый интерфейс.....	600
13.5.2. Аналого-цифровой интерфейс	603
13.5.3. Интерфейсные модели основных серий цифровых интегральных схем	605
Интерфейсная модель ТТЛ	605
Интерфейсная модель высокоскоростной ТТЛ-серии.....	607
Интерфейсная модель микросхем ТТЛШ	607
Интерфейсная модель микросхем КМОП-серии	607
Интерфейсная модель микросхем улучшенной КМОП-серии	608
Интерфейсная модель микросхем низковольтной КМОП-серии	608
Интерфейсная модель микросхем ЭСЛ-серии	608
ЛИТЕРАТУРА	609
ОГЛАВЛЕНИЕ	610