

Оглавление

Введение.....	8
Схемный редактор.....	10
Цвета схемного редактора.....	13
Размещение компонент.....	14
Программирование горячих клавиш.....	14
Создание списка соединений для проектирования печатных плат.....	15
Редактирование параметров компонент.....	15
Редактирование видимых атрибутов.....	15
Специализированный редактор параметров компонент.....	16
Общий редактор атрибутов.....	16
Редактирование и создание компонент.....	18
Создание изображения символа.....	18
Ввод контактов.....	18
Ввод атрибутов.....	19
Установка видимости атрибута.....	20
Создание иерархических схем.....	20
Правила построения иерархических схем.....	21
Навигация по иерархической схеме.....	21
Краткий обзор LTspice.....	22
Описание схемы.....	22
Внешние списки соединений.....	23
Общая структура и соглашения.....	23
Краткий справочник по схемным компонентам.....	25
Описание схемных компонент.....	26
А. Специальные Функции.....	26
В. Функциональный источник напряжения или источник тока.....	27
С. Конденсатор.....	30
D. Диод.....	31
Е. Источник напряжения управляемый напряжением (ИНУН).....	33
F. Источник тока, управляемый током (ИТУТ).....	34
G. Источник тока, управляемый напряжением (ИТУН).....	34
H. Источник напряжения, управляемый током (ИНУТ).....	36
I. Источник тока.....	36
J. Полевой транзистор (JFET).....	39
K. Взаимная Индуктивность.....	40
L. Катушка индуктивности.....	41
M. МОП-транзистор с изолированным затвором (MOSFET).....	43
O. Линия передачи с потерями.....	46
Q. Биполярный транзистор.....	48
R. Резистор.....	49

S. Ключ, управляемый напряжением.....	49
T. Линия передачи без потерь.....	50
U. Однородная ёмкостно-резистивная линия.....	50
V. Источник напряжения.....	51
W. Ключ, управляемый током независимого источника напряжения	53
X. Подсхема.....	54
Z. Транзистор MESFET	55
Директивы моделирования.....	56
.AC - Частотный анализ линеаризованных схем по малому сигналу.....	56
.BACKANNO – Соотнесение имен контактов подсхем и токов.....	56
.DC – Расчет по постоянному току при вариации источников.....	57
.END – Конец списка соединений.....	57
.ENDS – Конец описания подсхемы.....	57
.FOUR – Фурье-анализ сигналов переходных процессов.....	57
.FUNC – определение пользовательской функции.....	58
.GLOBAL – Объявление глобальных узлов.....	58
.IC – Установка начальных условий.....	59
.INCLUDE – Включение произвольного файла.....	59
.LIB – Включение библиотеки.....	60
.LOADBIAS – Загрузка данных режима по постоянному току.....	60
.MEASURE – Определяемые пользователем вычисления.....	61
.MODEL – Определение SPICE модели.....	64
.NODESET – Установка приближенных значений для начального ре- шения по постоянному току.....	65
.NOISE – Анализ шума.....	65
.OP – Поиск рабочей точки по постоянному току.....	66
.OPTIONS – Установка опций моделирования.....	66
.PARAM – Определяемые пользователем параметры.....	68
.SAVE – Ограничения на количество записываемых данных.....	69
.SAVEBIAS – Сохранение данных режима по постоянному току.....	69
.STEP – Вариация параметров.....	70
.SUBCKT – Описание подсхемы.....	71
.TEMP – вариация температуры.....	72
.TF – Расчет малосигнальных передаточных функций.....	72
.TRAN – Расчет переходных процессов.....	72
.WAVE – Запись потенциалов в .Wav файл.....	74
Выходные переменные.....	76
Графический постпроцессор.....	78
Выбор графиков.....	78
Размер экрана.....	79
Математическая обработка графиков.....	80
Преобразование графиков по математическому выражению.....	80

Вычисление среднего и среднеквадратичного значения.....	82
Отображение результатов Фурье-преобразования графиков.....	83
Пользовательские функции.....	83
Управление осями координат.....	83
Дополнительные поля для графиков.....	84
Управление цветом.....	84
Добавление курсоров.....	85
Сохранение конфигурации.....	86
Формат файла с быстрым доступом.....	86
Панель управления.....	87
Compression (Сжатие данных).....	87
Operation (Операции).....	88
Save Defaults (Запись по умолчанию).....	89
SPICE (настройка параметров моделирования).....	90
Netlist Options (опции списка соединений).....	92
Hacks!.....	92
Drafting Options (опции схемного редактора)	93
Приложения.....	95
Модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	95
Моделирование момента сопротивления на валу двигателя.....	100
Частотный пуск асинхронного двигателя со скалярным управлением	101
Частотный пуск асинхронного двигателя с обратной связью по току (потокосцеплению) ротора.....	103
АЛЬБОМ СХЕМ LTSPICE.....	106
160.asc - аналого-цифровая схема.....	106
1563.asc - применение подсхемы с текстовым описанием.....	107
Astable.asc - моделирование мультивибратора во времени.....	108
Audioamp.asc - многокаскадный транзисторный усилитель сигнала. Анализ переходных процессов и частотный анализ.....	109
BandGaps.asc - температурный анализ рабочей точки.....	110
Butter.asc - частотные характеристики при многовариантном анализе.	111
Clapp.asc - временные осциллограммы транзисторного генератора. Применение опции для метода расчета.....	112
Cohn.asc - частотные характеристики пассивного фильтра.....	113
Colpits2.asc - временные осциллограммы транзисторного генератора. Применение опции для метода расчета.....	114
Colpits.asc - временные осциллограммы транзисторного генератора. Применение опции для метода расчета.....	115
Courvetrace.asc - статические характеристики транзистора.....	116
DcopPnt.asc - расчет рабочей точки многокаскадной транзисторной схемы.....	117

Dimmer.asc - применение транзисторных схем замещения динистора и тринистора.....	118
FC.asc - применение текстового описания подсхемы.....	119
HalfSlope.asc - применение преобразования Лапласа при моделировании переходных процессов и при частотном анализе.....	120
Hartly.asc - взаимные индуктивности в транзисторном генераторе синусоидального сигнала.....	121
Howland.asc - параметрический анализ мгновенных процессов схемы на операционном усилителе.....	122
IdealTransformer.asc - макромодель «идеального трансформатора»	123
LM78XX.asc (LM308.asc, LM741.asc) - сложные транзисторные схемы усилителей.....	124
Logamp.asc - логарифмическая функция на электронных компонентах.....	125
LoopGain2.asc - частотные характеристики разомкнутого и замкнутого контуров.....	126
LoopGain.asc - частотные характеристики разомкнутого и замкнутого контуров.....	127
MC1648.asc - транзисторный генератор синусоидального напряжения.....	128
MeasureBW.asc - измерение полосы пропускания транзисторного усилителя.....	129
MonteCarlo.asc - частотные характеристики при разбросе параметров по случайному закону.....	130
NE555.asc - транзисторный генератор импульсов.....	131
Noise.asc - анализ шума электронной схемы.....	132
NoiseFigure.asc - анализ шума электронной схемы.....	133
Notch.asc - многовариантный анализ частотных характеристик.....	134
Opamp.asc - частотные характеристики схемы на операционных усилителях.....	135
P2.asc - получение осциллограмм работы сложной транзисторной схемы.....	136
Passive.asc - частотные характеристики пассивного фильтра.....	137
PhaseShift2.asc - транзисторная генераторная схема.....	138
PhaseShift.asc - транзисторная генераторная схема.....	139
Phono.asc - частотный и временной анализ схемы на операционном усилителе.....	140
Pierce.asc - транзисторный генератор переменного сигнала.....	141
PLL2.asc - применение функциональных звеньев и звеньев, представленных преобразованиями Лапласа.....	142
PLL.asc - применение функциональных звеньев и звеньев, представленных преобразованиями Лапласа.....	143

Relax.asc - генератор пилообразного сигнала на операционном усилителе.....	144
Royer.asc - генератор сигнала.....	145
SampleAndHold.asc - функциональная модель квантователя.....	146
S-param.asc - многовариантный анализ частотных характеристик пассивного фильтра.....	147
StepAC.asc - многовариантный частотный анализ с пошаговым изменением одного параметра семы.....	148
StepModelParam.asc - статические характеристики транзистора с применением пошагового изменения параметра.....	149
StepNoise.asc - анализ шума при пошаговом изменении параметра.....	150
StepTemp.asc - анализ рабочей точки усилительной схемы при пошаговом изменении температуры.....	151
Transformer2.asc - анализ переходных процессов в схеме с взаимными индуктивностями.....	152
Transformer.asc - схема с трансформатором.....	153
TransmissionLineInverter.asc - модель длинной линии.....	154
TwoTau.asc - применение звеньев представленных преобразованием Лапласа.....	155
UniversalOpamp2.asc — частотные характеристики операционных усилителей различного уровня.....	156
Varactor2.asc - многовариантный анализ частотных характеристик схемы с варактором.....	157
Varactor.asc - многовариантный анализ частотных характеристик схемы с варактором.....	158
Varistor.asc - временной анализ схемы с варистором.....	159
Vswitch.asc - применение модели ключа, управляемого напряжением.....	160
WaveIn.asc — ввод в схему сигнала из wav-файла.....	161
WaveOut.asc - вывод в wav-файл сигнала.....	162
Wein.asc - схема генератора синусоидального напряжения.....	163
Список литературы.....	164

Введение

Моделирование электрических схем непосредственно связано с проектированием соответствующих устройств. В системах конструкторского проектирования электронных устройств широкое распространение получили программы моделирования, объединенные общим названием – SPICE-программы (например, программы PSpice, TSpice, XSpice и т.д.). Текстовая форма описания электрических схем для SPICE-программ фактически стала мировым стандартом для систем автоматизированного проектирования. Настоящее пособие посвящено программе моделирования LTSpice, входящей в систему SwitcherCAD III. Базовым материалом послужило руководство пользователя этой системы [1], а так же описание традиционных правил применения языка для SPICE-программ [2, 3].

Поскольку пособие предназначено для студентов-электроприводчиков, то в него включены материалы, относящиеся к разработке моделей электрических машин и схем электропривода на языке SPICE-программ.

SwitcherCAD III - третье поколение системы проектирования импульсных регуляторов компании Linear Technology. Особенность программы моделирования LTSpice состоит в том, что она содержит встроенные макромодели для мощных импульсных контроллеров и регуляторов. Кроме SPICE-программы, система проектирования включает схемный редактор и средства отображения результатов моделирования (графический постпроцессор), позволяющие проводить дальнейший анализ. В состав системы входит также встроенная база данных для большинства импульсных устройств компании Linear Technology и многих пассивных компонентов. База данных устройств, схемный редактор, программа моделирования и система графического отображения результатов интегрированы в одну систему.

Пакет LTSpice/SwitcherCAD III полностью доступен для общего использования. Распространено более чем 500 000 копий. Для большого числа пользователей система LTSpice/SwitcherCAD III стала основным инструментом моделирования.

Система LTSpice/SwitcherCAD III была разработана для моделирования импульсных систем питания и регулирования и отличается от других SPICE-программ специальной логикой, управляющей переключениями, обеспечивая приемлемое время моделирования. Современные импульсные источники питания имеют систему управления с различными режимами работы. Например, могут измениться режимы модуляции в зависимости от режима работы схемы и т.д. Оригинальный компилятор SwitcherCAD III, позволяет достаточно быстро и точно смоделировать подобного рода устройства. Кроме того, система моделирования позволяет получить практически произвольную форму импульсов. В LTSpice

встроены схемные элементы соответствующие физически существующим компонентам. Конденсаторы и катушки индуктивности могут быть смоделированы с последовательными сопротивлениями и другими паразитными элементами, без использования подсхем или внутренних узлов. Это позволяет учесть конечное внутреннее сопротивление элементов на всех частотах. Элементная база развита для мощных МДП-транзисторов в части их моделирования в ключевых режимах, также без использования подсхем или внутренних узлов. Сокращение числа узлов, которые программа должна рассчитать, значительно сокращает затраты на вычисления, без потерь точности или потерь в части детальности описания форм импульсов.

В настоящее время имеется около семисот изделий, выпускаемых компанией Linear Technology, смоделированных в SwitcherCAD III. Программа свободно распространяется через вебсайт этой компании. В пакет включены файлы со схемами, которые полностью подготовлены для демонстрации всех возможностей программы. Программа является полнофункциональной и позволяет пользователю разрабатывать собственные схемы. Вместе с тем, как отмечается в руководстве пользователя SwitcherCAD III, надо понимать, что пакет не предназначен для автоматического получения готовых решений. Это - только инструмент, облегчающий проектирование, которое предполагает еще макетирование и испытание. Поэтому результаты моделирования во всех случаях следует дополнять здравым смыслом [1].

Схемный редактор.

Схемный редактор применяется для редактирования и создания схем, включая иерархические схемы. Размер схемы и глубина иерархии ограничены только компьютерными ресурсами.

В элементную базу входит приблизительно 800 символов. Эти символы охватывают большинство мощных электронных устройств, операционных усилителей, компараторов и многих других устройств для проектирования электрических схем. Можно разрабатывать пользовательские символы.

Пиктограммы на главной панели имеют назначение, показанное на рис.1.

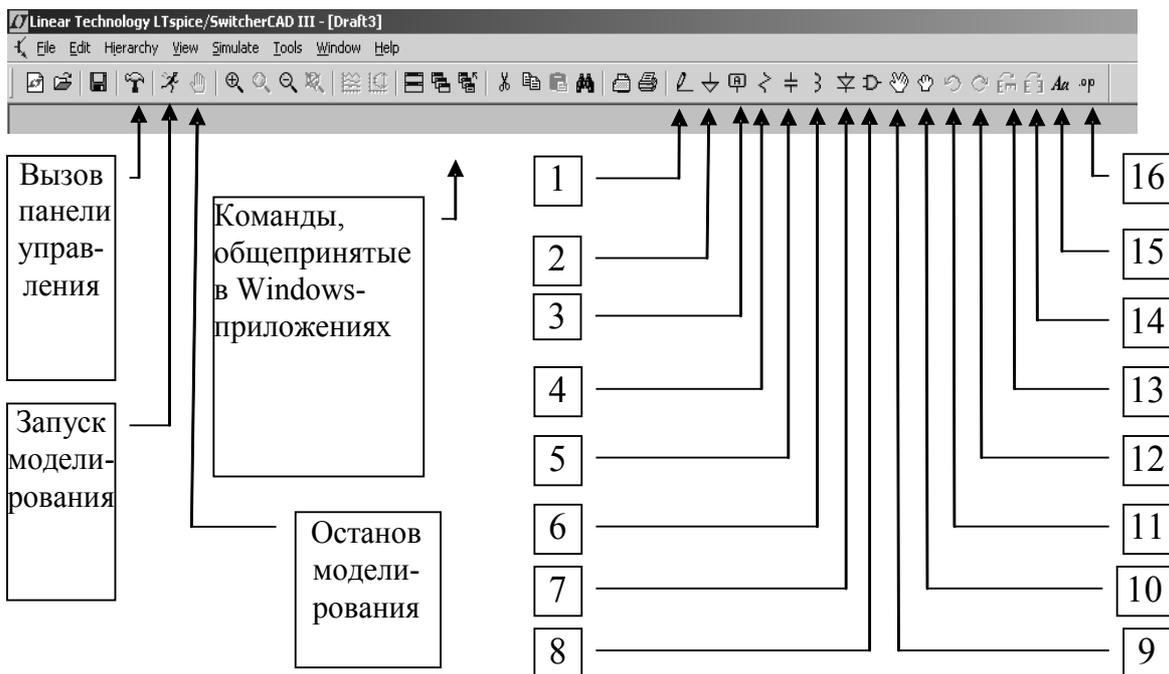


Рис.1. Пиктограммы главной панели

На рис.1 обозначено:

1 – ввод проводников; 2 – ввод глобального узла ("земли"); 3 – ввод порта или имени проводника; 4 – ввод резистора; 5 – ввод конденсатора; 6 – ввод индуктивности; 7 – ввод диода; 8 – ввод схемных элементов; 9 – задание режима перемещения отдельных объектов схемы; 10 – задание режима перемещения схемных элементов; 11,12 – вращение элемента (Ctrl+R); 13,14 – зеркальное отображение элемента (Ctrl+E); 15 – ввод комментария; 16 – текстовый ввод Spice-директивы.

Для работы с объектами схемы – их перемещением, удалением, вращением или зеркальным отображением, необходимо нажать на соответствующую пиктограмму, затем навести курсор на объект схемы. Курсор по-

сле нажатия на пиктограмму видоизменяет свою форму. Можно работать с группой объектов, если курсором "оттянуть" прямоугольник, захватывающий объекты.

Пиктограммы главной панели могут быть вызваны командой **Edit**, результат действия которой показан на рис.2.

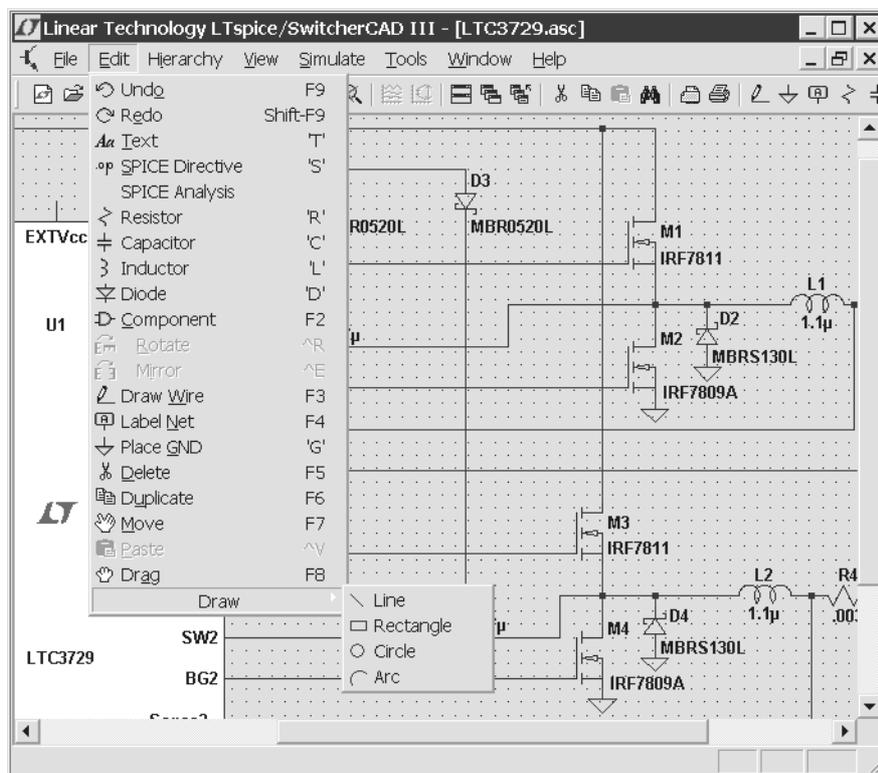


Рис.2. Команда Edit главного меню.

Особенности команд редактирования схемы:

Undo: Отмена последней команды.

Redo: Восстановление последней команды Undo.

Text: Размещение текста. Введенный текст не влияет на моделирование.

SPICE Directive: Размещение текста в список соединений схемы. Так как по списку соединений выполняется моделирование, то появляется возможность вводить данные для моделирования в текстовой форме. Это позволяет устанавливать варианты моделирования, файлы, которые содержат модели, определить новые модели, или использовать SPICE-команды. Можно ввести текстовое описание подсхемы, для которой отсутствует графический символ. Имя этого элемента должно начинаться с символа X. Правила текстового описания таких элементов-подсхем приводятся далее.

SPICE Analysis: Ввод/редактирование задания на моделирование.

Resistor, Capacitor, Inductor, Diode, Component – были рассмотрены выше.

Rotate, Mirror: – были рассмотрены выше.

Draw Wire: Ввод проводника осуществляется при нажатии левой кнопки мыши. Каждый щелчок мыши определит новый сегмент проводника. Для подсоединения к другому проводнику надо кликнуть левой кнопкой мыши при наведении курсора на этот проводник. Правый щелчок отменяет ввод текущего проводника. Еще один щелчок правой кнопкой отменит команду ввода проводников. Можно вводить проводники через компоненты типа резистор. Провод будет автоматически вырезан так, что резистор окажется соединенным последовательно с проводом. При нажатой CTRL проводники можно укладывать под разными углами, определяемыми узлами сетки.

Label Net: Программа автоматически именуется проводники некоторым стандартным образом. Эта команда позволяет назначить уникальные имена проводникам.

Place GND: Размещение символа "земля" (GROUND). Это нулевой провод, он имеет глобальное имя "0". Присутствие его на схеме является обязательным. Относительно этого узла выполняется расчет узловых потенциалов схемы.

Delete: Удаление объектов.

Duplicate: Копирование объектов. Можно копировать объекты из разных схем, если они открыты одновременно. Для вставки скопированных фрагментов во вторую схему достаточно набрать Ctrl-V.

Move: Перемещение отдельных объектов схемы.

Paste: Вставка объектов, выбранных командой копирования.

Drag: В отличие от перемещения отдельных объектов, этой командой перемещаются целые компоненты вместе с их именами и другой сопроводительной текстовой информацией. Кроме того, компоненты перемещаются вместе с проводниками, которые становятся "резиновыми нитями".

Draw команда ввода графических объектов – линий, дуг и т.д. Введенные объекты не влияют на схему и могут использоваться для оформления комментариев или примечаний к схеме. По умолчанию введенные графические объекты фиксируются в узлах сетки. Для их произвольного расположения достаточно при их позиционировании удерживать клавишу CTRL.

Draw=>Line: Рисование линий. **Draw=>Rectangle**: Рисование прямоугольников. **Draw=>Circle**: Рисование окружностей. **Draw=>Arc**: Рисование дуг.

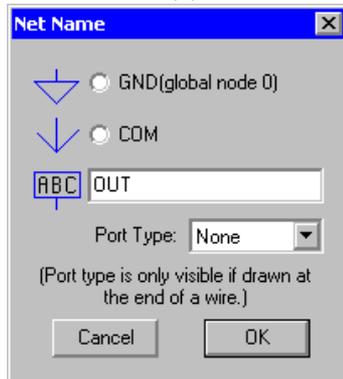
Именованние проводников

Каждый узел в схеме должен иметь уникальное имя. Имя узла может быть назначено пользователем отдельной командой. После ввода этой команды появляется окно, изображенное на рис.3а.

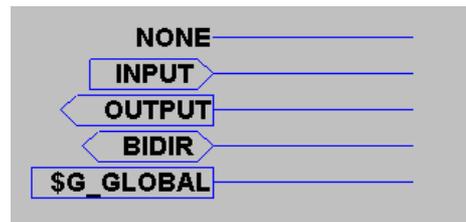
Для именованния нулевого узла, который является по умолчанию глобальным, может быть использован специальный графический символ "GND".

Есть также графический символ, определенный как узел "COM". Этот узел не имеет никакого специального значения и введен для удобства чтения схемы. Узел может быть портом ввода, вывода или двунаправленным узлом. Соответствующее графическое изображение можно выбрать на развороте **Port Type**. Эти изображения никакого влияния на список соединений не оказывают и служат также для удобства чтения схемы (рис.3б).

Если узлу дать имя, начинающееся с символов "\$G_ ", например, "\$G_VDD", то этот узел станет глобальным независимо от того, в какой подсхеме он находится.



а)



б)

Рис.3. а - окно именованния узлов; б – графические изображения портов.

Цвета схемного редактора

Командой главного меню **Tools=>Color Preferences** можно назначить цвета для объектов схемного редактора. В режиме этой команды надо кликнуть на объект и в появившемся окне использовать красные, зеленые и синие слайдеры, чтобы назначить цвет для объекта. Текстовые комментарии, атрибуты и другие объекты, связанные с компонентой, отобразятся в том же цвете, что и компонента.

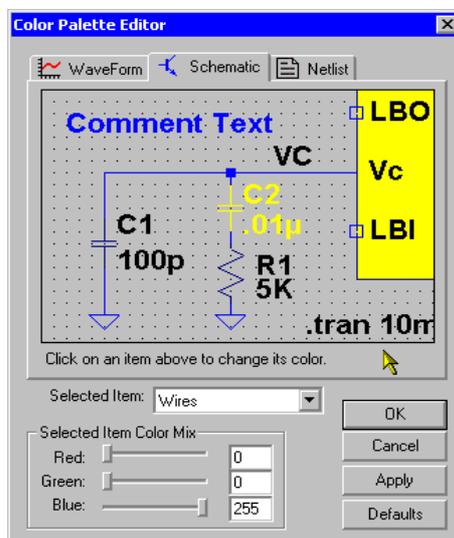


Рис.4. Окно назначения цветов для схемного редактора.

Размещение компонент.

Часто используемые компоненты – резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, могут быть выбраны кнопкой главной панели. Другие компоненты могут быть выбраны через команду главного меню **Edit=>Component**. В результате появится окно ввода, изображенное на рис.5

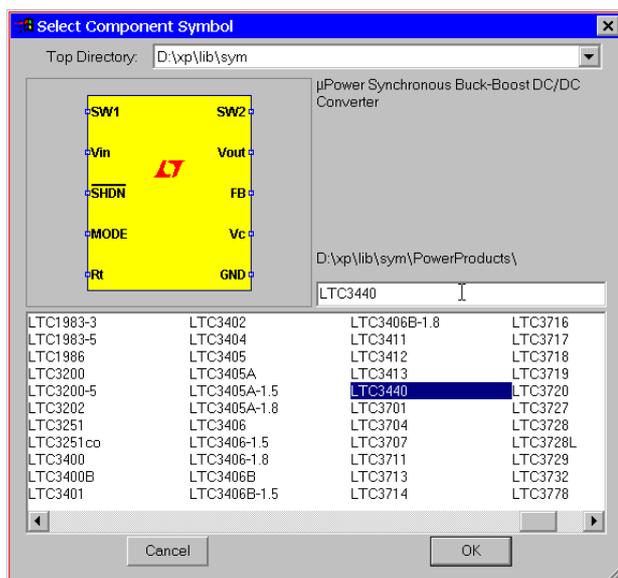


Рис.5. Окно ввода схемных компонент.

Программирование горячих клавиш

Командой главного меню **Tools=>Control Panel=>Drafting Options=>Hot Keys** можно запрограммировать клавиатуру для быстрого ввода большинства команд. После ввода команды главного меню, в появившемся окне надо щелкнуть мышью на команде и затем нажать ключевую комбинацию, которой надо закодировать эту команду. Чтобы удалить ключевую комбинацию, надо после клика мышью по команде, нажать "Delete".

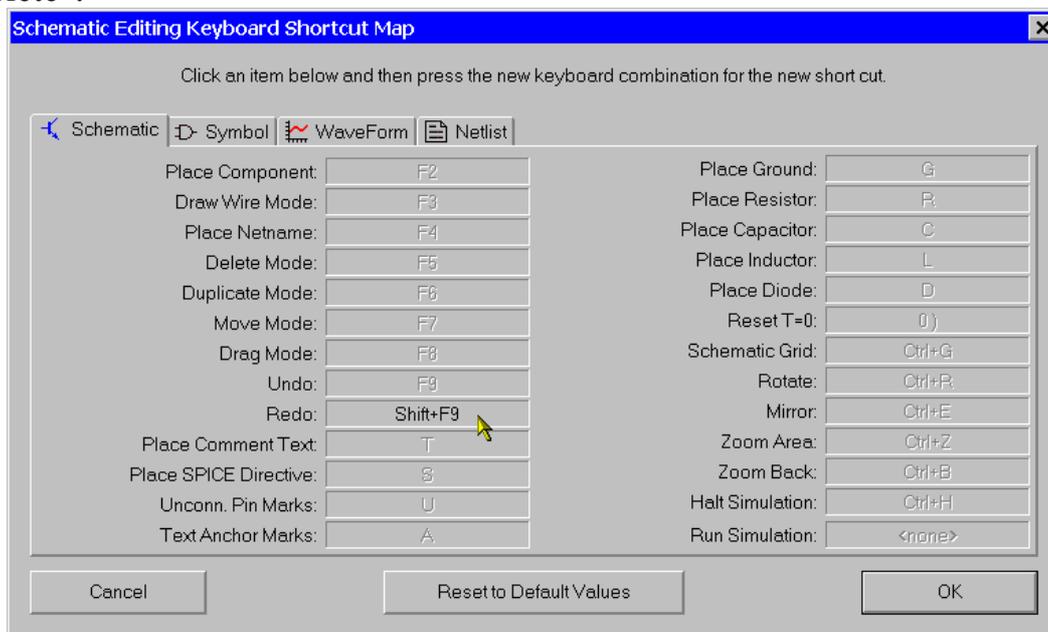


Рис.6. Программирование горячих клавиш.

Создание списка соединений для проектирования печатных плат.

Командой **Tools=>Export Netlist** создается список соединений для проектирования печатных плат. Следует обратить внимание на то, что порядок следования выводов в схемном элементе должен соответствовать порядку выводов соответствующего технологического элемента, размещаемого на печатной плате. Например, если требуется импортировать список соединений, сгенерированный в LTSpice, в систему проектирования печатных плат ExpressPCB ("http://www.expresspcb.com"), надо создать компоненты или в LTSpice, или в ExpressPCB так, чтобы порядок следования и номера выводов этих компонент совпадали в LTSpice и ExpressPCB. Иначе будет нарушена схема соединений выводов.

Доступны следующие форматы: Accel, Algorex, Allegro, Applicon Bravo, Applicon Leap, Cadnetix, Calay, Calay90, CBDS, Computervision, EE Designer, ExpressPCB, Intergraph, Mentor, Multiwire, PADS, Scicards, Tango, Telesis, Vectron, and Wire List.

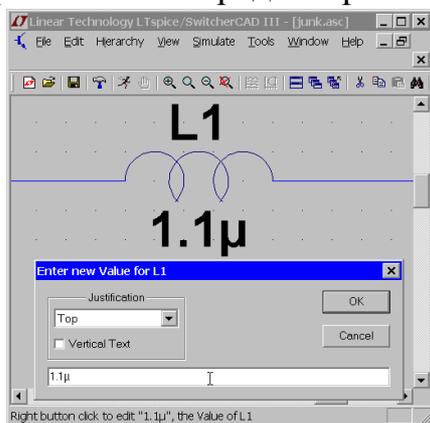
Редактирование параметров компонент

Параметры компонент могут быть отредактированы двумя или тремя различными способами, в зависимости от типа компонента:

1. Видимые на схеме параметры могут быть отредактированы, непосредственно переводом курсора на параметр и правым кликом мыши. Курсор мыши при наведении на текст превращается в текстовый символ.

2. Достаточно большое число компонент – резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, биполярные транзисторы, транзисторы MOSFET, транзисторы JFET, независимые источники напряжения, независимые источники тока, иерархические блоки схемы имеют специальные редакторы. Эти редакторы могут обратиться к соответствующей базе данных устройств. Для использования этих редакторов, надо навести курсор на саму компоненту, и кликнуть правой кнопкой мыши.

3. Поместить курсор поверх компоненты, удерживая клавишу CTRL, нажать правую кнопку мыши. Появится диалоговое окно, в котором можно отредактировать все доступные атрибуты компонента. Рядом с каждым полем можно установить флажок, чтобы указать отображение атрибута на схеме.



Редактирование видимых атрибутов

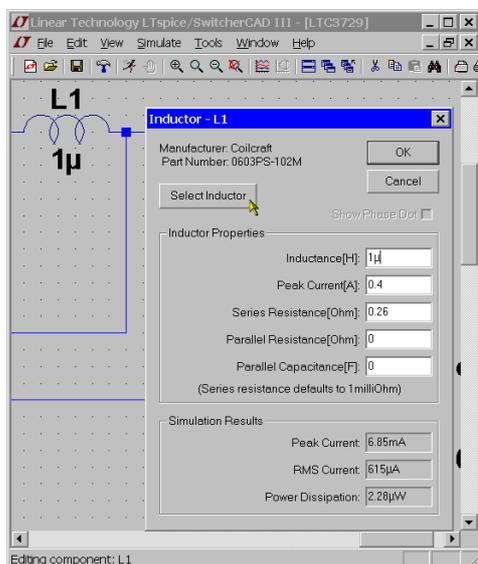
Видимые на схеме параметры компонент могут быть отредактированы, указанием курсора на параметр и правым кликом мыши. Курсор мыши при наведении на

Рис.7. Редактирование параметра индуктивности.

текст превращается в текстовый символ. Это самый удобный способ изменить значение компонента. На рис.7 приведен пример редактирования параметра индуктивности.

Специализированный редактор параметров компонент

Резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, биполярные транзисторы, транзисторы MOSFET, транзисторы JFET, независимые источники напряжения, независимые источники тока, иерархические блоки схемы имеют специальные редакторы. Для использования специального редактора, надо привести курсор на саму компоненту, и кликнуть правой кнопкой мыши.



Резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, биполярные транзисторы, транзисторы MOSFET, транзисторы JFET, независимые источники напряжения, независимые источники тока, иерархические блоки схемы имеют специальные редакторы. Для использования специального редактора, надо привести курсор на саму компоненту, и кликнуть правой кнопкой мыши.

Рис.8. Редактирование параметров индуктивности в специальном редакторе.

Общий редактор атрибутов

Иногда желательно иметь прямой доступ к каждому доступному атрибуту для редактирования его содержания и видимости на экране. Для запуска соответствующего редактора, надо поместить курсор поверх компоненты, удерживая клавишу CTRL, нажать правую кнопку мыши. Появится диалоговое окно, в котором можно отредактировать все доступные атрибуты компонента. Рядом с каждым полем можно установить флажок, чтобы указать отображение атрибута на схеме.

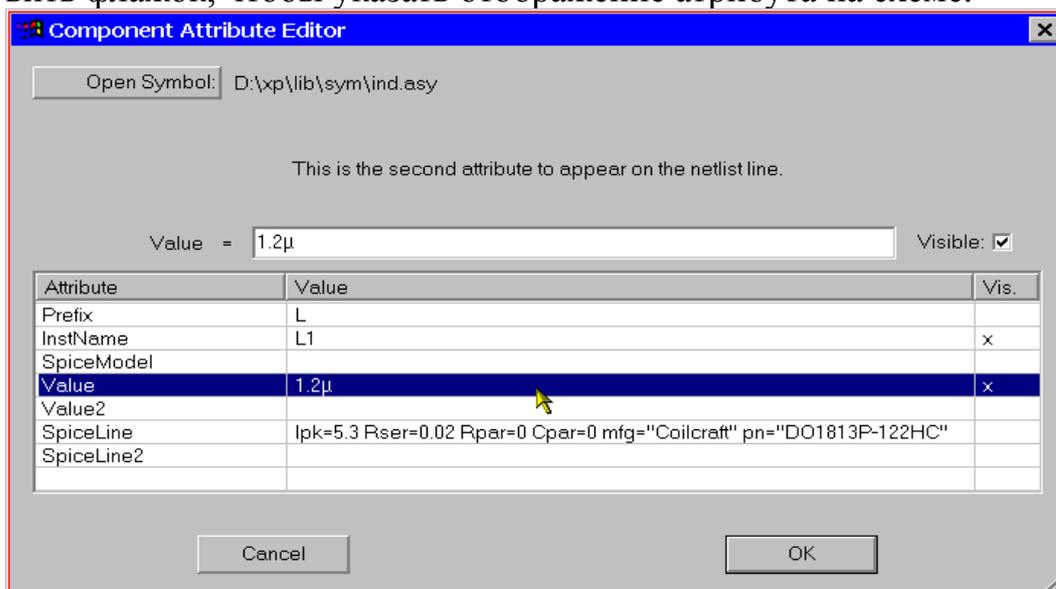


Рис.9. Редактирование параметров индуктивности в редакторе атрибутов

Атрибуты **SpiceModel**, **Value**, **Value2**, **SpiceLine**, и **SpiceLine2** – полностью определяют все значения компонента. В списке соединений, генерируется строка в SPICE-формате примерно такого содержания:

```
<name> node1 node2 [...] <SpiceModel>  
+ <Value> <Value2> <SpiceLine> <SpiceLine2>
```

Префиксный символ – это символ, по которому программа узнает тип компонента. С префиксного символа должны начинаться схемные имена (**InstName**) компонент. Но бывают случаи, когда схемное имя может начинаться с произвольного символа. Тогда в списке соединений префиксный символ и схемное имя (**InstName**) будут отделены символом '\$'. Например, если в строке префиксного атрибута **Prefix** записано "M", а в строке атрибута **InstName** записано "Q1", то в списке соединений в поле имени компонента (<name>) появится имя **M\$Q1**.

Есть три исключения к вышеупомянутому правилу.

Существует специальный символ, перемильчик, которая не транслируется в элемент схемы, в этом случае посылается директива генератору списка соединений, что есть два различных имени для одного и того же электрического узла.

Другое исключение - символ, с префиксом 'X' и атрибутами, определенными в полях **Value** и **Value2**. Такой компонент в списке соединений будет присутствовать как две SPICE-строки:

```
.lib <SpiceModel>  
<name> node1 node2 [...] <Value2>
```

В этом случае автоматически подключается библиотека, которая содержит описание подсхемы, с именем компоненты. Компилятор списка соединений удалит дубликат .lib инструкции. Следует обратить внимание на то, что такие компоненты не доступны в схемном редакторе.

Третье исключение – также символ с префиксом 'X', описание подсхемы имеется в файле с именем, которое задается атрибутом <**ModelFile**>. Такой компонент также представлен в списке соединений как две SPICE-строки:

```
.lib <ModelFile>  
<name> node1 node2 [...] <SpiceModel> <Value>  
+ <Value2> <SpiceLine> <SpiceLine2>
```

Этот метод используется в том случае, когда описание подсхемы содержится в отдельном файле и в тоже время имеется доступное для редактирования графическое изображение компонента. Символы в атрибуте **SpiceModel** - это имя подсхемы в библиотечном файле, который имеет имя <**ModelFile**>. **SpiceModel** – это еще и имя графического изображения компоненты.

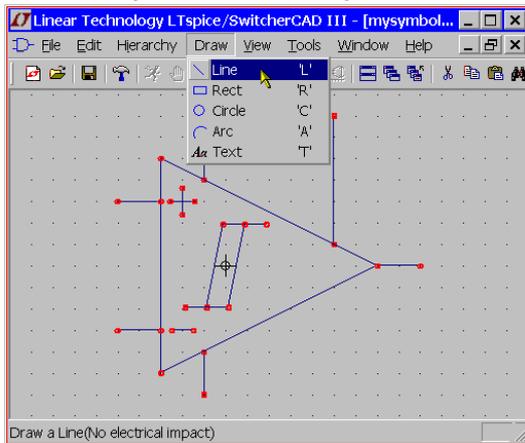
Редактирование и создание компонент

Компоненты (или символы) могут представлять собой простейшее устройство вроде резистора или конденсатора, библиотечную подсхему в отдельном файле или отдельную страницу схемы.

Создание нового символа начинается командой меню **File => New Symbol**.

Создание изображения символа

Символ создается из набора линий, прямоугольников, кругов и дуг, а также текста. Эти объекты никак не влияют на схему. Точки привязки этих объектов отмечаются маленькими красными кругами. Точки привязки нужны для удобства перемещения объектов. Их можно



включить/выключить командой **View=>Mark Object Anchors**. Окно редактора при создании символа показано на рис.10. Внимание: перемещение линий и других объектов производится на более мелкой сетке, относительно той, которая видна на экране. С помощью точек привязки можно точно установить объект в узлах видимой сетки.

Рис.10. Окно редактора символа.

Ввод контактов

Ввод контактов выполняется командой **Edit=>Add Pin/Port**. На рис.11

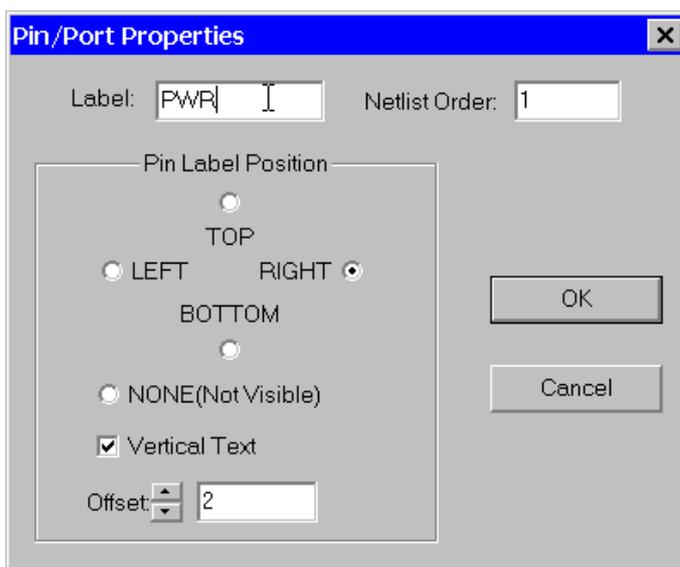


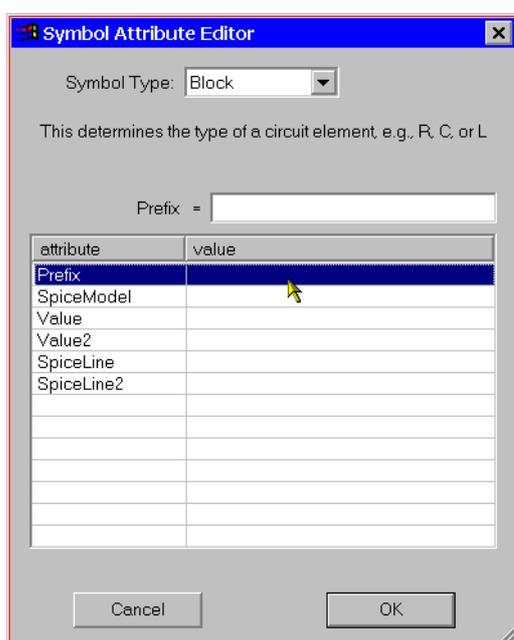
Рис.11. Окно редактирование свойств контактов.

показано окно редактирования свойств контактов. В поле **Label** указывается имя контакта. В поле **Netlist Order** указывается порядковый номер контакта в списке соединений. Часть окна, озаглавленная, "**Pin Label Position**" определяет расположение контакта относительно его имени: "сверху" ("TOP"), "снизу" ("BOTTOM"), "слева" ("LEFT") и "справа" ("RIGHT"). Например, если

отмечена радиокнопка "сверху" ("TOP"), контакт будет расположен сверху его имени. Если символ представляет примитивный SPICE элемент или библиотечную подсхему, то имя контакта может быть произвольным, здесь имеет значение его порядковый номер. В последствие, при моделировании схемы с созданным элементом, узлы элемента будут распознаны по их порядковому номеру. Если символ представляет иерархическую схему (или, что то же самое - схему замещения), то имя контакта имеет значение и должно совпадать с именем соответствующего провода схемы замещения символа.

Ввод атрибутов

Для ввода атрибутов символа, используемых по умолчанию, используется команда **Edit=>Attributes=>Edit Attributes**. Наиболее важные атри-



буты определяются префиксом – символом, с которого начинается имя элемента. Префикс определяет базовый тип символа. Если символ представляет SPICE-примитив, то символ должен иметь соответствующий префикс: R для резистора, C для конденсатора, M для MOSFET и т.д. Описание все префиксов имеется в соответствующем разделе. Если символ представляет подсхему, определенную в библиотеке, то префикс должен быть 'X'.

Рис. 12. Окно редактирования атрибутов.

Например, в базе данных имеется символ для MOSFET с префиксным атрибутом 'M', можно заменить префиксный атрибут на 'X', чтобы транзистор мог быть смоделирован не как встроенная модель, а как пользовательская подсхема.

Приведем специальную комбинацию атрибутов, которые автоматически подключат требуемую библиотеку в каждое схемное решение, где будет использован символ:

Prefix: X

SpiceModel: < имя файла с моделью >

Value: <те параметры, которые должны быть видимы на схеме >

Value2: <параметры, включаемые в список соединений >

Атрибут **Value2** служит для передачи дополнительных параметров.

Для того, чтобы символ представлял страницу иерархической схемы, для всех атрибутов надо оставить пробел, а в поле "**Symbol Type**" надо установить "**Block**".

Атрибут **ModelFile** задает имя файла, который будет включен в список соединений как библиотека. См. примеры для **.lib\sym\Opamps\1pole.asy** и **.lib\sub\1pole.sub**. Если префиксный атрибут - 'X' , то в строке **Spice-Model** определяется имя подсхемы, которая описана в библиотечном файле **ModelFile**.

Установка видимости атрибута

Атрибут можно сделать видимыми, если задать команду **Edit=>Attributes=>Attribute Window**. В появившемся диалоговом окне (рис.13) можно выбрать атрибут и затем позиционировать его на редактируемом поле. Если навести на установленный атрибут курсор и кликнуть мышью, то в появившемся окне можно изменить его текстовое выравнивание и содержание (рисю 14).

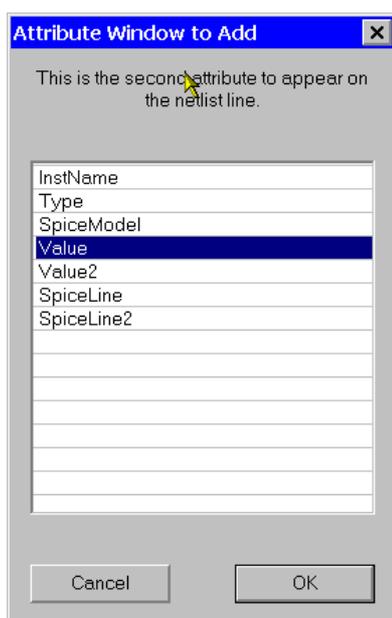


Рис.13. Окно позиционирования атрибута.

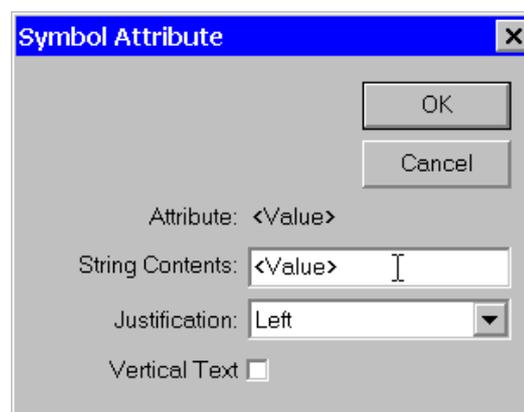


Рис.14. Окно для текстового выравнивания атрибута.

Создание иерархических схем

Большие схемы могут быть представлены как иерархические схемы с разной степенью детализации.

Правила построения иерархических схем

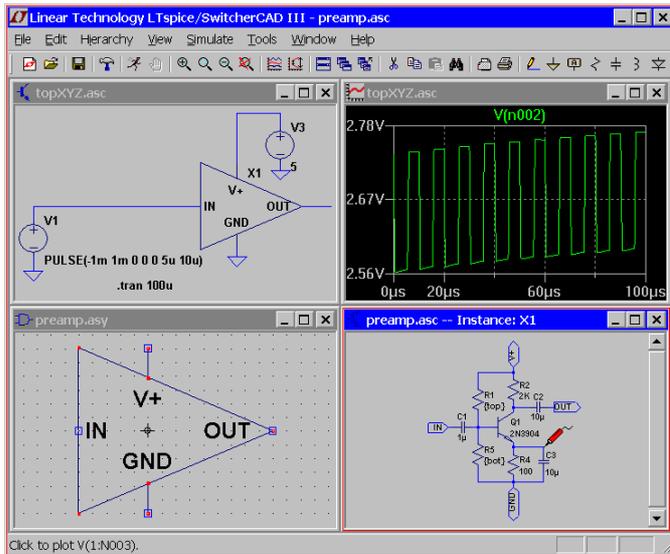


Рис.15. Создание иерархических схем.

Некоторая схема может быть представлена как блок в схеме более высокого уровня. Этот блок создается как компонента (символ) и записывается в файл с таким же именем, как и электрическая схема, которая представляет этот блок. Затем блок помещается как компонента в схему более высокого уровня. Например, если в схему topXYZ.asc включена компонента из файла preamp.asy, то схема замещения этой компоненты должна быть размещена в файле с именем preamp.asc. Электрическая связь с блока со своей схемой обеспечивается одинаковым именовании контактов блока и соответствующих проводников схемы замещения этого блока (см. рис.15).

Схема верхнего уровня, схема замещения символа и сам символ должны быть размещены в одном и том же каталоге. Созданный символ, который представляет схему низшего уровня, не должен иметь атрибутов.

Навигация по иерархической схеме

Любой файл, который открывается командой **File=>Open**, считается схемой верхнего уровня. Можно выполнить моделирование при добавлении **SPICE**-директив в любые схемы низшего уровня.

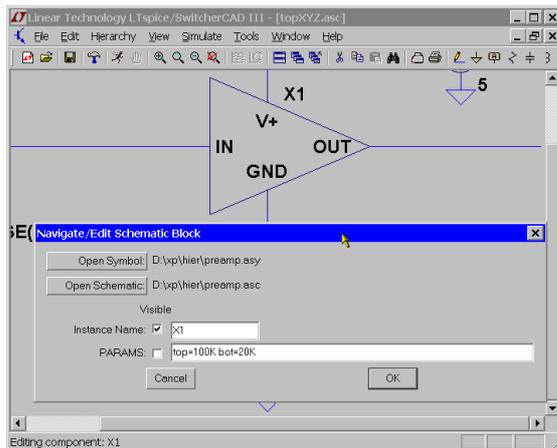


Рис.16. Окно навигации по иерархической подсхеме.

Чтобы открыть схему замещения блока, надо сначала открыть высокоуровневую схему и затем, поместив курсор на символ блока, дважды кликнуть левой кнопкой мыши. Либо, после наведения курсора на сим-

вол, кликнуть правой кнопкой мыши. Тогда появится окно, показанное на рис.16, в этом окне можно открыть схему замещения, а так же ввести параметры ее элементов.

Для того, чтобы отобразить напряжения и токи в подсхемах, надо в панели управления (**Simulate=>Control Panel**) на закладке **Save Defaults** отметить опции "**Save Subcircuit Node Voltages**" и "**Save Subcircuit Device Currents**". При подсвечивании узла на схеме верхнего уровня, этот же узел будет подсвечен на схеме более низкого уровня.

Краткий обзор LTspice

LTSpice может использоваться как универсальная SPICE-программа. Проектирование схем выполняется во встроенном схемном редакторе. Команды моделирования и параметры размещаются в текстовом формате на схеме, используя стандартный SPICE-синтаксис. Отображение графиков может быть выполнено щелчком мыши на узлах схемы в течение или после моделирования.

Описание схемы

Состав схемы определяется текстом списка соединений. Список соединений состоит из списка элементов схемы и их узлов, описаний моделей, и других SPICE-команд.

Список соединений обычно вводится в виде графического изображения схемы. Для загрузки схемы надо в меню задать команду **File=>Open**. Появится окно просмотра файлов. Далее можно выбрать существующую схему и сохранить ее под новым именем или напечатать новое имя, чтобы создать пустой схемный файл. LTspice использует много различных типов файлов и документов. Для схемных файлов необходимо расширение ".asc". Команды схемного редактора находятся в меню **Edit**. Горячая клавиатура для команд перечислена в разделе **Схемный редактор/программирование горячих клавиш**.

При моделировании схемы, из графической информации, представленной в схемном редакторе, извлекается список соединений и размещается в файл с тем же именем, но расширением ".net". Далее LTspice читает и обрабатывает этот файл.

Можно также открыть и отредактировать сгенерированный в LTspice текст списка соединений. Вместе с тем, этот текст можно составить вручную или сгенерировать любой другой внешней программой. Файлы с расширениями ".net", ".cir" или ".sp" LTspice распознает как список соединений. То есть вместо файла с графической схемой можно открыть соответствующий файл со списком соединений и выполнить моделирование.

Внешние списки соединений

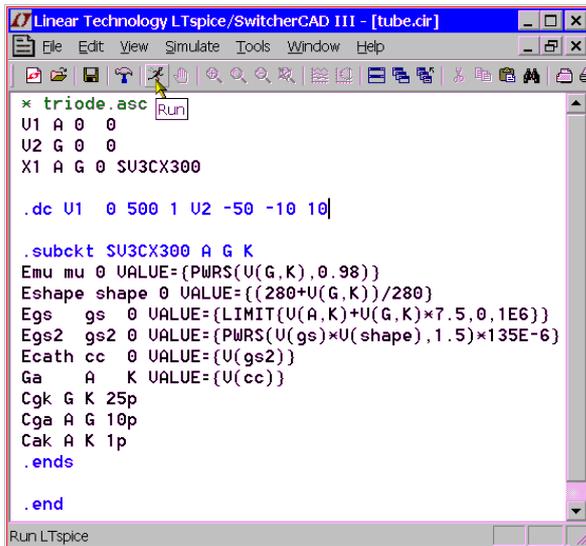


Рис.17. Текстовый редактор списка соединений.

Можно открыть список соединений созданный или вручную, или другими схемными редакторами. Встроенный редактор ASCII поддерживает неограниченный размер файла, и неограниченное число undo/redo. Может использоваться команда меню **Tools=>Color Preferences** для регулировки цветов, используемых во встроенном редакторе ASCII.

Общая структура и соглашения

Анализируемая схема описывается текстовым файлом, носящим название список соединений. Первая строка в списке соединений игнорируется и ее, как правило, используют как комментарий. Последняя строка списка соединений - обычно просто строка ".END", но она может быть в LTSpice опущена. Любые строки после строки ".END" игнорируются.

Порядок строк в списке соединений между первой строкой и последней может быть произвольным. Строками могут быть комментарии, объявления элемента схемы или директивы моделирования. Пример:

* Эта первая строка игнорируется

* Схема ниже представляет R-C схему, на которую поступают

* импульсы частотой 1MHz

R1 n1 n2 1K ; резистор 1 кОм расположен между узлами n1 и n2

C1 n2 0 100p ; емкость 100пФ расположена между узлом n2 и землей

V1 n1 0 PULSE(0 1 0 0 0 .5μ 1μ) ;импульсный источник частотой 1МГц

.tran 3μ ; длительность переходного процесса 3μс

.end

Первые две строки - комментарии. Любая строка, начинающаяся с "*" является комментарием и игнорируется. Строка, начинающаяся с "R1" объявляет, что резистор 1 кОм, расположен между узлами n1 и n2. Обратите внимание, что точка с запятой ";" используется для размещения комментария в середине строки. Строка, начинающаяся с "C1" объявляет, что конденсатор 100пФ расположен между узлами n2 и землей. Узел "0" – это глобальный общий провод схемы ("земля").

Ниже приводится краткий обзор словаря LTspice:

- регистр, первые пробелы, пустые строки и позиции табуляции игнорируются.

- первый знак строки (кроме пробела) определяет тип строки.

1-й символ - тип строки

* (звездочка) комментарий

A – Z элемент схемы, например, "R" для резистора, "C" для конденсатора, "L" для катушки индуктивности, и так далее. Каждый элемент в схеме определен по имени, по узлам схемы, с которыми элемент связан и значения параметров, которые определяют электрические характеристики элемента. Первый символ имени элемента определяет тип элемента. Следовательно, R, R1, RSE, ROUT и R3AC2ZY - допустимые имена резистора. Имена элемента должны быть уникальны; например, может только быть один R1 в схеме. Электрическое поведение некоторых элементов может быть определено моделью.

. (точка) Директива моделирования, например: .options reltol=1e-4

+ (плюс) Продолжение предыдущей строки.

Числа могут быть выражены не только в экспоненциальном формате, например, 1e12, но также и с техническими множителями. То есть числа 1000.0 или 1e3 могут также быть написаны как 1K. Ниже приводится таблица допустимых множителей:

T - 1e12; G - 1e9; Meg - 1e6; K - 1e3; Mil - 25.4e-6; M - 1e-3

u (или μ) - 1e-6; n - 1e-9; p - 1e-12; f - 1e-15.

Не распознанные символы расположенные сразу после номера или технического множителя игнорируются. Следовательно, 10, 10V, 10Volts и 10Hz все представляют то же самое число. M, MA, MSec и MMhos - все представляют тот же самый масштабный коэффициент (1e-3). Часто ошибочно резистор вводится со значением 1M, предполагая номинал в один мегаОм, однако 1M интерпретируется в LTSpice как один миллиОм. Это правило используется для совместимости со стандартом SPICE.

LTspice понимает числа, написанные в форме 6K34, для обозначения 6.34к. Такое правило применимо для любого из множителей, описанных выше. Правило может быть выключено командой **Tools=>Control Panel=>SPICE**, сняв отметку "**Accept 3K4 as 3.4K**".

Имена узлов могут быть произвольными символьными строками. Глобальный общий узел имеет по умолчанию имя "0" или "GND". Обратите внимание, так как узлы - символьные строки, то "0" и "00" - разные узлы.

Всюду далее угловые скобки применяются для полей данных, которые должны быть обязательно заполнены определенной информацией, например, "<srcname>" имя некоторого определенного источника. Квадратные скобки указывают, что включенное поле данных является дополнительным.

Краткий справочник по схемным компонентам

Компонента	Синтаксис
специальная функция	Axx n1 n2 n3 n4 n5 n6 n7 n8 <model> [внешние параметры]
произвольный функциональный источник	Vxx n+ n- <V=... или I=...>
емкость	Cxx n+ n- <емкость> [ic=<val.>] [Rser=<val.>] +[Lser=<val.>] [Rpar=<val.>] [Cpar=<val.>] +[m=<val.>]
диод	Dxx A K <модель> [area]
источник напряжения, управляемый напряжением	Exx n+ n- nc+ nc- <коэфф.усиления>
источник тока, управляемый током	Fxx n+ n- <Vnam> <коэфф.усиления>
источник тока, управляемый напряжением	Gxx n+ n- nc+ nc- <коэфф.передачи>
источник напряжения, управляемый током	Hxx n+ n- <Vnam> <коэфф.передачи.>
независимый источник тока	Ixx n+ n- <ток>
JFET транзистор	Jxx D G S <модель> [area] [off] +[IC=<Vds,Vgs>] [temp=<T>]
взаимная индуктивность	Kxx L1 L2 <coeff.>
индуктивность	Lxx n+ n- <индуктивность> [ic=<val.>] [Rser=<val.>] + [Rpar=<val.>] [Cpar=<val.>] [m=<val.>]
MOSFET транзистор	Mxx D G S B <модель> [L=<len>] [W=<width>] +[AD=<area>] [AS=<area>] [PD=<perim>] +[PS=<perim>] +[NRD=<value>] [NRS=<value>] +[off] +[IC=<Vds, Vgs, Vbs>] + [temp=<T>]
линия передачи с потерями	Oxx L+ L- R+ R- < модель >
биполярный транзистор	Qxx C B E [S] < модель > [area] + [off] [IC=Vbe,Vce][temp=<T>]
резистор	Rxx n1 n2 <value>
ключ, управляемый напряжением	Sxx n1 n2 nc+ nc- < модель > [on,off]
линия передачи без потерь	Txx L+ L- R+ R- ZO=<value> TD=<value>
RC-линия	Uxx n1 n2 ncommon <модель> +L=<len> [N=<lumps>]
независимый источник напряжения	Vxx n+ n- <напряжение>
ключ, управляемый током	Wxx n1 n2 <Vnam> <model> [on,off]
подсхема	Xxx n1 n2 n3... <имя подсхемы>
MESFET транзистор	Zxx D G S <модель> [area] [off] [IC=<Vds,Vgs>]

Описание схемных компонент.

1.

А. Специальные Функции

Символьные имена:

INV, BUF, AND, OR, XOR,
SCHMITT, SCHMTBUF, SCHMTINV, DFLOP,
VARISTOR, и MODULATE

Синтаксис:

Annn n001 n002 n003 n004 n005 n006 n007 n008 <модель> [параметры]

Функциональные элементы для моделирования аналого-цифровых устройств. Являются частной разработкой Linear Technology Corporation's. Для большинства из них нет полного описания, так как они часто изменяются с каждым новым набором моделей, доступных в LTspice. Описание имеется для наиболее общеупотребительных элементов.

INV, BUF, AND, OR, и XOR - универсальные идеализированные логические элементы. Все элементы имеют восемь контактов, не требуют питания. Контакты 1 – 5 считаются входными, контакты 6 и 7 - выходы, контакт 8 – общий узел. Неиспользованные входы и выходы распознаются компилятором LTSpice и удаляются из моделирования.

Входы и выходы логических элементов могут быть соединены с аналоговыми элементами или выводами логических элементов. Для расчета токов и напряжений должны быть заданы соответствующие параметры логических элементов. 8-й контакт логического элемента используется для его включения в электрическую схему, если этот контакт оставить свободным, то он автоматически будет соединен с общим узлом электрической схемы.

По умолчанию считается, что логическому нулю соответствует 0 Вольт, а логической единице соответствует 1В. Порог перехода от логического нуля к логической единице соответствует 0,5В. Входное и выходное сопротивление элемента равно 1Ом. Задержка сигнала отсутствует. Параметры элементов приведены ниже в таблице.

Обратите внимание на то, что не все параметры могут быть определены одновременно, например, характеристики выхода задаются или длительностью фронтов или RC постоянной времени, но не обоими.

По умолчанию задержка распространения равна нулю или устанавливается параметром Td. Задержка по входу равна задержке распространения.

Входные логические пороговые значения по умолчанию вычисляются по формуле $0,5 \cdot (V_{high} + V_{low})$, но могут быть установлены с параметром Ref. Время задержки равно задержке распространения.

параметр	по умолчанию	значение
Vhigh	1V	логический высокий уровень
Vlow	0V	логический низкий уровень
Ihigh	1A	ток при высоком логическом уровне
Ilow	0A	ток при низком логическом уровне
Trise	0	длительность переднего фронта
Tfall	Trise	длительность заднего фронта
Tau	0	выходная RC-постоянная времени
Cout	0	выходная емкость
Rout	1	выходное сопротивление
Rhigh	Rout	Выходное сопротивление высокого логического уровня
Rlow	Rout	Выходное сопротивление низкого логического уровня

Триггер Шмитта имеет характеристики аналогичные рассмотренным. Напряжения переключения определяются параметрами V_t и V_h . Низкий уровень переключения $V_t - V_h$, высокий уровень $V_t + V_h$.

VARISTOR – управляемый напряжением варистор. Его напряжение пробоя устанавливается напряжением между контактами 1 и 2. Аварийный импеданс определяется параметром `rclamp`. См. схемное решение в файле `\examples\Educational\varistor.asc`.

MODULATE - управляемый напряжением осциллятор (генератор синусоидального напряжения). См. схемный пример `\examples\Educational\PLL.asc`. Мгновенная частота колебаний устанавливается напряжением на входе FM. Преобразование напряжение-частота линейно и устанавливается двумя параметрами - `mark` и `space`. Параметр `mark` - частота, когда на входе FM 1В, параметр `space` устанавливает частоту, когда на входе FM 0В. Амплитуда устанавливается напряжением на входе AM, если этот вход не используется, то по умолчанию устанавливается амплитуда 1В.

В. Функциональный источник напряжения или источник тока.

Имена: BV, BI, BI2

Синтаксис:

для источника напряжения

```
Bnnn n001 n002 V=<выражение> [ic=<значение>]
+ [tripdv=< значение >] [tripdt=< значение >]
+ [laplace=<выражение> [window=<time>]
+ [nfft=<число>] [mtol=<число>]]
```

для источника тока:

Bnnn n001 n002 I=<выражение> [ic=< значение >]
+ [tripdv=< значение >] [tripdt=< значение >] [Rpar=< значение >]
+ [laplace=< выражение > [window=<time>]
+ [nfft=< число >] [mtol=< число >]]

<выражение> - функциональное выражение.

tripdv и **tripdt** определяют шаг изменения сигнала источника. Если, например, напряжение меняется больше чем на **tripdv** вольт за **tripdt** секунд, тот временной шаг моделирования игнорируется.

Для источника тока, параллельное сопротивление может быть определено параметром Rpar.

Приведенные ниже в таблице операции сгруппированы в обратном порядке старшинства вычисления:

&	преобразование операнда к Булевской переменной и выполнение операции И
	преобразование операнда или выражения к Булевской переменной и выполнение операции ИЛИ
^	преобразование операнда или выражения к Булевской переменной и выполнение операции исключающее ИЛИ
<	истина, если выражение слева - меньше чем выражение справа, иначе ложь
>	истина, если выражение слева больше чем выражение справа, иначе ложь
<=	истина, если выражение слева меньше чем или равно выражение справа, иначе ложь
>=	истина, если выражение слева больше чем или равно выражение справа, иначе ложь
+	сложение с плавающей запятой
-	вычитание с плавающей запятой
*	умножение с плавающей запятой
/	деление с плавающей запятой
**	возведение в степень
!	преобразование выражения к Булевской переменной и инвертирование
@	оператор выбора шага

К току или напряжению можно применить преобразование Лапласа, которое задается как функция переменной *s*. В этом случае оператор "^" распознается как возведение в степень "**". Поведение во временной области определяется импульсной передаточной функцией, найденной Фурье-преобразованием отклика в частотной области. LTspice автоматически определяет соответствующий диапазон частот и разрешающую способность. Можно эти значения откорректировать, явно устанавливая параметры nfft и window. Обратная величина значения window - разрешающая способность по частоте. Значение nfft – наибольшее значение частоты.

Доступные математические функции приведены в следующей таблице.

abs(x)	абсолютное значение
acos(x)	арккосинус x
acosh(x)	гиперболический арккосинус
asin(x)	арксинус
asinh(x)	гиперболический арксинус
atan(x)	арктангенс
atan2(y, x)	четырёхквadrантный арктангенс y/x
atanh(x)	гиперболический арктангенс
cos(x)	косинус
cosh(x)	гиперболический косинус
exp(x)	экспонента
ln(x)	натуральный логарифм
log(x)	натуральный логарифм
log10(x)	десятичный логарифм
sgn(x)	знак
sin(x)	синус
sinh(x)	гиперболический синус
sqrt(x)	квадратный корень
tan(x)	тангенс
tanh(x)	гиперболический тангенс
u(x)	1 если $x > 0$., иначе 0.
buf(x)	1 при $x > .5$, иначе 0
inv(x)	0 при $x > .5$, иначе 1
uramp(x)	x если $x > 0$., иначе 0.
!(x)	альтернативный синтаксис для inv(x)
int(x)	преобразование x к целому числу
floor(x)	целое число равное или меньше чем x
ceil(x)	целое число равное или больше чем x
rand(x)	случайное число между 0 и 1 в зависимости от целочисленного значения x
random(x)	подобно rand(), но с гладкими переходами между значениями.
min(x,y)	наименьшее из x и y
max(x,y)	наибольшее из x или y
limit(x,y,z)	эквивалентно min(max(x,y),z)
if(x,y,z)	если $x > .5$, то y иначе z
table(x,a,b,c,d,...)	интерполяция значений для x, основанная на просмотре таблицы, заданной как набор пар точек.

Для комплексных чисел функции **atan2()**, **sgn()**, **u()**, **buf()**, **inv()**, **uramp()**, **int()**, **floor()**, **ceil()**, **rand()**, **min()**, **limit()**, **if()**, и **table(...)** не доступны. Функции **Re(x)** и **Im(x)** возвращают вещественную и мнимую часть комплексного числа. Функции **Ph(x)** и **Mag(x)** возвращают фазу и амплитуду комплексного числа.

Истина в цифровой форме равна 1, и Ложь - 0. Преобразование к Булевой переменной конвертирует значение к 1, если значение больше чем 0.5, иначе значение преобразуется в 0.

Для комплексных чисел доступны только +, -, *, /, **. Для комплексных чисел Булев оператор XOR (^), означает возведение в степень **.

Имеются следующие встроенные константы:
 $e=2.7182818284590452354$; $\pi=3.141592653589793238464$;
 $k=1.3806503e-23$; $q=1.602176462e-19$.

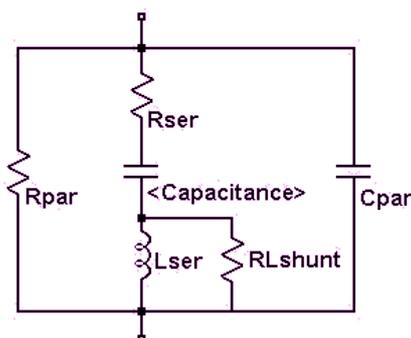
С. Конденсатор

Символьное имя: CAP, POLCAP

Синтаксис:

```
Cnnn n1 n2 <capacitance> [ic=<value>]
+ [Rser=<value>] [Lser=<value>] [Rpar=<value>]
+ [Cpar=<value>] [m=<value>]
+ [RLshunt=<value>]
```

Возможно задание последовательного эквивалентного сопротивления, последовательной индуктивности, параллельного сопротивления и параллельной внутренней емкости. Эквивалентная схема приведена ниже:



Установочные параметры емкости приведены ниже в таблице.

Таблица

имя	параметр
Rser	эквивалентное последовательное сопротивление
Lser	эквивалентная последовательная индуктивность
Rpar	эквивалентное параллельное сопротивление
Cpar	эквивалентная параллельная емкость
RLshunt	сопротивление шунта, параллельного Lser
m	число параллельных модулей
ic	начальное напряжение (используется, только если uic помечен на .tran закладке)

Если требуется учитывать паразитные параметры емкости, то лучше их задать в виде параметров Rpar, Rser, RLshunt, Cpar и Lser, чем явно

вычерчивать их на схеме. LTspice применяет специальную технологию расчета емкости без использования внутренних узлов. Это делает матрицу моделирования меньшей, позволяет ее быстрее вычислить и снижает вероятность превращения ее в сингулярную матрицу при малых шагах времени.

Обратите внимание на то что, паразитные параметры могут быть использованы для макромоделирования пьезокристаллов.

Нелинейный конденсатор можно определить через задание выражения для некоторой функции. LTspice компилирует это выражение и символически дифференцирует его относительно всех переменных, находя частную производную, которая соответствует емкости:

Синтаксис:

```
Cn1 n1 n2 Q=<Выражение> [ic=<величина>] [m=<величина>]
```

В выражении используется специальная переменная x , которая соответствует напряжению на емкости. Поэтому, например, постоянная емкость 100pF может быть описана так:

```
Cn1 n1 n2 Q=100p*x
```

Емкость со скачкообразным изменением от 100p до 300p при нулевом напряжении может быть описана так:

```
Cn1 n1 n2 Q=x*if(x<0,100p,300p)
```

Такая форма описания полезна, для быстрой оценки новых макромоделей нагрузки, например для транзисторов.

D. Диод

Символьные имена: DIODE, ZENER, SCHOTTKY, VARACTOR.

Синтаксис:

```
Dn1 anode cathode <модель> [area]  
+ [off] [m=<val>] [temp=<value>]
```

Примеры:

```
D1 SW OUT MyIdealDiode  
.model MyIdealDiode D(Ron=.1 Roff=1Meg Vfwd=.4)
```

```
D2 SW OUT dio2  
.model dio2 D(Is=1e-10)
```

Параметры диода задаются в директиве .model. Допустимы две разновидности описания диода.

В первой используется кусочно-линейная модель проводимости диода, приводящая к минимальным вычислительным затратам. Эта модель имеет три основных участка: открытого состояния диода, закрытого и обрат-

ного пробоя. Область прямой проводимости и обратного пробоя ограничиваются предельными токами I_{limit} и $revI_{limit}$ соответственно. Наклон вольтамперных характеристик участков прямой, обратной проводимости и обратного пробоя определяется сопротивлениями R_{on} , R_{off} и R_{rev} соответственно. Переход к области прямой проводимости задается напряжением V_{fwd} , переход к области пробоя задается напряжением V_{rev} . Параметры ϵ и $rev\epsilon$ определяют плавность перехода от одного участка к другому (для этого применяется квадратичная функция). Эти параметры задают ширину переходного участка в Вольтах.

Ниже приводится описание параметров кусочно-линейной модели диода в формате:

имя параметра - описание - [единица измерения] - значение по умолчанию.

R_{on} - сопротивление прямой проводимости [Ом] 1,
 R_{off} - сопротивление обратной проводимости [Ом] $1/g_{min}$,
 V_{fwd} - напряжение перехода к прямой проводимости [В] 0,
 V_{rev} - напряжение пробоя [В] $infin$ (бесконечность),
 R_{rev} - сопротивление в области пробоя [Ом] R_{on} ,
 I_{limit} - предельный ток области прямой проводимости [А] $infin$,
 $Revilimit$ - предельный обратный ток [А] $infin$
 ϵ - ширина плавности перехода к прямой проводимости [В] 0,
 $Revepsilon$ - ширина плавности перехода к пробояю [В] 0.

Во второй модели применяется стандартное описание диода, принятое в SPICE-программах. Такие модели применяются при детальном анализе аварийных режимов и вычислении тока рекомбинации. Параметр [area] задает число параллельных диодных ветвей.

Ниже приводится описание параметров SPICE-модели диода в формате:

имя параметра - описание - [единица измерения] - значение по умолчанию.

IS - Ток насыщения перехода [А] $1e-14$,
RS - Омическое сопротивление [Ом] 0,
N - Коэффициент эмиссии [] 1,
TT - Время пролета неосновных носителей [сек] 0,
CJO - Емкость перехода диода при нулевом смещении [Ф] 0,
VJ - Встроенный потенциал перехода [В] 1,
M - Коэффициент качества перехода [] 0.5,
EG - Энергетический барьер (ширина запрещенной зоны)- [эВ/V]
1.11(Si), 0.69 (Sbd), 0.67 (Ge)
XTI - Температурный коэфф.IS [] 3.0,
KF - Коэфф. фликкер-шума [] 0,
AF - Показатель фликкер-шума [] 1,
FC - Коэфф. емкости прямосмещенного перехода [] 0.5,

BV - Напряжение пробоя(обр.) [В] infin(бесконечность),
IBV- Ток насыщения при пробое диода обратн. напряжением [А] 1e-10.

Е. Источник напряжения управляемый напряжением (ИНУН)

Символьные имена: E, E2

Применяют три типа зависимых источника напряжения.

Синтаксис: Exxx n+ n- nc+ nc- <коэффициент передачи>

Здесь напряжение между узлами n+ и n- зависит от входного напряжения между узлами nc+ и nc-. Это – линейно-зависимый источник с постоянным коэффициентом передачи.

Синтаксис :

Exxx n+ n- nc+ nc- table=(< пара значений>, < пара значений >, ...)

Здесь таблица используется, чтобы определить функциональный коэффициент передачи. Таблица - список пар чисел. Второе значение пары - напряжение выхода, когда напряжение управления равно первому значению этой пары. Выход линейно интерполируется, когда напряжение управления попадает между указанными точками. Если напряжение управления оказывается вне диапазона таблицы, выходное напряжение экстраполируется как постоянное напряжение крайней точки таблицы.

Синтаксис:

Exxx n+ n- nc+ nc- Laplace=<func(s)>
+ [window=<время>] [nfft=<число>] [mtol=<число>]

Передаточная функция этого элемента схемы определена преобразованием Лапласа. Преобразование Лапласа должно быть функцией переменной s. Оператор "^" распознается как возведение в степень "***" при использовании выражений с преобразованием Лапласа. При частотном анализе s заменяется на j. Поведение во временной области определяется импульсной передаточной функцией, найденной Фурье-преобразованием отклика в частотной области. LTspice автоматически определяет соответствующий диапазон частот и разрешающую способность. Можно эти значения откорректировать, явно устанавливая параметры nfft и window. Обратная величина значения window - разрешающая способность по частоте. Значение nfft – наибольшее значение частоты.

Синтаксис:

Exxx n+ n- value={<выражение>}

Это - альтернативный синтаксис описания источника с произвольной функцией изменения напряжения.

Синтаксис:

Fxxx n+ n- POLY(<N>) <(node1+,node1-) (node2+,node2-)
+ ... (nodeN+,nodeN-)> <c0 c1 c2 c3 c4 ...>

Это - архаичное средство описания источника с произвольной функцией, заданной полиномом.

Обратите внимание: рекомендуется использовать эквивалентный источник тока, управляемый напряжением (ИТУН) G, шунтируемый сопротивлением вместо ИНУН. ИТУН с шунтируемым сопротивлением, требует меньше вычислительных затрат, чем ИНУН. Кроме того, выходное сопротивление, отличное от нуля ближе к практическим схемам.

Ф. Источник тока, управляемый током (ИТУТ)

Символьное имя: F

Синтаксис:

Fxxx n+ n- <Vnam> <коэффициент передачи>

Этот элемент схемы прикладывает ток к узлам n+ и n-. Прикладываемый ток равен значению усиленного тока через источник напряжения, обозначенный как <Vnam>.

Синтаксис:

Fxxx n+ n- value={<выражение>}

Это - альтернативный синтаксис описания источника с произвольной функцией изменения коэффициента передачи.

Синтаксис:

Fxxx n+ n- POLY(<N>) <V1 V2 ... VN> <c0 c1 c2 c3 c4 ...>

Это - архаичное средство описания источника с произвольной функцией, заданной полиномом.

Г. Источник тока, управляемый напряжением (ИТУН)

Символьные имена: G, G2

Применяют три типа ИНУТ.

Синтаксис:

Gxxx n+ n- nc+ nc- <коэффициент передачи>

Этот элемент задает ток между узлами n+ и n-, который зависит от входного напряжения между узлами nc+ и nc-. Этим способом описывается линейно-зависимый источник с постоянным коэффициентом передачи.

Синтаксис:

Gxxx n+ n- nc+ nc- table=(<два значения>, < два значения >, ...)

Здесь таблица используется для функционального задания коэффициента передачи. Таблица представляет собой список пар чисел. Второе значение пары – выходной ток при напряжении управления равном первому значению этой пары. Выход линейно интерполируется, когда напряжение управления попадает между указанными точками. Если напряжение управления оказывается вне диапазона таблицы, выходной ток экстраполируется как постоянный ток крайней точки таблицы.

Синтаксис:

Gxxx n+ n- nc+ nc- Laplace=<func(s)>
+ [window=<время>] [nfft=<число>] [mtol=<число>]

Передаточная функция этого элемента схемы определена преобразованием Лапласа. Преобразование Лапласа должно быть функцией переменной *s*. При использовании выражений с преобразованием Лапласа оператор "^" распознается как возведение в степень "***". При частотном анализе *s* заменяется на *ω*. Поведение во временной области определяется импульсной передаточной функцией, найденной Фурье-преобразованием отклика в частотной области. LTspice автоматически определяет соответствующий диапазон частот и разрешающую способность. Можно эти значения откорректировать, явно устанавливая параметры nfft и window. Обратная величина значения window - разрешающая способность по частоте. Значение nfft – наибольшее значение частоты.

Синтаксис:

Gxxx n+ n- value={<expression>}

Это - альтернативный синтаксис описания источника с произвольной функцией изменения коэффициента передачи.

Синтаксис:

Gxxx n+ n- POLY(<N>) <(node1+,node1-) (node2+,node2-)>

+ ... (nodeN+,nodeN-)> <c0 c1 c2 c3 c4 ...>

Это - архаичное средство описания источника с произвольной функцией, заданной полиномом.

Н. Источник напряжения, управляемый током (ИНУТ)

Символьное имя: Н

Синтаксис:

Нxxx n+ n- <Vnam> <коэффициент передачи>

Этот элемент прикладывает напряжение между узлами n + и n-. Прикладываемое напряжение равно значению тока через источник напряжения с именем <Vnam>, умноженного на коэффициент передачи.

Синтаксис:

Нxxx n+ n- value={<выражение>}

Это - альтернативный синтаксис описания источника с произвольной функцией изменения коэффициента передачи.

Синтаксис:

Нxxx n+ n- POLY(<N>) <V1 V2 ... V3> <c0 c1 c2 c3 c4 ...>

Это - архаичное средство описания источника с произвольной функцией, заданной полиномом.

I. Источник тока

Символьное имя: CURRENT

Синтаксис:

Ixxx n+ n- <current> [AC=<amplitude>] [load]

Это источник постоянного тока между узлами n+ и n-. Если источник помечен как load, то источник неидеальный, то есть при уменьшении напряжения до нуля и переходе в отрицательную область, ток также падает до нуля. Такой вариант предназначен для моделирования источника питания для тех случаев, когда его мощности не хватает для поддержания постоянства тока при режимах, близких к короткому замыканию. Для частотного анализа AC, значение AC используется как амплитуда источника.

импульсный источник тока

Синтаксис:

Ixxx n+ n- PULSE (Ioff Ion Tdelay Trise Tfall Ton Tperiod Ncycles)

Параметры источника описаны в таблице.

имя	параметр	единица измерения
Ioff	начальная величина	А
Ion	величина импульса	А
Tdelay	задержка	с
Tr	время нарастания	с
Tf	время спадания	с
Ton	время включения	с
Tperiod	период	с
Ncycles	число волновых циклов циклы	--

Зависимый от времени синусоидальный источник тока:

Синтаксис:

Ixxx n+ n- SINE(Ioffset Iamp Freq Td Theta Phi Ncycles)

Параметры описаны в таблице.

имя	параметр	единица измерения
Ioffset	смещение по пост току	А
Iamp	амплитуда	А
Freq	частота	Гц
Td	задержка	с
Theta	коэффициент затухания	1/с
Phi	фаза	градусы
Ncycles	число циклов	число

Для моментов времени меньших, чем Td или после завершения Ncycles, ток вычисляется по формуле:

$I_{offset} + I_{amp} \cdot \sin(\pi \cdot \phi/180)$.

Иначе ток определяется формулой

$I_{offset} + I_{amp} \cdot \exp(-(\text{time}-T_d) \cdot \Theta) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \text{Freq} \cdot (\text{time}-T_d) + \pi \cdot \phi/180)$

Зависимый от времени экспоненциальный источник тока:

Синтаксис:

Ixxx n+ n- Ixxx n+ n- EXP(I1 I2 Td1 Tau1 Td2 Tau2)

Параметры описаны в таблице.

имя	параметр	единица измерения
I1	начальная величина	А
I2	величина пульса	А

Td1	время задержки нарастания	с
Tau1	постоянная времени нарастания	с
Td2	время задержки спада	с
Tau2	постоянная времени спада	с

Для моментов времени меньших, чем Td1, выходной ток есть I1. В течение времени между Td1 и Td2 ток определяется формулой:

$$I1 + (I2 - I1) \cdot (1 - \exp(-(time - Td1)/Tau1)).$$

Для времени после Td2 ток определяется формулой:

$$I1 + (I2 - I1) \cdot (1 - \exp(-(time - Td1)/Tau1)) + (I1 - I2) \cdot (1 - \exp(-(time - Td2)/Tau2)).$$

Зависимый от времени частотно-модулированный источник тока.

Синтаксис:

Ixxx n+ n- SFFM(Ioff Iamp Fcar MDI Fsig)

Параметры описаны в таблице.

имя	параметр	единица измерения
Ioff	смещение по постоянному току	А
Iamp	амплитуда	А
Fcar	несущая частота	Гц
MDI	коэффициент модуляции	(нет)
Fsig	частота сигнала	Гц

Ток определяется выражением:

$$Ioff + Iamp \cdot \sin((2 \cdot \pi \cdot Fcar \cdot time) + MDI \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot Fsig \cdot time)).$$

табличная функция напряжения

Синтаксис:

Ixxx n+ n- tbl=(<напряжение, ток>, <напряжение, ток>, ...)

Ток может также быть определен как табличная функция напряжения между узлами. Этот способ может быть использован для моделирования характеристик нагрузки.

Специальная форма источника тока.

Синтаксис:

Ixxx n+ n- <value> step(<value1>, [<value2>], [<value3>, ...]) [load]

Ток определен как список величин, для использования при анализе переходных процессов на том или ином шаге. В этом режиме моделирование выполняется до устойчивого состояния при первом токе в списке, <value1>. После чего ток меняется на следующее значение из списка, <value2>. Моделирование продолжается до устойчивого состояния, достигаемого при этом токе. Далее ток принимает следующее значение и процесс повторяется, пока список не будет исчерпан. Если команда .tran не определяет "step", то используется оригинал <value>.

резистивная нагрузка

Синтаксис:

Ixxx n+ n- R=<value>

Это - не источник тока, а резистор. Используется для моделирования резистивной нагрузки, представленной в списке соединения как источник тока.

Кусочно-линейное задание тока в функции времени

Синтаксис: Ixxx n+ n- PWL(t1 i1 t2 i2 t3 i3...)

До момента времени t1, ток источника равен i1. В моменты между t1 и t2, ток изменяется линейно от i1 до i2. Можно указать любое число моментов времени и соответствующих значений тока. Для моментов времени за последней точкой ток сохраняет свое последнее значение.

Синтаксис:

Ixxx n+ n- wavfile=<filename> [chan=<nnn>]

Этот способ позволяет использовать **.wav** файл для ввода данных в LT-spice. <filename> может представлять или полный путь для .wav файла или относительный путь к каталогу, содержащему схему или список соединений. Для указания пути, содержащего пробелы, должны использоваться двойные кавычки. .wav файл может содержать до 65536 каналов, нумерованных от 0 до 65535. Опция chan определяет, какой канал используется. По умолчанию для первого канала используется номер 0. .wav файл масштабируется в диапазоне от -1А до 1А. Этот источник применяется только при анализе переходных процессов.

Ж. Полевой транзистор (JFET)

Символьные имена: NJF, PJF

Синтаксис:

Ixxx Сток Затвор Исток <model> [area] [off] [IC=Vds, Vgs] [temp=T]

Примеры:

J1 0 in out MyJFETmodel

.model MyJFETmodel NJF(Lambda=.001)

J2 0 in out MyPJFETmodel

.model MyPJFETmodel PJF(Lambda=.001)

Параметры транзистора задаются в директиве .model. Ключевые слова NJF и PJF определяют полярность транзистора. Параметр [area] определяет число параллельно соединенных транзисторов.

Характеристики по постоянному току определены параметрами VTO и BETA, которые определяют зависимость тока стока от напряжения затвора; параметром LAMBDA, который определяет выходную проводимость;

Is - ток насыщения перехода. Накопление заряда смоделировано нелинейными емкостями запирающего слоя для обоих переходов и определено параметрами Cgs, Cgd и PB.

Ниже приводится описание некоторых параметров полевого транзистора в формате:

имя параметра - описание - [единица измерения] - значение по умолчанию.

VTO - Пороговое напряжение [В] -2.0

BETA - Проводимость передачи [A/B] 1e-4

LAMBDA – Коэффициент модуляции длины канала [1/V] 0

RD - Сопротивление стока [Ом] 0

RS - Сопротивление истока [Ом] 0

CGD - Емкость перехода затвор-сток при нулевом напряжении на переходе [Ф] 0

CGS - Емкость перехода затвор-исток при нулевом напряжении на переходе [Ф] 0

FC - Коэффициент емкости прямо смещенного перехода [] 0.5

PB - Внутренний потенциал затвора [В] 1.0

IS - Ток насыщения перехода затвор-исток(сток) [А] 1e-14

KF - Коэфф. фликкер-шума [] 0

AF - Показатель фликкер-шума [] 1

К. Взаимная Индуктивность

Символьное имя: Отсутствует, размещается как текст на схеме.

Синтаксис:

Kxxx L1 L2 [L3 ...] <коэффициент связи>

L1 и L2 - имена катушек индуктивности в схеме. Взаимный коэффициент связи должен быть в диапазоне между -1 и 1. Коэффициент связи вычисляется по формуле $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$, где M – значение взаимной индуктивности, L₁ – значение индуктивности катушки L1, L₂ – значение индуктивности катушки L2.

Строка

K1 L1 L2 L3 L4 1.

аналогична шести строкам:

K1 L1 L2 1.

K2 L2 L3 1.

K3 L3 L4 1.

K4 L1 L3 1.

K5 L2 L4 1.

K6 L1 L4 1.

Рекомендуется начинать моделирование при взаимном коэффициенте связи равном 1. При этом устраняется индуктивность рассеяния, которая может оказывать паразитное влияние на очень высоких частотах при отсутствии затухания, что приводит к замедлению моделирования. Вместе с тем, взаимное значение индуктивности равное -1 или 1 , так же может привести к трудностям моделирования, если присутствует `ic` директива в закладке `.tran`.

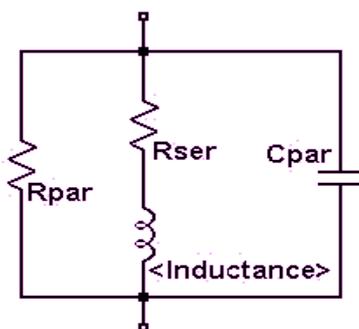
L. Катушка индуктивности

Символьные имена: IND, IND2

Синтаксис:

Lxxx n+ n- <inductance> [ic=<value>] [Rser=<value>] [Rpar=<value>] +[Cpar=<value>] [m=<value>]

Для индуктивности можно определить эквивалентное последовательное сопротивление, последовательную индуктивность, параллельное сопротивление и параллельную емкость. Эквивалентная схема приведена ниже:



Параметры Катушки индуктивности:

Rser - эквивалентное последовательное сопротивление

Rpar - эквивалентное параллельное сопротивление

Cpar - эквивалентная параллельная емкость

m - число параллельных ветвей

ic - начальный ток (используется при директиве `ic` на закладке `.tran`)

tc1 - линейный температурный коэффициент.

tc2 - квадратичный температурный коэффициент индуктивности.

temp - время

Если включить в модель катушки индуктивности паразитные Rpar, Rser и Cpar, то LTspice будет использовать встроенную модель без внутренних узлов. Это уменьшит размер матрицы моделирования, снизит вероятность того, что эта матрица окажется сингулярной. В результате вычисления при любом временном шаге будут быстрее.

По умолчанию, LTspice учитывает последовательное сопротивление катушки индуктивности, чтобы помочь SMPS анализу переходных процессов. Для SMPS это сопротивление не имеет никаких последствий и может быть при желании отключено. Для этого надо дать команду "Tools=>Control Panel=>Hacks!" и снять отметку "Supply a min. inductor damping if no Rpar is given." ("установить мин. демпфирование катушки индуктивности, если не задан Rpar"). Эта установка будет запомнена между запусками программы. По умолчанию задается последовательное сопротивление 1 миллиОм для катушек индуктивности (не применяется для взаимной индуктивности). Это последовательное сопротивление Rser позволяет SwitcherCAD III моделировать индуктивность как Нор-тон-эквивалентную схему вместо Тэвенин-эквивалентной для уменьшения размера линеаризованной матрицы схемы. Если Вы не хотите, чтобы LTspice ввел это минимальное сопротивление, Вы должны явно установить Rser=0 для катушки индуктивности. Это приведет к использованию более громоздкого Тевенин-эквивалента катушки индуктивности при анализе переходных процессов.

В LTspice применяется две формы для нелинейных катушек индуктивности. Одна из них - функциональная индуктивность, задаваемая выражением для потока. Ток катушки индуктивности обозначается в выражении ключевым словом "x". Ниже - пример из списка соединений.

```
L1 N001 0 Flux=1m*tanh(5*x) ;Приведено выражение для потока.
I1 0 N001 PWL(0 0 1 1) ; Если была бы задана формула для нелинейной
.tran 1 ;индуктивности, то она должна быть умножена на x
.end,
```

В этом примере, источник I1 линейно нарастает в функции времени. Тогда производная dI/dt равна единице, а напряжение на узле N001 равно значению индуктивности: $U_{N001} = L \cdot dI/dt = L$.

Второй способ задания нелинейной индуктивности в LTspice использует гистерезисную модель, первоначально предложенную Джоном Чаном и др. в IEEE Transactions On Computer-Aided Design, Vol. 10. No. 4, April 1991. Эта модель определяет гистерезис тремя параметрами:

- Hc - Коэрцитивная сила [А-витки/м];
- Br - Остаточная индукция [Тесла];
- Bs - Индукция насыщения [Тесла].

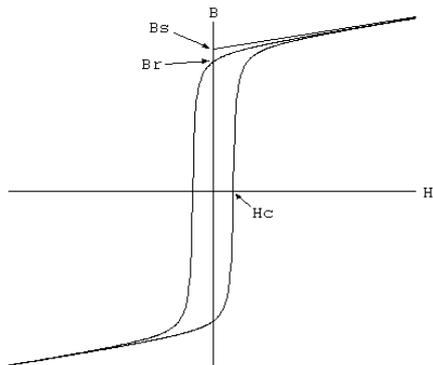
Верхними и нижними ветвями гистерезиса являются зависимости:

$$B_{up}(H) = B_s \cdot \frac{H + H_c}{|H + H_c| + H_c \cdot (B_s / B_r - 1)} + \mu_0 \cdot H$$

и

$$B_{dn}(H) = B_s \cdot \frac{H - H_c}{|H - H_c| + H_c \cdot (B_s / B_r - 1)} + \mu_0 \cdot H$$

Эти функции представлены ниже на графике. H_c и B_r являются пересечениями главного цикла гистерезиса с H -и B -осями. B_s - пересечение B -оси асимптотической линией, $B_{sat}(H) = B_s + \mu_0 \cdot H$, получаемой при устремлении H в бесконечность.

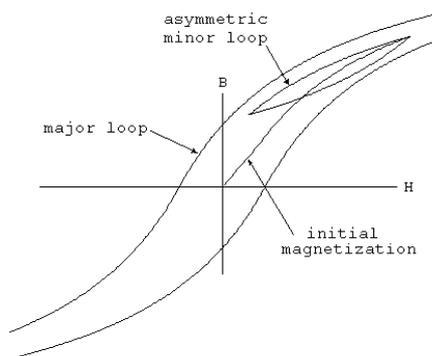


Начальная кривая намагничивания определяется выражением

$$B_{mag}(H) = .5 \cdot (B_{up}(H) + B_{dn}(H))$$

Младшие циклы получают различными преобразованиями вышеприведенных уравнений. Для примера на графике приведен асимметричный младший цикл для типичного феррита ($H_c=16$ А-витков/м, $B_s=.44$ Т, $B_r=.10$ Т).

В дополнение к основным параметрам H_c , B_r и B_s , требуются:



L_m - Длина сердечника (искл. возд. зазор) [м];

L_g - Длина воздушного зазора [м];

A - площадь поперечного сечения магнитопровода [м²];

N - число витков .

Следует обратить внимание на то, что при определении ненулевого зазора для магнитного поля, H не пропорционально потоку в обмотках. LTspice рассчитывает

магнитное поле в сердечнике и зазоре в предположении их однородности.

Ниже приводится пример, демонстрирующий задание индуктивности через поток для катушки L1, расположенной на сердечнике с зазором.

*

```
L1 N001 0 Hc=16. Bs=.44 Br=.10 A=0.0000251
```

```
+ Lm=0.0198 Lg=0.0006858 N=1000
```

```
I1 0 N001 PWL(0 0 1 1)
```

```
.tran .5
```

```
.options maxstep=10u
```

```
.end
```

М. МОП-транзистор с изолированным затвором (MOSFET)

Символьные имена:

NMOS, NMOS3, PMOS, PMOS3

В LTspice применяются два существенно различных типа MOSFETS: монолитный MOSFETs и VDMOS - мощный вертикальный МДП-транзистор технологии двойной диффузии.

Монолитные MOSFET:

Синтаксис: Mxxx Nd Ng Ns Nb <model> [m=<value>] [L=<len>]
+ [W=<width>] [AD=<area>] [AS=<area>]
+ [PD=<perim>] [PS=<perim>] [NRD=<value>]
+ [NRS=<value>] [off] [IC=<Vds, Vgs, Vbs>]
+ [temp=<T>]

Примеры:

```
M1 Nd Ng Ns 0 MyMOSFET
.model MyMOSFET NMOS(KP=.001)
```

```
M1 Nd Ng Ns Nb MypMOSFET
.model MypMOSFET PMOS(KP=.001)
```

```
M1 14 2 13 0 PNOM L=25U W=12U
```

```
M2A 0 2 100 100 NW L=33U W=12U AD=288P AS=288P
+ PD=60U PS=60U
+ NRD=14 NRS=24
```

Вертикальный МДП-транзистор технологии двойной диффузии:

Синтаксис: Mxxx Nd Ng Ns <model> [L=<len>] [W=<width>]
+ [M=<area>] [m=<value>] [off]
+ [IC=<Vds, Vgs, Vbs>] [temp=<T>]

Пример:

```
M1 Nd Ng Ns Si4410DY
.model Si4410DY VDMOS(Rd=3m Rs=3m Vto=2.6 Kp=60
+ Cgdmax=1.9n Cgdmin=50p Cgs=3.1n Cjo=1n
+ Is=5.5p Rb=5.7m)
```

Монолитные МДП-транзисторы:

ND,NG,NS -узлы подключения стока, затвора, истока
МОП - транзистора соответственно

NB -узел подключения подложки

имя модели -имя модели транзистора

L -длина канала (может устанавливаться пользователем)

W -ширина канала (может устанавливаться пользователем)

AD -площадь стока в м
 AS -площадь истока в м
 PD -периметр стока в м
 PS -периметр истока в м
 NRD -относительное сопротивление стока
 NRS -относительное сопротивление истока

Ниже приводится описание некоторых параметров МОП транзистора в формате:

имя параметра - описание - [единица измерения] - значение по умолчанию.
 LEVEL- Тип модели (1,2 или 3) [] 1
 LD - Длина канала [м] 0
 WD - Ширина канала(по диффузии) [м] 0
 VTO - Напряжение порога при нулевом токе стока [В] 0
 KP - Проводимость передачи [A/B²] 2.0e-5
 GAMMA-Коэфф.влияния подложки sqrt [В] 0
 PHI - Объемный потенциал при слабой инверсии [В] 0.6
 LAMBDA- Коэфф.модуляции длины канала (для LEVEL 1 или 2) [1/B] 0
 RD - Сопротивление стока [Ом] 0
 RS - Сопротивление истока [Ом] 0
 IS - Ток насыщения переходов [А] 1.e-14
 JS - Плотность тока насыщения [А/м] 0
 PB - Встречный потенц.подложки [В] 0
 CBD - Емкость перехода подл.-сток при нулевом напр.на пере. [Ф] 0
 CBS - Емкость перех. подл.-исток при нулевом напр.на перех. [Ф] 0
 CJ - Емкость подл.-сток при нулевом смещении на ед.плоч. [Ф/м²] 0
 CJSW - Удельная емкость боковой поверх.перех.подл.-сток[Ф/м] 0
 MJ - Показатель качества перех. подл.-сток [] 0.5
 MJSW - Показатель качества боковой поверх.перех.подл.-сток [] (level 2,3) 0.33 (level1) 0.5
 FC - Коэфф.нелинейности прямосмещен.перех.подл.-исток [] 0.5
 CGSO - Относительная емкость перекрытия затвор-исток (на единицу ширины канала) [Ф/м] 0
 CGDO - Относительная емкость перекрытия затвор-сток (на единицу ширины канала) [Ф/м] 0
 CGBO - Относительная емкость перекрытия затвор-подл.(на единицу ширины канала) [Ф/м] 0
 NSUB - Уровень легирования подл. [1/см³] 0
 NSS - Плотность поверхностных состояний [1/см²] 0
 NFS - Плотность быстрых поверхностных состояний [1/см²] 0
 TOX - Толщина окисла [м] 1e-7
 TPG - Тип затвора: +1-противопол. м-лу подл. [] 1

-1 – аналогичный подложке
0 - алюминий

XJ - Металлургическая глубина перехода [м] 0
UO - Подвижность носителей [см²/В·с] 600.0
UCRIT - Критическое поле для ограничения скорости носителей (для LEVEL=2) [В/см] 1.e4
UEXP - Показатель ограничения скорости носителей [] 0
UTRA-Коэфф.поперечного поля ограничения подвижности носителей [] 0
VMAX-Скорость максимального дрейфа носителей [м/сек] 0
NEFF - Коэфф.заряда канала [] 1.0
XQC - Часть зарядов канала,притянута сток [] 0
DELTA-Коэфф.влияния ширины канала на пороговое напряж. (для LEVEL=2,3) [] 0
THETA - Коэфф.модуляции подвижности (для LEVEL=3) [1/В] 0
ETA - Статическая обратная связь (для LEVEL=3) [] 0
KAPPA - Коэфф.поля насыщения (для LEVEL=3) [] 0.2
KF - Коэфф.фликкер-шума [] 0
AF - Показатель фликкер-шума [] 1.0

О. Линия передачи с потерями

Символьные имена: LTLIN

Синтаксис:

Oxxx L+ L- R+ R- <model>

Пример:

```
O1 in 0 out 0 MyLossyTline  
.model MyLossyTline LTRA(len=1 R=10 L=1u C=10n)
```

Это - простой проводник линии с потерями. L+ и L- являются входными узлами. R+ и R- являются выходными узлами. При моделировании автоматически определяются электрические характеристики этого элемента.

Параметры для линии передачи с потерями (Lossy Transmission Lines):

имя	параметр	ед.изм/ти п	по умолч.
R	сопротивление/длина	Ом/м	0.
L	индуктивность/длина	Гн/м	0.
G	проводимость/длина	mhos/м	0.
C	емкость/длина	Ф/м	0.
LEN	длина линии	-	(none)
REL	управление точкой прерывания	-	1
ABS	breakpoint control		1
NOSTEPLIMIT	не ограничивать шаг времени меньше, чем задержка линии	flag	not set
NOCONTROL	не делать сложного управления временным шагом	flag	not set
LININTERP	использовать линейную интерполяцию	flag	not set
MIXEDINTERP	использовать линейную интерполяцию, когда квадратичная оказывается плохой	flag	not set
COMPACTREL	специальный reltol для уплотнения хронологии	flag	RELTOL
COMPACTABS	специальный abstol для уплотнения хронологии	flag	ABSTOL
TRUNCNR	использовать метод Ньютона-Рафсона для управления временным шагом	flag	not set
TRUNCDCONT-CUT	не ограничивать шаг времени, чтобы сохранить ошибки импульсной передаточной функции	flag	not set

Q. Биполярный транзистор

Символьные имена:

NPN, PNP, NPN2, PNP2

Синтаксис:

Qxxx Коллектор База Эмиттер [Узел подложки]
+ model [area] [off] [IC=<Vbe, Vce>] [temp=<T>]

Пример:

```
Q1 C B E MyNPNmodel  
.model MyNPNmodel NPN(Bf=75)
```

Параметры транзистора задаются в директиве .model. Ключевые слова NPN и PNP определяют полярность транзистора. Параметр [area] определяет число параллельно соединенных транзисторов.

В основе применяемой модели транзистора использована модель Гумеля-Пуна. Модель автоматически упрощается к модели Эберса-Молла при отсутствии некоторых параметров.

Ниже приводится описание некоторых параметров биполярного транзистора в формате:

имя параметра - описание - [единица измерения] - значение по умолчанию.

IS - Ток насыщения [A] 1e-16
EG - Энергетический барьер(ширина запрещенной зоны) [эл/В] 1.11
XTI - Температур.коэфф.тока IS [] 3
BF - Прямой коэффициент усиления (максимальное значен.) [] 100
NF - Коэфф.эмиссии прямого тока [] 1.0
VAF - Напряжение Эрли [В] (бесконечность)
IKF - Точка изгиба кривой зависимости $I_C=f(U_{ЭБ})$ при больших токах [A] (бесконечность)
ISE - Ток утечки эмитт.перехода [A] 0
NE - Коэфф.эмиссии тока ISE [] 1.5
BR - Обратный коэфф.усиления [] 1.0
NR - Коэфф.эмиссии тока коллектора в инверсном вкл. [] 1
VAR - Напряжение Эрли при инверсном включении [В] (бесконечность)
IKR - Точка изгиба кривой зависимости $I_E=f(V_{CB})$ при больших токах [A]
ISC - Ток утечки коллек.перехода [A] 0
NC - Коэфф.эмиссии коллекторного перехода [] 2.0
RB - Сопротивление базы [Ом] 0
IRB - Ток, при котором RB уменьшается в два раза [A] (бесконечность)
RBM - Минимальное значение RB [Ом] RB
RE - Сопротивление эмиттера [Ом] 0

RC - Объемное сопротивление коллектора [ОМ]
 CJE - Емкость эмиттера при нулевом напряжении на переходе [Ф] 0
 MJE - Показатель качества перехода эмиттер-база [] 0.33
 VJE - Внутренний потенциал перехода эмиттер-база [В] 0.75
 CJC - Емкость коллектора при нулевом напряжении на переходе [Ф] 0
 MJC - Показатель качества перехода коллектор-база [] 0.33
 VJC - Внутренний потенциал перехода коллектор-база [В] 0.75
 XCJC - Коэфф.расщепления емкости коллектор-база [] 1.0
 CJS - Емкость коллектор-подложка при нулевом напряжении [Ф] 0
 MJS - Показатель качества перехода коллектор-подложка [] 0.
 VJS - Внутренний потенциал перехода коллектор-подложка [В] 0.75
 FC - Коэфф.нелинейности прямосмещенного перехода [] 0.5
 TF - Время переноса носителей через базу [сек] 0
 XTF - Коэфф.зависимости времени TF от режима [] 0
 VTF - "Критическое" напряжение зависимости $TF=f(V_{BC})$ [В] (бесконечность)
 ITF - "Критический" ток для TF [А] 0
 RTF - Избыточный фазовый сдвиг на частоте $F=1/(TF*2\pi)$ [град] 0
 TR - Время переноса носит. через базу в инверсном включении [сек] 0
 XTB - Температурный коэффициент усиления по току [] 0
 KF - Коэфф.фликкер-шума [] 0
 AF - Показатель фликкер-шума [] 1

R. Резистор

Символьные имена: RES, RES2

Синтаксис:

Rxxx n1 n2 <value> [tc=tc1, tc2, ...]

Резистор соответствует линейному сопротивлению между узлами n1 и n2. Температурная зависимость может быть определена для каждого резистора параметром tc. Сопротивление R задается следующей формулой:

$$R = R_0 * (1. + dt * tc_1 + dt^{**2} * tc_2 + dt^{**3} * tc_3 + ...)$$

где R0 - сопротивление при номинальной температуре, dt - разность между температурой резистора и номинальной температурой.

S. Ключ, управляемый напряжением

символьное имя: SW

Синтаксис:

Sxxx n1 n2 nc+ nc- <model> [on,off]

Пример:

S1 out 0 in 0 MySwitch

.model MySwitch SW(Ron=.1 Roff=1Meg Vt=0 Vh=-.5 Lser=10n Vser=.6)

Напряжение между узлами nc+ и nc- управляет сопротивлением ключа между узлами n1 и n2. В имени модели определяется поведение ключа. Пример схемы см. в файле .\examples\Educational\Vswitch.asc.

Параметры ключа, управляемого напряжением:

Vt - пороговое напряжение [В], (по умолч. 0.);

Vh - напряжение гистерезиса [В], (по умолч. 0.);

Ron сопротивление замкнутого ключа [Ом], (по умолч. 1.);

Roff сопротивление разомкнутого ключа [Ом], (по умолч. 1/gmin);

Lser последовательная индуктивность [Гн], (по умолч. 0.);

Vser последовательное напряжение [В], (по умолч. 0.);

ilimit предельный ток [А], (по умолч. infin);

Ключ имеет три разных режима управляющего напряжения, в зависимости от значения напряжения гистерезиса **Vh**. Если **Vh** является нулевым, ключ срабатывает в зависимости от того, является ли входное напряжение выше или ниже порогового напряжения **Vt**. Если **Vh** положительно, ключ работает как триггер Шмитта с точками перехода в **Vt+Vh** и **Vt-Vh**. То есть при положительном нарастании напряжения управления ключ замкнется при **Vt+Vh** и разомкнется при **Vt-Vh**. Если **Vh** - отрицательно, ключ срабатывает с плавным переходом собственного сопротивления. Переход происходит между напряжениями управления **Vt+Vh** и **Vt-Vh**.

Т. Линия передачи без потерь

Символьное имя: TLINE

Синтаксис:

Txxx L+ L- R+ R- Zo=<value> Td=<value>

L+ и L- входные узлы. R+ and R- выходные узлы. Zo – волновое сопротивление (Ом). Td – задержка сигнала (с).

У. Однородная ёмкостно-резистивная линия

Символьное имя: URC

Синтаксис:

Uxxx N1 N2 Ncom <model> L=<len> [N=<lumps>]

N1 и N2 – входной и выходной узлы, Ncom – общий узел. Обязательно указываются имя модели <model> и длина линии <len> в метрах. Необязательный параметр N задает число сегментов линии.

В модели могут быть использованы внутренние сгенерированные узлы. RC сегменты располагаются в геометрической прогрессии, увеличивающейся к середине линии. Константа прогрессии K задается в модели как параметр.

Если задается ненулевое значение параметра ISPERL, то линия представляет собой RC сегменты с обратно включенными диодами с эквивалентными емкостными переходами, током насыщения ISPERL, и сопротивлением RSPERL.

K - константа прогрессии, по умолчанию равна 2.

FMAX - максимальная частота, по умолчанию 1ГГц.

RPERL - сопротивление линии на единицу длины, по умолчанию 1000 Ом/м. **CPERL**- емкость линии на единицу длины, по умолчанию $1e-15$ Ф/м.

ISPERL - ток насыщения/длина модуля, по умолчанию 0 А/м.

RSPERL - диодное сопротивление/длина модуля, по умолчанию 0 Ом/м.

V. Источник напряжения

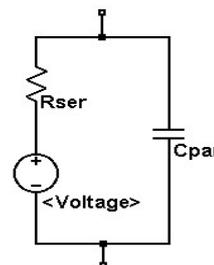
Символьные имена: VOLTAGE, BATTERY

Источник постоянного напряжения.

Синтаксис:

Vxxx n+ n- <число> [AC=<амплитуда>] [Rser=<число>] [Cpar=<число>]

Узлы соединения источника: n+ и n-. Постоянное значение напряжения задается числом <число>. Для частотного анализа задается амплитуда параметром AC. Могут быть определены последовательное сопротивление Rser и параллельная емкость Cpar. Эквивалентная схема:



Исторически сложилось так, что источники напряжения дополнительно используются в SPICE-программах для измерения тока и как датчики тока для элементов, управляемых током. Если задан параметр Rser, то источник напряжения может использоваться как измеритель и не может использоваться для определения управляемых источников.

Импульсный источник напряжения.

Синтаксис:

Vxxx n+ n- PULSE(V1 V2 Tdelay Trise Tfall Ton Tperiod Ncycles)

Параметры:

Voff, [В] - начальное значение,

Von, [В] - максимальное значение,

Tdelay, [с] - задержка,

Tr, [с] - время нарастания,

Tf, [с] - время спада,

T_{on} , [с] - длительность плоской части импульса,
 T_{period} , [с] - период повторения,
 N_{cycles} , [-] - число циклов.

Синусоидальный источник напряжения.

Синтаксис:

Vxxx n+ n- SINE(Voffset Vamp Freq Td Theta Phi Ncycles)

Параметры:

Voffset, [В] - смещение по постоянному току,
Vamp, [В] - амплитуда,
Freq, [Гц] - частота,
Td, [с] - задержка,
Theta, [1/с] - коэффициент затухания,
Phi, [градусы] - фаза,
Ncycles, [-] - число циклов.

Для моментов времени меньших чем Td или после завершения Ncycles, напряжение имеет вид:

$V_{offset} + V_{amp} \cdot \sin(\pi \cdot \Phi / 180)$,

Иначе напряжение определяется формулой:

$V_{offset} + V_{amp} \cdot \exp(-(\text{time} - T_d) \cdot \Theta) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \text{Freq} \cdot (\text{time} - T_d) + \pi \cdot \Phi / 180)$

Коэффициент затухания, Theta, является величиной, обратной постоянной времени затухания импульса.

Экспоненциальный источник напряжения.

Синтаксис:

Vxxx n+ n- EXP(V1 V2 Td1 Tau1 Td2 Tau2)

Параметры:

V1, [В] - начальная величина,
V2, [В] - величина пульса,
Td1, [с] - время задержки нарастания,
Tau1, [с] - постоянная времени нарастания,
Td2, [с] - время задержки спада,
Tau2, [с] - постоянная времени спада.

Для моментов времени меньших, чем Td1, выходное напряжение равно V1. В течение времени между Td1 и Td2 напряжение определяется формулой:

$V_1 + (V_2 - V_1) \cdot (1 - \exp(-(\text{time} - T_{d1}) / \tau_1))$.

Для времени после Td2 напряжение определяется формулой:

$V_1 + (V_2 - V_1) \cdot (1 - \exp(-(\text{time} - T_{d1}) / \tau_1)) + (V_1 - V_2) \cdot (1 - \exp(-(\text{time} - T_{d2}) / \tau_2))$.

Частотно-модулированный источник напряжения.

Синтаксис:

Vxxx n+ n- SFFM(Voff Vamp Fcar MDI Fsig)

Параметры:

Voff	смещение по постоянному току	Volts
Vamp	амплитуда	Volts
Fcar	несущая частота	Hz
MDI	коэффициент модуляции	(none)
Fsig	частота сигнала	Hz

Напряжение определяется выражением

$V_{off} + V_{amp} * \sin((2 * \pi * F_{car} * time) + MDI * \sin(2 * \pi * F_{sig} * time))$.

Кусочный линейный источник напряжения.

Синтаксис:

Vxxx n+ n- PWL(t1 v1 t2 v2 t3 v3...)

До момента времени, равного t1, напряжение равно - v1. В моменты времени между t1 и t2, напряжение изменяется линейно от e1 до e2 и т.д. После последней временной точки, напряжение остается таким каким оно было задано для этой точки.

Источник, задаваемый внешним файлом.

Синтаксис:

Vxxx n+ n- wavfile=<имя файла> [chan=<nnn>]

В качестве внешнего файла используется .wav файл. <имя файла> является или полным, абсолютным путем для .wav файла или относительным путем, определяемым каталогом, содержащим схему или netlist. Чтобы определить путь, содержащий пробелы должны использоваться двойные кавычки.

.wav файл может содержать до 65536 каналов, пронумерованных от 0 до 65535. Параметр chan определяет номер используемого канала. По умолчанию используется первый канал с номером 0.

.wav файл интерпретирует напряжение в диапазоне от -1V до 1V.

Источник может быть использован только при расчете переходных процессов.

W. Ключ, управляемый током независимого источника напряжения

Символьное имя: CSW

Синтаксис:

Wxxx n1 n2 Vnam <model> [on,off]

Пример:

W1 out 0 Vsense MySwitch

Vsense a b 0.

```
.model MySwitch CSW(Ron=.1 Roff=1Meg It=0 Ih=-.5)
```

Ток через источник напряжения с именем Vnam управляет сопротивлением ключа. Обязательно указывается имя модели, которое определяет поведение ключа.

Параметры ключа, управляемого током:

It - пороговый ток [А], (по умолч. 0.);

Ih - ток гистерезиса[А] , (по умолч. 0.);

Ron - сопротивление замкнутого ключа [Ом] , (по умолч. 1.);

Roff - сопротивление разомкнутого ключа , (по умолч. 1/gmin);

Ключ имеет три разных режима управления током, в зависимости от значения тока гистерезиса, **Ih**. Если **Ih** является нулевым, ключ срабатывает в зависимости от того, является ли входной ток выше или ниже порогового тока **It**. Если **Ih** положительно, ключ работает как триггер Шмитта с точками перехода в **It+Ih** и **It-Vh**. То есть при положительном нарастании тока управления ключ замкнется при **It+Ih** и разомкнется при **It-Ih**. Если **Ih** - отрицательно, ключ срабатывает с плавным переходом собственного сопротивления. Переход происходит между током управления **It+Ih** и **It-Ih**.

Х. Подсхема

Синтаксис:

```
Xxxx n1 n2 n3... <имя подсхемы> [<параметр>=<выражение>]
```

Ниже приводится пример описания подсхемы делителя напряжения и вызова этой подсхемы из основной схемы.

* Пример вызова подсхемы

*

* Описание основной схемы

```
X1 in out 0 divider top=9K bot=1K
```

```
V1 in 0 pulse(0 1 0 .5m .5m 0 1m)
```

*описание подсхемы

```
.subckt divider A B C
```

```
R1 A B {top}
```

```
R2 B C {bot}
```

```
.ends divider
```

```
.tran 3m
```

```
.end
```

Z. Транзистор MESFET

Символьное имя:

MESFET

Синтаксис:

Zxxx Сток Затвор Исток model [area] [off] [IC=<Vds, Vgs>]

Параметры транзистора задаются в директиве .model. Ключевые слова NMF и PMF определяют полярность транзистора. Параметр [area] определяет число параллельно соединенных транзисторов.

Модель транзистора является модификацией модели арсенид-галиевого транзистора.

Ниже приводится описание некоторых параметров транзистора в формате:

имя параметра - описание - [единица измерения] - значение по умолчанию.

VTO	- Пороговое напряжение	[В]	-2.
ALPHA	- Параметр напряжения насыщения	[1/В]	2.0
BETA	- Проводимость передачи(крутизна)	[А/В ²]	1e-4
LAMBDA	- Коэфф.модуляции длины канала	[1/В]	0
RD	- Сопротивление стока	[Ом]	0
RS	- Сопротивление истока	[Ом]	0
CGD	- Емкость перех. затвор-сток при нулевом напряж. на перех.	[Ф]	0
CGS	- Емкость перех. затвор-исток при нулевом напряж. на перех.	[Ф]	0
KF	- Коэфф.фликкер-шума	[]	0
AF	- Показатель фликкер-шума	[]	1

Директивы моделирования.

Программа LTSpice позволяет проводить шесть видов анализа схем:

1. Расчет переходных процессов (включая Фурье-анализ)
2. Частотный анализ линеаризованных схем по малому сигналу.
3. Многовариантный расчет по постоянному току
4. Режим по постоянному току в рабочей точке
5. Расчет малосигнальных передаточных функций в режиме по постоянному току.
6. Анализ шумов

Если схема вводится в графическом редакторе, то директивы моделирования помещаются в схемное решение как текст, начинающийся с точки.

.AC - Частотный анализ линеаризованных схем по малому сигналу. **Синтаксис.**

`.ac <oct, dec, lin> <Nsteps> <StartFreq> <EndFreq>`

Директива задает частотный анализ в пределах начальной частоты, задаваемой параметром **StartFreq** и конечной частоты задаваемой параметром **EndFreq**. Ключевые слова **oct** или **dec** определяют логарифмический масштаб изменения частоты октавами или декадами соответственно. Если задано ключевое слово **lin**, то частота меняется линейно. Параметр **Nsteps** задает число точек по частоте:

ключевое слово	Значение параметра Nsteps
oct	Число точек на октаву
dec	Число точек на декаду
lin	Общее число точек между значениями StartFreq и EndFreq

Частотные характеристики рассчитываются после автоматического определения режима по постоянному току и линеаризации нелинейных компонентов. Независимые источники тока и напряжения задаются амплитудами и фазами.

.BACKANNO – Соотнесение имен контактов подсхем и токов **Синтаксис:**

`.backanno`

Эта директива автоматически включается в список соединений SwitcherCAD III, чтобы включить информацию в .raw файл, позволяющей обратиться к токам порта по имени контакта штырька. Это дает возможность строить графики тока через контакты через схемный редактор, с помощью нажатия на контакты мышкой.

.DC – Расчет по постоянному току при вариации источников

Синтаксис:

```
.dc <имя 1-й переменной> <начальное значение1> <конечное значение1> +<приращение1>  
+[<имя 2-й переменной> <начальное значение2> <конечное значение2>  
+<приращение2>]
```

Этот режим удобно использовать для получения статических характеристик различных устройств. В качестве переменных могут выступать имена независимых источников тока или напряжения. При указании второго источника формируется вложенный цикл.

* Пример

*

```
M1 2 1 0 0 nbsim  
Vgs 1 0 3.5  
Vds 2 0 3.5  
.dc Vds 3.5 0 -0.05 Vgs 0 3.5 0.5  
.model nbsim NMOS Level=8  
.end
```

.END – Конец списка соединений

Все строки списка соединений после этой директивы игнорируются. Так как схемный редактор LTSpice автоматически вставляет эту директиву в конец списка соединений, то ее вводить не надо.

.ENDS – Конец описания подсхемы

Этой директивой отмечается конец описания макромодели (подсхемы). См. директиву `.SUBCKT` для более детальной информации.

.FOUR – Фурье-анализ сигналов переходных процессов

Синтаксис:

```
.four <frequency> [Nharmonics] [Nperiods] <data trace1> [<data trace2> ...]
```

Пример:

```
.four 1kHz V(out)
```

Фурье-анализ выполняется после завершения расчета переходных процессов. В директиве задается частота первой гармоники **frequency**. Если не задан параметр **Nharmonics**, то рассчитываются амплитуды постоянной составляющей и первых девяти гармоник. Если не задан параметр **Nperiods**, то спектральному анализу подвергается участок переходного

процесса равный одному периоду в конце интервала расчета. Длительность периода определяется как $1/\text{frequency}$. Если **Nperiods** задан равным -1, то спектральный анализ ведется по полному времени переходного процесса.

Эта директива введена для совместимости с SPICE-программами. В большинстве случаев более удобным является применение Фурье-анализа, встроенного в редактор графиков **LTSpice**.

Если директива введена, то результат ее действий можно посмотреть в **.log** файле с помощью команды меню **View=>Spice Error Log** .

.FUNC – определение пользовательской функции

Синтаксис:

```
.func <имя функции>([аргументы]) {<выражение>}
```

Пример: `.func Pythag(x,y) {sqrt(x*x+y*y)}`

`.func` директива позволяет создавать пользовательские функции для параметризации схем и функциональных источников. При описании подсхем, в них будет содержаться только ссылка на функцию. Описание подсхем оказывается независимым от содержания функции, что дает возможность включать подсхемы в библиотечные наборы. Наборы функций можно записывать в файлы и подключать их к заданию на моделирование директивой `.inc`.

Если `.func` директива включена в описание подсхемы, то ее область действия ограничивается этой подсхемой.

Чтобы заменить тот или иной номинал на функцию, эта функция должна быть заключена в фигурные скобки.

*** Пример**

```
.func myfunc(x,y) {sqrt(x*x+y*y)}  
.param u=100 v=600  
V1 a 0 pulse(0 1 0 1n 1n .5μ 1μ)  
R1 a b {myfunc(u,v/3)}  
C1 b 0 100p  
.tran 3μ  
.end
```

Вся вычисления параметров выполняются прежде, чем начинается моделирование.

.GLOBAL – Объявление глобальных узлов

Синтаксис:

```
.global <node1> [node2 [node3] [...]]
```

Пример:

`.global VDD VCC`

Команда `.global` позволяет объявить область видимости некоторых узлов, упомянутых в подсхемах, за пределами этих подсхем. Эти узлы автоматически соединяются в основной схеме и во всех подсхемах. Следует иметь в виду, что в общий узел с именем "0" является глобальным и не требует упоминания в `.global` инструкции. Узлы, имена которых начинаются с "\$G_" также являются глобальными узлами, без упоминания в `.global` инструкции.

.IC – Установка начальных условий

Директива `.ic` позволяет задать начальные условия для анализа переходных процессов. Могут быть определены напряжения узлов и токи катушек индуктивности. К указанным узлам и ветвям подключаются источники напряжения и тока, и рассчитывается режим по постоянному току. После завершения расчета режима по постоянному току эти источники отключаются, и при наличии директивы `.tran`, выполняется расчет переходных процессов с заданными начальными условиями. При анализе по постоянному току, начальные условия используются как ограничения. В LTspice катушки индуктивности при анализе по постоянному току интерпретируются как источники тока с бесконечным сопротивлением.

Синтаксис:

```
.ic [V(<имя узла>)=<напряжение>] [I(<имя индуктивности>)=<ток>]
```

Пример:

```
.ic V(in)=2 V(out)=5 V(vc)=1.8 I(L1)=300m
```

.INCLUDE – Включение произвольного файла

Синтаксис:

```
.include <filename>
```

Эта директива включает названный файл так, как будто этот файл был напечатан в списке соединений вместо команды `.include`. Директива полезна для включения библиотек моделей или подсхем.

Может быть введен абсолютный путь для имени файла. В противном случае LTspice смотрит сначала в каталоге `<SwCADIII>\lib\sub` и затем в каталоге, который содержит запрос на список соединений, т.е. `<SwCADIII>` - каталог, содержащий программу `scad3.exe`, обычно устанавливаемую в `C:\Program Files\LTC\SwCADIII`.

Обязательно надо указывать расширение файла, например, `".inc myfile.lib"`, но не `".inc myfile"`

Можно определить Интернет-ссылку на имя файла:

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

Файл "library.lib" будет передан в каталог, где находится схема и включен в задание. При многократном моделировании, чтобы не заходить в Интернет каждый раз, .inc инструкцию можно отредактировать на:

```
.inc library.lib
```

Если Интернет-ссылка не существует, то появятся непредсказуемые сообщения об ошибках, так как LTspice включит страницу ошибки html в задание на моделирование как допустимый синтаксис SPICE.

Если http – содержит ссылку на .pdf файл, моделирование прервется после загрузки. Следующий пример загрузит .pdf файл:

*Фиктивное моделирование для загрузки файла справки.

*Моделирование прервется с ошибкой, но

*файл scad3.pdf будет размещен в

*тот же самый каталог, который содержит список соединений.

```
.inc http://ltspice.linear.com/software/scad3.pdf
```

```
.end
```

.LIB – Включение библиотеки

Синтаксис:

```
.lib <filename>
```

Эта директива включает модель и описание подсхемы названного файла, как будто тот файл был напечатан в списке соединений вместо команды .lib.

Если в задании на моделирование имеется ссылка на модель из файла, указанного в директиве .lib, то в ОЗУ загружается на весь файл, а только его часть, относящаяся к данной модели. В остальном директива аналогична директиве .inc.

.LOADBIAS – Загрузка данных режима по постоянному току

Синтаксис:

```
.loadbias <filename>
```

По этой команде производится считывание из файла узловых потенциалов по постоянному току. Для выполнения расчета переходных процессов по директиве .tran с заданными начальными условиями этот файл можно предварительно отредактировать и заменить директиву .nodeset на .ic. Для передачи содержания файла узловых потенциалов в выходной файл результатов (с расширением out) необходимо в директиве .options указать параметр expand.

Команда .loadbias - дополнение к команде .savebias. Сначала необходимо выполнить моделирование с командой .savebias. Затем надо заменить команду .savebias на .loadbias .

.MEASURE – Определяемые пользователем вычисления

Есть два основных вида .MEASURE инструкций. В одном случае обращаются к точке по абсциссе (независимой переменной, например, ось времени в .tran анализе) и во втором случае обращаются к диапазону по оси абсцисс.

В первом случае выводится значение данных или значение выражения в определенной точке и, возможно, при выполнении определенных условий. Используется следующий синтаксис:

Синтаксис:

```
.MEAS[SURE] [AC|DC|OP|TRAN|TF|NOISE] <name>  
+ [<FIND|DERIV|PARAM> <expr>]  
+ [WHEN <expr> | AT=<expr>]]  
+ [TD=<val1>] [<RISE|FALL|CROSS>=<count1>|LAST]]
```

В .MEAS директивах можно произвольно задавать тип анализа. Это позволяет использовать инструкции только для некоторых типов анализа. Обязательно присутствие имени <name>, которое может использоваться в других инструкциях. Ниже приводятся примеры .MEAS директив, которые обращаются к отдельной точке по абсциссе:

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

Выводится значение **V(out)** в точке **t=5ms** помеченное как **res1**.

```
.MEAS TRAN res2 FIND V(out)*I(Vout) WHEN V(x)=3*V(y)
```

Выводится значение выражения $V(out)*I(Vout)$ как только впервые выполнится условие $V(x)=3*V(y)$. Результат помечен как res2.

```
.MEAS TRAN res3 FIND V(out) WHEN V(x)=3*V(y) cross=3
```

Выводится значение $V(out)$, когда условие $V(x)=3*V(y)$ выполнено в третий раз. Результат имеет метку res3.

```
.MEAS TRAN res4 FIND V(out) WHEN V(x)=3*V(y) rise=last
```

Выводится значение $V(out)$ в те моменты времени, когда условие $V(x)=3*V(y)$ было выполнено при значениях $V(x)$ больших, чем $3*V(y)$. Результат помечен res4.

```
.MEAS TRAN res5 FIND V(out) WHEN V(x)=3*V(y) cross=3 TD=1m
```

Выводится значение $V(out)$, когда условие $V(x)=3*V(y)$ выполнено в третий раз, но не ранее как через 1мс. Результат имеет метку res5.

```
.MEAS TRAN res6 PARAM 3*res1/res2
```

Выводится величина $3 \cdot \text{res1} / \text{res2}$. Эта форма полезна для того, чтобы выводить выражения других .meas операторных результатов. Не предусматривается присутствия в формуле, которая будет вычислена, выражений вида $V(3)$ (выражений, основанных на прямых данных моделирования). Но если такие данные все-таки приводятся, то берется значение для последней моделируемой точки. Результат данного примера помечен как res6.

В приведенных примерах, при обращении к одной точке по абсциссе, требуемый результат основан на координатных данных (зависимых переменных). Если в .MEAS операторе никакая координатная информация не затребована, выводится точка по абсциссе, при выполнении заданного условия:

```
.MEAS TRAN res6 WHEN V(x)=3*V(y)
```

Выводится время наступления условия $V(x)=3 \cdot V(y)$. Результат помечен res6.

Второй вид .MEAS директивы обращается к диапазону по абсциссе.

Синтаксис:

```
.MEAS [AC|DC|OP|TRAN|TF|NOISE] <name>  
  + [<AVG|MAX|MIN|PP|RMS|INTEG> <expr>]  
  + [TRIG <lhs1> [[VAL]=<rhs1>] [TD=<val1>]  
  + [<RISE|FALL|CROSS>=<count1>]  
  + [TARG <lhs2> [[VAL]=<rhs2>] [TD=<val2>]  
  + [<RISE|FALL|CROSS>=<count2>]
```

Диапазон абсциссы определен точками, задаваемыми в "TRIG" и "TARG". Если опущено TRIG значение, то по умолчанию происходит обращение к началу моделирования. Точно так же TARG по умолчанию указывает значения до конца моделирования. Если все три значения для TRIG, TARG и WHEN точек опущены, то директива работает по полному диапазону данных оси абсцисс. Виды операций, которые могут быть выполнены на интервале:

AVG - вычисление среднего числа <expr>

MAX - поиск максимального значения <expr>

MIN - поиск минимального значения <expr>

PP - поиск удвоенной амплитуды <expr>

RMS - вычисление среднеквадратичного значения <expr>

INTEG - интегрирование <expr>

где <expr> - выражение.

Если никакая операция не определена, результат директивы - расстояние по абсциссе между TRIG и TARG точками. Ниже приводятся примеры интервальных директив:

```
.MEAS TRAN res7 AVG V(NS01)
+ TRIG V(NS05) VAL=1.5 TD=1.1u FALL=1
+ TARG V(NS03) VAL=1.5 TD=1.1u FALL=1
```

Выводится среднее значение потенциала на узле V(NS01) от 1-ого падения V(NS05) к 1.5V после 1.1мкс и первого падения V(NS03) к 1.5V после 1.1мкс. Результат имеет метку res7.

Для частотного анализа, условные выражения с комплексными числами переводятся к условиям с вещественными числами, выражения преобразуются к амплитудному значению. Например:

```
.MEAS AC rel8 when V(out)=1/sqrt(2)
Результат rel8 - частота, при которой амплитуда V(out) равна
0.70710678118655.
```

Результаты, полученные в одной директиве, могут быть использованы в другой инструкции. Далее продемонстрировано вычисление полосы пропускания 3дБ:

```
.MEAS AC tmp max mag(V(out)) ; поиск максимального значения и
; пометка результата именем "tmp"
.MEAS AC BW trig mag(V(out))=tmp/sqrt(2) rise=1
+ targ mag(V(out))=tmp/sqrt(2) fall=last
```

В результате будет выведена разница в частоте между двумя точками, отстоящими на 3дБ вниз от максимального значения. Примечание: Данные при частотном анализе являются комплексными числами, как и результаты директивы. Однако, равенство в условиях относится только к вещественной части комплексного числа, то есть "mag(V(out)) = tmp/sqrt(2)" эквивалентно $\text{Re}(\text{mag}(V(\text{out}))) = \text{Re}(\text{tmp}/\sqrt{2})$.

Операции AVG, RMS, и INTEG различны для .NOISE анализа и других типов анализа, так как шум уже интегрирован по частоте. Следовательно, AVG и RMS дает среднеквадратическое шумовое напряжение, а INTEG дает интегрированный полный шум. Например, если добавляются директивы SPICE

```
.MEAS NOISE out_totn INTEG V(onoise)
.MEAS NOISE in_totn INTEG V(inoise)
к .noise-анализу, то в .log файле будет напечатан интегрированный полный шум.
```

.MEAS директивы могут быть выполнены в графическом постпроцессоре, после того, как моделирование закончено. Это позволяет записывать сценарий .MEAS инструкций и выполнять его на наборе выходных данных. Для этого надо сделать окно графического постпроцессора активным, и выполнить команду меню File=>Execute .MEAS Script.

Есть одно последствие .MEAS директив, выполненных в графическом постпроцессоре. Точность .MEAS операторного вывода будет ограничена точностью данных после сжатия. Можно откорректировать параметры сжатия для более точного .MEAS операторного вывода.

.MODEL – Определение SPICE модели

Определение модели для диода, транзистора, ключа, линии передачи с потерями и однородной емкостно-резистивной линии.

Некоторые элементы схемы, например, транзисторы, имеют много параметров. Вместо того, чтобы определять каждый параметр транзистора для каждого типа транзистора, транзисторы сгруппированы по типовым именам и имеют общие параметры. Транзисторы той же самой модели могут иметь разные размеры, и электрическое поведение масштабируется к размеру образца.

Синтаксис:

```
.model <modname> <type>[(<parameter list>)]
```

Имя модели <modname> должно быть уникально. То есть два различных типа элементов схемы, например, диода и транзистора, не могут одно и то же имя. Список параметров зависит от типа модели <type>. Ниже приведен список типовых имен моделей:

Тип	ассоциированный схемный элемент
SW	ключ, управляемый напряжением
CSW	ключ, управляемый током
URC	Однородная RC-линия
LTRA	линии передачи с потерями
D	диод
NPN	NPN биполярный транзистор
PNP	PNP биполярный транзистор
NJF	N-канальный полевой транзистор (JFET)
PJF	P-канальный полевой транзистор (JFET)
NMOS	МОП-транзистор (MOSFET) с каналом N-типа
PMOS	МОП-транзистор (MOSFET) с каналом P –типа
NMF	N-канальный MESFET (модификация Арсенид-Галиевого транзистора)
PMF	P-кагальный MESFET
VDMOS	Мощный вертикальный МДП-транзистор технологии двойной диффузии

Список параметров приводится в описании соответствующего элемента.

.NODESET – Установка приближенных значений для начального решения по постоянному току

Директива позволяет облегчить вычисление рабочей точки в статическом режиме. Если схема имеет несколько возможных состояний по постоянному току как, например, для триггерных схем, итеративный процесс при поиске решения по постоянному току может не сойтись. В этих случаях директива может задать конкретное состояние схемы. К узлам, указанным в директиве, подключаются источники постоянного напряжения, и рассчитывается одна итерация. Затем источники отключаются, и итерационный процесс продолжается.

Синтаксис:

`.NODESET V(узел1)=<напряжение> [V(узел2)=<vнапряжение [...]]`

.NOISE – Анализ шума

На каждой частоте рассчитывается спектральная плотность выходного напряжения, вызванная независимыми источниками внутреннего шума (резисторами, ключами и полупроводниковыми приборами)

Синтаксис:

`.noise V(<out>[,<ref>]) <src> <oct, dec, lin>
+ <Nsteps> <StartFreq> <EndFreq>`

Выходное напряжение указывается по спецификации `V(<out>[,<ref>])`. Если задана спецификация вида `V(n1, n2)`, то вычисляется напряжение между узлами. К входным узлам цепи подключается независимый источник напряжения или тока с именем `<src>`. Этот источник служит для обозначения входных зажимов. Выходной шум пересчитывается к входным зажимам цепи. Если к входу подключается источник напряжения, то на входе рассчитывается эквивалентная спектральная плотность напряжения шума $S_{u_{вх}}(f)$ [$B^2/Гц$], если источник тока, то рассчитывается эквивалентная спектральная плотность тока $S_{i_{вх}}(f)$ [$A^2/Гц$]. Уровень шума пересчитывается с выхода на вход делением спектральной плотности выходного напряжения $S_{u_{вых}}$ на квадрат модуля соответствующей передаточной функции. Внутреннее сопротивление генератора сигнала должно быть включено в описание схемы как отдельный резистор. На каждой частоте рассчитывается не только спектральная плотность суммарного шума, но и вклад в нее каждого шумового источника. Параметры `<oct, dec, lin>`, `<Nsteps>`, `<StartFreq>` и `<EndFreq>` аналогичны параметрам, задаваемым в директиве `.ac`.

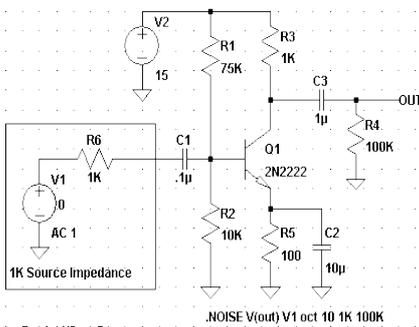
В качестве выходной переменной используются: **V(onoise)** – корень квадратный из $S_{u_{вых}}(f)$, **V(inoise)** – корень квадратный из $S_{i_{вх}}(f)$. Если вход определен как источник тока, то в выходных данных используется **inoise** – корень квадратный из $S_{i_{вх}}(f)$. Может быть отображен шумовой вклад

каждого компонента. Эти вклады отнесены к выходу. Их можно отнести к входу, делением на коэффициент усиления ("gain").

По результатам расчета спектральной плотности внутреннего шума легко вычисляется дифференциальный коэффициент шума:

$Kш(f) = Su_{вх}(f) / Su_r$, где $Su_{вх}(f)$ – спектральная плотность напряжения шума, обусловленная шумом внутреннего сопротивления генератора R_g и внутренним шумом схемы, пересчитанная на его вход. $Su_{вх}(f) = V(\text{inoise})^2$; $Su_r = 4k \cdot T_0 \cdot R_r$ – спектральная плотность напряжения шума внутреннего сопротивления генератора; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град. – постоянная Больцмана; $T_0 = 300.15$ К – номинальная температура в градусах по Кельвину.

Дифференциальный коэффициент шума может быть вычислен в децибелах как функция внутреннего сопротивления генератора. Для этого может быть использована SPICE-директива `.func`:



```
.func NF(R)  
+10*log10(V(inoise)*V(inoise)/(4*k*300.15*R))
```

На рисунке приведен пример схемы, подготовленной для анализа шума (см. файл <SwCADIII>\examples\Educational\NoiseFigure.asc).

.OP – Поиск рабочей точки по постоянному току

Расчет рабочей точки по постоянному току автоматически выполняется перед всеми видами анализа. Эта директива применяется только в тех случаях, когда требуется найти только рабочую точку. После моделирования по этой директиве, можно указать узел или ток – результат появится в строке состояния.

.OPTIONS – Установка опций моделирования

Ключевое слово - [тип данных] (значение по умолч.) – Описание.

- abstol** [число] (1pA) - Допустимая ошибка расчета тока в режиме TRAN
- baudrate** [число] (нет)- Используется для графического постпроцессора
- chgtol** [число] (10fC)-Допустимая ошибка расчета заряда в режиме TRAN
- defad** [число] (0.) -Диффузионная площадь стока МОП-транзистора(AD)
- defas** [число] 0. - Диффузионная площадь истока МОП-транзистора(AS)
- defl** [число] 100μm - Длина канала МОП-транзистора (L)
- defw** [число] 100μm - Ширина канала МОП-транзистора (W)
- delay** [число] (нет) - Сдвигает разрядные переходы в диаграмме.
- flagloads** [флаг] false- пометка внешних источников тока как загружаемых

frain [число] (нет) - Входной узел для многократного анализа
fraout [число] (нет) - Выходной узел для многократного анализа
frastop [число] (нет) - верхняя частота для многократного анализа
frastart [число] (нет) - нижняя частота для многократного анализа
fraamp [число] (нет) - fra func ampl. for freq.response analysis
fravref [число] (нет) - additional DC offset of Vin Freq. response analysis
Gmin [число] (1e-12) - Минимальная проводимость ветви(меньшая проводимость считается равной нулю)
itl1 [число] 100. -максимальное число итераций при анализе по пост.току
itl2 [число] 50. - Максимальное число итераций при расчете передаточных функций по постоянному току при переходе к следующей точке.
itl4 [число] 10. - Максимальное число итераций при переходе к следующему моменту времени в режиме TRAN
itl6 [число] 25. - число шагов, используемых в продвижении источника (применяется при плохой сходимости по постоянному току при поиске рабочей точки)
srcsteps [число] 25. - альтернативное имя для itl6
maxclocks [число] infin.- максимальное число циклов записи
maxstep [число] infin.- максимальный шаг при расчете переходных процессов
measdgt [число] 6 -Число результатов, помечаемых в .measure-директивах
method [строка] trap - Численный метод интегрирования, используется также trapezoidal или Gear
minclocks [число] 10 - минимальное число циклов записи
nomarch [флаг] false - не запускать графический постпроцессор.
noopiter [флаг] false -Идти непосредственно к gmin stepping.
numdgt [число] 6 - Исторически "numdgt" используется для задания числа знаков в выходных данных. В LTspice, если "numdgt" устанавливается > 6, то используется двойная точность для представления переменных
oversample [число] (нет) - For Freq. response analysis
pivrel [число] 1e-3 - Относительная величина элемента строки матрицы, необходимая для его выделения в качестве ведущего элемента
pivtol [число] 1e-13 - Абсолютная величина элемента строки матрицы, необходимая для его выделения в качестве ведущего элемента (режим AC)
reltol [число] 0.001 - Допустимая относительная ошибка расчета напряжений и токов в режиме TRAN
startclocks [число] 5 - number of clock cycles to wait before looking for steadystate число тактовых циклов, необходимых для поиска установившегося процесса
sstol [число] 0.001 - относительная ошибка для обнаружения установившегося режима

temp [число] 27°C - Заданная по умолчанию температура для типовых элементов схемы.

tnom [число] 27°C - Заданная по умолчанию температура для модельных элементов схемы.

topologycheck [число] 1 - Устанавливается ноль для игнорирования висячих узлов и контуров источников напряжения

trtol [число] 1.0 - Set the transient error tolerance. This parameter is an estimate of the factor by which the actual truncation error is overestimated.

trytocompact [флаг] not set - Если установлен этот флаг, то производится уплотнение информации для входных напряжений и токов.

vntol [число] 1μV - Допустимая ошибка в расчетах напряжений в режиме TRAN

plotreltol [число] .0025 - Установка относительной ошибки сжатия для графического постпроцессора

plotvntol [число] 10μV - Установка абсолютной ошибки сжатия напряжения для графического постпроцессора

plotabstol [число] 1nA - Установка абсолютной ошибки сжатия тока для графического постпроцессора

plotwinsize [число] 300 - Количество данных, сжимаемых в одном окне. Для отключения сжатия, указывается ноль.

.PARAM – Определяемые пользователем параметры

Директива создает определяемые пользователем переменные. Это позволяет параметризовать подсхемы и сохранить их в библиотеках. Если директива `param` включена в описании подсхемы, то ее область действия распространяется только на эту подсхему и на подсхемы, включенные в нее. Чтобы вызывать замену параметра и вычисление выражения, надо заключить выражение в изогнутые фигурные скобки.

Ниже приводится пример использования директивы `param` для непосредственной передачи параметров в строке, ссылающейся на подсхему.

*

* Здесь описание схемы

```
.params x=y y=z z=1k*tan(pi/4+.1)
```

```
X1 a b 0 divider top=x bot=z
```

```
V1 a 0 pulse(0 1 0 .5μ .5μ 0 1μ)
```

* Здесь описание подсхемы

```
.subckt divider n1 n2 n3
```

```
r1 n1 n2 {top}
```

```
r2 n2 n3 {bot}
```

```
.ends
```

*

```
.tran 3μ
```

.end

Вычисление параметра начинается после обнаружение фигурных скобок, после этого вычисляются все доступные выражения.

.SAVE – Ограничения на количество записываемых данных

Ряд режимов моделирования, особенно расчет переходных процессов, может генерировать большое количество данных. Их число может быть ограничено, использованием save-директивы. В этом случае записываются только те напряжения и токи, которые представляют интерес.

Синтаксис:

```
.save V(out) [V(in) [I(L1) [I(S2)]]] [dialogbox]
```

Директива .save I(Q2) сохранит токи базы, коллектора и эмиттера биполярного транзистора Q2. Чтобы записать только ток коллектора, надо указать Ic(Q2).

В директиве могут использоваться групповые символы '*' и '?'. Например, ".save V(*) Id (*)" сохранит только все потенциалы и все токи стока.

Если определено ключевое слово "dialogbox", то отображается диалоговое окно со списком всех доступных потенциалов и токов. Если моделирование ведется с использованием схемного редактора LTspice, то вывод на график нужного тока или потенциала может быть задан непосредственно по схеме.

.SAVEBIAS – Сохранение данных режима по постоянному току

Синтаксис:

```
.savebias <filename> [internal]  
+ [time=<value> [repeat]] [temp=<value>] [step=<value>]  
+ [DC1=<value>] [DC2=<value>] [DC3=<value>]
```

По этой команде записывается текстовый файл с именем, указанным в <filename>, который впоследствии может быть загружен командой loadbias при последующем моделировании.

Команды savebias и loadbias применяются при расчете больших схем или схем, для которых по тем или иным причинам расчет режима по постоянному току занимает большое время. В этом случае найденное один раз решение сохраняется на диске по директиве savebias и по директиве loadbias загружается перед выполнением этого или других видов анализа.

Можно добавить ключевое слово "internal", для сохранения потенциалов внутренних узлов подсхем.

Параметры [time=<value> [repeat]] определяют моменты времени, в которые запоминаются узловые потенциалы схемы при расчете переход-

ных процессов. Если параметр `repeat` не указан, то узловые потенциалы запоминаются в первый момент времени, равный указанному значению (с точностью до шага интегрирования) или превышающий его. При наличии параметра `[repeat]`, параметр `<value>` равен интервалу времени, с которым узловые потенциалы запоминаются, при этом в файле сохраняется только последняя запись.

Параметр `[temp=<value>]` задает температуру, для которой сохраняются узловые потенциалы при вариации температуры, а параметр `[step=<value>]` задает интервал температур, через который обновляется запись в файл.

Параметры `[DC1=<value>]` `[DC2=<value>]` `[DC3=<value>]` задают значения параметров, варьируемых по директиве `.DC`, для которых производится запись в файл. Параметр `[DC1=<value>]` используется только при вариации одной переменной, а `DC2`, `DC3` – при вариации двух переменных (соответственно первой и второй).

Образуемый на диске текстовый файл имеет следующий формат. Сначала на одной или более строках в виде комментариев указываются имя схемы, заголовок, дата создания, затраты времени на расчет, тип анализа, температура и т.п. Далее помещается единственная директива `.NODESET`, содержащая полную информацию об узловых потенциалах схемы. При модификации схемы, файл может быть отредактирован вручную, добавляя или исключая из директивы `.NODESET` узлы или корректируя их потенциалы.

.STEP – Вариация параметров

Эта команда позволяет выполнить многовариантный расчет при изменении температуры, параметра модели, глобального параметра или независимого источника. Варьируемый параметр может задаваться в определенном диапазоне с линейным или логарифмическим шагом приращения, или в виде списка значений.

Примеры:

.step oct v1 1 20 5

Здесь изменение напряжения независимого источника `v1` задается в диапазоне от 1 до 20 Вольт в логарифмическом масштабе, 5 точек на октаву.

.step I1 10u 100u 10u

Изменение тока независимого источника `I1` задается в диапазоне от 10мкА до 100мкА при линейном приращении тока с шагом 10мкА.

.step param RLOAD LIST 5 10 15

Моделирование будет выполнено 3 раза с глобальным параметром `Rload` равным 5, 10 и 15

.step NPN 2N2222(VAF) 50 100 25

Параметр VAF в модели NPN-транзистора меняется от 50 до 100 с шагом 25

.step temp -55 125 10

Температура меняется от -55°C до 125°C с шагом 10 градусов. 10-degree step. Step sweeps may be nested up to three levels deep.

Возможно изменение сразу нескольких параметров, но не больше трех. В этом случае формируются вложенные циклы.

.SUBCKT – Описание подсхемы

Множественно повторяющиеся участки схемы могут быть определены как подсхема. В результате эти участки заменяются ссылками на описание этой подсхемы. Перед моделированием список соединений схемы расширяется заменой каждого обращения к подсхеме ее элементами.

Окончание описания подсхемы обозначается директивой .ends.

Ниже приведен пример описания подсхемы:

*

* Описание схемы

X1 a b 0 divider

V1 a 0 pulse(0 1 0 .5μ .5μ 0 1μ)

* Описание подсхемы

.subckt divider n1 n2 n3

r1 n1 n2 1k

r2 n2 n3 1k

.ends

.tran 3μ

.end

В результате непосредственно для моделирования будет сформирован следующий список соединений:

* X1 разворачивается в цепь из 2-х транзисторов

r:x1:1 a b 1k

r:x1:2 b 0 1k

*

v1 a 0 pulse(0 1 0 .5μ .5μ 0 1μ)

.tran 3μ

.end

Имена элементов подсхем и имя подсхемы образуют полное имя этих элементов.

.TEMP – вариация температуры

Директива является архаичной формой для задания списка значений температуры при многовариантном расчете.

Синтаксис:

.TEMP <T1> <T2> ...

эквивалентно:

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

.TF – Расчет малосигнальных передаточных функций

По этой директиве выполняется расчет по постоянному току в окрестности рабочей точки и, после линеаризации схемы, рассчитываются передаточные функции при малых изменениях входного независимого источника. Если выходная переменная – ток, то для его определения используется измерительный источник напряжения с нулевым значением напряжения.

Синтаксис:

.TF V(<узел>[, <2-й узел>]) <имя источника>

.TF I(<имя независимого источника напряжения>) <имя источника>

Примеры:

.TF V(out) Vin

.TF V(5,3) Vin

.TF I(Vload) Vin

.TRAN – Расчет переходных процессов

В LTspice могут применяться две формы директивы:

Синтаксис:

.TRAN <Tstep> <Tstop> [Tstart [dTmax]] [modifiers]

.TRAN <Tstop> [modifiers]

Первая форма - традиционная команда SPICE. <Tstep> - приращение времени для построения графиков, также используется как предварительное задание размера расчетного шага. LTspice использует сжатие данных при их графическом отображении, так что этот параметр мало-значим и может быть опущен или установлен в нуль. <Tstop> - продолжительность моделирования. Переходные процессы как правило, рассчитываются с нулевого момента времени. Однако, если задан параметр Tstart, то результаты между нулевым временем, и временем, равным Tstart не сохраняются. Этот параметр может использоваться для регулирования размеров выходных файлов, позволяя проигнорировать процессы при запуске схемы. Параметр dTmax, является максимальным шагом

интегрирования уравнений схемы. Если заданы T_{start} и dT_{max} , то должен быть задан шаг T_{step} .

В директиве `tran` может присутствовать несколько опций [modifiers]: `UIC`, `steady`, `nodiscard`, `startup` и `step`.

UIC (Use Initial Conditions – использовать начальные условия): Перед началом расчета переходных процессов всегда рассчитывается режим по постоянному току. Если установлена опция `UIC`, то расчет режима по постоянному току отменяется. Начальные значения напряжений на емкостях и токов индуктивностей указываются в опциях `IC=...` при описании емкостей и индуктивностей, а все начальные значения узловых потенциалов указываются в директиве `.IC`.

Опцию `UIC` следует применять с осторожностью. Пропуск расчета по постоянному току, в котором отыскивается рабочая точка, может привести к нефизическому начальному состоянию. Например, рассмотрим источник напряжения, соединенный параллельно с емкостью. При нулевых начальных условиях на емкости в первый шаг должен появиться бесконечный ток, заряжающий емкость. Алгоритм моделирования будет сокращать расчетный шаг, чтобы ток стал конечной величиной, что приведет к сообщению об ошибке вида "time step too small convergence fail" ("шаг по времени слишком маленький").

steady: Прервать моделирование при достижении установившегося состояния.

Возможно полуавтоматическое определение установившегося состояния. Для этого после запуска моделирования надо воспользоваться командами меню `Simulate=>Efficiency Calculation=>Mark Start` и `Simulate=>Efficiency Calculation=>Mark End`.

Рекомендуется использовать директиву `.ic` для ускорения выхода на установившийся режим. Амплитуда ошибки при поиске установившегося состояния задается в опции `sstol`.

nodiscard: Не удалять часть переходного процесса до установившегося состояния.

startup: Рассчитать начальную рабочую точку с отключенными независимыми источниками тока и напряжения. После этого запустить расчет переходных процессов и включить эти источники в первые 20 мкс моделирования.

step: Вычислять пошаговый отклик схемы.

Эта опция работает с источниками тока, загружаемыми в виде списка с шагом по току. Процедура расчета следующая:

- 1) вычисление установившегося состояния и удаление части переходного процесса, если не установлена опция nodiscard;
- 2) линейное нарастание следующего значения тока из списка со скоростью нарастания 20 А/мкс;
- 3) вычисление установившегося состояния
- 4) загрузка следующего значения тока из списка или завершение расчета, если список исчерпан

При сложных схемах автоматический переход на новое значение из списка может не произойти. В этом случае рекомендуется применить при расчете переходных процессов кусочно-линейное задание источника тока, например:

PWL(0 0.5 1m 0.5 1.01m 0.1 3m 0.1 3.01m 0.5)

что означает:

загрузка начального тока 0.5А в нулевой момент времени,
 фиксация 0.5А в течении 1мс,
 переключение на 0.1А в момент 1.01мс,
 фиксация 0.1А в течение 3мс,
 переход к 0.5А к моменту 3.01мс и фиксация 0.5А.

PWL может иметь почти неограниченную последовательность пар (время, значение).

.WAVE – Запись потенциалов в .Wav файл.

LTspice может записывать .wav аудио-файлы. Эти файлы можно прослушивать или использовать как входные данные для другого моделирования.

Синтаксис:

`.wave <filename.wav> <Nbits> <SampleRate> V(out) [V(out2) ...]`

Пример:

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

<имя файла.wav> может включать или абсолютный путь к файлу или относительный путь, содержащий схему или список соединений. Если путь к файлу содержит пробелы, то он заключается в кавычки.

<Nbits> - число битов на канал. -Допустимый диапазон - от 1 до 32 битов.

<SampleRate> число записей выборок в моделируемую секунду. Допустимый диапазон от 1 до 4294967295 выборок в секунду.

Остальная часть синтаксиса перечисляет узлы, напряжения на которых требуется записать. Каждому узлу будет соответствовать независимый канал в .wav файле. Число каналов может быть от одного до 65535. Так же как и узловое напряжение, можно записать ток, например, Ib(Q1). .wav-аналоговый файл преобразуется в цифровой сигнал в диапазоне от -1 до +1 Вольта или Ампера.

Следует обратить внимание на то, что возможно записать .wav файлы, которые нельзя запустить в звуковой системе вашего компьютера из-за числа каналов, скорости выборки или числа битов, в связи с ограничениями кодер-декодера. Вместе с тем эти .wav файлы могут использоваться в LTspice как входные данные для другого моделирования. При запуске .wav файла на звуковой плате вашего компьютера, следует иметь в виду, что обычно поддерживаемые файлы .wav форматы имеют 1 или 2 канала; 8 или 16 битов/канал и скорость выборки составляет 11025, 22050, или 44100 Гц.

Выходные переменные

1. При расчете переходных процессов и расчете по постоянному току используются следующие обозначения для переменных [3]:

Общая форма	Пример	Пояснение
$V(\langle \text{узел} \rangle)$	$V(2)$	Потенциал узла
$V(\langle +\text{узел} \rangle, \langle -\text{узел} \rangle)$	$V(2,4)$	Разность потенциалов узла
$V(\langle \text{имя} \rangle)$	$V(R1)$	Разность потенциалов между выводами двухполюсного компонента
$V_x(\langle \text{имя} \rangle)$	$V_B(Q1)$	Потенциал вывода многополюсного компонента
$V_{xy}(\langle \text{имя} \rangle)$	$V_{CE}(Q3)$	Разность потенциалов между выводами многополюсного компонента
$V_z(\langle \text{имя} \rangle)$	$V_A(T2)$	Напряжение на входе или выходе линии передачи ($z=A$ - вход, $z=B$ - выход)
$I(\langle \text{имя} \rangle)$	$I(D5)$	Ток через двухполюсный компонент
$I_x(\langle \text{имя} \rangle)$	$I_B(Q1)$	Ток через указанный вывод многополюсного компонента
$I_z(\langle \text{имя} \rangle)$	$I_A(T3)$	Ток через входные или выходные зажимы линии передачи ($z=A$ - вход, $z=B$ - выход)

В спецификации переменных $V(\langle \text{имя} \rangle)$, $I(\langle \text{имя} \rangle)$ параметр $\langle \text{имя} \rangle$ указывает на один из двухполюсных компонентов, имена которых начинаются со следующих букв: С – конденсатор; D – диод; E – ИНУН; F – ИТУТ; G – ИТУН; H – ИНУТ; I – независимый источник тока; L – индуктивность; R – резистор; S – ключ, управляемый напряжением; V – независимый источник напряжения; W – ключ, управляемый током.

В спецификациях переменных $V_x(\langle \text{имя} \rangle)$, $V_{xy}(\langle \text{имя} \rangle)$ и $I_x(\langle \text{имя} \rangle)$ параметр $\langle \text{имя} \rangle$ указывает имя трехполюсного или четырехполюсного компонента, а x и y – аббревиатуры их выводов (см. след. табл.).

Имена трех- и четырехполюсных компонентов

Первая буква	Компонент	Аббревиатура вывода
B	Арсенид-галлиевый полевой транзистор	D (сток), G (затвор), S (исток)
J	Полевой транзистор	D (сток), G (затвор), S (исток)
M	МОП-транзистор	D (сток), G (затвор), S (исток) B (подложка)
Q	Биполярный транзистор	C (коллектор), B (база), E (эмиттер), S (подложка)
T	Линия передачи	VA (входное напряжение) IA (входной ток) VB (выходное напряжение) IB (выходной ток)
Z	Статически индуцированный биполярный транзистор	C (коллектор), G (затвор), E (эмиттер)

Например, напряжение коллектор – база транзистора Q3 обозначается как VCB(Q3).

В спецификациях переменных Vz(<имя>), Iz(<имя>) в качестве параметра <имя> указывается имя линии передачи (начинается с буквы T), а символ z принимает два значения: A – вход, B – выход линии передачи.

2. Режим расчета частотных характеристик. При выводе результатов расчета частотных характеристик к именам переменных, перечисленным выше, добавляются суффиксы, перечисленные ниже в табл.

Суффиксы имен переменных при расчете частотных характеристик

Суффикс	Пример	Пояснение
	V(2,3)	Модуль
M	VM(2)	Модуль
DB	VDB(R1)	Модуль в децибелах
P	VCEP(Q3)	Фаза в радианах
G	IAG(T2)	Групповое запаздывание
R	IR(VIN)	Действительная часть
I	II(R13)	Мнимая часть

В отличие от режимов DC и TRAN в режиме AC возможен вывод токов не всех компонентов, а только следующих: R — резисторы; C — конденсаторы; I — независимые источники тока; L — индуктивности; T — линии передачи; V — независимые источники напряжения. Для вывода токов других устройств необходимо последовательно с ними включить независимый источник напряжения с нулевой ЭДС и затем указать спецификацию тока этого источника.

3. Анализ уровня внутреннего шума. При расчете уровня внутреннего шума имена выходных переменных имеют стандартный вид:

INOISE — эквивалентный уровень шумового напряжения или тока на входе цепи, равный $\sqrt{S_{ax}(f)}$

ONoise — уровень напряжения шума на выходе, равный $\sqrt{S_{u_{вых}}(f)}$

DB(INOISE) — эквивалентный уровень шумового напряжения или тока на входе в децибелах;

DB(ONoise) — уровень напряжения шума на выходе в децибелах.

В графическом постпроцессоре корень квадратный из спектральной плотности напряжения и тока внутреннего шума выводится в виде V(INOISE), I(INOISE), V(ONoise).

Графический постпроцессор

Выбор графиков

Есть три основных способа выбора графиков.

1. Отображение графиков непосредственно из схемы;
2. В диалоговых окнах командами меню **Plot Settings=>Visible Traces** и **Plot Settings=>Add Trace**;

1. Отображение графиков непосредственно из схемы:

Курсором указать провод – курсор отобразится в виде пробника, и щелкнуть левой кнопкой мыши - появится график потенциала на этом проводе относительно "земли". Если то же самое выполнить при нажатой клавише **Alt**, то курсор отобразится в виде токовых клещей (красная стрелка на клещах покажет направление тока) и при нажатии на левую кнопку мыши появится график тока через проводник. График тока отобразится, если курсор навести на двухполюсник или на контакт многополюсника. Если второй раз указать ток или напряжение, то отобразится только указанный график – все остальные будут стерты. Удалить график можно, активизируя панель графиков и нажав пиктограмму удаления объектов. Курсор в виде ножниц надо навести на название удаляемого графика. Для отображения напряжения между узлами, надо нажать на один узел и перетащить курсор на второй узел. Курсор в виде красного пробника сохранится на первом узле и в виде черного пробника на втором узле. Для отображения мгновенной мощности надо навести курсор на двухполюсник или на контакт многополюсника, и нажать на клавишу **Alt**.

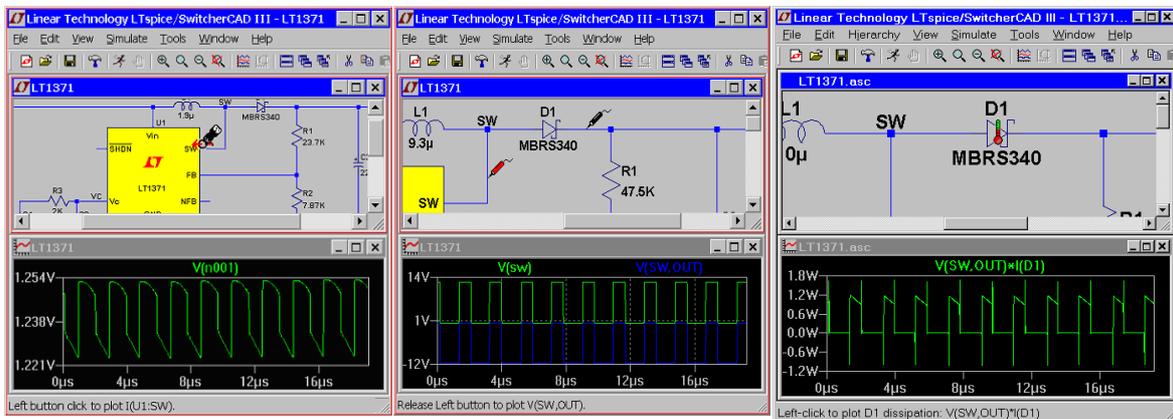


Рис.18. Отображение графиков тока, напряжения и мгновенной мощности непосредственно из схемы.

Отображением графиков непосредственно из схемы можно воспользоваться для схем любого уровня иерархии.

2. Команды меню **Plot Settings=>Visible Traces** и **View=>Add Trace**:

Эти команды доступны из главного меню при активной панели графика-

ков. Такой же результат можно получить, если при активной панели графиков нажать правую кнопку мыши и выбрать в меню **Visible Traces** или **Add Trace**.

В результате в первом случае появится диалог, позволяющий выбрать нужный график из полного списка графиков. При нажатой Ctrl можно выбрать графики в произвольном порядке, при нажатой Alt оттягивая мышью, можно выбрать некоторое число последовательно следующих друг за другом графиков, при нажатой Alt и двойном клике мышью по-

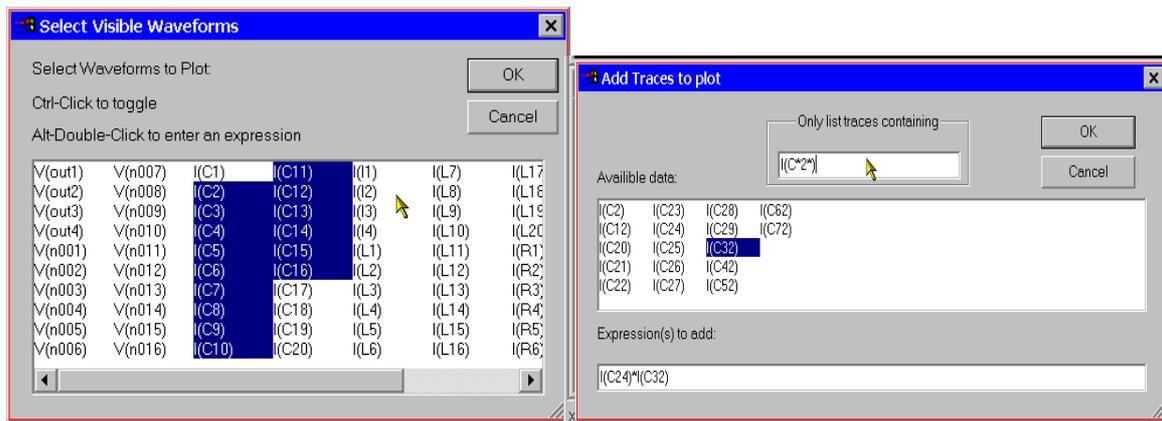


Рис.19. Отображение графиков через диалоговые окна.

явится окно для ввода алгебраического выражения.

Во втором случае отличия будут в следующем. Нельзя непосредственно удалить уже видимые графики. Преимущества: можно отобразить список графиков по шаблону и можно ввести выражение для отображаемого графика.

Размер экрана

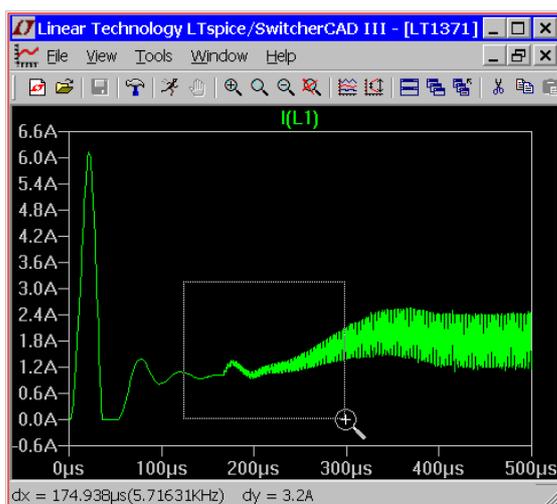


Рис.20. Масштабирование графиков.

LTspice автоматически масштабирует размер окна для построения графика. Чтобы изменить размер окна на области, надо нажатой левой кнопкой мыши оттянуть прямоугольник нужных размеров.

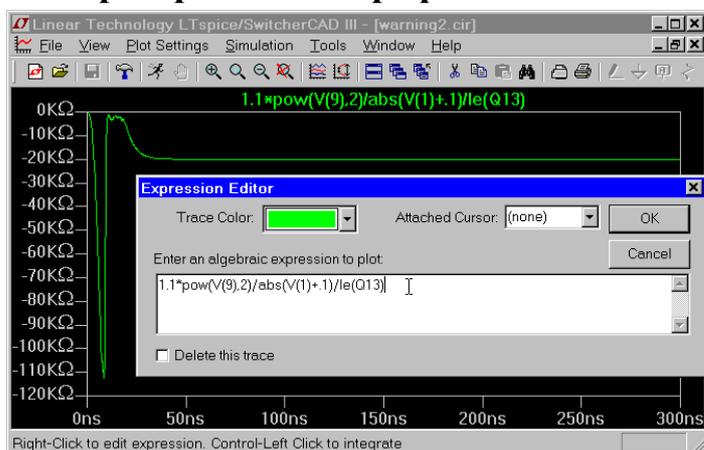
На панели имеются кнопки, позволяющие уменьшить масштаб, выполнить панорамирование, автоматически выбрать масштаб или вернуться к исходному размеру окна. Есть также возможность отката (отмена и восстановление) команд, если в главном меню набрать **Plot Setting –Undo/Redo**.

Математическая обработка графиков

Имеется три способа обработки графиков:

1. Преобразование графиков по математическому выражению.
2. Вычисление среднего и среднеквадратичного значения.
3. Отображение результатов Фурье-преобразования графиков.

Преобразование графиков по математическому выражению.



Перевести курсор на название графика и кликнуть правой кнопкой мыши. В появившемся окне (рис.21) можно ввести требуемое выражение. Разность потенциалов, например, $V(a)-V(b)$ может быть записана в эквивалентной форме $V(a,b)$.

Рис.21. Ввод математического выражения при обработке графиков.

Приведенные в таблице операции сгруппированы в обратном порядке старшинства вычисления:

&	преобразование операнда к Булевой переменной и выполнение операции И
	преобразование операнда или выражения к Булевой переменной и выполнение операции ИЛИ
^	преобразование операнда или выражения к Булевой переменной и выполнение операции исключающее ИЛИ
<	истина, если выражение слева - меньше чем выражение справа, иначе ложь
>	истина, если выражение слева больше чем выражение справа, иначе ложь
<=	истина, если выражение слева меньше чем или равно выражение справа, иначе ложь
>=	истина, если выражение слева больше чем или равно выражение справа, иначе ложь
+	сложение с плавающей запятой
-	вычитание с плавающей запятой
*	умножение с плавающей запятой
/	деление с плавающей запятой
**	возведение в степень
!	преобразование выражения к Булевой переменной и инвертирование
@	оператор выбора шага

Доступные математические функции приведены в следующей таблице.

abs(x)	абсолютное значение
acos(x)	арккосинус x
acosh(x)	гиперболический арккосинус
asin(x)	арксинус
asinh(x)	гиперболический арксинус
atan(x)	арктангенс
atan2(y, x)	четырёхквadrантный арктангенс y/x
atanh(x)	гиперболический арктангенс
cos(x)	косинус
cosh(x)	гиперболический косинус
exp(x)	экспонента
ln(x)	натуральный логарифм
log(x)	натуральный логарифм
log10(x)	десятичный логарифм
sgn(x)	знак
sin(x)	синус
sinh(x)	гиперболический синус
sqrt(x)	квадратный корень
tan(x)	тангенс
tanh(x)	гиперболический тангенс
u(x)	1 если $x > 0.$, иначе 0.
buf(x)	1 при $x > .5$, иначе 0
inv(x)	0 при $x > .5$, иначе 1
uramp(x)	x если $x > 0.$, иначе 0.
!(x)	альтернативный синтаксис для inv(x)
int(x)	преобразование x к целому числу
floor(x)	целое число равное или меньше чем x
ceil(x)	целое число равное или больше чем x
rand(x)	случайное число между 0 и 1 в зависимости от целочисленного значения x
random(x)	подобно rand(), но с гладкими переходами между значениями.
re(x)	Вещественная часть комплексного числа
white(x)	случайное число между $-.5$ и $.5$, еще более гладкие переходы по отношению к random
min(x,y)	наименьшее из x и y
max(x,y)	наибольшее из x или y
limit(x,y,z)	эквивалентно min(max(x,y),z)
if(x,y,z)	если $x > .5$, то y иначе z
table(x,a,b,c,d,...)	интерполяция значений для x, основанная на просмотре таблицы, заданной как набор пар точек.

Для комплексных чисел функции atan2(), sgn(), u(), buf(), inv() uramp(), int(), floor(), ceil(), rand(), min(), limit(), if(,), и table(...) не доступны.

Функции **Re(x)** и **Im(x)** возвращают вещественную и мнимую часть комплексного числа. Функции **Ph(x)** и **Mag(x)** возвращают фазу и амплитуду комплексного числа.

Истина в цифровой форме равна 1, и Ложь - 0. Преобразование к Булевской переменной конвертирует значение к 1, если значение больше чем 0.5, иначе значение преобразуется в 0.

Оператор выбора шага, '@' полезен при выполнении многовариантного моделирования и применяется при заданных директивах .step, .temp, или .dc. Он позволяет выбирать данные, начиная с определенного выполненного шага. Например, оператор V(1)@3 определяет данные для графика, начиная с 3-го шага.

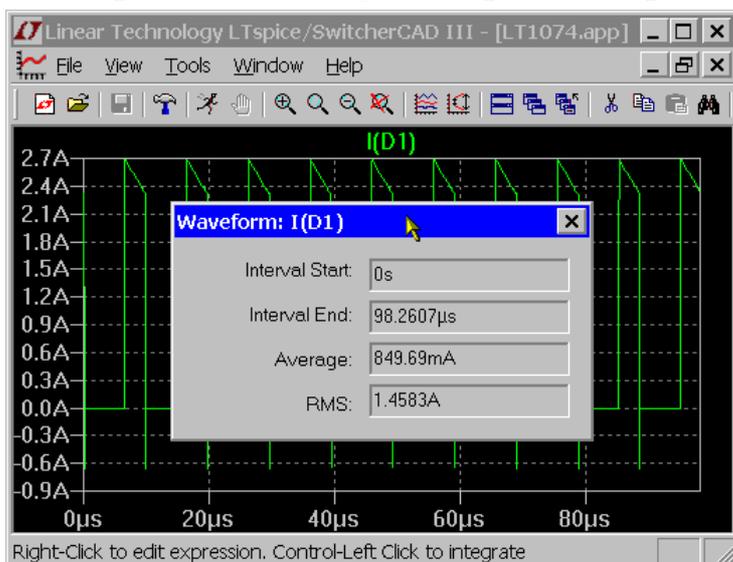
Для комплексных чисел доступны только +, -, *, /, **. Для комплексных чисел Булев оператор XOR (^), означает возведение в степень **.

Имеются следующие встроенные константы:
e=2.7182818284590452354; pi=3.141592653589793238464;
k=1.3806503e-23; q=1.602176462e-19.

При построении графиков переходных процессов ключевое слово "time" воспринимается как время. Точно так же "freq" и "omega" воспринимаются как частота и угловая частота при выполнении частотного анализа. "w" может использоваться как синоним для "omega".

Вычисление среднего и среднеквадратичного значения.

Графический постпроцессор может проинтегрировать график для получения среднего (average) и среднеквадратичного значения (RMS) по



отображенной области. Для этого по оси "x" надо выбрать интересующий диапазон, затем переместить мышь в название графика и удерживая клавишу CTRL и щелкнуть левой кнопкой мыши.

Рис.22. Окно с результатами вычисления среднего и среднеквадратичного значения.

Отображение результатов Фурье-преобразования графиков.

Быстрое преобразование Фурье для различных графиков выполняется через команду меню View=>FFT. Окно настройки приведено на рис.23.

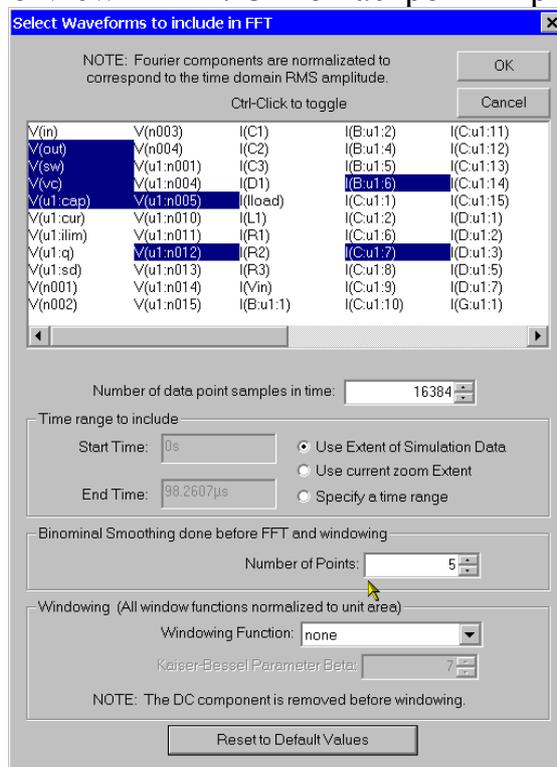


Рис.23. Окно быстрого преобразования Фурье

Пользовательские функции

Команда меню **Plot Settings=>Edit Plot Defs File** позволяет вводить собственные функции и параметры для их использования в графическом постпроцессоре. Эти функции сохраняются в файле plot.defs в том же самом каталоге SwCADIII, где находится программа scad3.exe.

Синтаксис тот же самый как у инструкций .param и .func, используемых для параметризации схем. Например, строка:

.func Pythag(x,y) {sqrt(x*x+y*y)} - определяет функцию Pythag() для вычисления квадратного корня от суммы двух параметров.

Аналогично, строка

.param twopi = 2*pi - определяет twopi как число 6.28318530717959. Обратите внимание на использование встроенной константы pi .

Управление осями координат

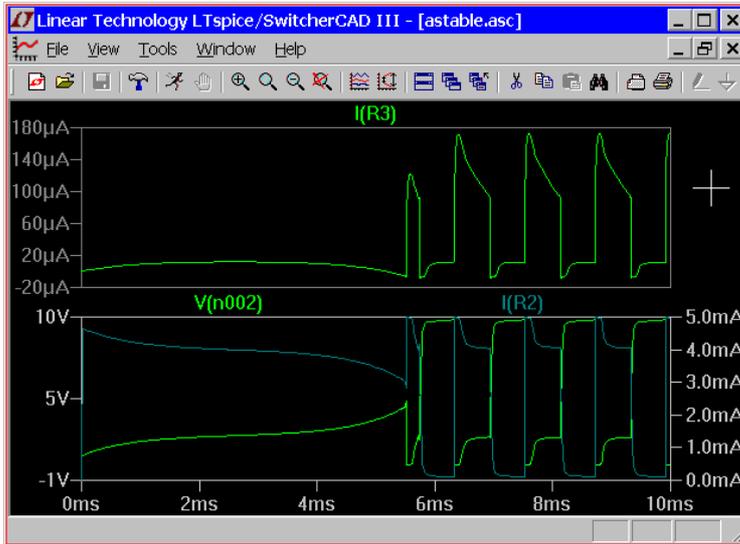
Если переместить курсор мыши в область осей координат, курсор превращается в линейку. При левом клике появляется окно для ручного

ввода диапазона оси и характера построения графика. Например, для вещественных данных, можно изменить пределы отображения по оси "у" и задать логарифмический масштаб.

Для данных в комплексной форме, можно выбрать форматы представления Bode, Nyquist или Cartesian.

Дополнительные поля для графиков

Можно ввести дополнительные поля для графиков в том же окне (см. рис.24). Для каждого поля можно независимо масштабировать ось ординат.

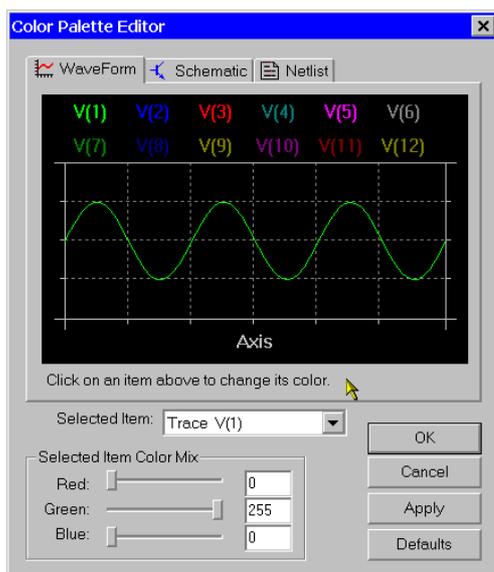


Можно перемещать графики из одного поля в другое, если навести курсор на название графика и при нажатой левой кнопке мыши перетащить это название на другое поле. Если после перетаскивания нажать клавишу **Ctrl** и отпустить мышь, то график скопируется

Рис.24. Дополнительные поля для графиков.

Управление цветом

Команда меню **Tools=>Color Preferences** позволяет устанавливать цвета.



Наведя курсор на объект в типовом графике, и используя красные, зеленые и синие слайдеры, можно откорректировать цвет этого объекта.

Рис.25. Управление цветом

Добавление курсоров

Можно использовать один или два курсора. Вы можете прикрепить курсор к следу левой мышью, нажимающей на метку следа. Один курсор прикрепляется к графику, если его навести на название графика и кликнуть левой кнопкой мыши. К этому же графику можно прикрепить второй курсор, если кликнуть правой кнопкой мыши на названии этого графика.

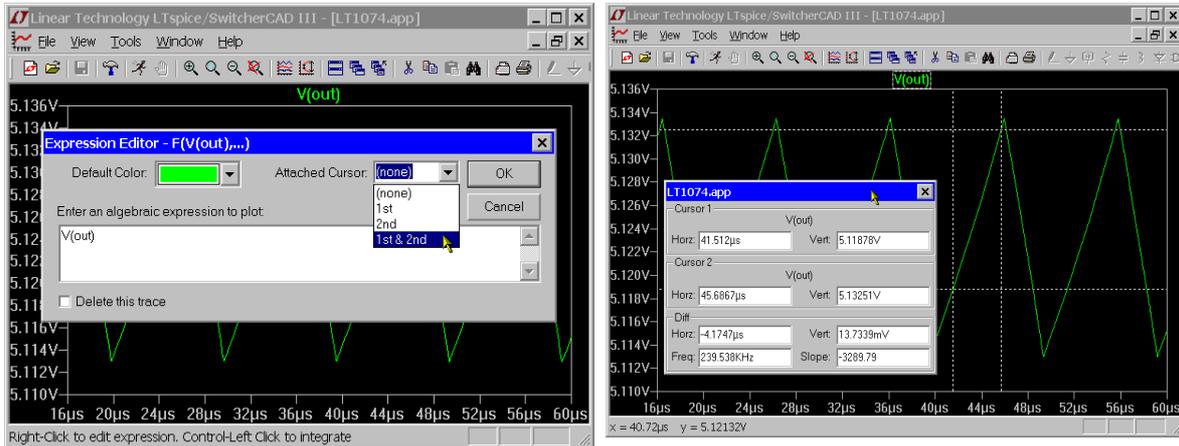
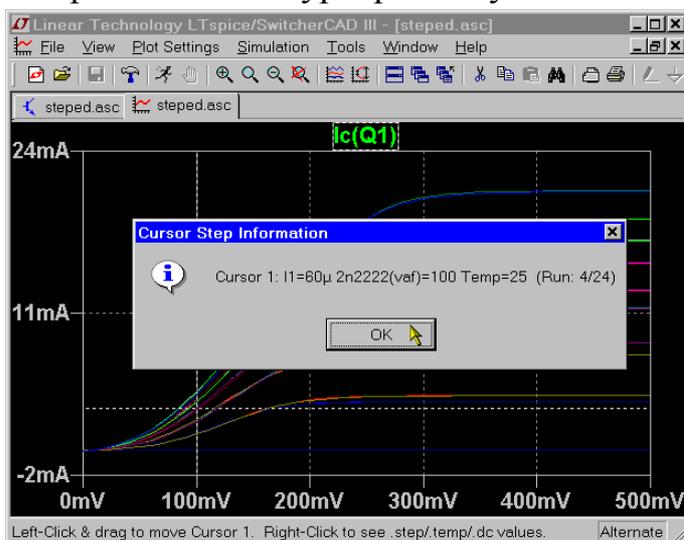


Рис.26. Выбор курсоров и отображение результатов их размещения.

Появится диалоговое окно, как на рис.26а, на развороте **Attached Cursor** надо выбрать **1st&2nd**. Можно также прикрепить 1-ый или 2-ой курсор или оба курсора к любому графику, выбирая соответствующее значение на этом развороте. Курсоры можно перемещать мышью или клавишами со стрелками. При активных курсорах появляется окно, показывающее месторасположение курсоров и их различия (рис.26б.).

Приложенные курсоры могут также использоваться для определения,



к какому шагу принадлежит график при отображении результатов многовариантного расчета. Для этого надо разместить курсор на вертикальной линии отсчета (должна появиться цифра 1 или 2) и нажать правую кнопку мыши. В результате появится окно с информацией о выполненном шаге (рис.27).

Рис.27. Окно с информацией о выполненном шаге многовариантного расчета.

Сохранение конфигурации

Команды меню **Plot Settings=>Save Plot Settings/Open Plot Settings files**, позволяют читать и записывать параметры настройки графиков на диск. Файл с конфигурацией графиков это текстовый файл с расширением ".plt". Такие файлы можно применять только к однотипным видам моделирования.

Формат файла с быстрым доступом

При моделировании LTspice использует сжатый двоичный формат файла данных, который позволяет добавлять новые данные в конец файла, не изменяя остальную его часть. После завершения моделирования, этот формат для обработки оказывается медленным при добавлении нового графика.

Чтобы сократить время обработки данных, можно преобразовать файл к альтернативному формату с быстрым доступом. Этот формат может быть получен после того, как моделирование закончено и когда не добавляются новые данные. В формате с быстрым доступом время загрузки новых графиков сокращается. Например, если имеется 5GB файл с 2000 графиками, то потребуется порядка 4min, чтобы добавить новый график. Но после конвертирования в формат **Fast Access**, время загрузки с этих четырех минут уменьшается до одной секунды.

Чтобы преобразовывать окно с графиками к формату **Fast Access**, надо это окно сделать активным и выполнить команду меню **Files=>Convert to Fast Access**. Преобразованный файл будет только на 11 байтов большим, чем первоначальный файл. Конверсионный процесс может занять долгое время и много физической памяти. Это время будет зависеть от состояния фрагментации жесткого диска и количества физической памяти. В ходе преобразования машина может не реагировать на мышь и клавиатуру. Чтобы избежать этого, можно конвертировать файлы в команде со следующим синтаксисом командной строки:

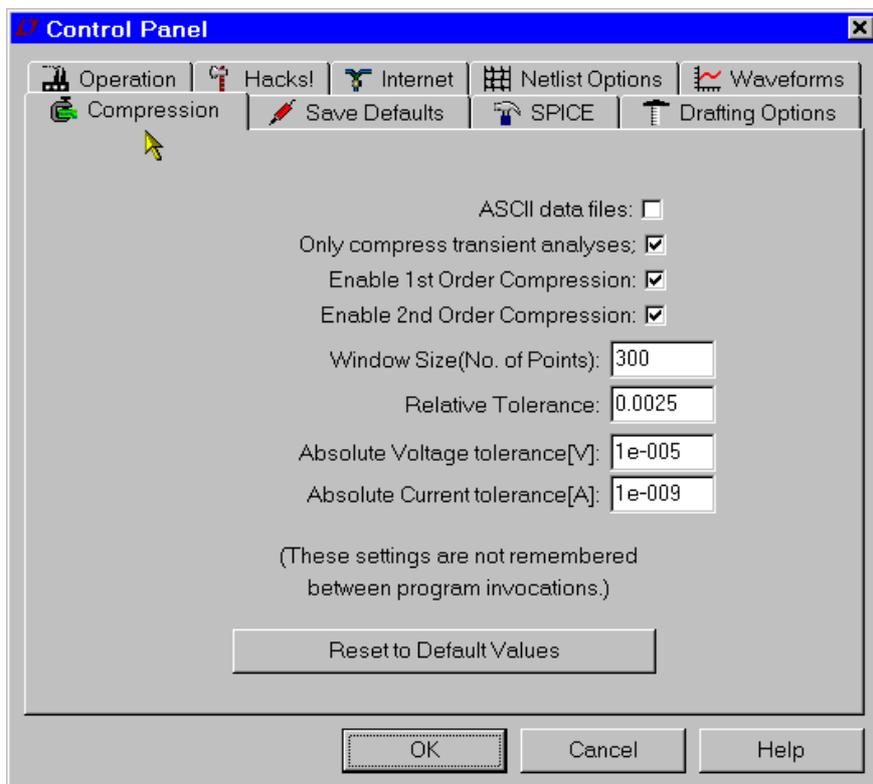
```
scad3.exe -FastAccess <file>,
```

где <файл> - имя .raw файла, который преобразуется в формат **Fast Access**.

Формат **Fast Access** поддерживается только для вещественных данных.

Панель управления.

Compression (Сжатие данных)



LTspice сжимает raw-файлы данных. Сжатый файл может быть в 50 раз меньше чем несжатый. Сжатие выполняется с потерями. Эта закладка панели управления позволяет управлять этими потерями.

Window Size(No. of Points): Максимальное число точек, которое может расположиться между двумя точками после сжатия.

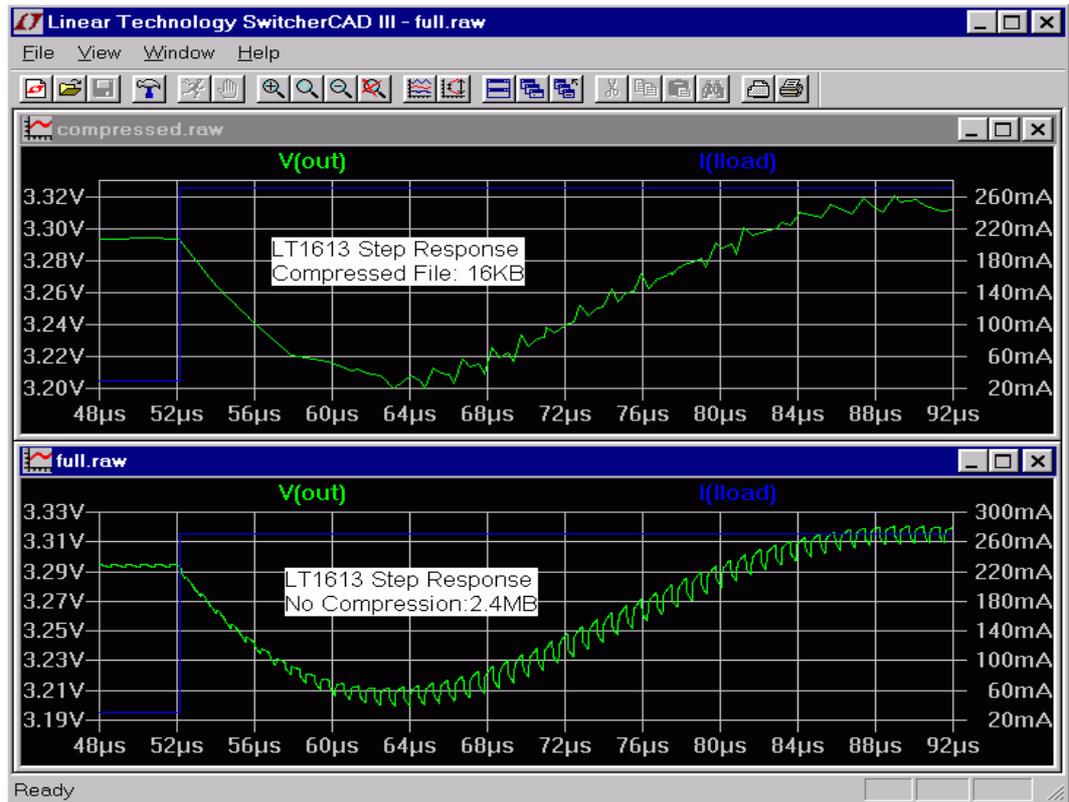
Relative Tolerance: относительная допустимая ошибка между сжатыми и несжатыми данными.

Absolute Voltage tolerance [V]: допустимая ошибка по напряжению.

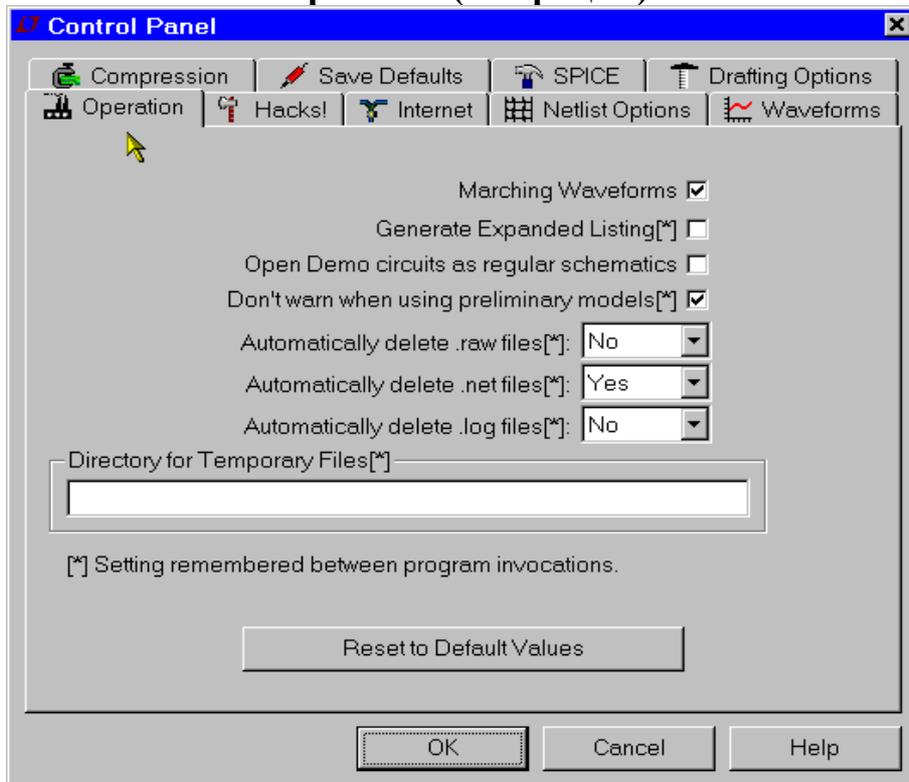
Absolute Current tolerance[A]: допустимая ошибка по току.

Установленные параметры сжатия не запоминаются между запусками программы, так как использование по умолчанию. Они доступны на панели управления для диагностических целей. Допустимые ошибки и размер окна могут быть установлены опциями `plotreltol`, `plotvntol`, `plotabstol` и `plotwinsize` в директивах `.option`, помещенных как SPICE-директивы в схемном редакторе.

Ниже на рис. приведен пример отображения сжатого и несжатого файлов:



Operation (Операции)



Строки, отмеченные звездочкой [*] запоминаются между обращениями программы.

Marching Waveforms: Проверка результатов моделирования на предмет их отображения в ходе расчета.

Generate Expanded Listing: Размещение в списке соединений расширенной информации из файла системного журнала - SPICE Error Log file.

Open Demo circuits as regular schematics: Открыть демонстрационные схемы в .\SwCADIII\lib\app*.app. Все команды SPICE будут видны. Схемы могут быть отредактированы и записаны в новом файле. Строки, отмеченные двойными точками '..' на схеме служат для демонстрации применения SPICE-директив. Строки, отмеченные только одной точкой могут быть отредактированы.

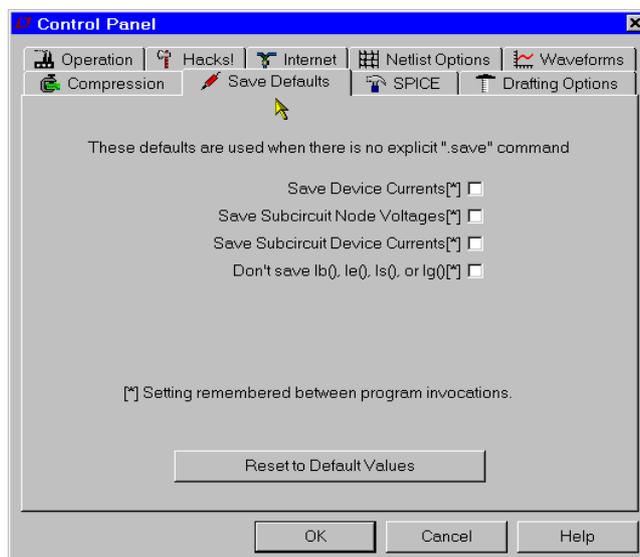
Don't warn when using preliminary models: Выключить сообщение предупреждения для всех SMPS-моделей (эти модели имеют правовую защиту).

Automatically delete .raw files: Этот флажок позволяет удалить файлы данных после завершения моделирования, что значительно уменьшает место на диске, но требует дополнительного времени на формирование данных при повторном моделировании.

Automatically delete .net files: удаление списка соединений после завершения моделирования. Список соединений является временным файлом, но может понадобиться при тестировании схемы или при записи в текстовый файл созданного в схемном редакторе описания схемы (подсхемы).

Automatically delete .log files: Эти файлы содержат различную статистику моделирования – времени моделирования, предупреждений и сообщений об ошибках и параметрах шага, используемых для исследований в директивах .step/.temp/.dc.

Save Defaults (Запись по умолчанию)



Эта закладка используется, если явно не указано, какая информация должна быть записана при моделировании. Здесь можно отметить строки: "Записать токи ", "Записать узловые напряжения подсхем" и "Записать токи подсхем".

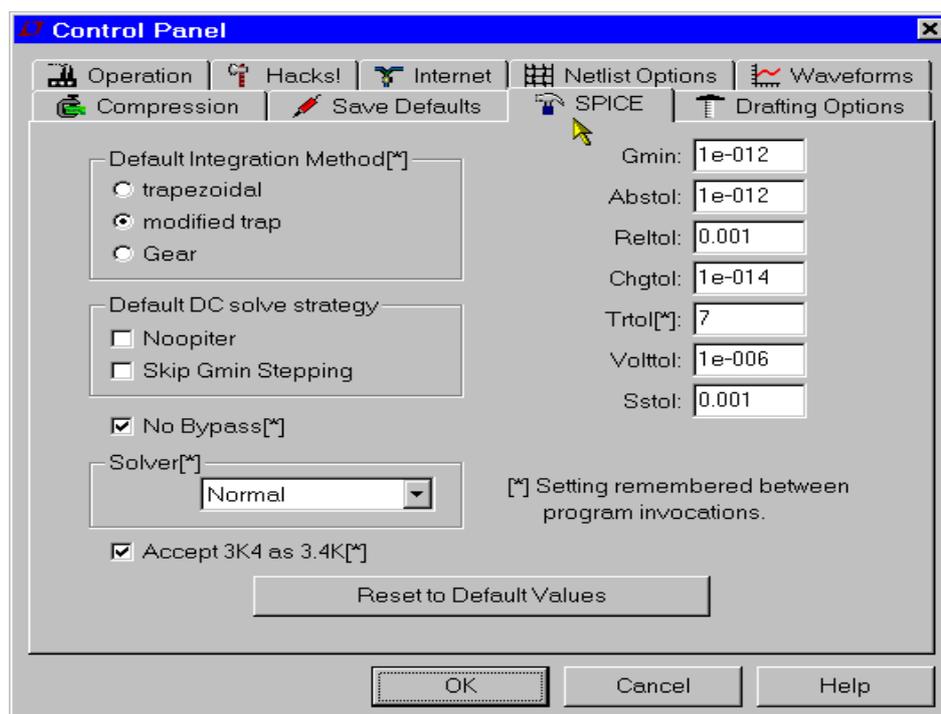
Save Device Currents: Отметка этой строки позволит отобразить предельные токи устройства и рассеиваемую мощность.

Save Subcircuit Node Voltages: Отметка этой строки позволит отобразить на графиках напряжения в подсхемах.

Save Subcircuit Device Currents: Отметка этой строки позволит отобразить на графиках напряжения в подсхемах.

Don't save Ib(), Ie(), Is(), Ig(): Отметка в этой строке позволяет сохранить только токи коллектора (стока) транзисторов, для экономии размеров выходных файлов. Вместе с тем оказывается недоступным определение мощности потерь в транзисторах..

SPICE (настройка параметров моделирования)



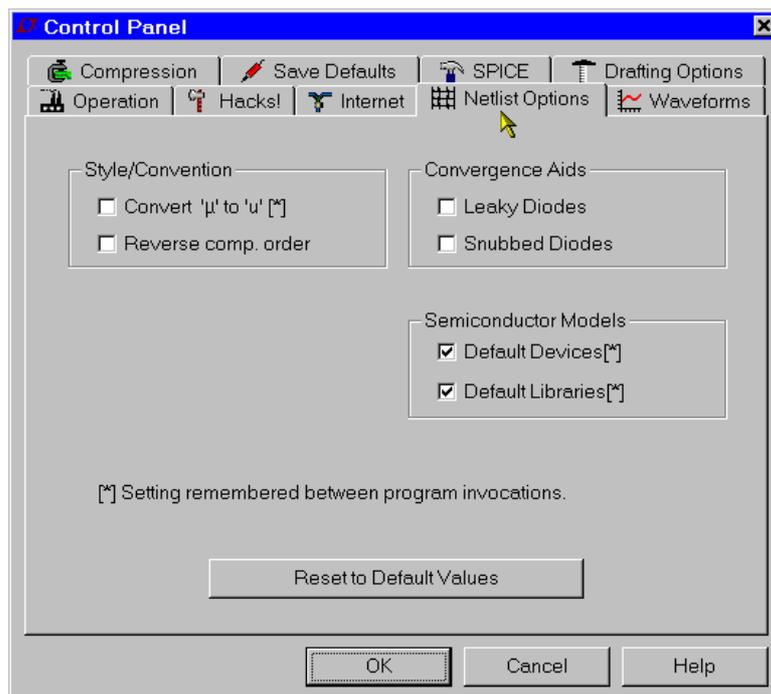
Единственный параметр, который сохраняется при перезапуске системы - Trtol. Большинство SPICE программ устанавливают этот параметр равным 7. В LTspice он установлен равным 1 для того, чтобы при использовании макромоделей SMPS отобразить на графиках наиболее полную информацию. Trtol влияет на расчетный шаг, что существенно

сказывается на точности моделирования. Для моделирования транзисторов уровней больше 1 требуется повышенная точность расчета. Если увеличить `trtol`, то можно сократить время моделирования почти в два раза и одновременно с этим снизить точность расчета. Установленный параметр `trtol` будет сохранен при перезапусках системы. Большинство традиционных параметров SPICE, таких как `gmin`, `abstol`, `reitol`, `chgtol`, `vntol` не запоминаются. Если возникает потребность в сохранении этих параметров, то их надо описать в директиве `.option` и сохранить в описании схемы или сохранить в отдельном файле, с тем, чтобы директивой `.inc` включить этот файл в описание схемы.

Следует обратить внимание на строку `solver` (метод решения). LTSpice содержит две версии SPICE. Одна версия является нормальной, другая - альтернативной. Альтернативный метод решения использует различные способы упаковки разреженных матриц для уменьшения расчетных ошибок. Обычно альтернативный метод приводит к замедлению расчета почти в два раза по сравнению с нормальным за счет повышения точности внутренних вычислений почти в тысячу раз. Это может оказаться полезным для диагностических целей. Если в директиве `.option` не определено, какой `solver` используется, то на этой закладке необходимо сделать выбор прежде, чем будет сгенерирован список соединений, так как два метода решения используют принципиально различные подходы.

Если отмечена строка "Асепт 3К4 as 3.4К" ("Принять 3К4 как 3.4К"), то это приведет к тому, что запись вида 4К99 будет воспринята как 4,99К. В большинстве SPICE-программ такая замена не применяется, но в LTSpice это принято из-за распространенности такого обозначения на практике.

Netlist Options (опции списка соединений)



Convert ' μ ' to 'u': Преобразование символа ' μ ' к символу 'u' . Эта опция необходима, если Windows не поддерживает греческий шрифт. Символ 'u' воспринимается в числах как множитель 10^{-6} .

Reverse comp. Order: Схемные элементы располагаются в списке соединений в том порядке, в каком они появились при вводе в схемном редакторе. Эта опция располагает элементы в обратном порядке.

Default Devices: Если в схемном редакторе LTSpice используется диод, то автоматически в список соединений вставляется инструкция ".model D D". Если не отметить эту опцию, то это включение не будет применяться. То же относится и к транзисторам.

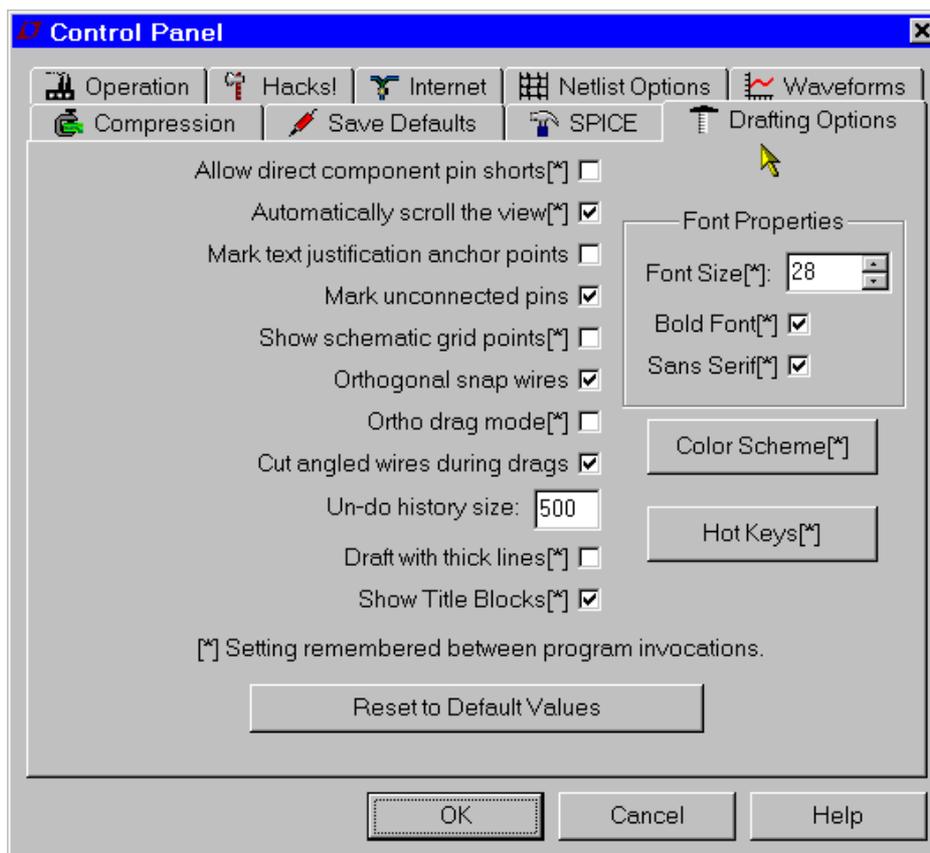
Default Libraries: Если в схемном редакторе LTSpice используется диод, то по умолчанию используется стандартная библиотека `dio`, включаемая по инструкции `lib`. Если не отметить эту опцию, то это включение не будет применяться. То же относится и к транзисторам.

Convergence Aids: зарезервировано для развития программы.

Hacks!

Эта закладка используется для развития программы и в настоящее время устарела. Рекомендуется применить `Reset to Default Values`.

Drafting Options (опции схемного редактора)



Allow direct component pin shorts: Если не пометить эту опцию, то схемный редактор предотвратит замыкание контактов. Таким образом, двухполюсники можно подключать к проводнику не размыкая его, а прямо устанавливая на проводник. Если не отметить эту опцию, то короткозамкнутая перемычка не будет автоматически удалена.

Automatically scroll the view: Отметка этой строки позволяет в схемном редакторе осуществлять автоматический скроллинг при приближении элементов к границе чертежа.

Mark text Justification anchor points: Вывести маленький кружок слева от текстового блока для его выравнивания.

Mark unconnected pins: Вывести квадраты на не подсоединенных узлах компонент .

Show schematic grid points: Отобразить сетку.

Allow direct component pin shorts: Если не пометить эту опцию, то схемный редактор предотвратит замыкание контактов. Таким образом, двухполюсники можно подключать к проводнику не размыкая его, а прямо устанавливая на проводник. Если не отметить эту опцию, то короткозамкнутая перемычка не будет автоматически удалена.

Automatically scroll the view: Отметка этой строки позволяет в схемном редакторе осуществлять автоматический скроллинг при приближении элементов к границе чертежа.

Mark text Justification anchor points: Вывести маленький кружок слева от текстового блока для его выравнивания.

Mark unconnected pins: Вывести квадраты на не подсоединенных узлах компонент .

Show schematic grid points: Отобразить сетку.

Orthogonal snap wires: Проведение проводников только под прямым углом. При нажатой клавише CTRL можно проводить под произвольным углом в узлах сетки. Если не отмечать эту строку, тогда проводники под любым углом можно проводить без нажатия на CTRL.

Cut angled wires during drags: Если отмечена эта строка, то двухполюсники при перетаскивании смогут перемещаться только вдоль проводников.

Undo history size: Установить размер буфера откат/восстановление .

Draft with thick lines: Увеличить толщину линий. Опция полезна при создании публикаций.

Show Title Block: Для внутреннего использования.

Приложения

Модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Система уравнений напряжений двигателя в матричной форме:

$$U_x = R_x \cdot I_x + L_x \cdot \frac{dI_x}{dt} + \omega \cdot G_x \cdot I_x,$$

где R – матрица сопротивлений, L – матрица индуктивностей, G_x – матрица э.д.с. двигателя, ω – скорость двигателя в эл. радианах ($\omega = Z_p \cdot \omega_{\text{мех}}$, Z_p – число пар полюсов, $\omega_{\text{мех}}$ – скорость двигателя в мех. радианах).

Результаты автоматизированного формирования матриц для неподвижной системы координат, в которой статорные обмотки представлены в трехфазных координатах, а роторные обмотки в двухфазных координатах:

$$L_x = \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 & L_{mf} & 0 \\ 0 & L_f & 0 & -\frac{L_{mf}}{2} & \frac{3L_{mf}}{2\sqrt{3}} \\ 0 & 0 & L_f & -\frac{L_{mf}}{2} & -\frac{3L_{mf}}{2\sqrt{3}} \\ L_{mf} & -\frac{L_{mf}}{2} & -\frac{L_{mf}}{2} & L_r & 0 \\ 0 & \frac{3L_{mf}}{2\sqrt{3}} & -\frac{3L_{mf}}{2\sqrt{3}} & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad R_x = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}\omega L_{mf}}{2} & -\frac{\sqrt{3}\omega L_{mf}}{2} & 0 & \omega L_r \\ -\omega L_{mf} & \frac{\omega L_{mf}}{2} & \frac{\omega L_{mf}}{2} & -\omega L_r & 0 \end{bmatrix} \quad E_x = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{2\omega I_{br} L_r + (\sqrt{3}\omega I_b - \sqrt{3}\omega I_c) L_{mf}}{2} \\ -\frac{2\omega I_{ar} L_r + (-\omega I_c - \omega I_b + 2\omega I_a) L_{mf}}{2} \end{bmatrix}$$

$$M_{dv} = \frac{((I_{br} - \sqrt{3} I_{ar}) I_c + (I_b - 2 I_a) I_{br} + \sqrt{3} I_{ar} I_b) L_{mf} Z_p}{2}$$

$$J \cdot \frac{d\omega_{\text{мех}}}{dt} = M_{dv} - M_c$$

где $G = \omega \cdot G_x$, $E_x = G \cdot I_x$ – вектор э.д.с. двигателя, $M_{dv} = I_{x_t} \cdot G_x \cdot I_x$ – момент двигателя, I_x – вектор токов. J – момент инерции, ω – скорость ротора в эл. радианах, $\omega_{\text{мех}}$ – скорость ротора в механических радианах. $\omega = Z_p \cdot \omega_{\text{мех}}$, Z_p – число пар полюсов. M_c – момент сопротивления на валу двигателя.

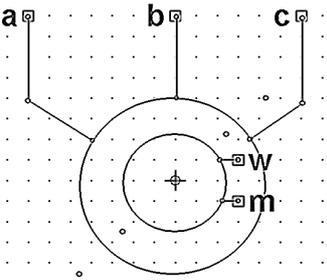
При выводе формул было учтено, что параметры фазы двухфазной машины в 1,5 раза больше параметров фазы эквивалентной по мощности

трехфазной машины, то есть: $L_m=3/2 \cdot L_{mf}$, $L_s=3/2 \cdot L_f$, $L_{s0}=3 \cdot L_f$, $R_s=3/2 \cdot R_f$, $R_0=3 \cdot R_f$, где L_{mf} – взаимная индуктивность между соответствующими фазами статора и ротора, L_f – индуктивность фазы статора трехфазной обмотки, R_f – активное сопротивление фазы статора трехфазной обмотки. L_{s0} , R_0 – индуктивность и сопротивление фазы нулевой последовательности.

Создание модели в LTSpice.

1. Создать папку, в которой будет создаваться модель.
2. Создать изображение двигателя. Для этого:

Выбрать команду **File-New Symbol**. Ввести контакты с именами **a**, **b**, **c**, **m** и **w**. Для ввода контактов можно нажать на клавишу 'p' и в появившемся окне напечатать соответствующее имя. Расположить контакты, как показано на рисунке. Видимыми их можно не делать (отметить радио-кнопку **Not Visible**). Шаг сетки при создании компоненты соответствует шагу сетки схемного редактора.

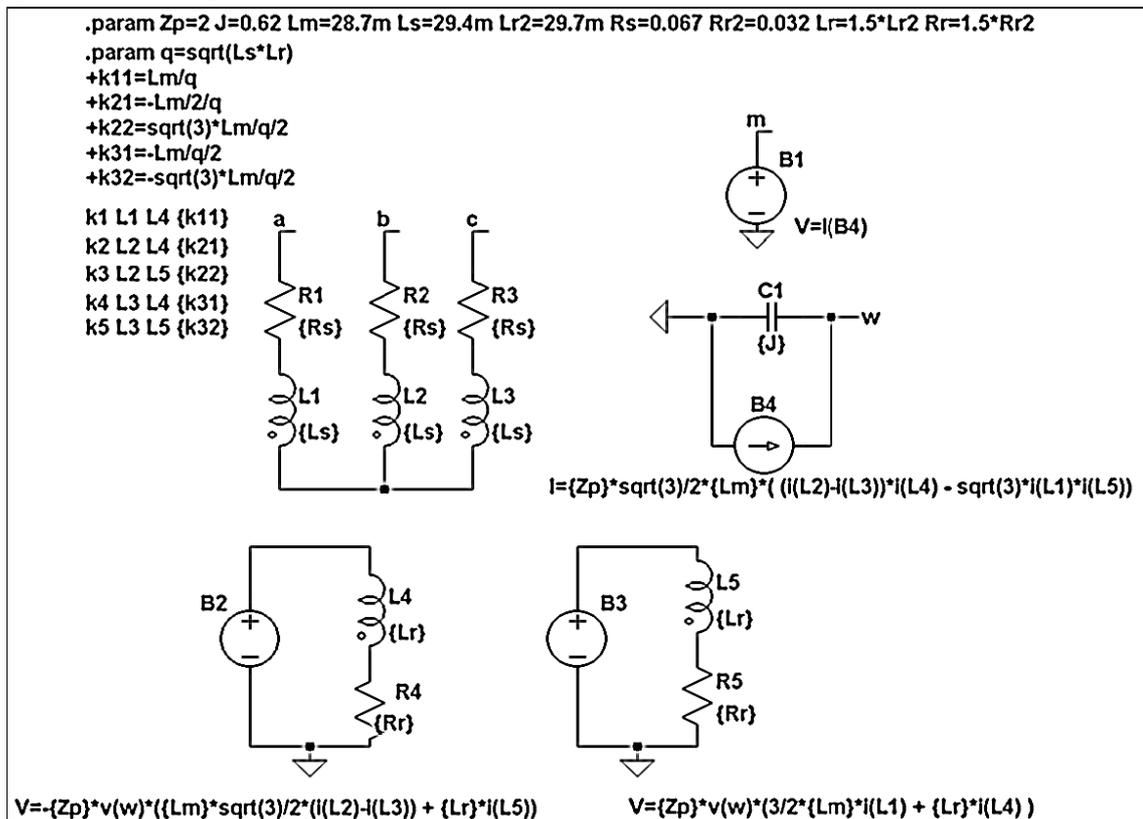


Нарисовать графическое изображение асинхронного двигателя. Основная команда: **Draw=>Line**, **Circle** и т.д. Чтобы точнее расположить линии в узлах сетки желательно отобразить точки привязки линий командой **View=>Anchor Points** (или нажать 'O')

Командой **Save-as** записать файл (расширение **asy**) в созданную папку.

3. Создать схему замещения асинхронного двигателя. Для этого:

Выбрать команду **File-New Schematic**. Ввести компоненты схемы



Компоненты схемы: B1, B2, B3 – управляемые источники напряжения **bv.asy**, B4 – управляемый источник тока **bi.asy**. Номиналы индуктивностей и сопротивлений параметризованы. Вместо числа ставится идентификатор в фигурных скобках. Числовое значение идентификатору присваивается в директиве **.params**. Взаимные индуктивности **M** в SPICE-программах задаются коэффициентом связи: $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$ и вводятся как текстовая строка. Например, взаимная индуктивность между фазой А статора и фазой α ротора соответствует строке k1 L1 L4 {k11}, где параметр k11 вычисляется в директиве **.params**.

4. Командой **Save-as** записать файл с тем же именем, какое было у созданного ранее символа, но с расширением **asc** и в ту же папку.

Можно создать схему замещения асинхронного двигателя в текстовом редакторе на языке SPICE-программ. Текст надо сохранить в файле с расширением **sub** или **lib**. При использовании текстовой модели в схеме верхнего уровня, надо указать место размещения этого файла.

* модель асинхронного двигателя

.subckt ADZIsPr a b c w m Isa Isb Pra Prb n

*.param Zp=2 Lm=28.7m Ls=29.4m Lr=29.7m Rs=0.067 Rr=0.032 J=0.62

.param q=sqrt(Ls*Lr2) Lr2=1.5*Lr Rr2=1.5*Rr sq3=sqrt(3)

+k11=Lm/q

+k21=-Lm/2/q

+k22=sq3*Lm/q/2

+k31=-Lm/q/2

+k32=-sq3*Lm/q/2

R1 a N001 {Rs}

R2 b N003 {Rs}

R3 c N005 {Rs}

L1 N001 n {Ls}

L2 N003 n {Ls}

L3 N005 n {Ls}

L4 N002 N004 {Lr2}

L5 N006 N007 {Lr2}

k1 L1 L4 {k11}

k2 L2 L4 {k21}

k3 L2 L5 {k22}

k4 L3 L4 {k31}

k5 L3 L5 {k32}

R5 N004 0 {Rr2}

R6 N007 0 {Rr2}

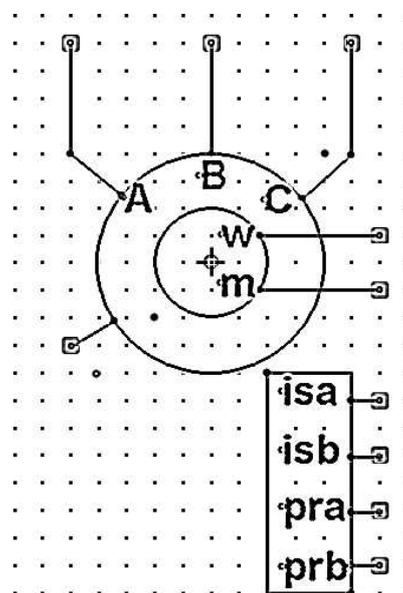
B10 N002 0 V=-{Zp}*v(w)*({Lm}*sq3/2*(i(L2)-i(L3)) + {Lr2}*i(L5))

B11 N006 0 V={Zp}*v(w)*(3/2*{Lm}*i(L1) + {Lr2}*i(L4))

B9 0 w I={Zp}*sq3/2*{Lm}*((i(L2)-i(L3))*i(L4) - sq3*i(L1)*i(L5))

C2 w 0 {J}

B1 m 0 V=I(B9)



```

B2 Isa 0 V=(2*I(L1) -I(L2) - I(L3))/3.
B3 Isb 0 V=(I(L2) - I(L3))/sq3
B4 Pra 0 V={Lr2}*I(L4)+1.5*{Lm}*v(Isa)
B5 Prb 0 V={Lr2}*I(L5)+1.5*{Lm}*v(Isb)
.end ADZIsPr

```

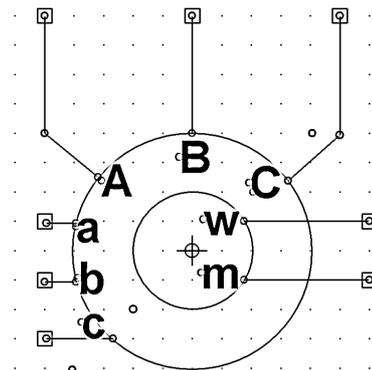
Вид символического изображения приведен рядом с текстовым описанием. В этой модели дополнительно включены управляемые источники B2-B5. Потенциалы на этих источниках соответствуют: току статора по осям α и β и потокосцеплениям ротора по этим же осям. При создании символического изображения для такого описания, вводятся дополнительные контакты с именами Isa, Isb, Pra, Prb. Кроме начал фаз модель содержит вывод нейтрали статорной обмотки **n**.

Приведем еще две модели асинхронного двигателя:

```

* модель асинхронного двигателя с выводам концов фаз
.subckt AD a b c aa bb cc w m
* .param Zp=2 Lm=28.7m Ls=29.4m Lr=29.7m Rs=0.067 Rr=0.032 J=0.62
.param q=sqrt(Ls*Lr2) Lr2=1.5*Lr Rr2=1.5*Rr sq3=sqrt(3.)
+k11=Lm/q
+k21=-Lm/2/q
+k22=sq3*Lm/q/2
+k31=-Lm/q/2
+k32=-sq3*Lm/q/2
R1 a N001 {Rs}
R2 b N003 {Rs}
R3 c N005 {Rs}
L1 N001 aa {Ls}
L2 N003 bb {Ls}
L3 N005 cc {Ls}
L4 N002 N004 {Lr2}
L5 N006 N007 {Lr2}
k1 L1 L4 {k11}
k2 L2 L4 {k21}
k3 L2 L5 {k22}
k4 L3 L4 {k31}
k5 L3 L5 {k32}
R5 N004 0 {Rr2}
R6 N007 0 {Rr2}
B10 N002 0 V=-{Zp}*v(w)*({Lm}*sq3/2*(i(L2)-i(L3)) + {Lr2}*i(L5))
B11 N006 0 V={Zp}*v(w)*(3/2*{Lm}*i(L1) + {Lr2}*i(L4) )
B9 0 w I={Zp}*sq3/2*{Lm}*((i(L2)-i(L3))*i(L4) - sq3*i(L1)*i(L5))
B1 m 0 V=I(B9)
C2 w 0 {J}
.end AD

```



```

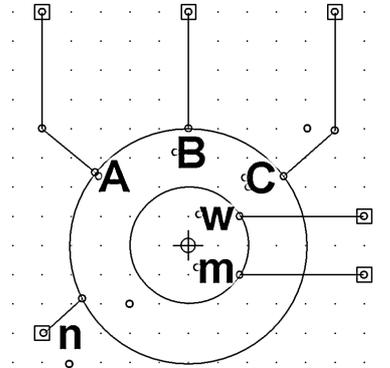
* модель асинхронного двигателя с выводом нейтрали статорной обмотки
.subckt ADZ a b c w m n
* .param Zp=2 Lm=28.7m Ls=29.4m Lr=29.7m Rs=0.067 Rr=0.032 J=0.62
.param q=sqrt(Ls*Lr2) Lr2=1.5*Lr Rr2=1.5*Rr sq3=sqrt(3.)
+k11=Lm/q

```

```

+k21=-Lm/2/q
+k22=sq3*Lm/q/2
+k31=-Lm/q/2
+k32=-sq3*Lm/q/2
R1 a N001 {Rs}
R2 b N003 {Rs}
R3 c N005 {Rs}
L1 N001 n {Ls}
L2 N003 n {Ls}
L3 N005 n {Ls}
L4 N002 N004 {Lr2}
L5 N006 N007 {Lr2}
k1 L1 L4 {k11}
k2 L2 L4 {k21}
k3 L2 L5 {k22}
k4 L3 L4 {k31}
k5 L3 L5 {k32}
R5 N004 0 {Rr2}
R6 N007 0 {Rr2}
B10 N002 0 V=-{Zp}*v(w)*({Lm}*sq3/2*(i(L2)-i(L3)) + {Lr2}*i(L5))
B11 N006 0 V={Zp}*v(w)*(3/2*{Lm}*i(L1) + {Lr2}*i(L4) )
B9 0 w I={Zp}*sq3/2*{Lm}*((i(L2)-i(L3))*i(L4) - sq3*i(L1)*i(L5))
B1 m 0 V=I(B9)
C2 w 0 {J}
.end ADZ

```



Создание схемы для исследования прямого пуска асинхронного двигателя.

Для этого:

Выбрать команду **File-New Schematic**. Ввести компоненты схемы, как на рисунке. Независимые источники напряжений – **voltage.asy**

При задании переходного процесса отметить строки:

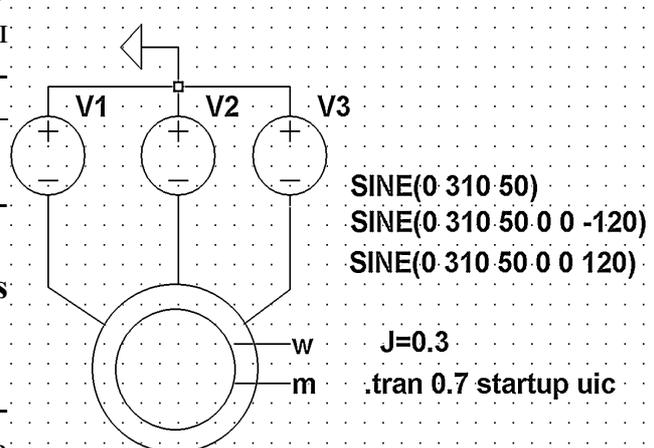
Start external DC supply voltages at 0V

Skip initial operating poin solution

При наведении мыши на асинхронный двигатель и нажатии на

правую кнопку, в строке появившегося меню **PARAMS**: можно ввести параметр двигателя, отличный от того, который был введен при создании модели. Например, может быть указано другое значение момента инерции: **J=0.3**. Для вывода на график момента и скорости, надо к контактам **m** и **w** двигателя подсоединить именованные проводники.

Командой **Save-as** записать файл под другим именем с расширением **asc** в ту же папку.



Моделирование момента сопротивления на валу двигателя.

При исследованиях асинхронного двигателя к узлу w можно подсоединять электрические схемы замещения механических систем.

Вязкое трение

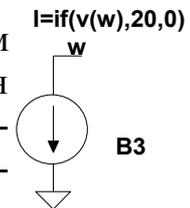
Моделируется резистором, значение которого можно подсчитать по формуле $R = \omega_n / M_n$. Резистор подсоединяется между выводом w и «землей».

Постоянный момент сопротивления

Моделируется источником тока, подсоединяемым между выводом w и «землей» (начало стрелки соединяется с w). Пусть момент сопротивления равен 20 Н·м. Если источник тока будет иметь постоянное значение, равное 20А, то в начальный момент времени, когда момент, развиваемый двигателем мал, произойдет обратное вращение двигателя.

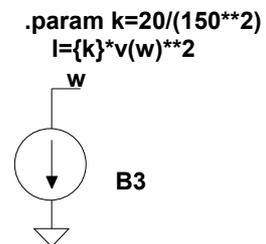
Чтобы избежать его, можно задать изменение источника тока в функции частоты. Например, в формате SPICE:

$I = \text{if}(v(w), 20, 0)$, что означает: если скорость больше, чем 0,5, то источник тока равен 20 А, иначе источник тока равен нулю. Число 0,5, которое здесь фигурирует, задается системой LTSpice по умолчанию. Это число можно отмасштабировать, например, если в скобках записать $10 * v(w)$, то выполнение условия произойдет при 0,05В.



Момент сопротивления, пропорциональный квадрату скорости.

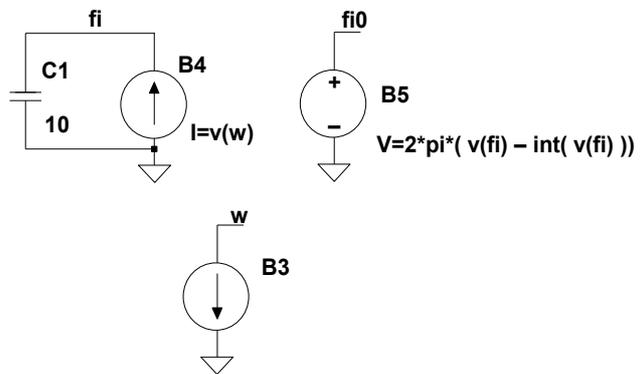
Обозначим коэффициент пропорциональности буквой k . Условимся, что при скорости 150 рад/с момент должен быть равен 20 Н·м. Вычисление коэффициента можно выполнить непосредственно в строке Spice-директивы **param**, как это показано на рис.



Момент сопротивления, зависящий от угла поворота вала.

Источник **B4** (см.рис.) формирует ток, численно равный скорости двигателя. Так как ток емкости $i = C \cdot \frac{dU}{dt}$, то $U = \frac{1}{C} \int i \cdot dt$. Таким образом,

напряжение на емкости численно равно интегралу от скорости двигателя, то есть численно равно углу поворота вала двигателя. Если на валу имеется понижающий редуктор, то коэффициент передачи этого редуктора должен быть равен емкости. То-



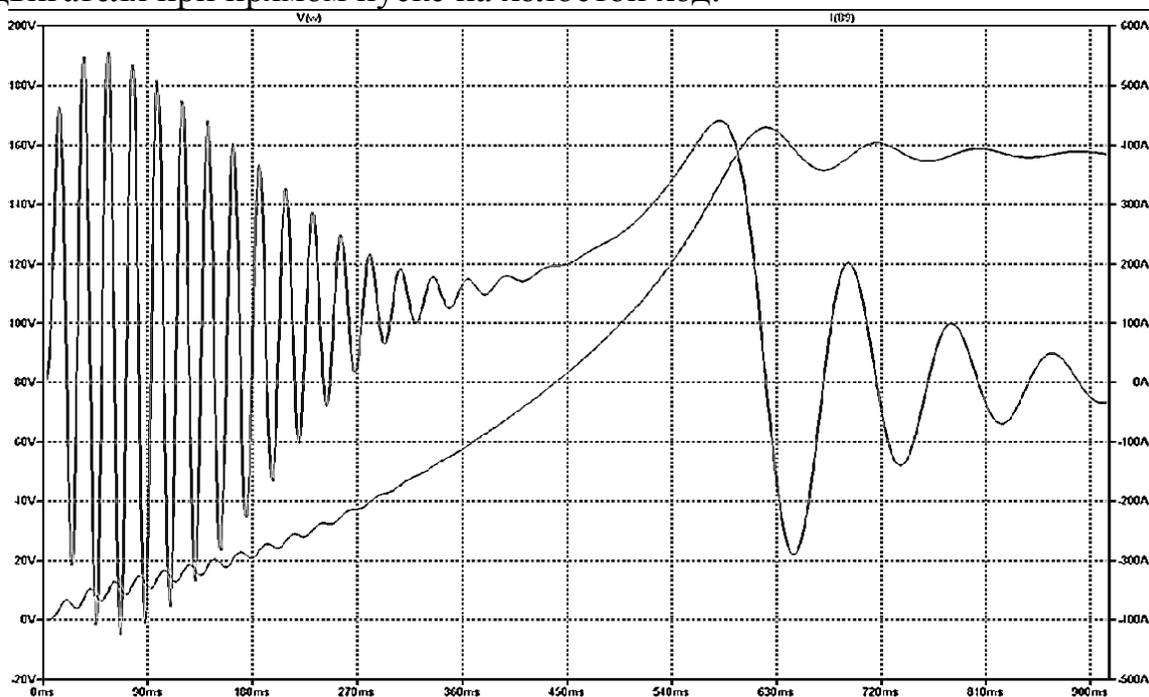
$I = \text{table}(v(fi0), 0, 0, pi, 0, pi+1m, 20)$

гда потенциал узла $\dot{\varphi}$ численно равен углу поворота выходного вала редуктора.

На источнике **B5** формируется линейно нарастающий периодический сигнал амплитудой $2 \cdot \pi$. Такой сигнал получается вычитанием из фактического значения угла его целой части (функция **int** – вычисление целой части числа) и умножением результата на 2π .

Источник **B3** формирует зависимость тока от входного сигнала в табличной форме. Первая точка таблицы имеет координаты (0,0), вторая точка имеет координаты ($\pi, 0$), третья ($\pi+0.001, 20$). Таким образом, если угол поворота становится равным $\pi+0.001$, то момент сопротивления подскакивает до 20 Н·м и остается таковым, пока угол не станет опять равным нулю.

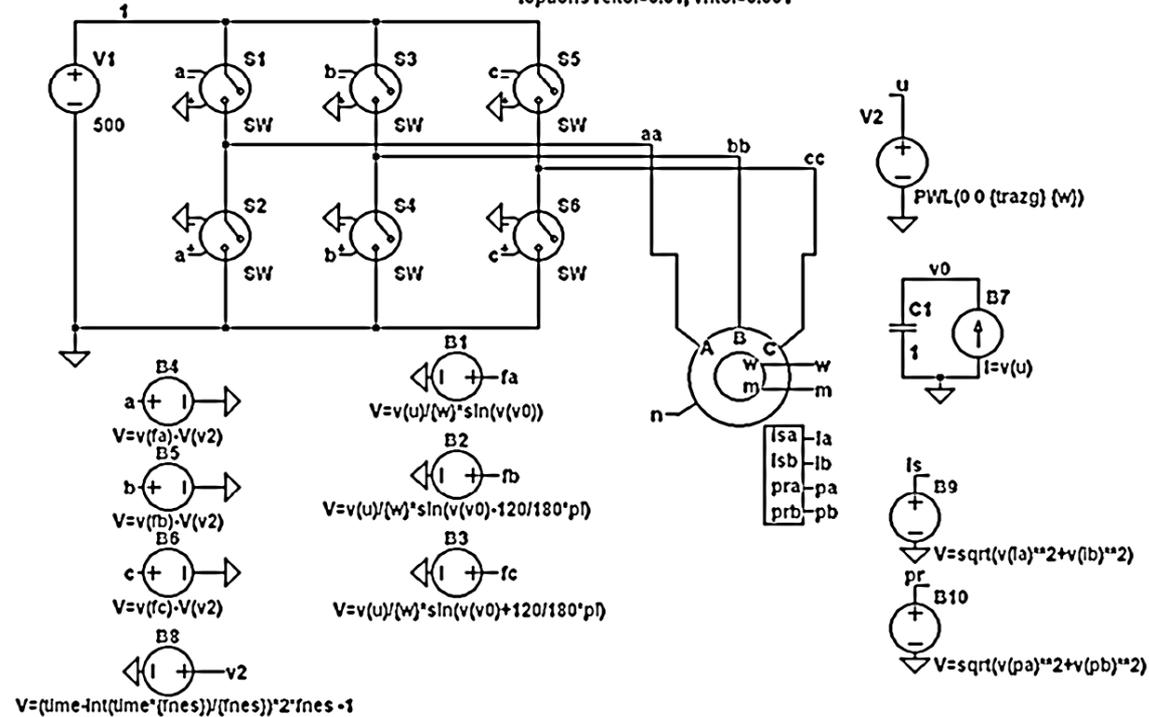
Ниже на рисунке приведены результаты расчета скорости и момента двигателя при прямом пуске на холостой ход:



Частотный пуск асинхронного двигателя со скалярным управлением

Схема частотного пуска при линейном нарастании частоты и напряжения приведена ниже.

```
.tran 0 1.5 0 0.5m startup ulc .model SW SW(Ron=1u) .param fnes=500 fkon=50 w=2*pi*fkon trazg=0.5
.options reitot=0.01, vntol=0.001
```



Параметры двигателя: $L_m=164m$, $L_s=169m$, $L_r=172m$, $R_s=1.32$, $R_r=0.922$, $Z_p=2$, $J=0.0206$.

На схеме используются следующие обозначения:
 - в строке **param** задаются: **fnes** – несущая частота ШИМ в Гц, **fkon** – конечная значение частоты в Гц, **trazg** – время нарастания частоты в секундах. Конкретные значения зависят от параметров двигателя и могут быть подобраны численным экспериментом. На управляемом источнике тока **B7** и емкости **C1** реализован интегратор, потенциал на **v0** соответствует углу для задания синусоиды ШИМ. Амплитуда этой синусоиды меняется линейно от 0 до 1. Три таких синусоиды со сдвигом 120 эл. град. реализованы на **B1-B3**. На элементах **B5-B7, B8** реализован ШИМ сигнал управления ключами.

Рассмотренное линейное изменение амплитуды напряжения и частоты применяется при скалярном частотном управлении асинхронным двигателем при постоянном моменте на валу. В соответствии с законом М.П.-Костенко изменение напряжения на двигателе в функции частоты для сохранения постоянной перегрузочной способности двигателя:

$$U = \frac{U_H}{f_H} \cdot \sqrt{\frac{M_{HG}}{M_H}} \cdot f$$
 где U_H , f_H , M_H – номинальное напряжение, частота и момент двигателя, M_{HG} – зависимость момента нагрузки от частоты, зная эту зависимость и подставляя ее в формулу, можно получить закон изме-

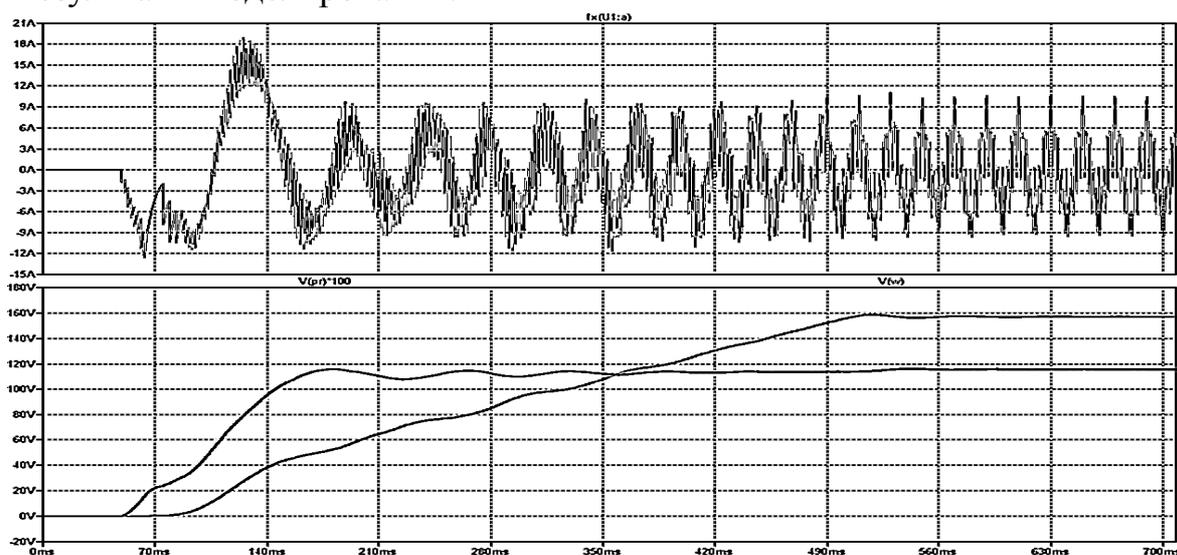
нения напряжения в функции частоты. Например, если момент пропорционален скорости вращения, причем при номинальной скорости он оказывается равным номинальному моменту, то напряжение будет пропорционально скорости в степени $3/2$. В этом случае нагрузка моделируется резистором, а закон изменения синусоиды ШИМ для трех фаз будет выглядеть так:

для фазы А: $V = \sqrt{((v(u)/\{w\})^{**3}) * \sin(v(v0))}$,

фазы В: $V = \sqrt{((v(u)/\{w\})^{**3}) * \sin(v(v0) - 120/180 * \pi)}$,

фазы С: $V = \sqrt{((v(u)/\{w\})^{**3}) * \sin(v(v0) + 120/180 * \pi)}$.

Результаты моделирования:



На верхнем графике приведено изменение тока фазы 'а' двигателя, на нижнем графике приведено изменение скорости и потокосцепления ротора (умноженное на 100).

Частотный пуск асинхронного двигателя с обратной связью по току (потокосцеплению) ротора.

Кроме рассмотренных в предыдущей схеме элементов, в этой схеме частотного пуска асинхронного двигателя с обратной связью по току (потокосцеплению) ротора присутствуют:

А) задатчик частоты (элемент В12), реализующий следующую функцию:

$$V = \text{if}(v(wr) - \{w\}/2, \{w\} + 35, 2 * v(wr) + 35),$$

где $v(wr)$ – потенциал, равный скорости двигателя, w – конечная скорость разгона двигателя в рад/с; 35 – абсолютное скольжение в рад/с. Т.е

если скорость не достигла конечного значения, то задатчик определяет частоту питания как сумму скорости двигателя и частоты скольжения. При достижении заданной скорости частота питания устанавливается равной постоянному значению $w+35$ (вместо 35 можно взять другое число).

Б) регулятор тока статора или потока ротора (элемент B11):

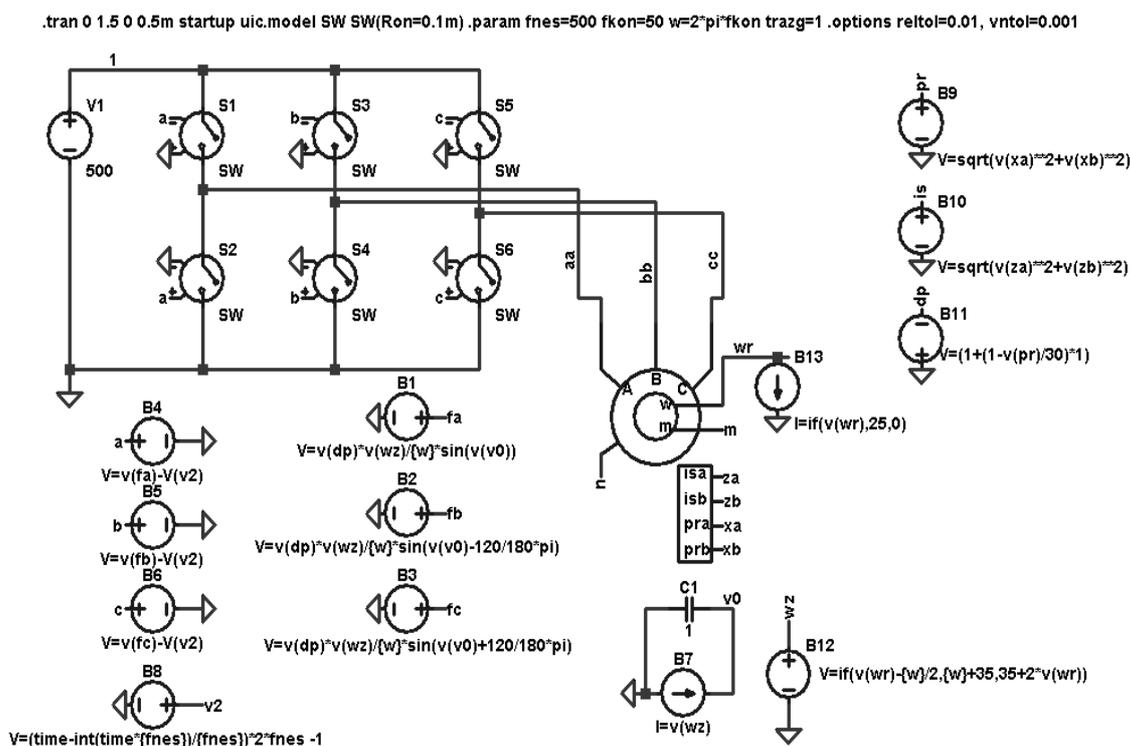
$$V=(1+(1-v(is)/\{z\}) * \{k\}),$$

где $v(is)$ (или $v(pr)$) – фактическое значение тока (потока); $\{z\}$ – задающее значение тока (потока); $\{k\}$ – коэффициент усиления (можно принять равным 1).

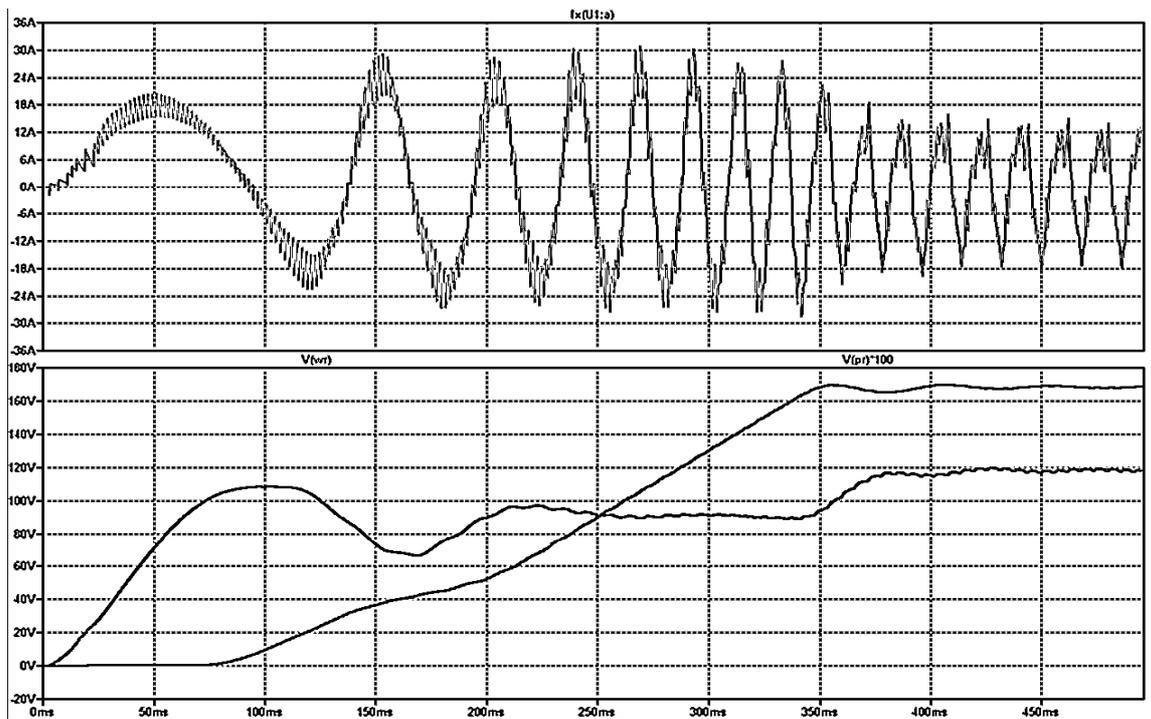
В) задатчик синусоиды ШИМ для фазы А (элемент B1):

$$V=v(dp)*v(wz)/\{w\}*\sin(v(v0)),$$

где $v(dp)$ – напряжение регулятора; $v(wz)$ - напряжение задатчика частоты;



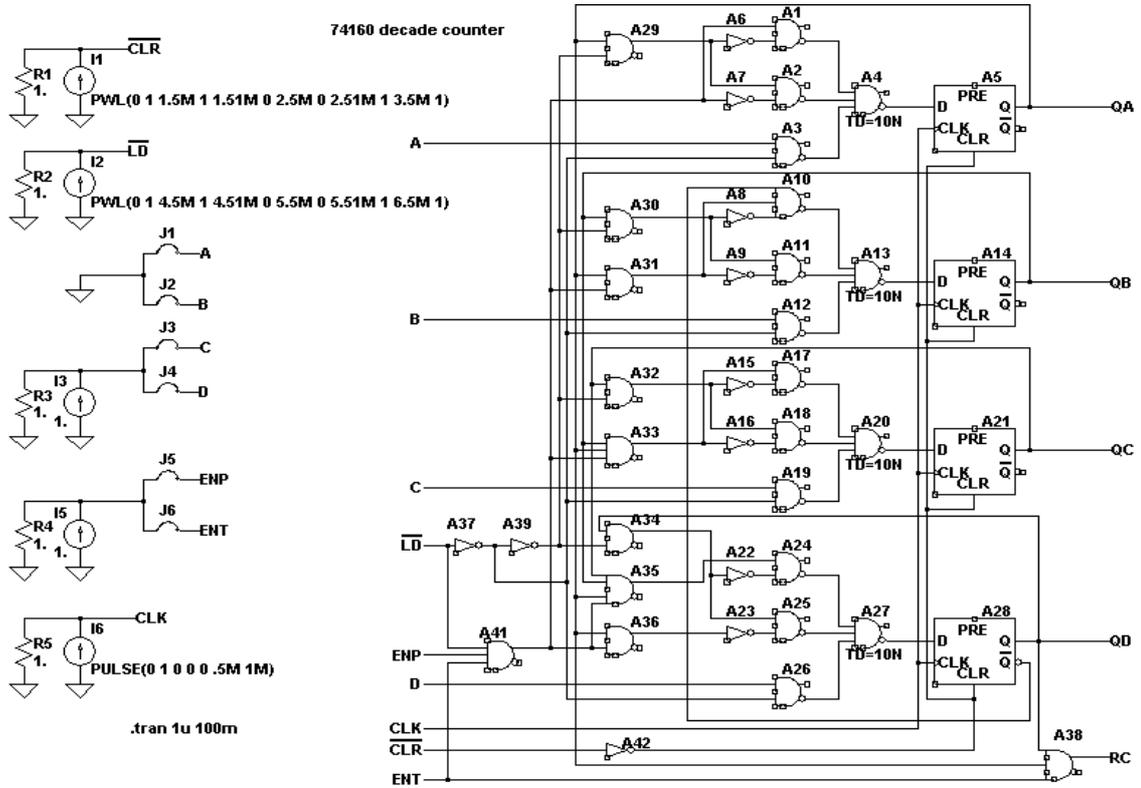
Результаты моделирования:



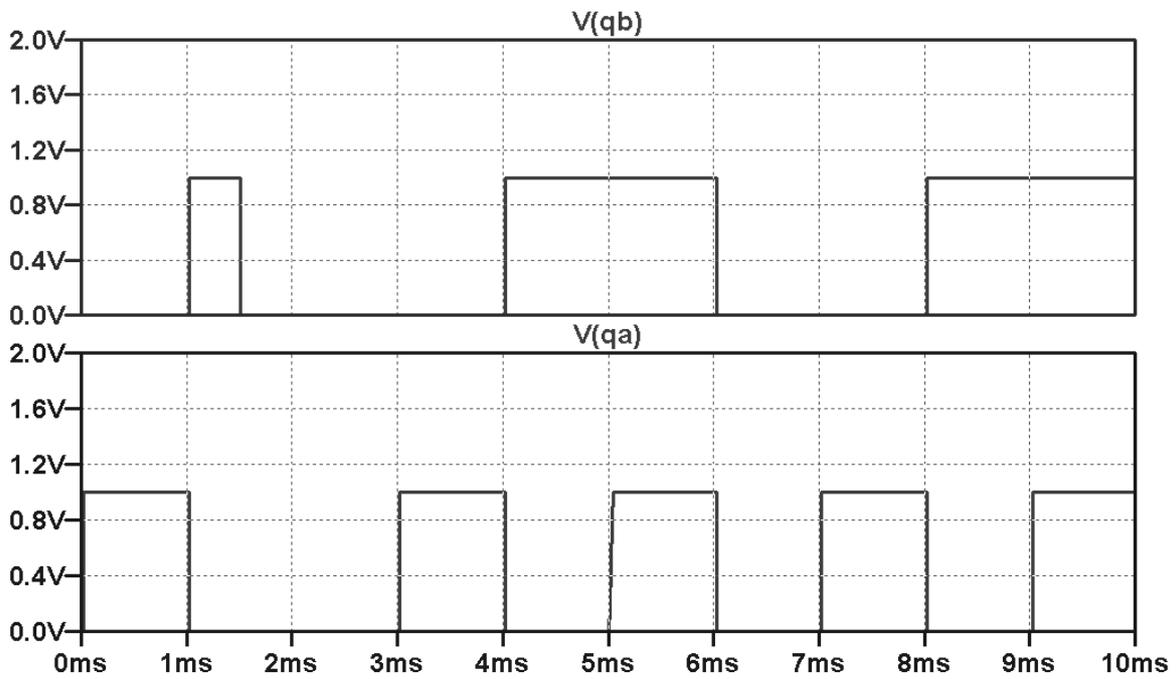
На верхнем графике приведено изменение тока фазы 'а' двигателя, на нижнем графике приведено изменение скорости и потокосцепления ротора (умноженное на 100).

АЛЬБОМ СХЕМ LTSPICE

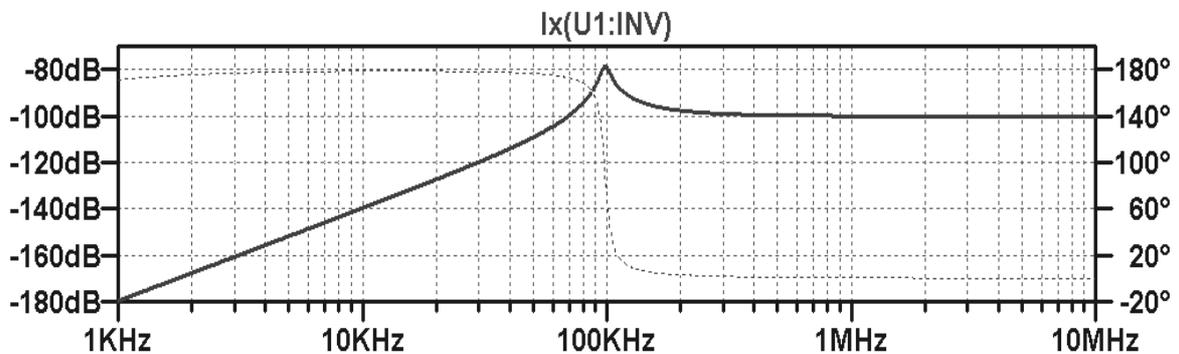
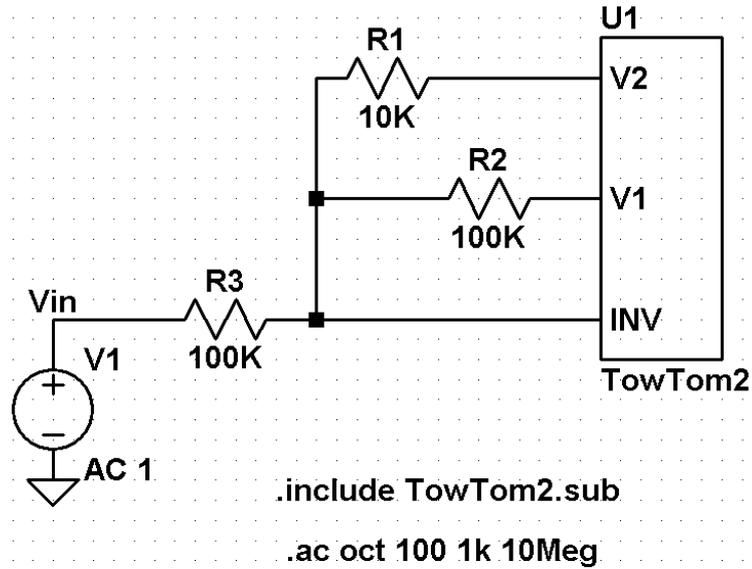
160.asc - аналого-цифровая схема.



This example schematic is supplied for informational/educational purposes only.



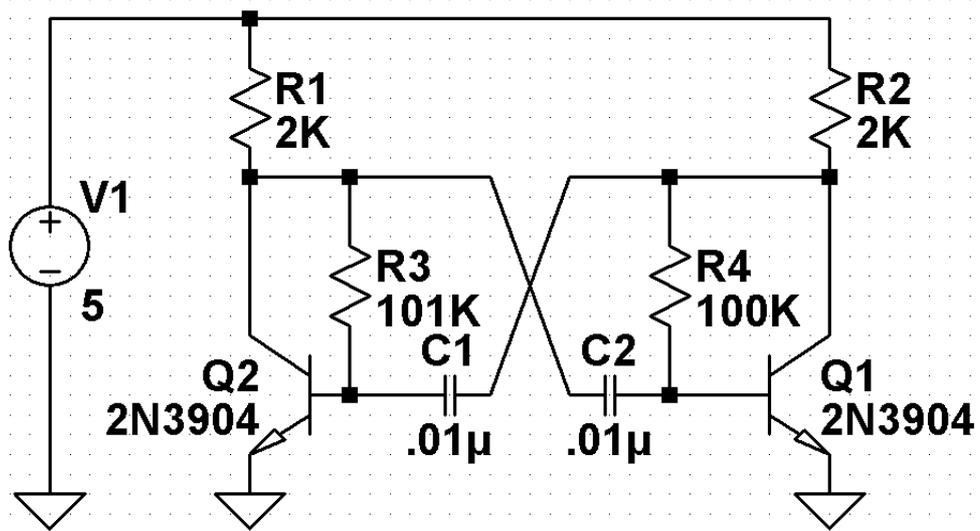
1563.asc - применение подсхемы с текстовым описанием.



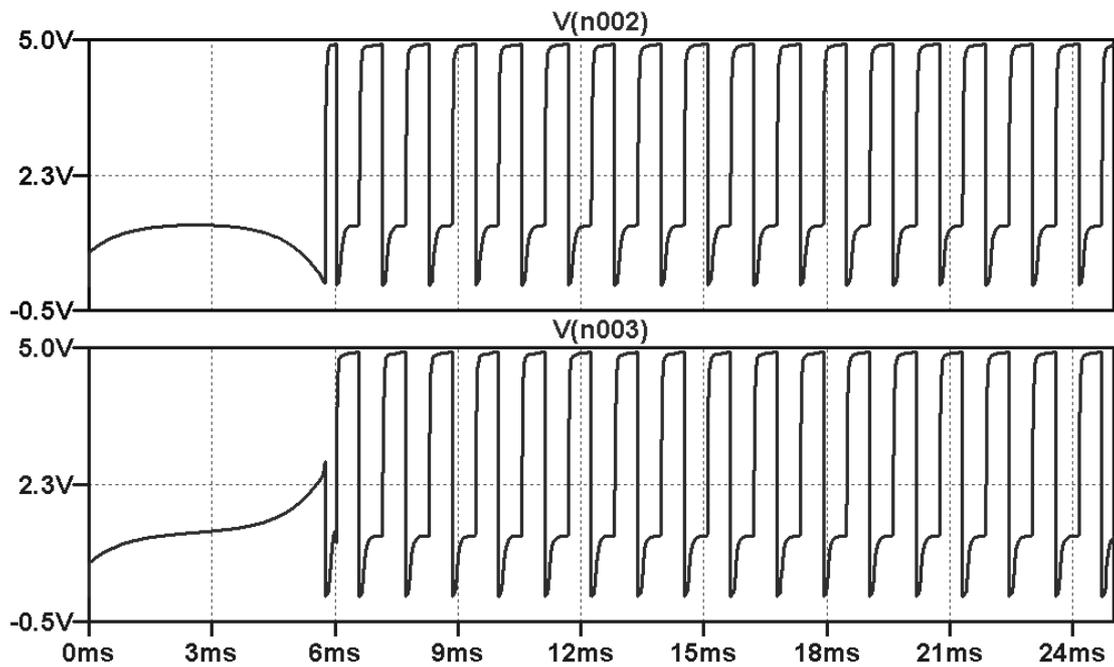
```
.subckt TowTom2 1 2 3
C1 1 3 {C}
C3 N001 1 3p
C4 N002 N001 .3p
C7 2 N003 {C}
C6 2 3 .25p
R2 N001 1 10K
R3 N002 N001 10K
R5 N003 N002 {R}
R1 1 0 1.
C2 1 0 {Aol/GBW1/6.28318530717959}
G1 0 1 0 N005 {Aol}
R6 2 0 1.
C8 2 0 {Aol/GBW1/6.28318530717959}
G3 0 2 0 N007 {Aol}
R4 N002 0 1.
C5 N002 0 {Aol/GBW2/6.28318530717959}
G2 0 N002 0 N006 {Aol}
R10 N005 3 {RN1}
R11 N006 N001 {RN2}
R12 N007 N003 {RN3}
.params R=10K C=160p GBW1=10Meg GBW2=15Meg
.params Aol=100K
.param RN1=1 RN2=1 RN3=1
.ends TowTom2
```

Текст с описанием под-
схемы TowTom2.sub

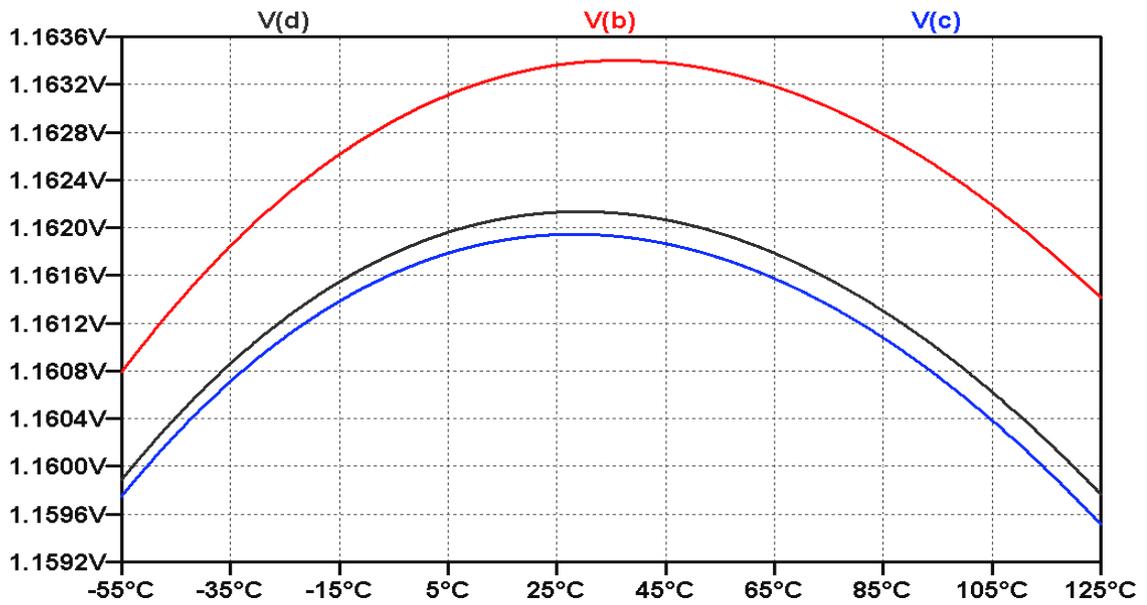
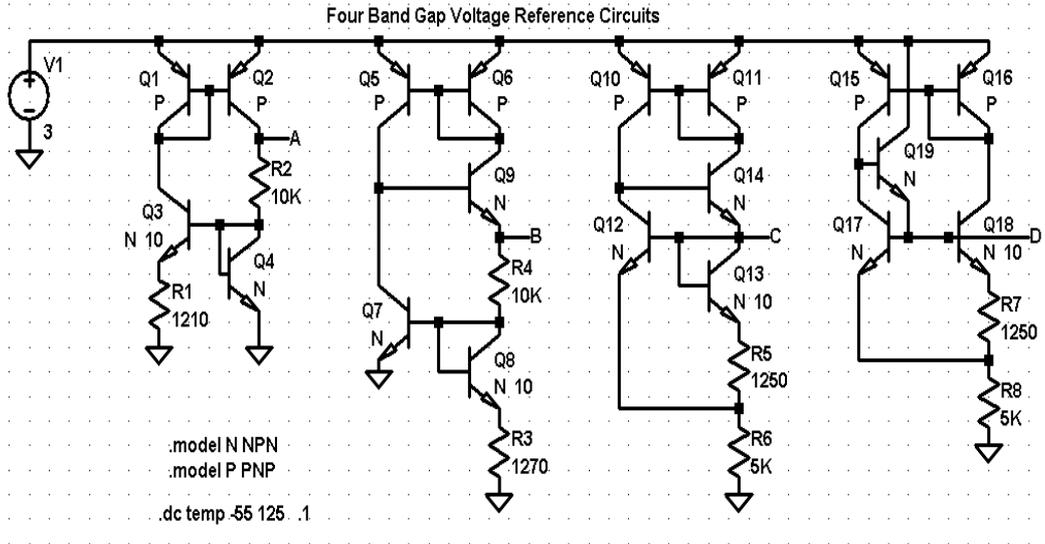
Astable.asc - моделирование мультивибратора во времени.



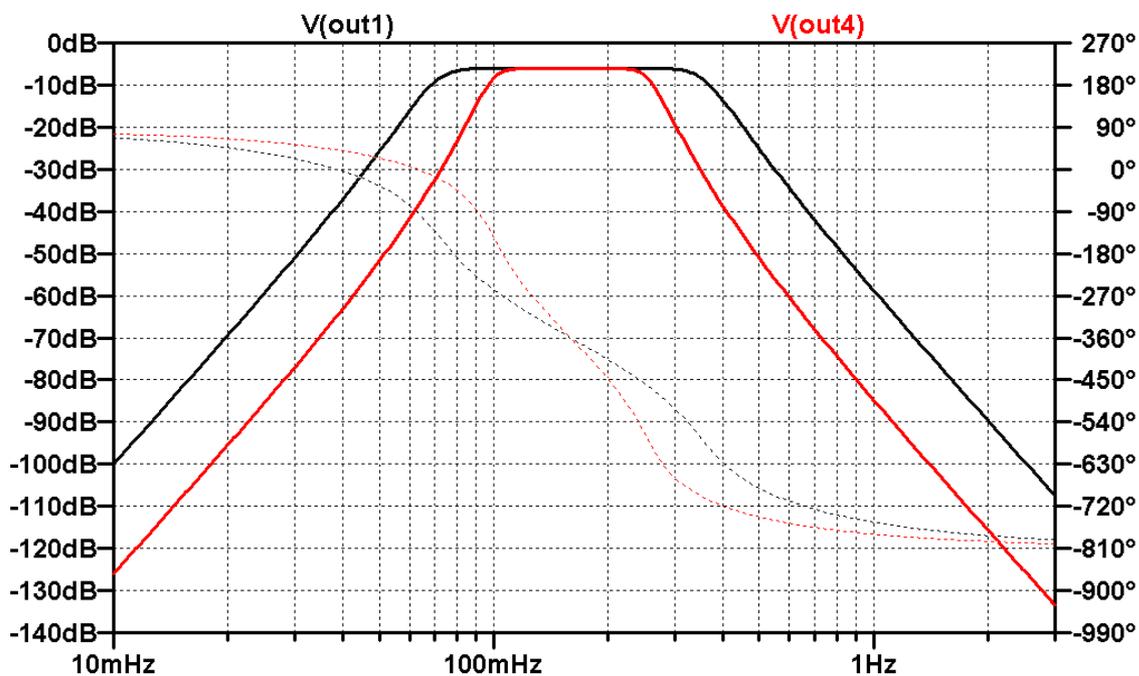
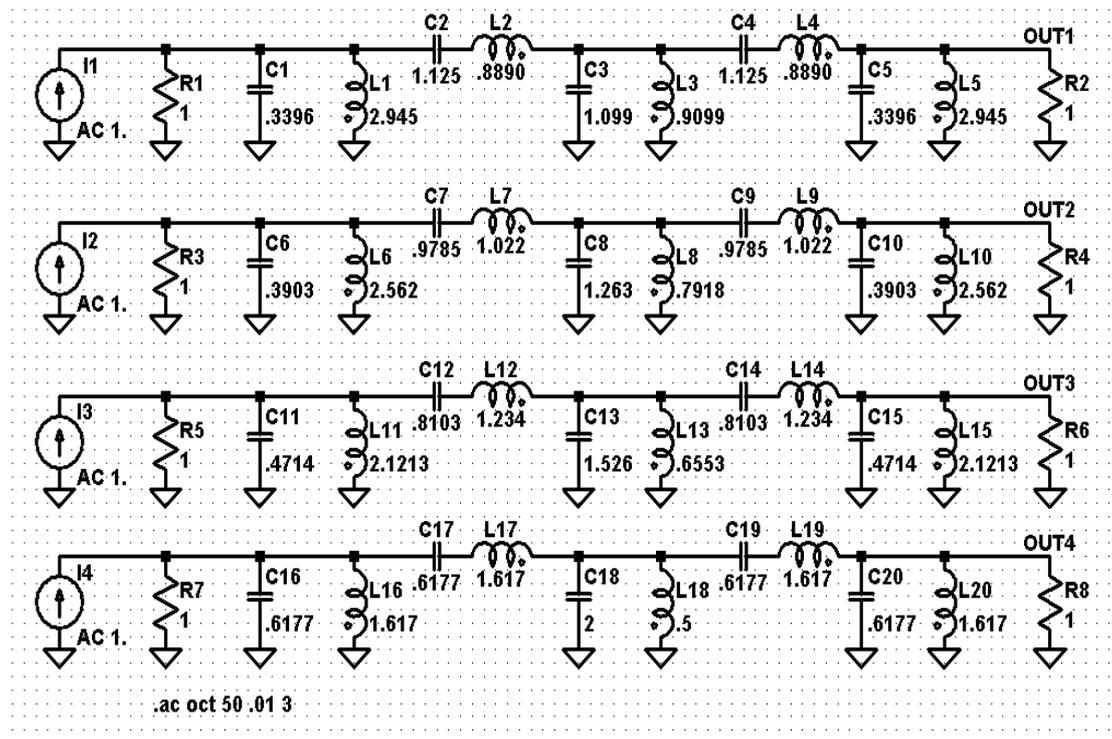
`.tran 25m startup`



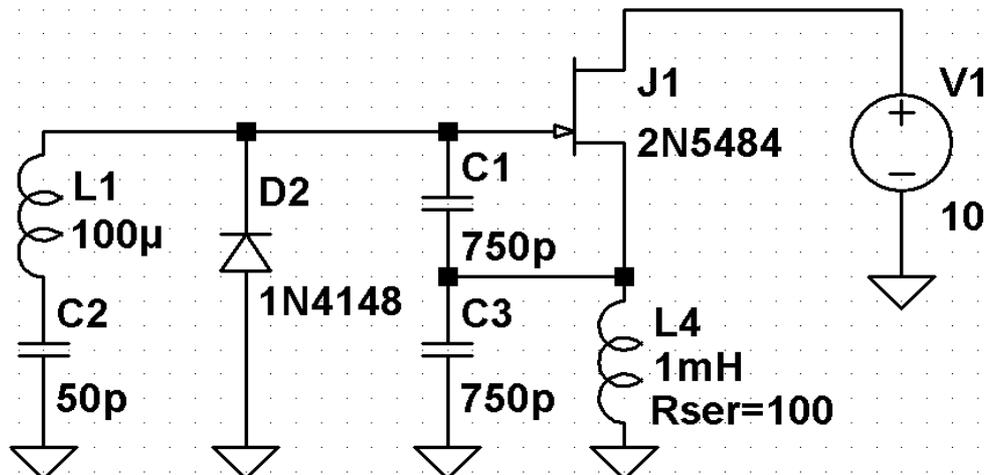
BandGaps.asc - температурный анализ рабочей точки.



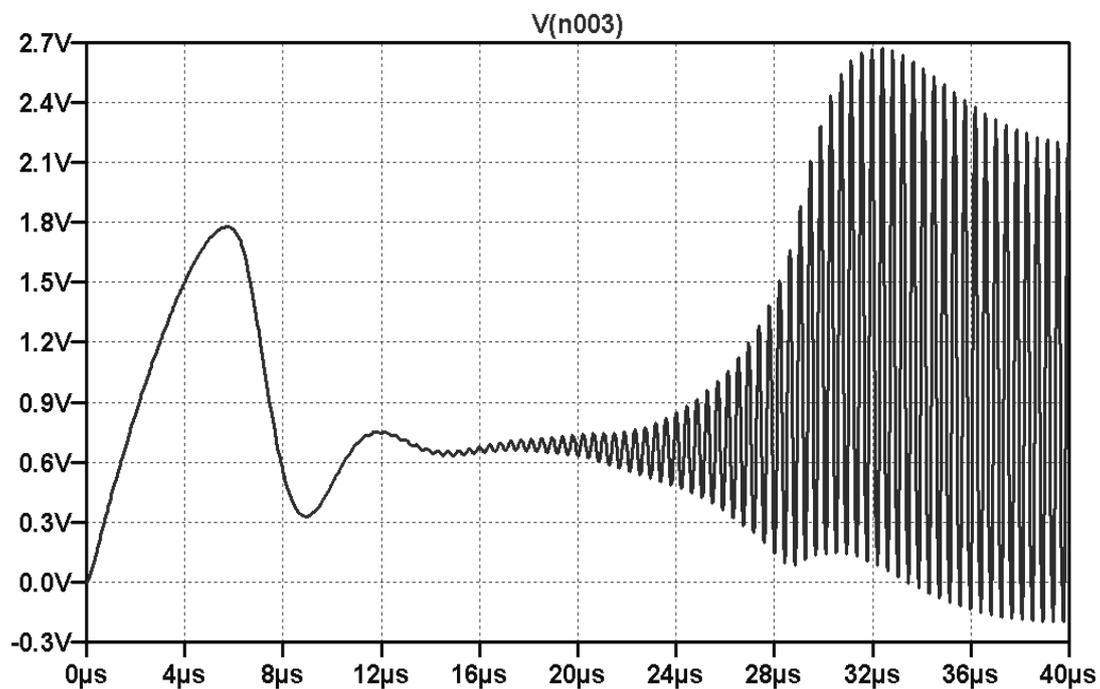
Butter.asc - частотные характеристики при многовариантном анализе.



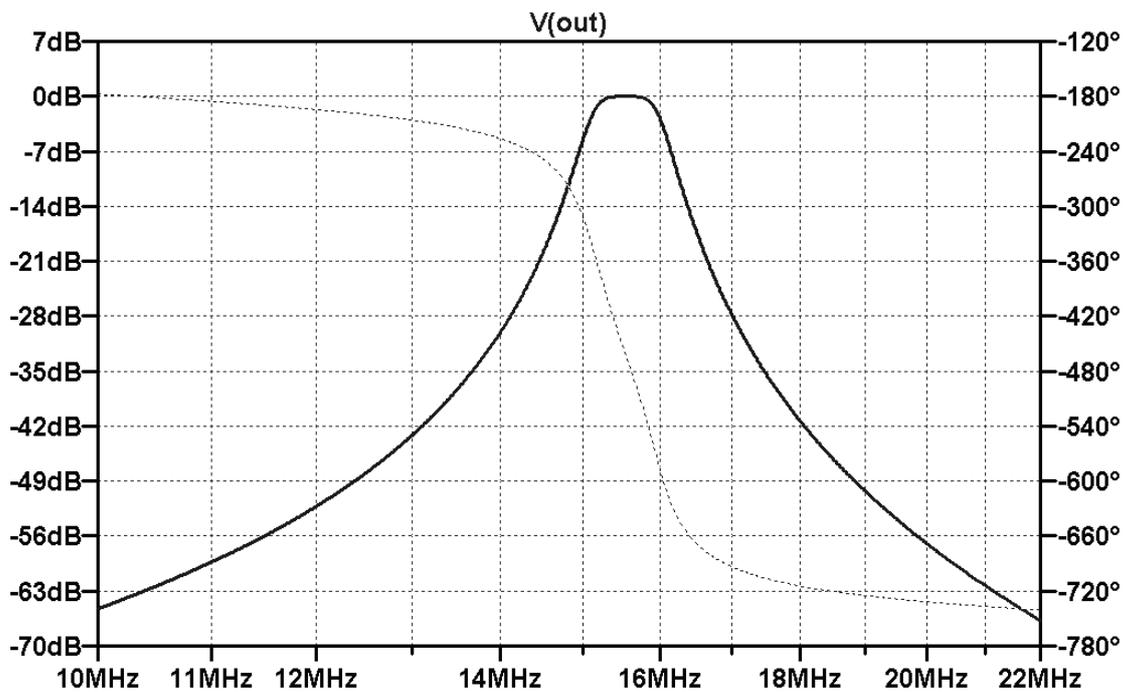
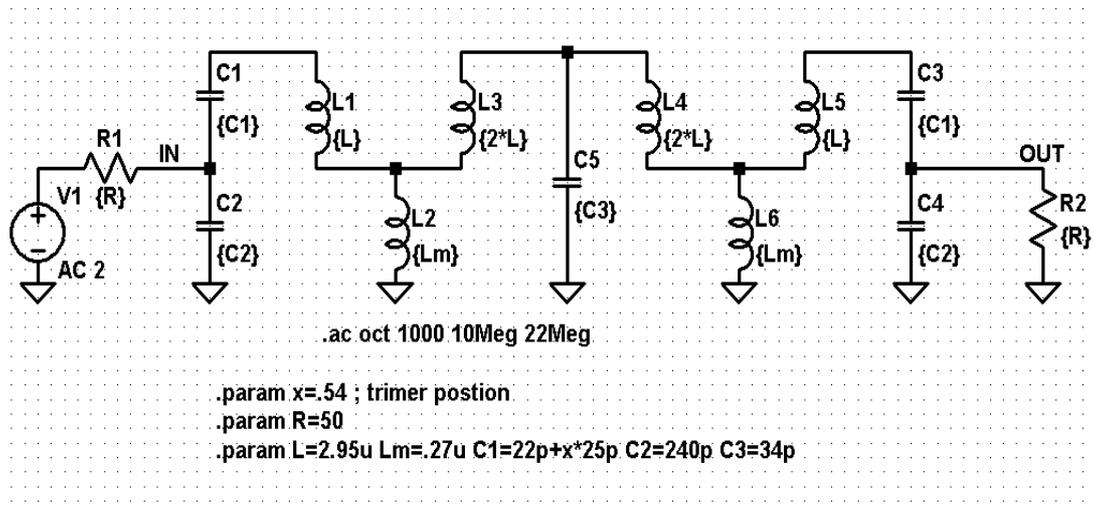
**Clapp.asc - временные осциллограммы транзисторного генератора.
Применение опции для метода расчета**



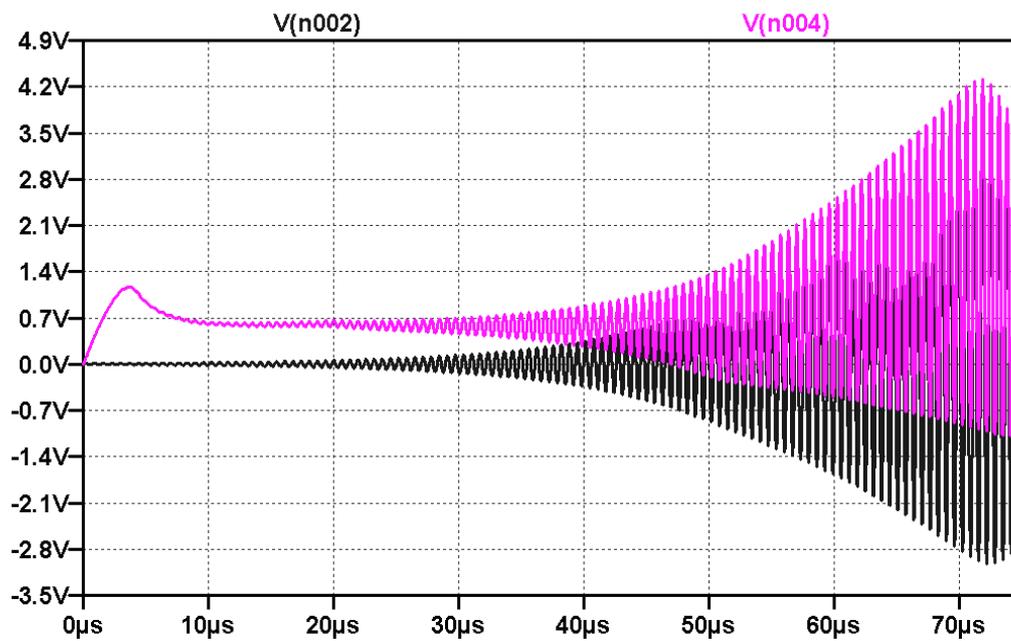
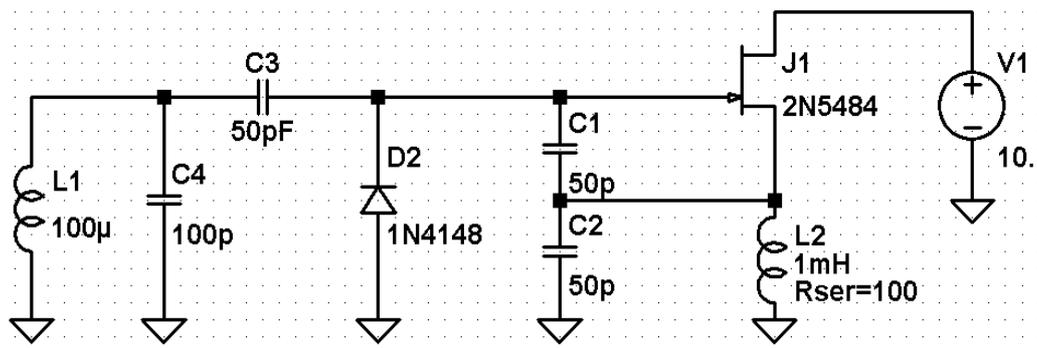
```
.tran 250μ startup  
.options method=trap
```



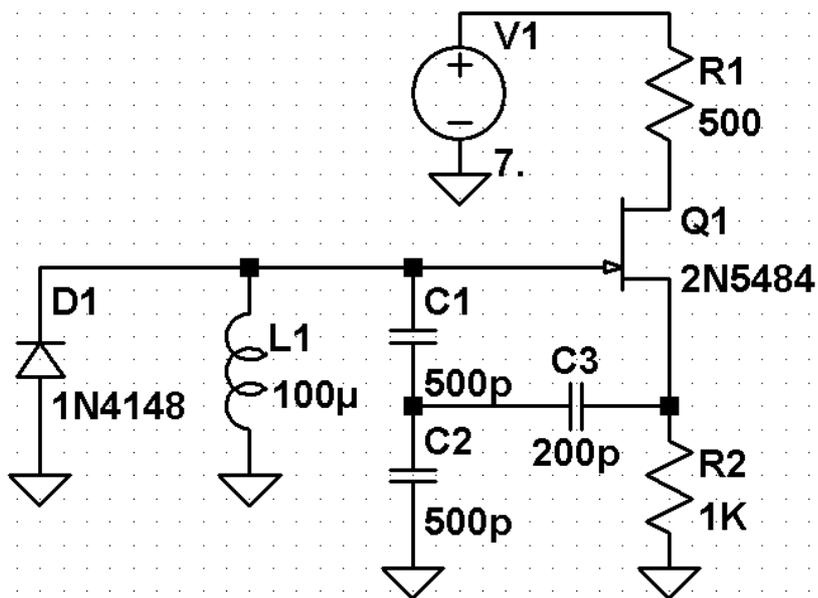
Cohn.asc - частотные характеристики пассивного фильтра



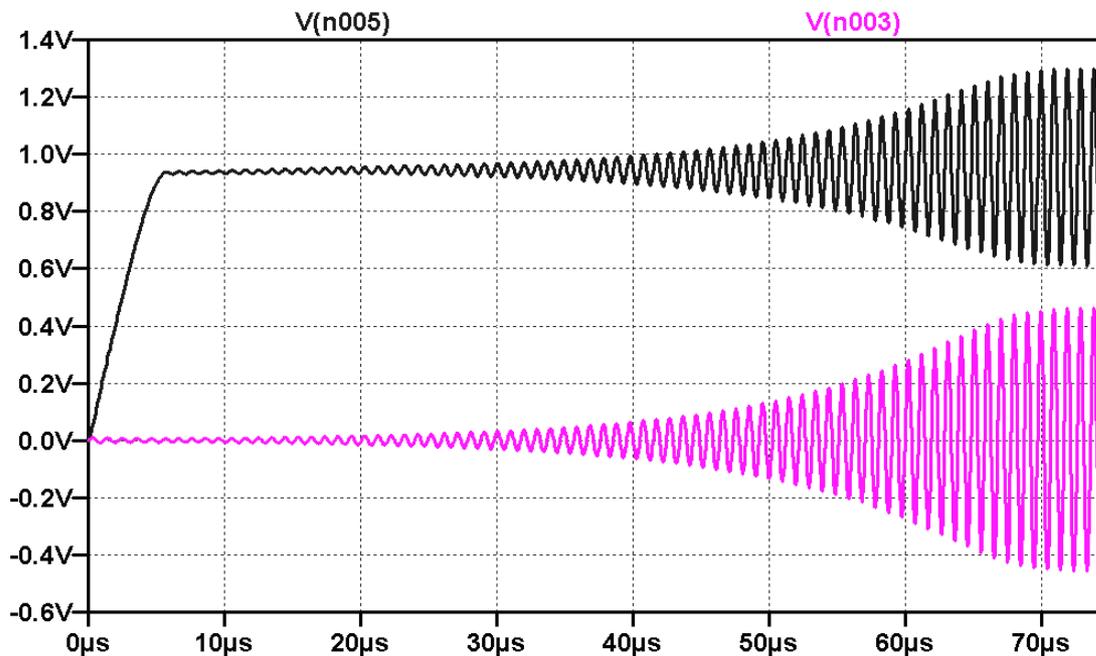
Colpits2.asc - временные осциллограммы транзисторного генератора. Применение опции для метода расчета



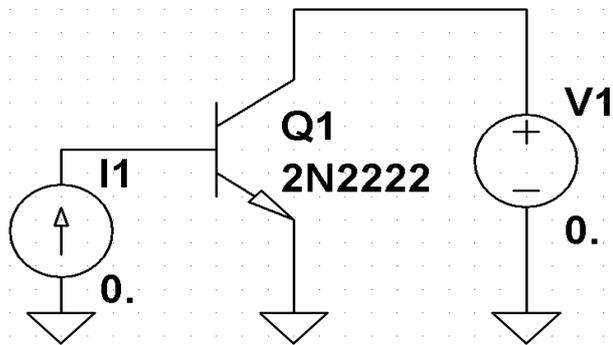
Colpits.asc - временные осциллограммы транзисторного генератора. Применение опции для метода расчета



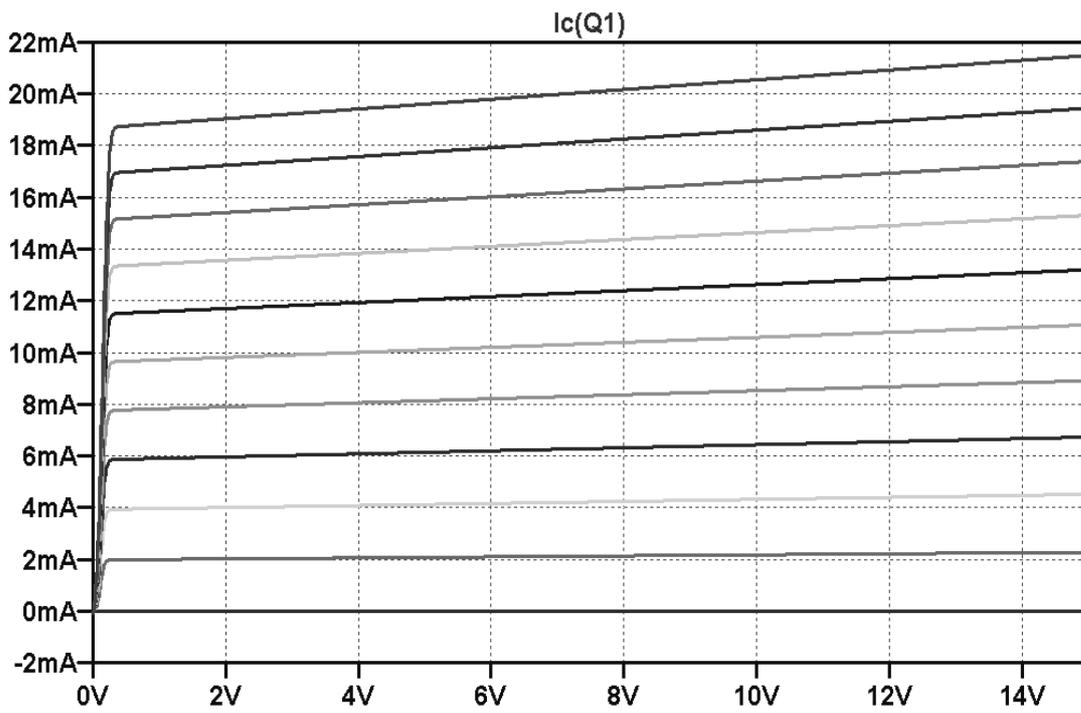
```
.tran 500µ startup  
.options method=trap
```



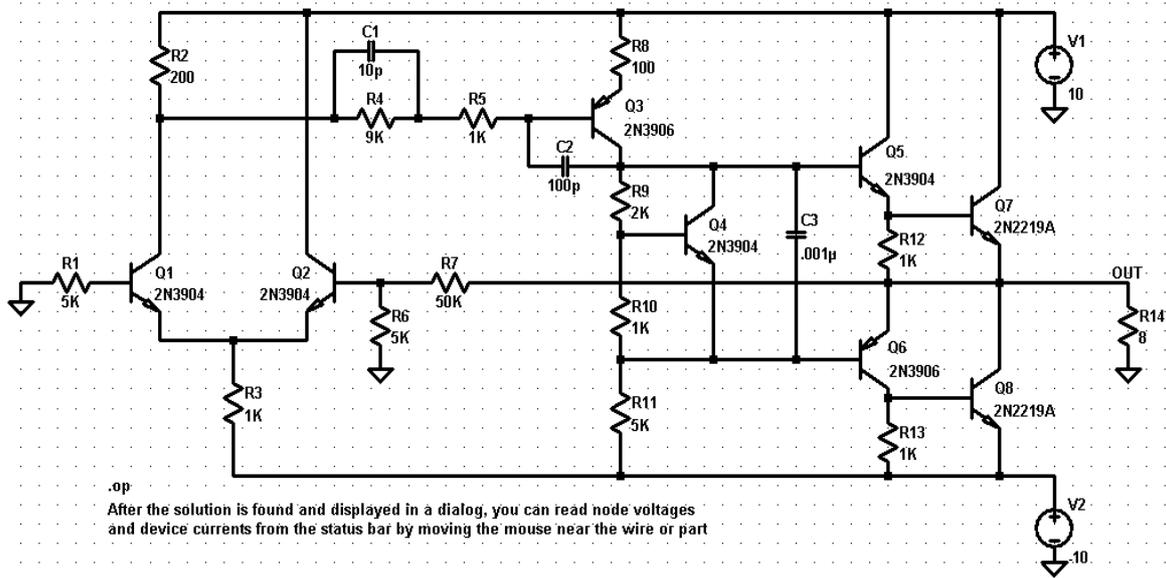
Courvetrace.asc - статические характеристики транзистора.



```
.dc V1 0 15 10m I1 0 100u 10u
```



DcorPnt.asc - расчет рабочей точки многокаскадной транзисторной схемы



-- Operating Point ---

V(n001):	10	voltage
V(n006):	1.20832	voltage
V(n007):	0.56357	voltage
V(out):	-0.128575	voltage
V(n013):	-9.27379	voltage
V(n014):	-10	voltage
V(n012):	-0.777274	voltage
V(n008):	-0.117999	voltage
V(n002):	9.0597	voltage
V(n009):	-0.0727085	voltage
V(n011):	-0.766691	voltage
V(n010):	-0.0741923	voltage
V(n005):	9.14543	voltage
V(n004):	9.81485	voltage
V(n003):	9.13686	voltage
Ic(Q3):	-0.00184289	device_current
Ib(Q3):	-8.57331e-006	device_current
Ie(Q3):	0.00185146	device_current
Ic(Q6):	-0.00083961	device_current
Ib(Q6):	-3.87678e-006	device_current
Ie(Q6):	0.000843487	device_current
Ic(Q8):	0.0224993	device_current
Ib(Q8):	0.000113398	device_current
Ie(Q8):	-0.0226127	device_current
Ic(Q7):	0.00654354	device_current
Ib(Q7):	3.42112e-005	device_current
Ie(Q7):	-0.00657775	device_current
Ic(Q2):	0.00449493	device_current
Ib(Q2):	1.37508e-005	device_current
Ie(Q2):	-0.00450869	device_current

продолжение...

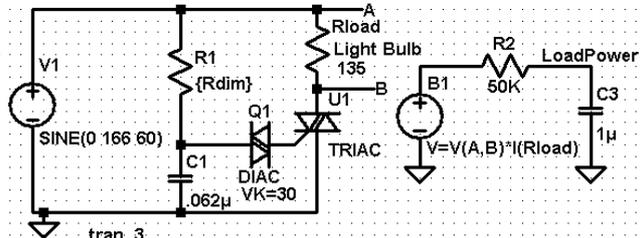
Ic(Q1):	0.00471008	device_current
Ib(Q1):	1.45417e-005	device_current
Ie(Q1):	-0.00472462	device_current
Ic(Q4):	0.00117751	device_current
Ib(Q4):	3.88491e-006	device_current
Ie(Q4):	-0.00118139	device_current
Ic(Q5):	0.000724134	device_current
Ib(Q5):	2.22241e-006	device_current
Ie(Q5):	-0.000726356	device_current
I(C3):	1.9856e-021	device_current
I(C1):	7.71598e-025	device_current
I(C2):	-7.93711e-022	device_current
I(R5):	8.57331e-006	device_current
I(R12):	0.000692145	device_current
I(R13):	0.000726212	device_current
I(R4):	8.57331e-006	device_current
I(R8):	0.00185146	device_current
I(R1):	-1.45417e-005	device_current
I(R7):	-1.08765e-006	device_current
I(R6):	-1.48385e-005	device_current
I(R3):	0.00923331	device_current
I(R2):	0.00470151	device_current
I(R10):	0.000659275	device_current
I(R9):	0.00066316	device_current
I(R14):	-0.0160718	device_current
I(R11):	0.00184455	device_current
I(V2):	0.0344168	device_current
I(V1):	-0.0183156	device_current

Dimmer.asc - применение транзисторных схем замещения динистора и тристора

```

.subckt DIAC T1 T2
* default parameters
.param RS=10 ; series resistance
.param VK=20 ; breakdown voltage
Q1 N002 N001 T2 0 PN
Q2 N001 N002 N005 0 NP
R1 N002 N004 {20K*(VK-1)}
R2 N004 T2 9.5K
R3 N002 N005 9.5K
Q3 N004 N003 N005 0 PN
Q4 N003 N004 T2 0 NP
R4 T1 N005 {RS}
.model PN NPN Cjc=10p Cje=10p
.model NP PNP Cjc=10p Cje=10p
.ends DIAC

```

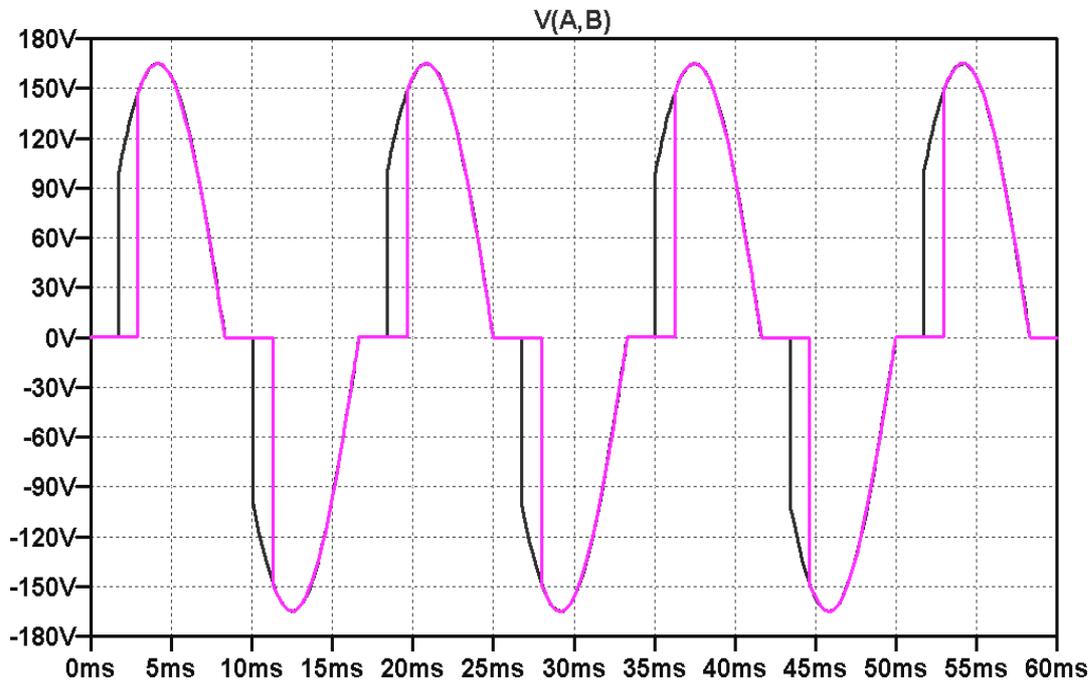


```

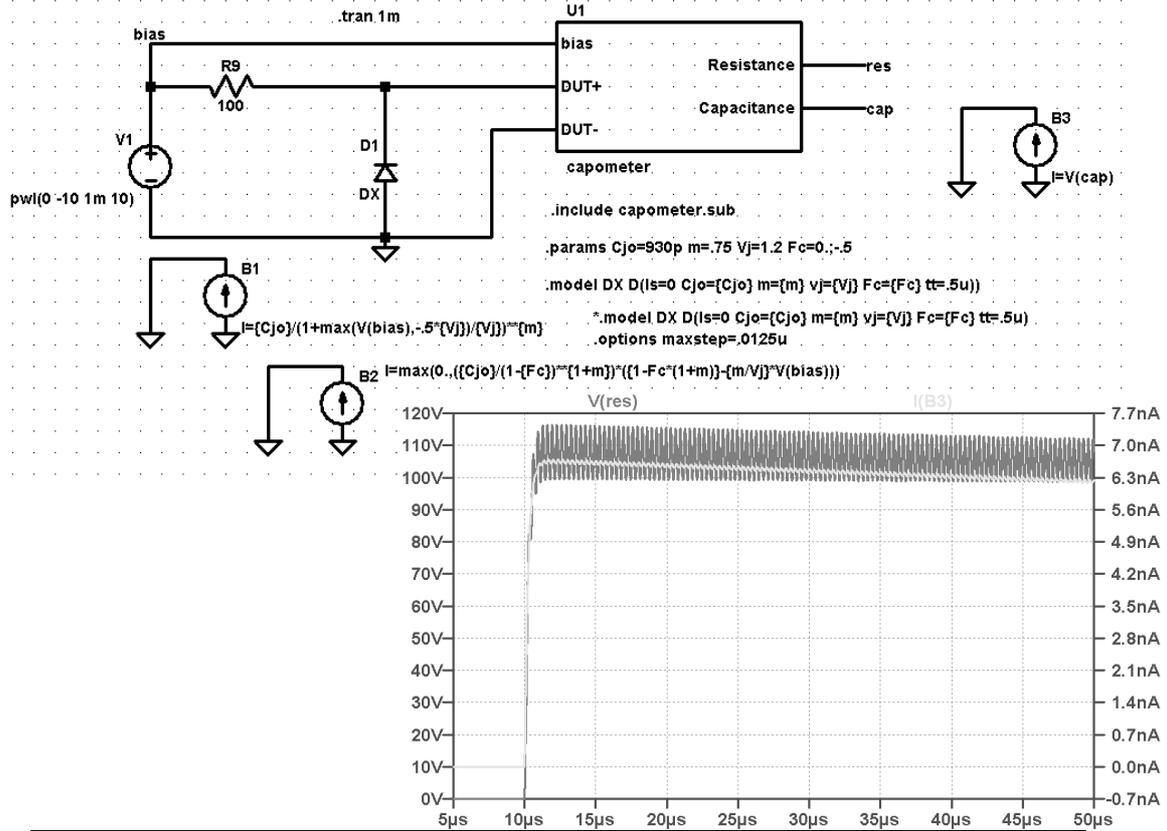
.tran 3
.step param Rdim list 50K 125K

.subckt TRIAC MT2 G MT1
.param R=10K
Q1 N001 G MT1 0 NP
Q2 N001 N002 MT2 0 NP
Q3 N002 N001 MT1 0 PN
Q4 G N001 MT2 0 PN
R1 MT2 N002 {R}
R2 G MT1 {R}
.model PN NPN Cjc=10p Cje=10p
.model NP PNP Cjc=10p Cje=10p
.ends TRIAC

```



FC.asc - применение текстового описания подсхемы



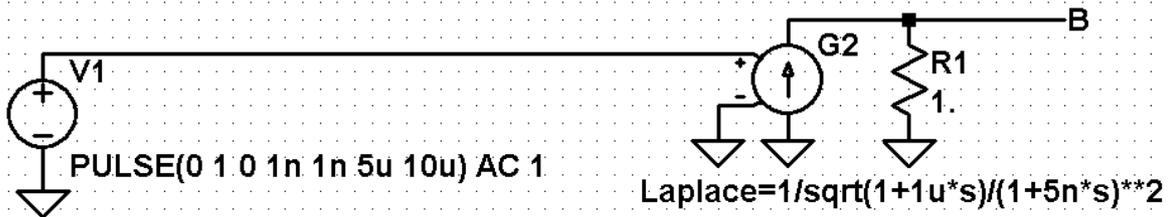
```

.subckt capometer 1 2 3 4 5
B1 2 1 I={current}*cos(2*pi*{freq}*time)*min(time*2e5, 1.) Rpar=1G
R1 N001 0 1.
C2 N001 0 {C}
B2 0 N001 I=sin(2*pi*{freq}*time)*V(x)*min(time*2e5, 1.)
G1 0 N002 N001 0 1.
G2 0 im N002 0 1.
R4 N002 0 1.
C5 N002 0 {C}
R5 im 0 1.
C6 im 0 {C}
R2 N003 0 1.
C3 N003 0 {C}
B3 0 N003 I=cos(2*pi*{freq}*time)*V(x)*min(time*2e5, 1.)
G3 0 N004 N003 0 1.
G4 0 re N004 0 1.
R6 N004 0 1.
C7 N004 0 {C}
R7 re 0 1.
C8 re 0 {C}
R3 5 0 1.
C4 5 0 {C}
B4 0 5 I=if(time<10u, 0.,
max(0.,.5*V(im)*{current}/(2*pi*{freq})*(V(im)*V(im)+V(re)*V(re))))
R10 4 0 1.
C10 4 0 {C}
B6 0 4 I=if(time<10u, 0., 2./{current}*(V(re)+V(im)*V(im)/V(re)))
G5 0 x N005 2 1.
R8 x 0 1.
R9 3 0 1G
G6 N005 1 3 0 1.
R12 1 N005 1.
*C9 x 0 {1/(4*pi*freq/Q)}
*L1 0 x {1/(Q*pi*freq)}
.param current=10u freq=3Meg C=1u Q=.25
.ends capometer

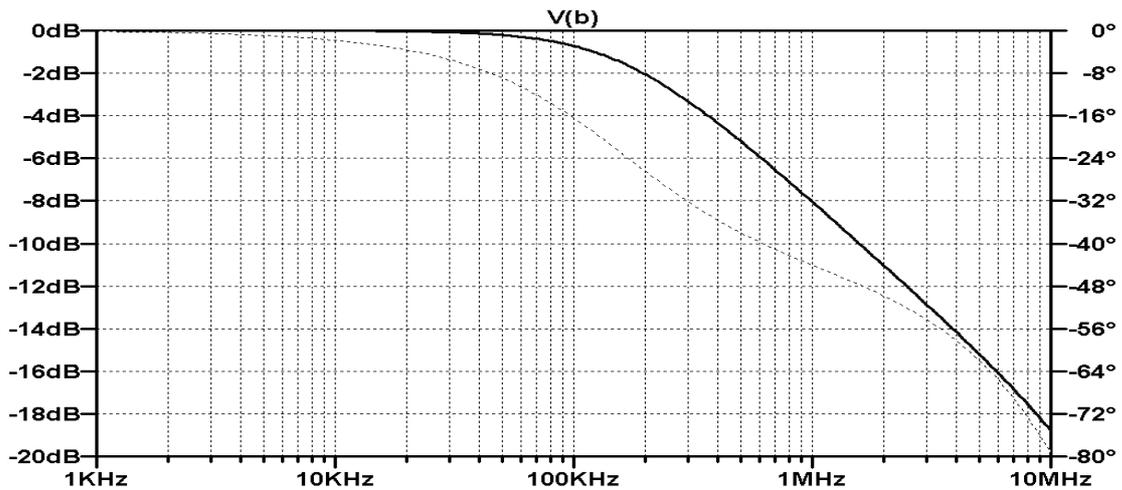
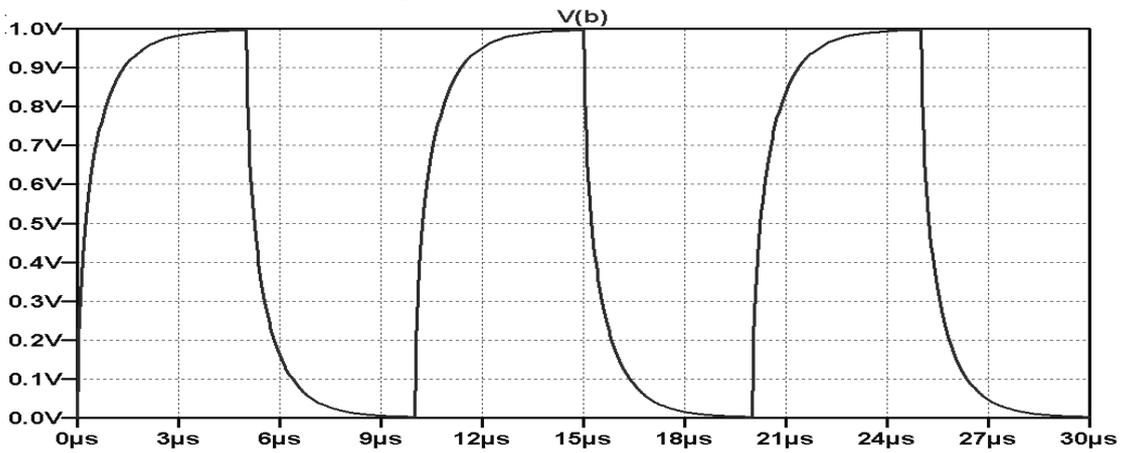
```

HalfSlope.asc - применение преобразования Лапласа при моделировании переходных процессов и при частотном анализе

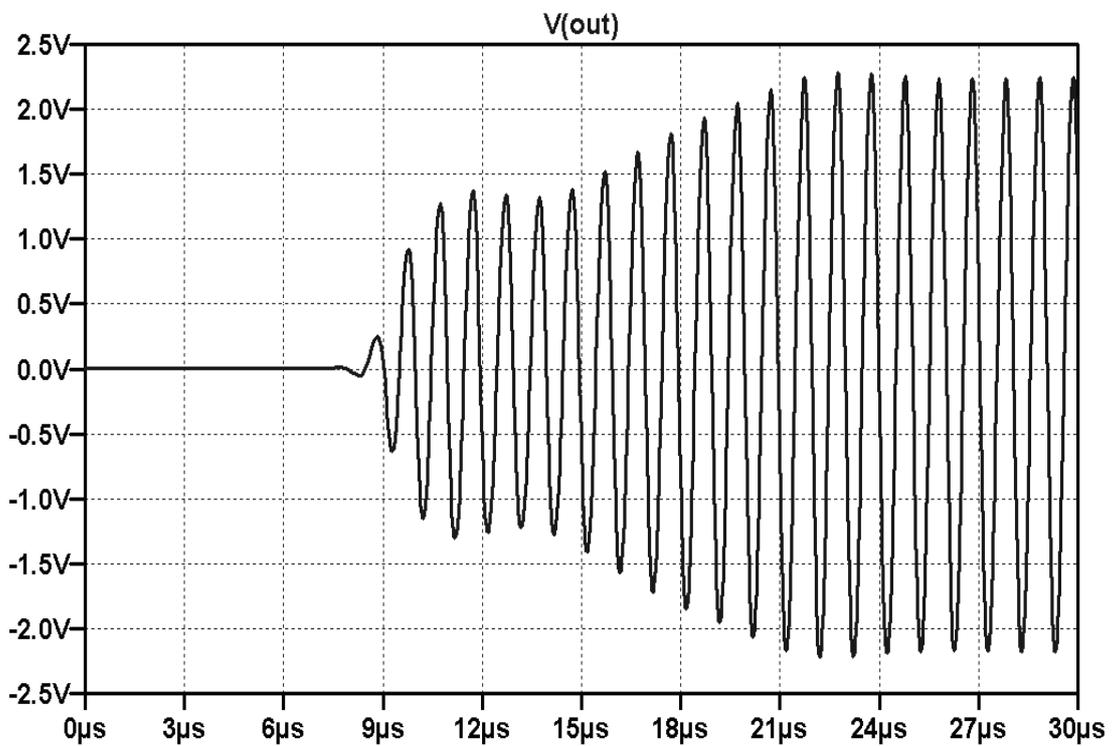
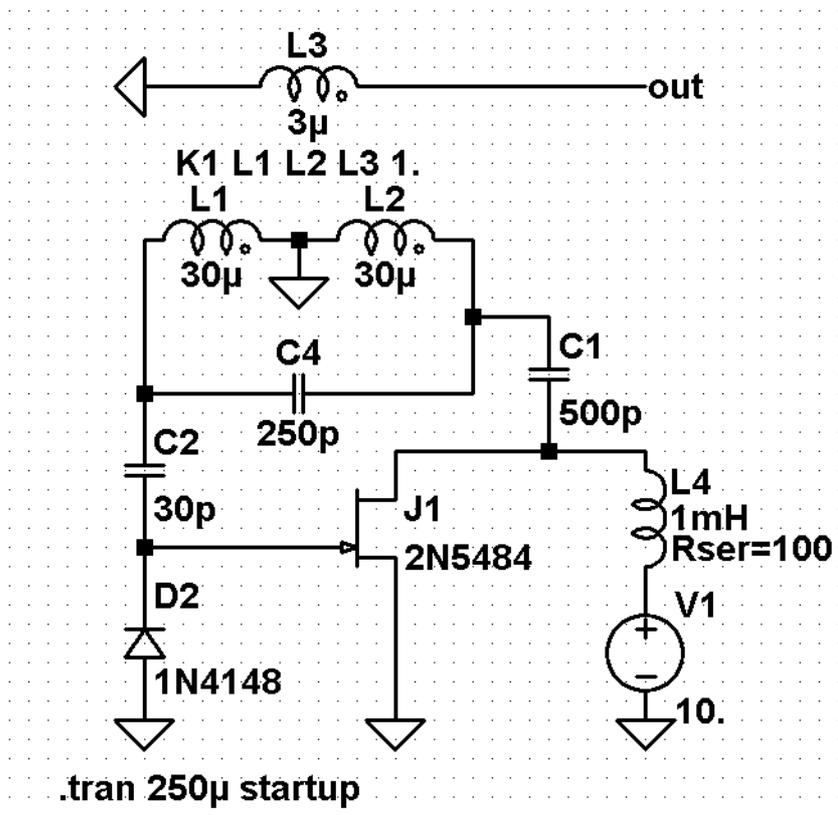
Time domain response of a 3db/octive rolloff



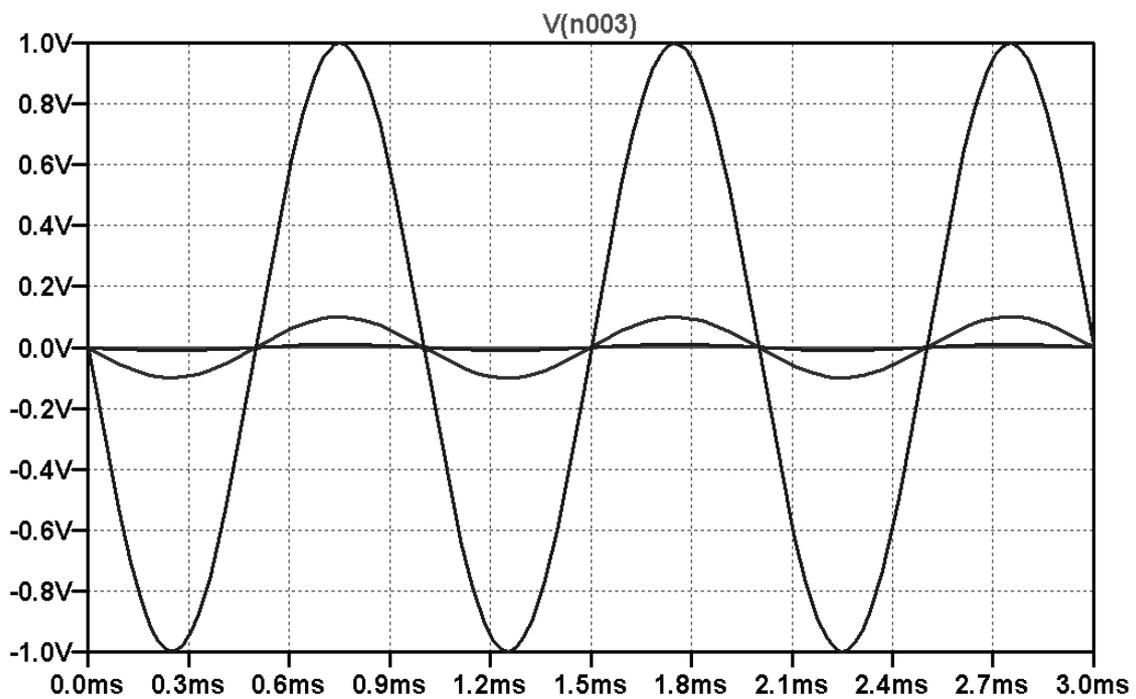
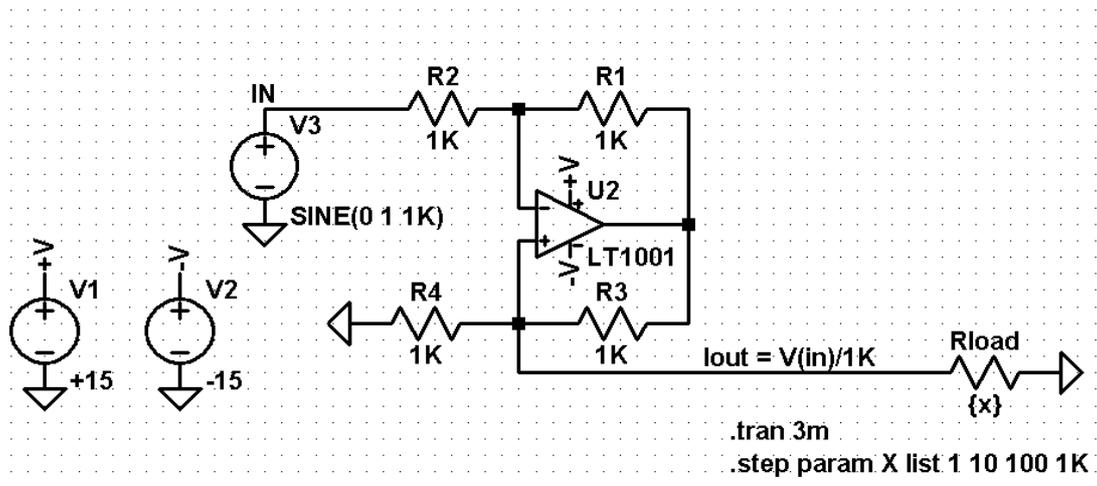
```
.tran 30u
*.ac oct 20 1K 10Meg
```



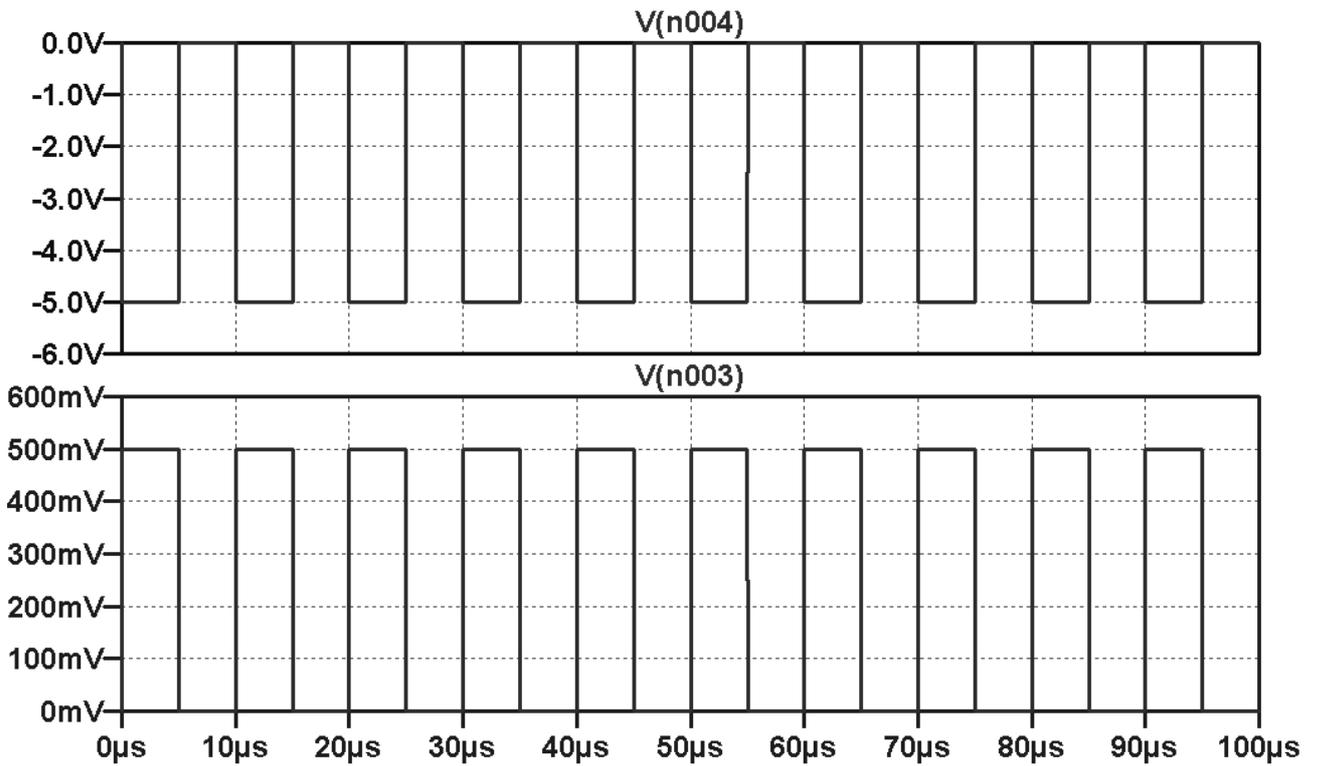
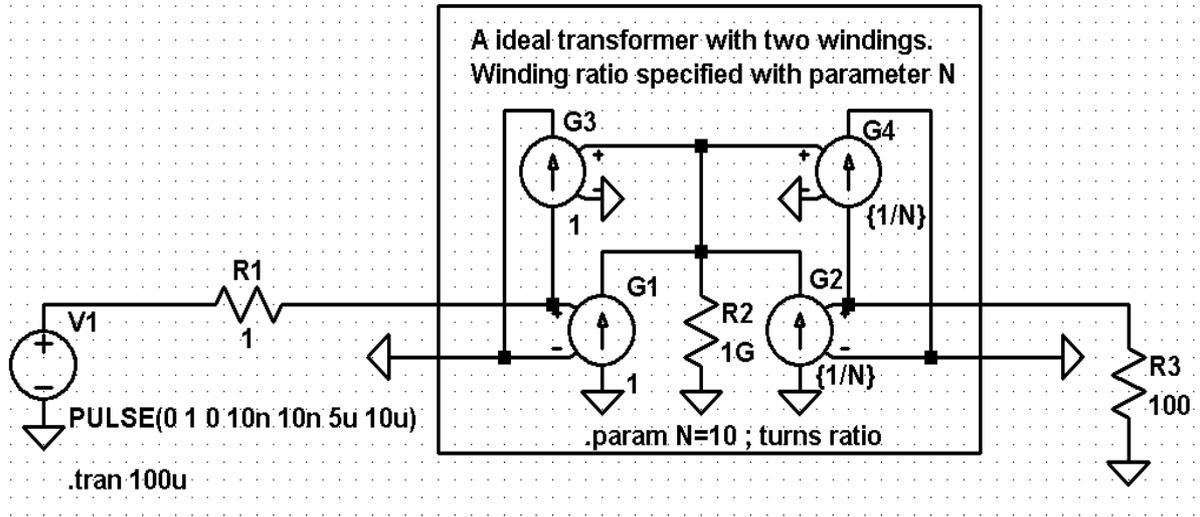
Hartly.asc - взаимные индуктивности в транзисторном генераторе синусоидального сигнала



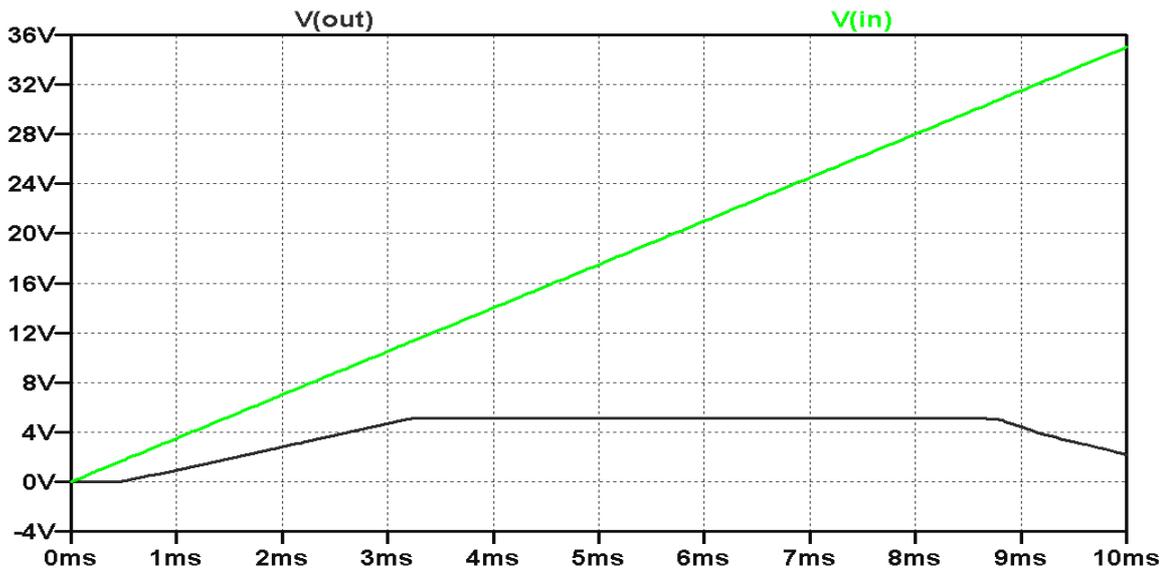
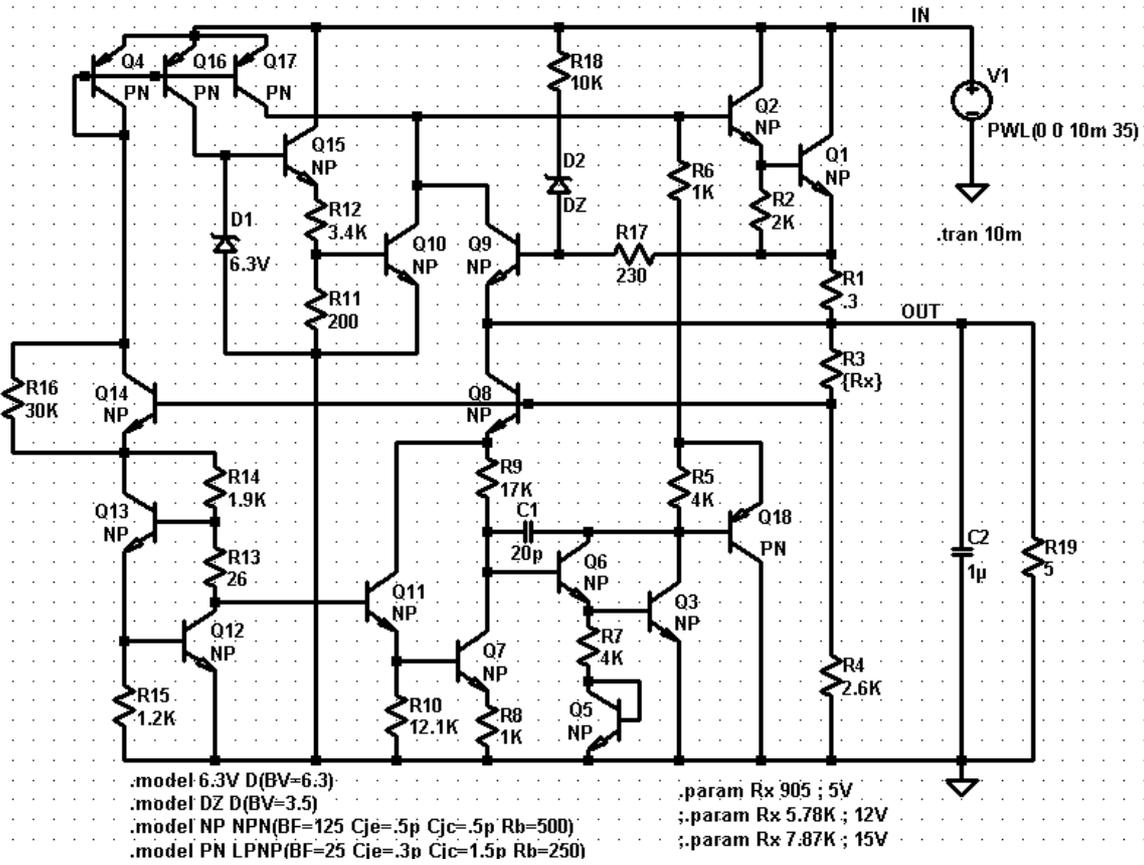
Howland.asc - параметрический анализ мгновенных процессов схемы на операционном усилителе



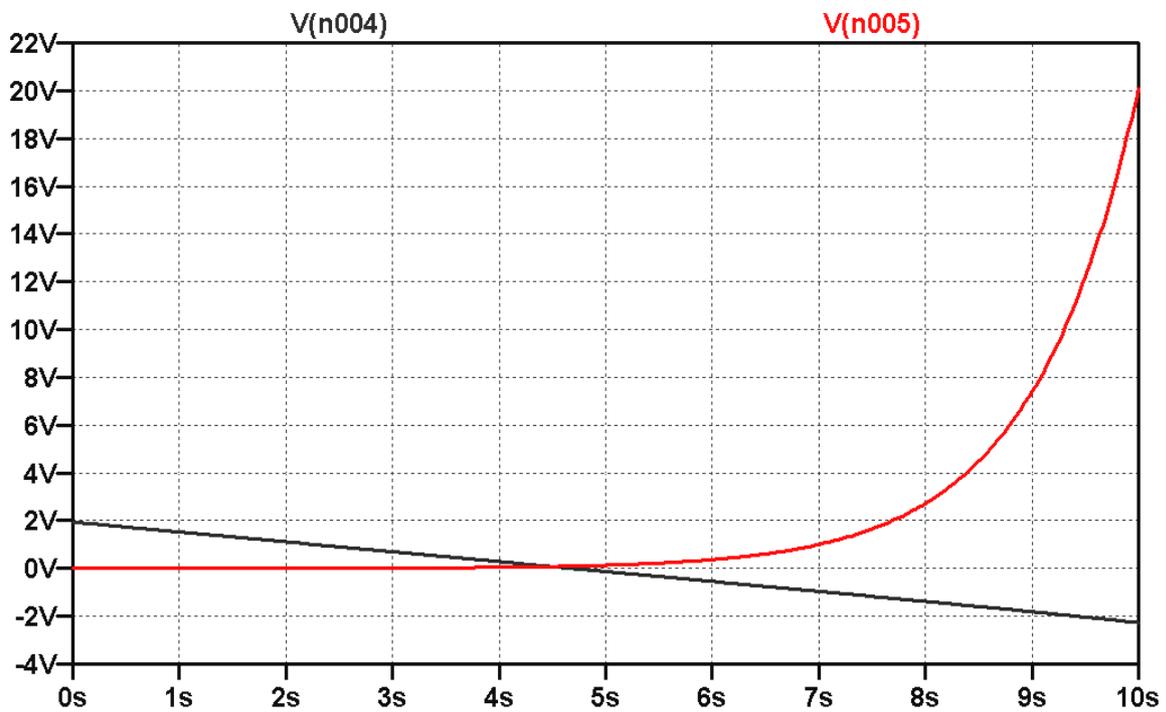
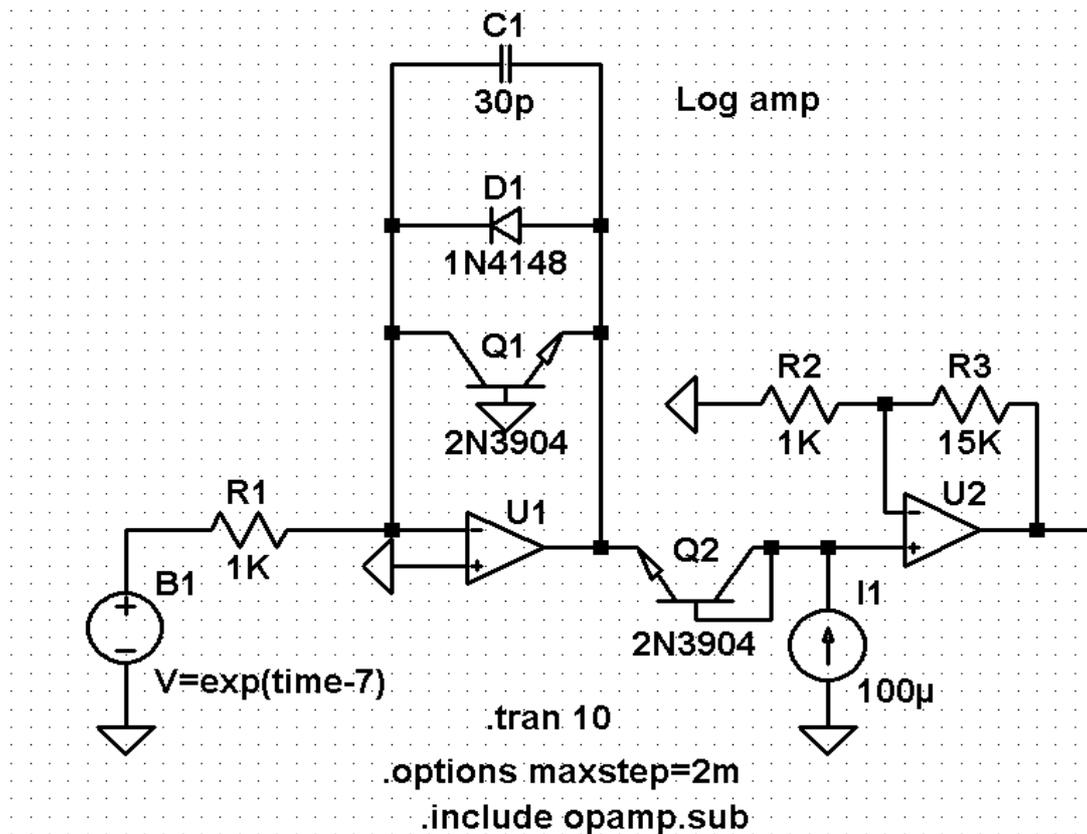
IdealTransformer.asc - макромодель «идеального трансформатора»



LM78XX.asc (LM308.asc, LM741.asc) - сложные транзисторные схемы усилителей



Logamp.asc - логарифмическая функция на электронных компонентах



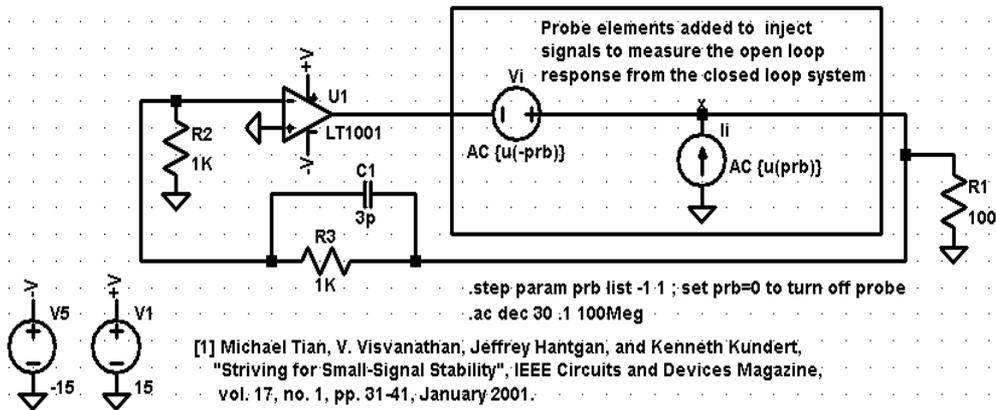
LoopGain2.asc - частотные характеристики разомкнутого и замкнутого контуров.

Here the open loop gain is determined from the closed loop system[1].
The open loop gain can be plotted by plotting the quantity:

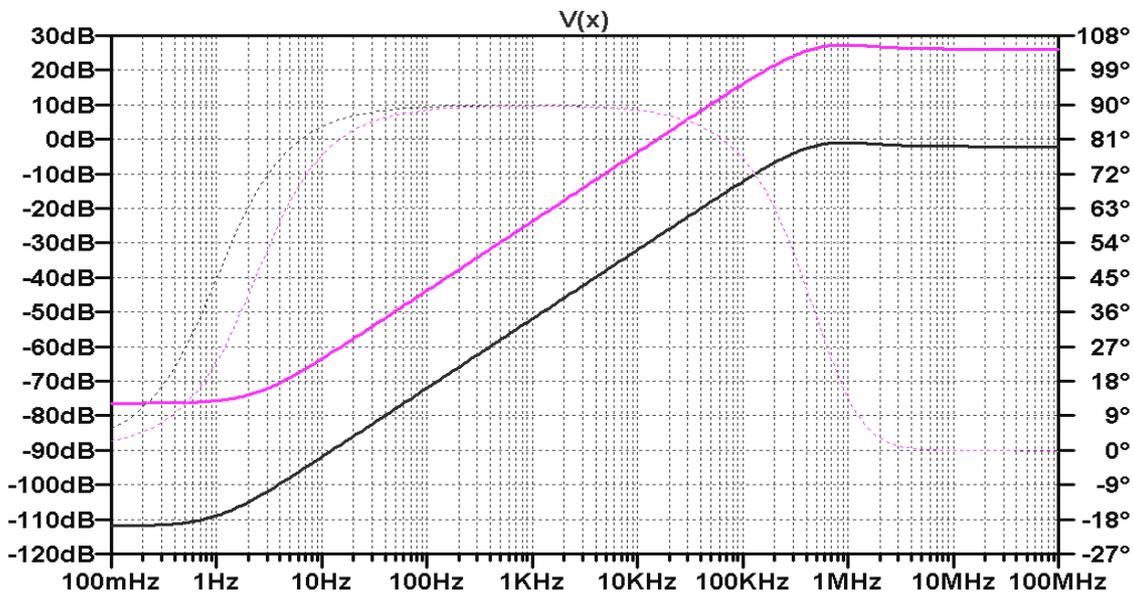
$$-1/(1-1/(2*(I(Vi)@1^*V(x)@2-V(x)@1^*(Vi)@2)+V(x)@1+I(Vi)@2))$$

Alternatively, you add the following line to your plot.defs file:
.func T.et.al() -1/(1-1/(2*(I(Vi)@1^*V(x)@2-V(x)@1^*(Vi)@2)+V(x)@1+I(Vi)@2))
And then plot simply T.et.al()

This is an improvement over the technique shown in LoopGain.asc because it (i) accounts for reverse feedback(it doesn't even matter if you reverse the direction of the probe -- you still compute the same open loop response) and (ii) the inserted probe elements result in a smaller, sparser circuit matrix.



This example is based on posts contributed by Frank Wiedmann to the independent users' group at <http://groups.yahoo.com/group/LTspice>

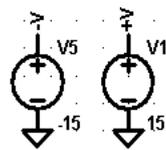


LoopGain.asc - частотные характеристики разомкнутого и замкнутого контуров

Here the open loop gain is determined from the closed loop system[1]. The voltage gain and current gain are independently measured in two circuits identical except for the elements inserted into the loop to make the measurements. Then the open loop gain can be plotted by plotting the quantity:

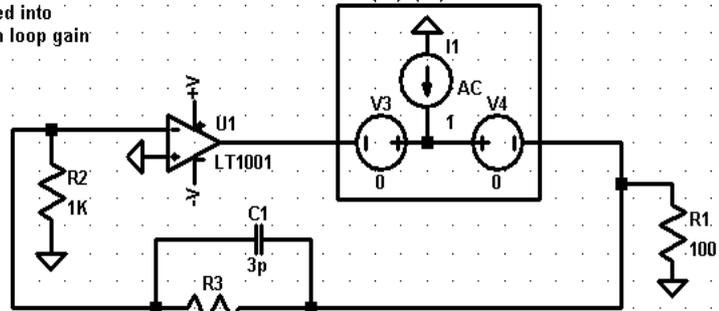
$$\left(\frac{I(V3)}{I(V4)} - \frac{V(x)}{V(y)}\right) / \left(\frac{I(V3)}{I(V4)} + \frac{V(x)}{V(y)} + 2\right)$$

Alternatively, you can add the lines
`.func Gi()=I(V3)/I(V4)`
`.func Gv()=-V(x)/V(y)`
`.func middlebrook(x,y) = (x*y-1)/(x+y+2)`
to your plot.defs file and then plot the quantity
`middlebrook(Gi(),Gv())`

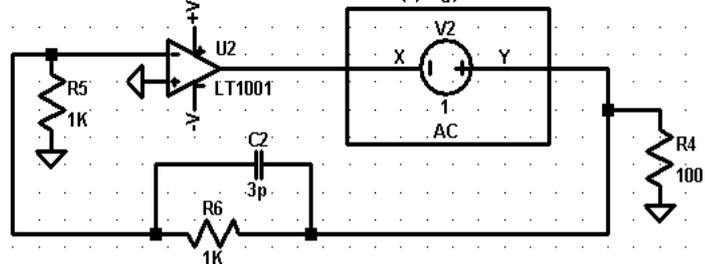


`.ac dec 30 .1 100Meg`

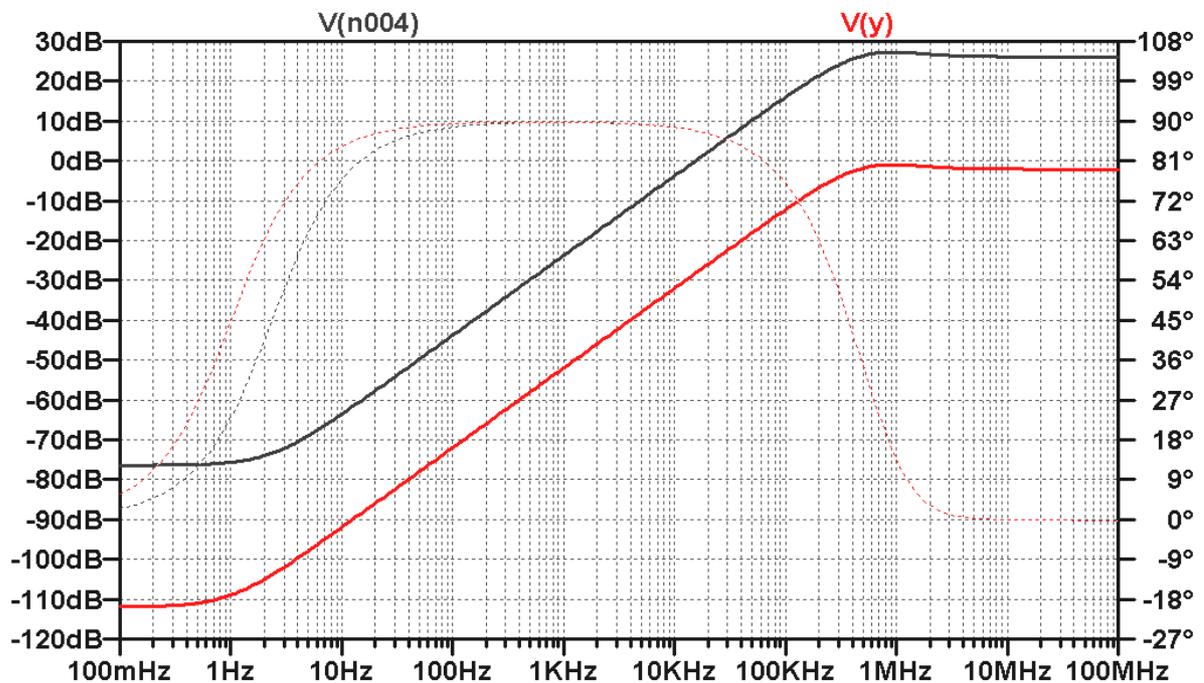
Elements added to compute current gain
 $G_i = I(V3)/I(V4)$



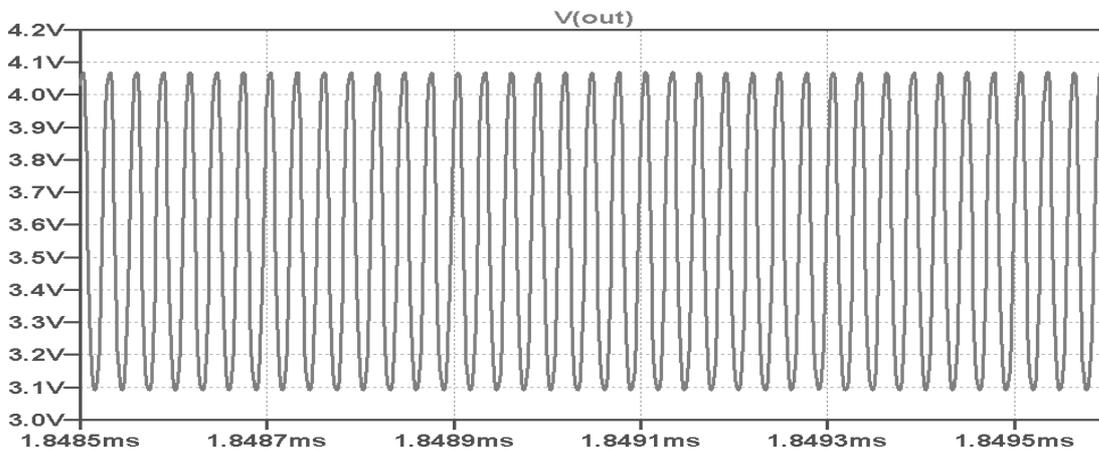
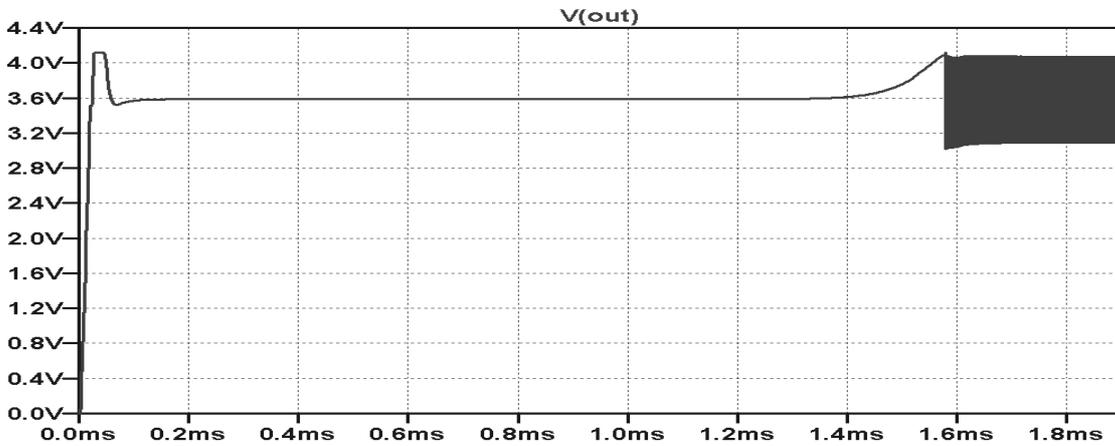
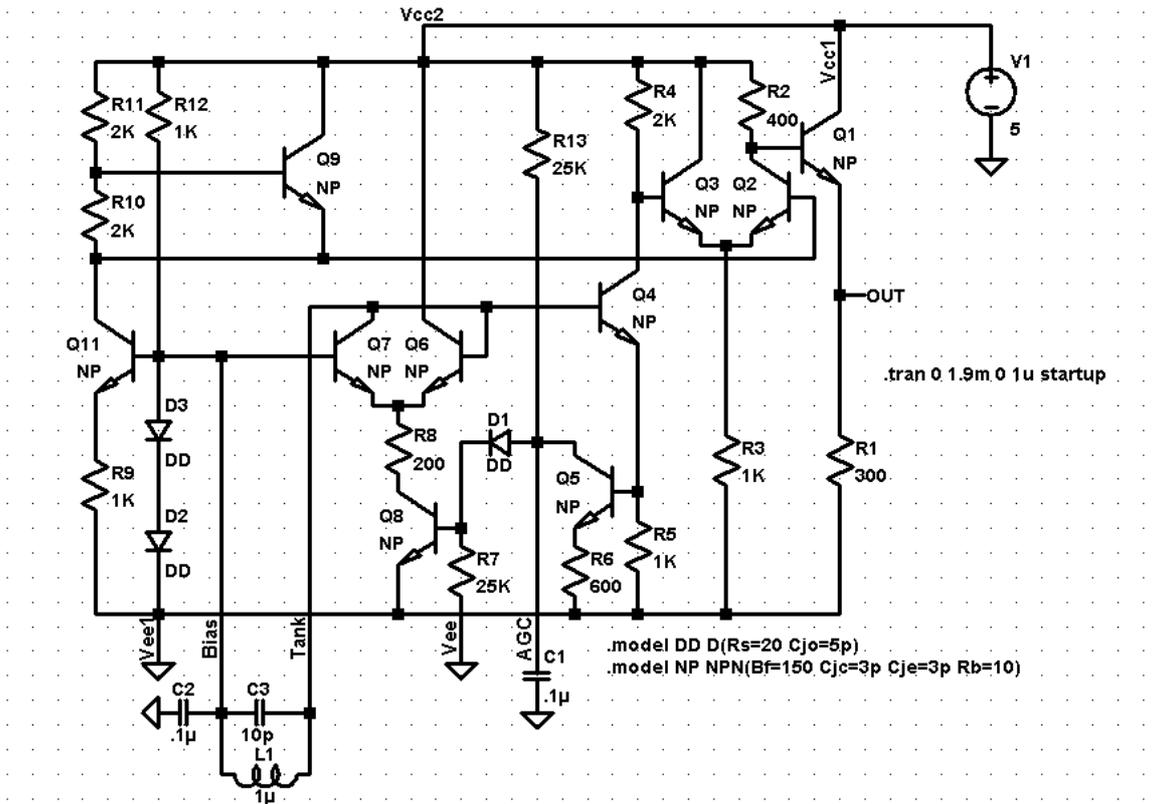
Element added to compute voltage gain
 $G_v = -V(x)/V(y)$



1] Middlebrook, R.D., "Measurement of Loop Gain in Feedback Systems", Int. J. Electronics, vol 38, No. 4, pp. 485-512, 1975
 See the example file LoopGain2.asc for an improved technique.

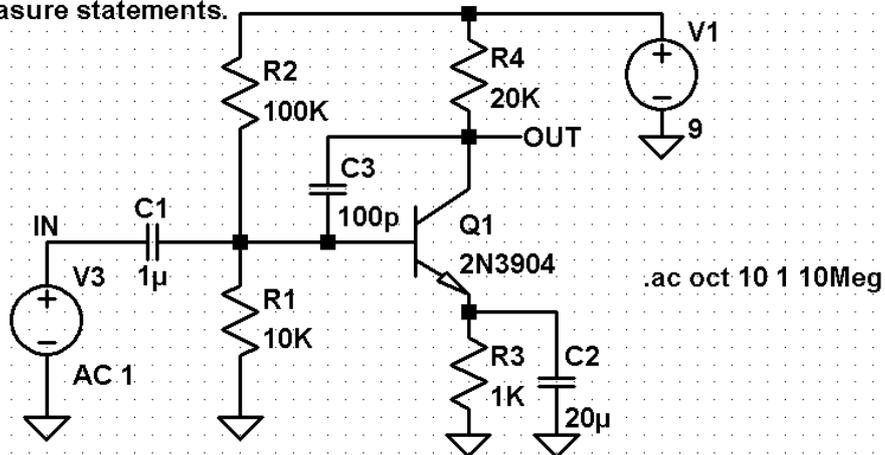


MC1648.asc - транзисторный генератор синусоидального напряжения

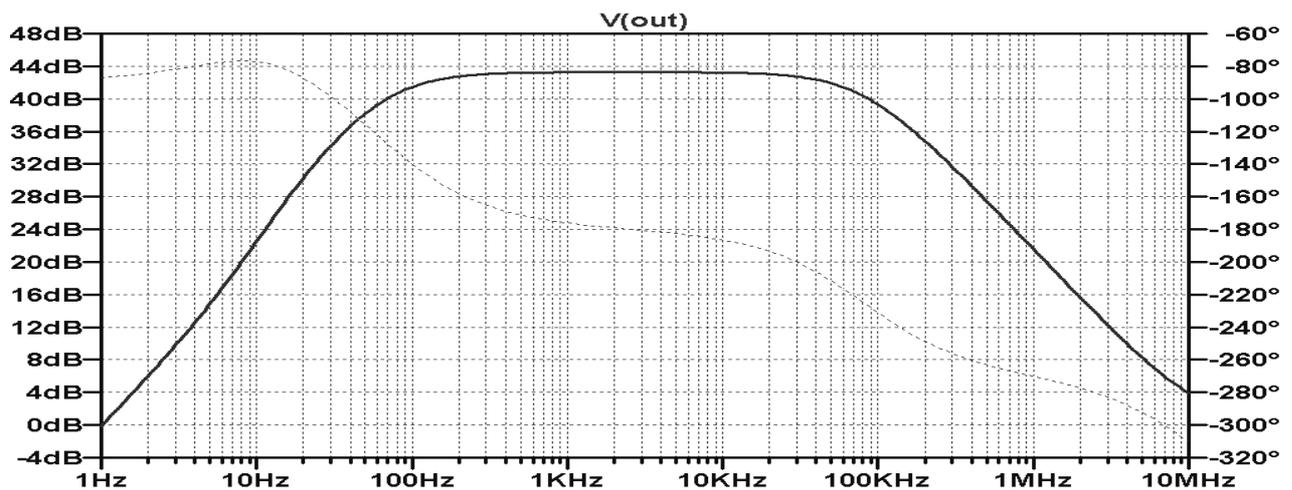


MeasureBW.asc - измерение полосы пропускания транзисторного усилителя

Example of using a .measure script to measure the 3dB bandwidth of a response.
Execute View=>SPICE Error Log after running the simulation to see the output of the .measure statements.



```
.measure tmp max mag(V(out))
.measure BW trig mag(V(out))=tmp/sqrt(2) rise=1 targ mag(V(out))=tmp/sqrt(2) fall=last
```



Circuit: * C:\Program Files\LTC\SwCADIII\examples\Educational\MeasureBW.asc

Direct Newton iteration for .op point succeeded.

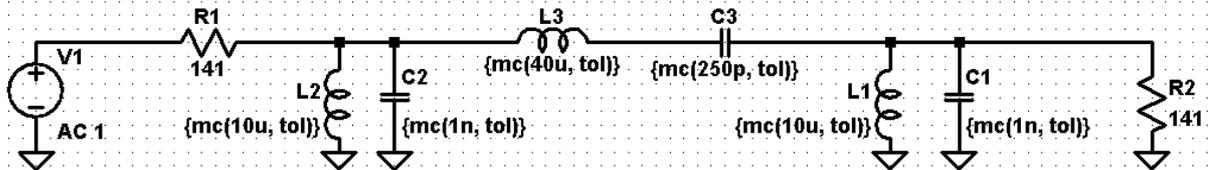
```
tmp: MAX(mag(v(out)))=(43.2762dB,0°) FROM 1 TO 1e+007
bw=81949.4 FROM 73.2928 TO 82022.7
```

Date: Wed Mar 12 14:00:44 2008
Total elapsed time: 0.094 seconds.

```
tnom = 27
temp = 27
method = trap
totiter = 9
traniter = 0
tranpoints = 0
accept = 0
rejected = 0
trancriters = 9
matrix size = 10
fillins = 0
solver = Normal
```

MonteCarlo.asc - частотные характеристики при разбросе параметров по случайному закону

Monte Carlo Simulation in LTspice



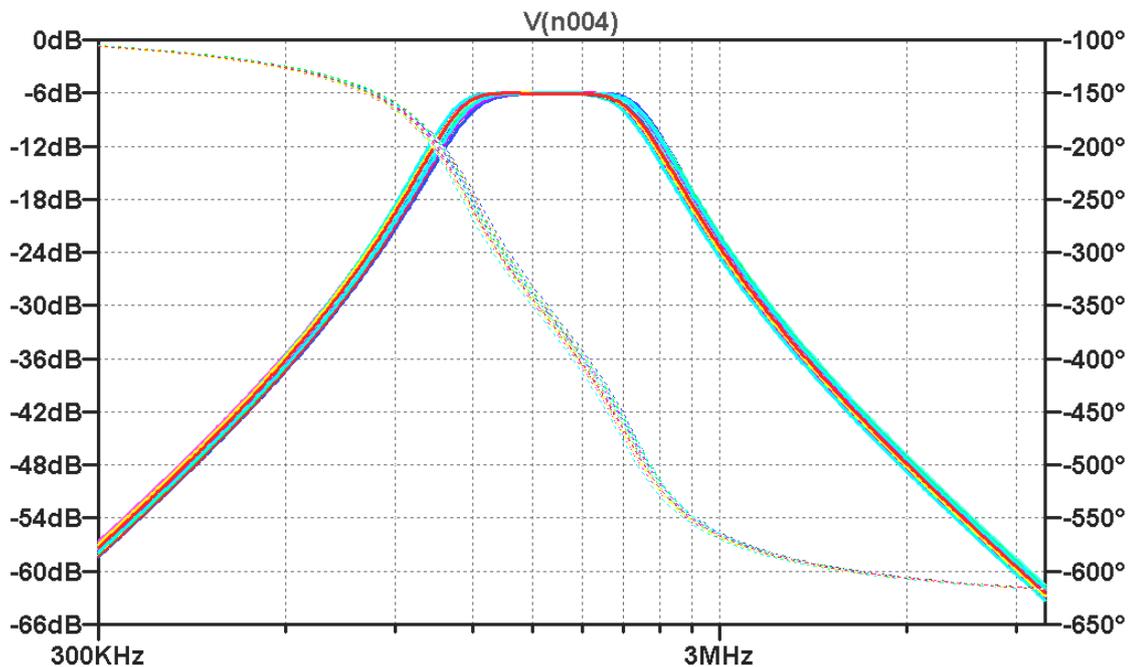
```
.param tol=.05 ; +/- 5% component tolerance
.step param X 0 20 1 ; a dummy paramter to cycle Monte Carlo runs
.ac oct 100 300K 10Meg
```

mc(val, tol) is a function that uses a random number generator to return a value between $val - tol \cdot val$ and $val + tol \cdot val$

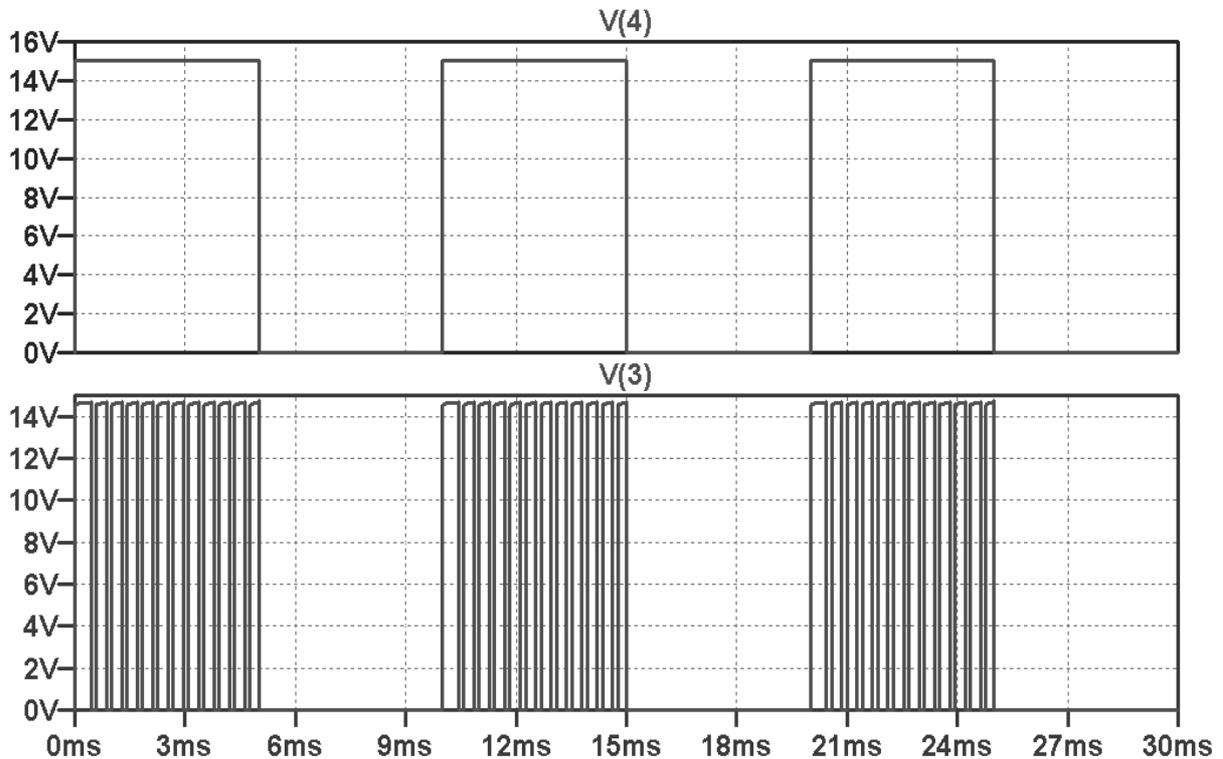
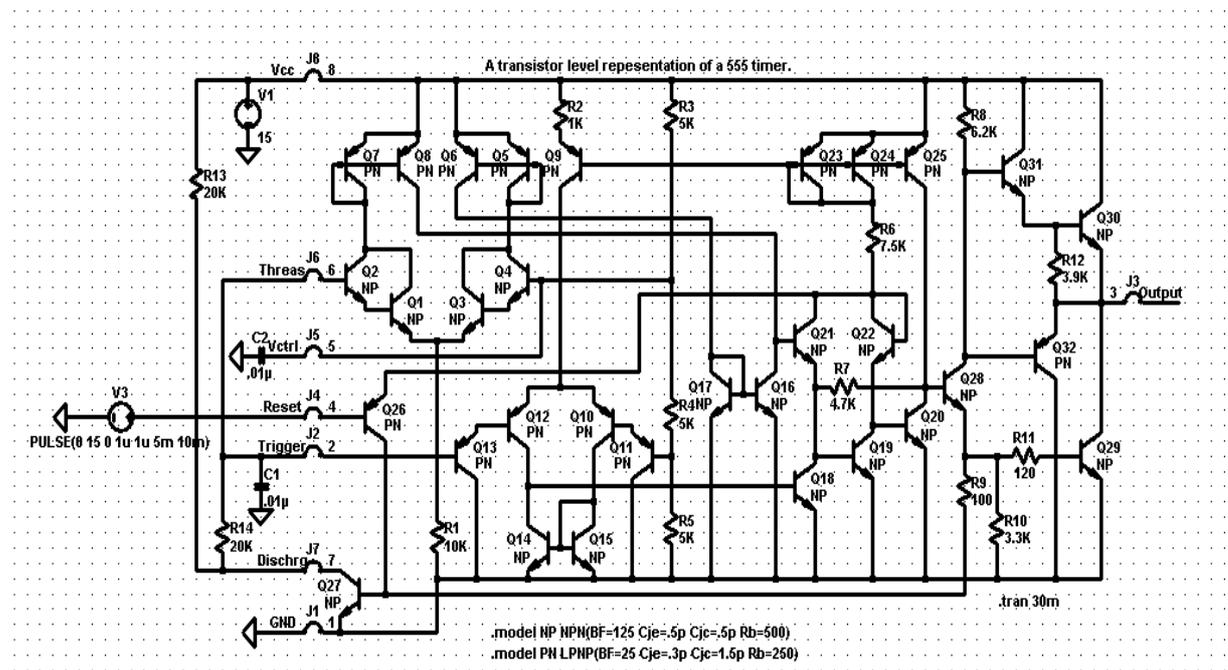
Other functions of interest:

flat(x): a function that uses a random number generator to return a value between $-x$ and x ;

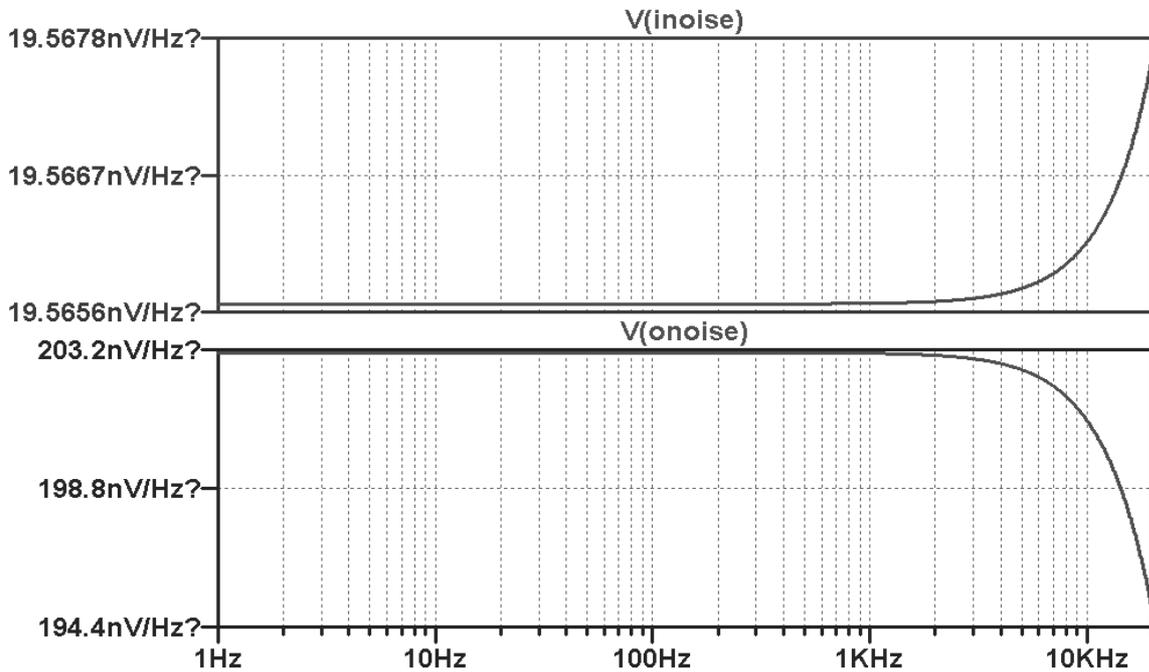
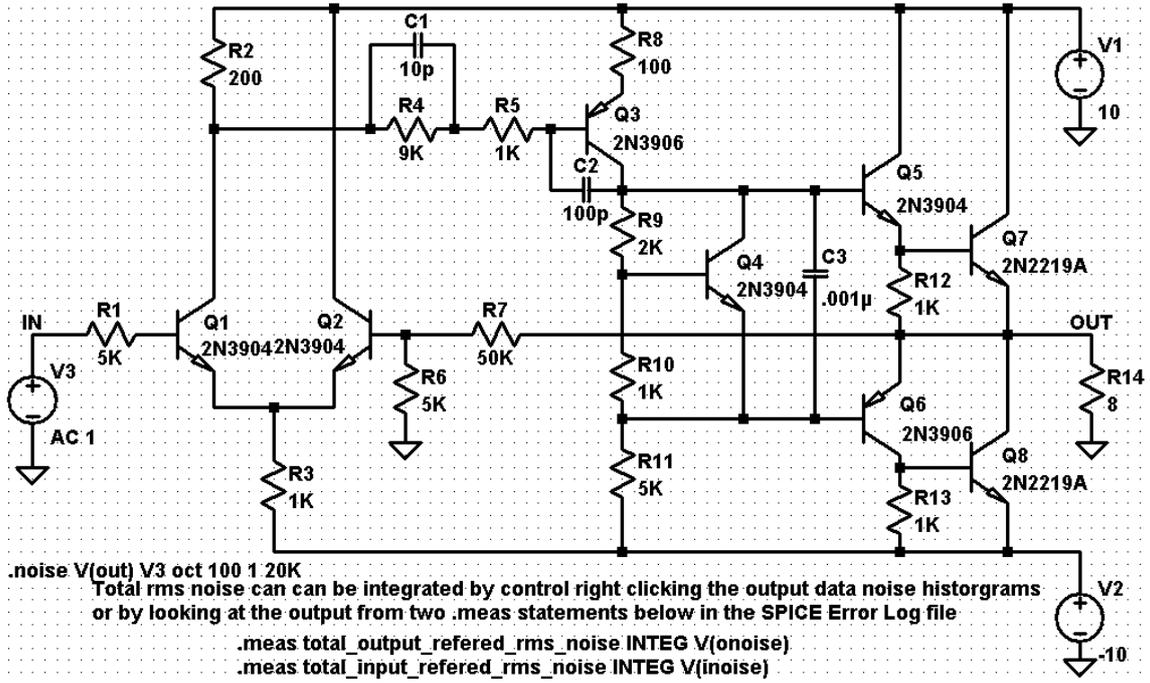
gauss(x): a function that uses a random number generator to return a value with a Gaussian distribution and sigma x .



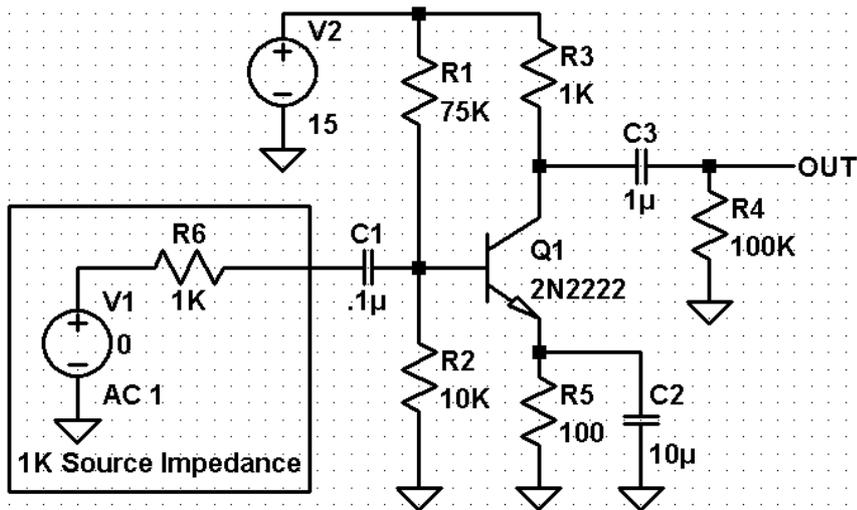
NE555.asc - транзисторный генератор импульсов



Noise.asc - анализ шума электронной схемы



NoiseFigure.asc - анализ шума электронной схемы



```
.NOISE V(out) V1 oct 10 1K 100K
```

To plot NF vs. Frequency:

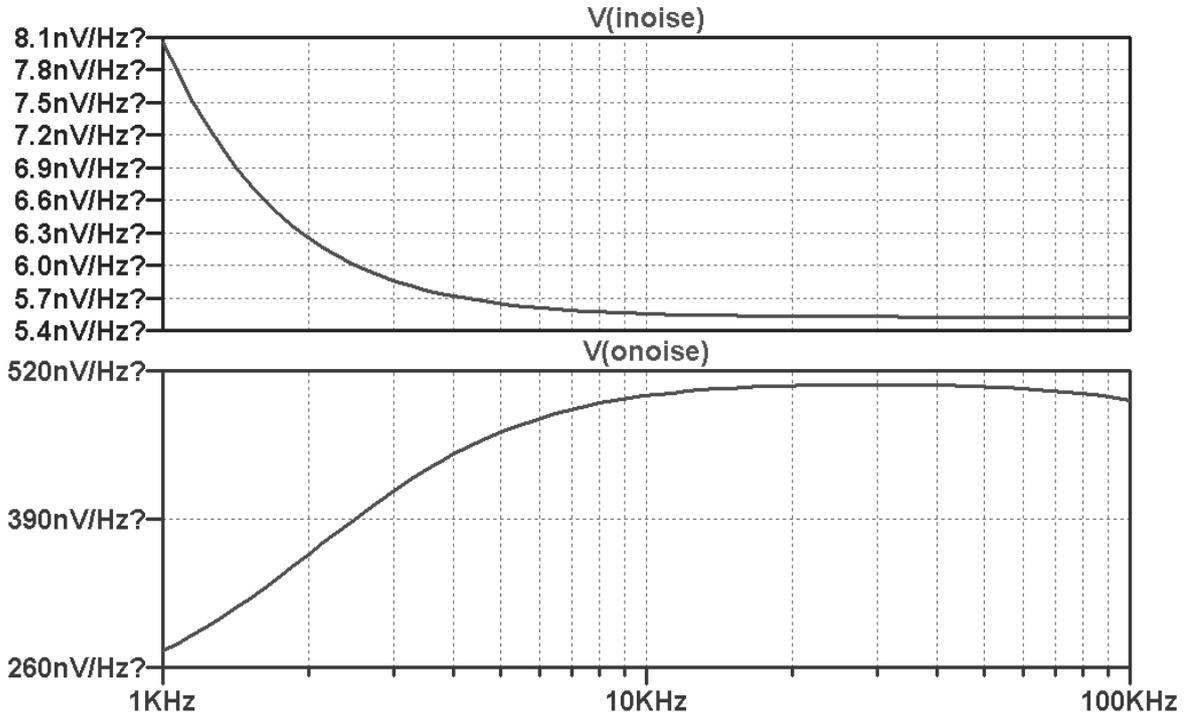
```
10*log10(V(inoise)*V(inoise))/(4*k*300.15*1K)
```

Note that the units are dB but will be labeled V/sqrt(Hz)

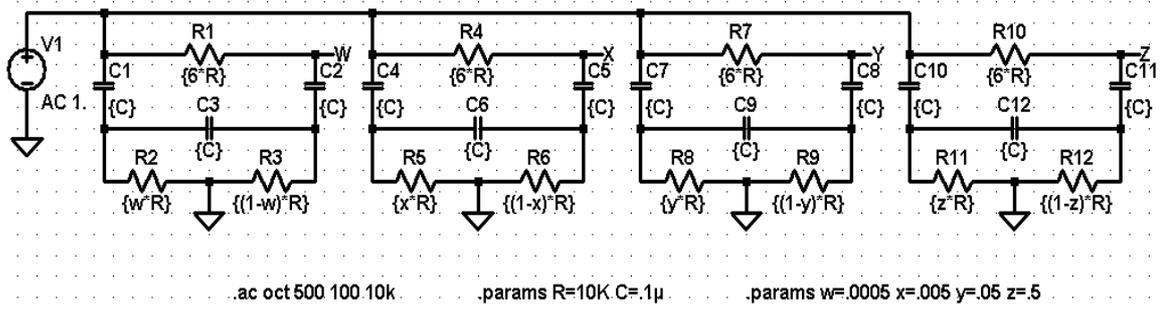
If you add the line

```
.func NF(R) 10*log10(V(inoise)*V(inoise))/(4*k*300.15*R)
```

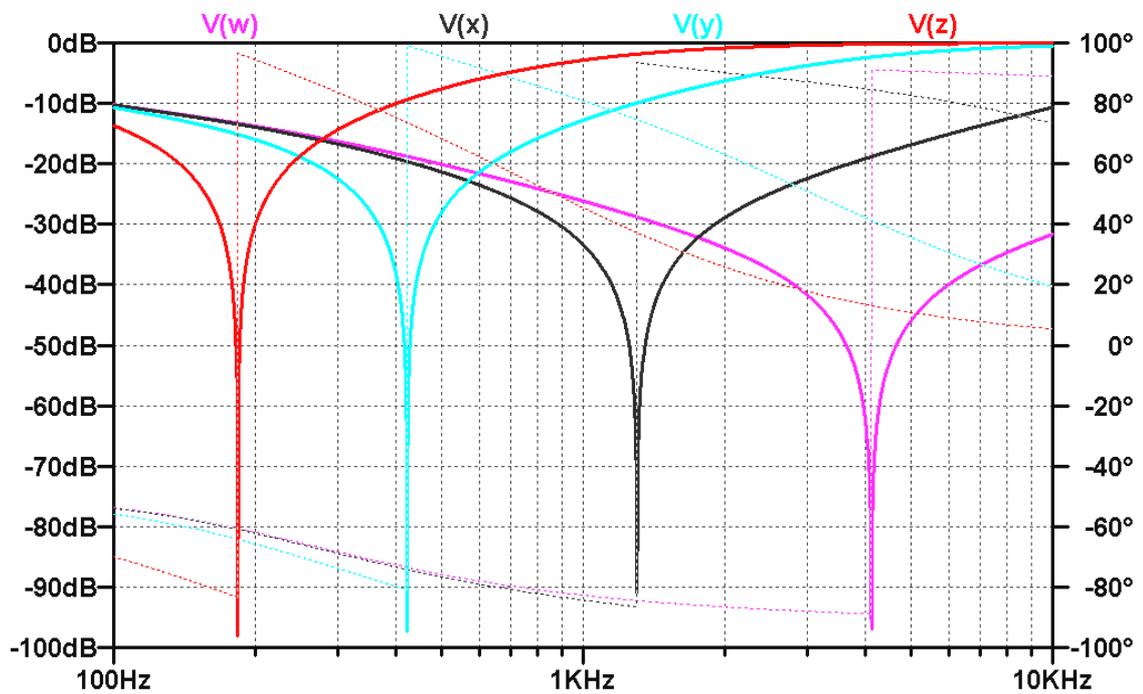
to your plot.defs file, then you can conveniently plot the quantity NF(1K)



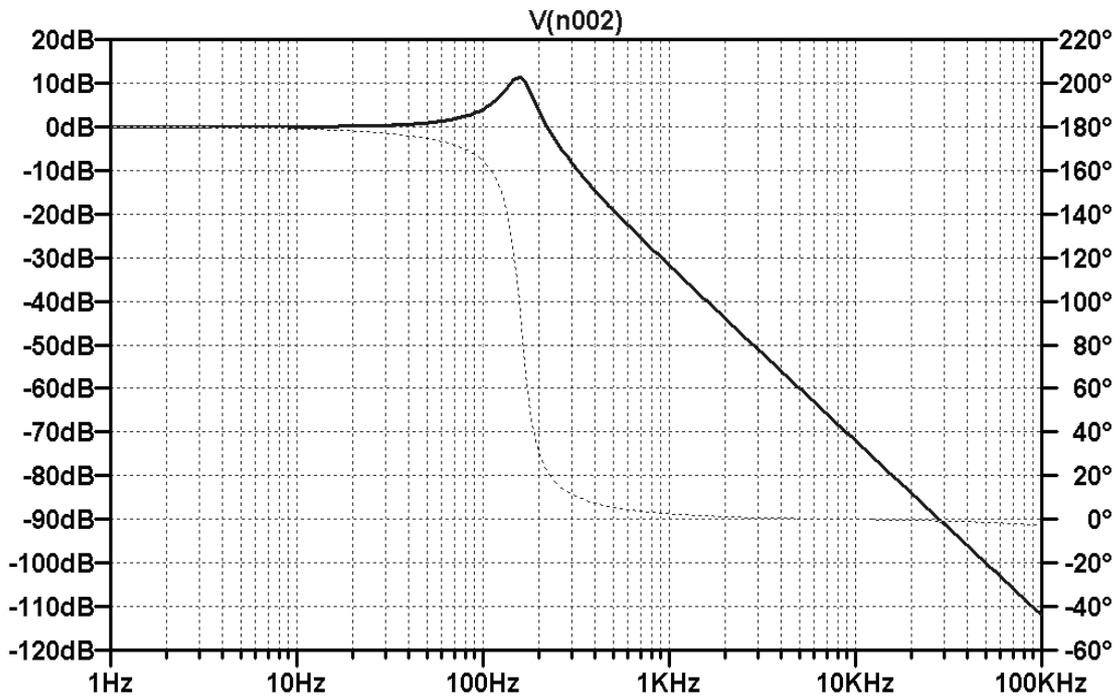
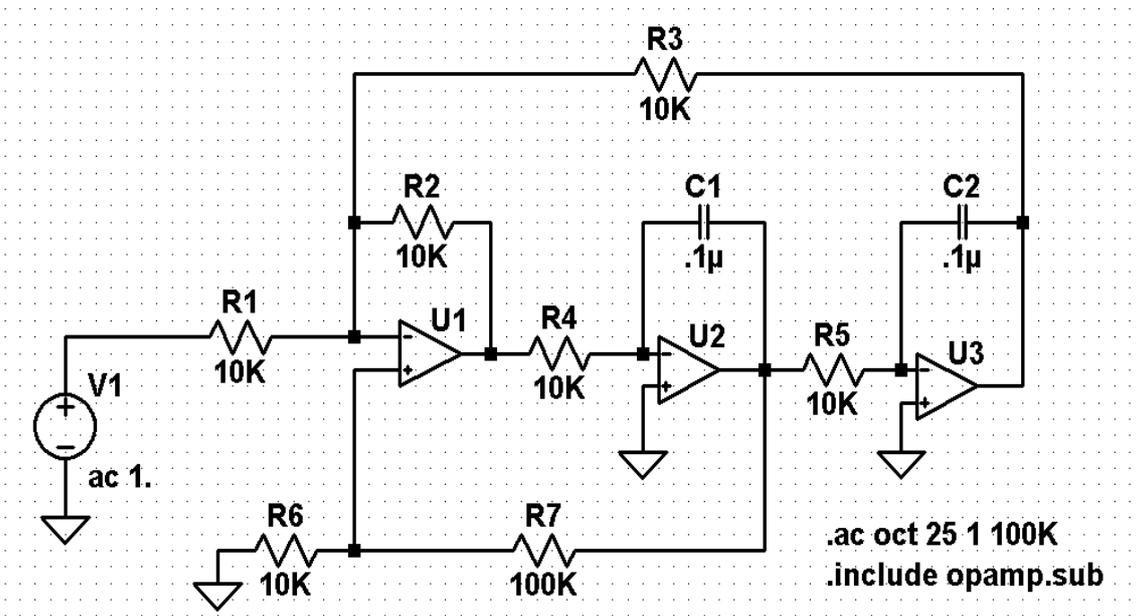
Notch.asc - многовариантный анализ частотных характеристик.



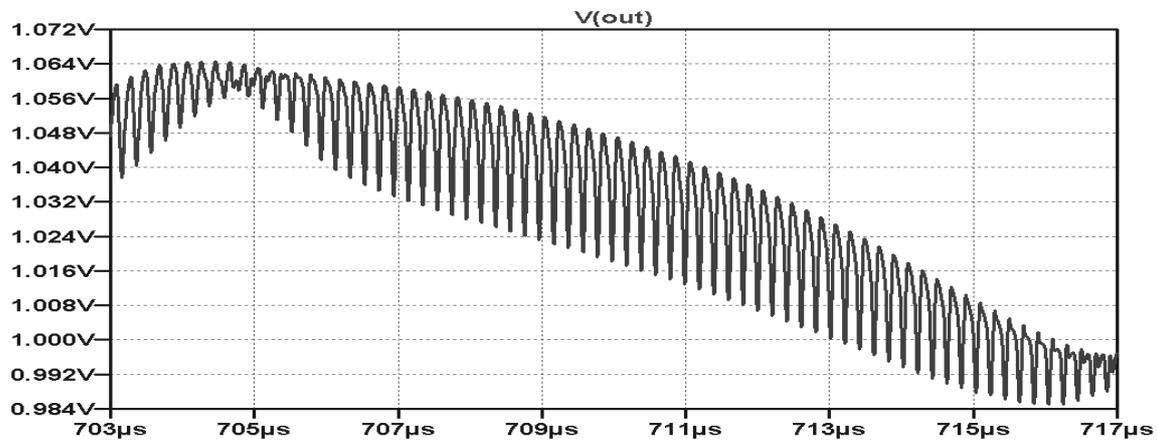
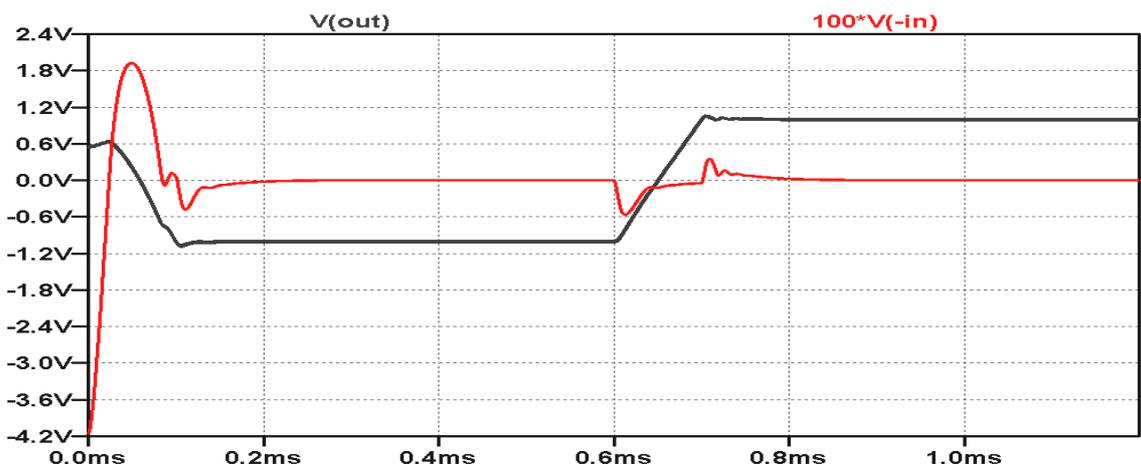
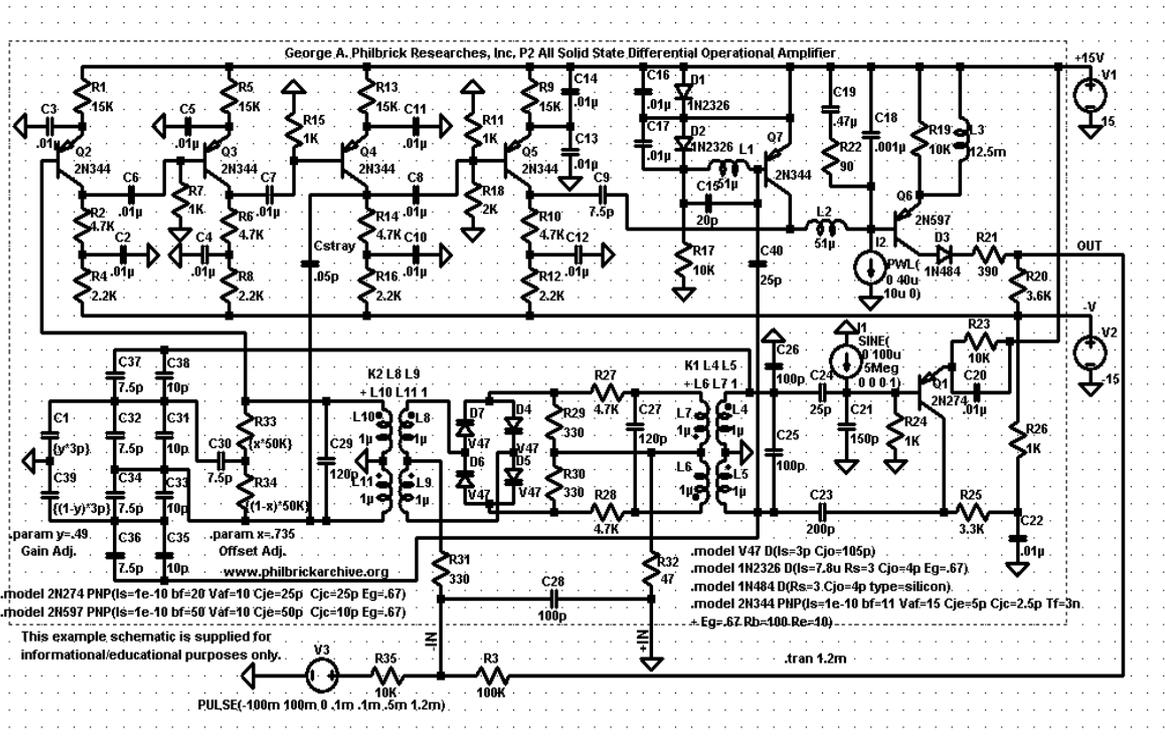
From Horowitz and Hill, The Art of Electronics, 2nd Ed, Cambridge, p. 281



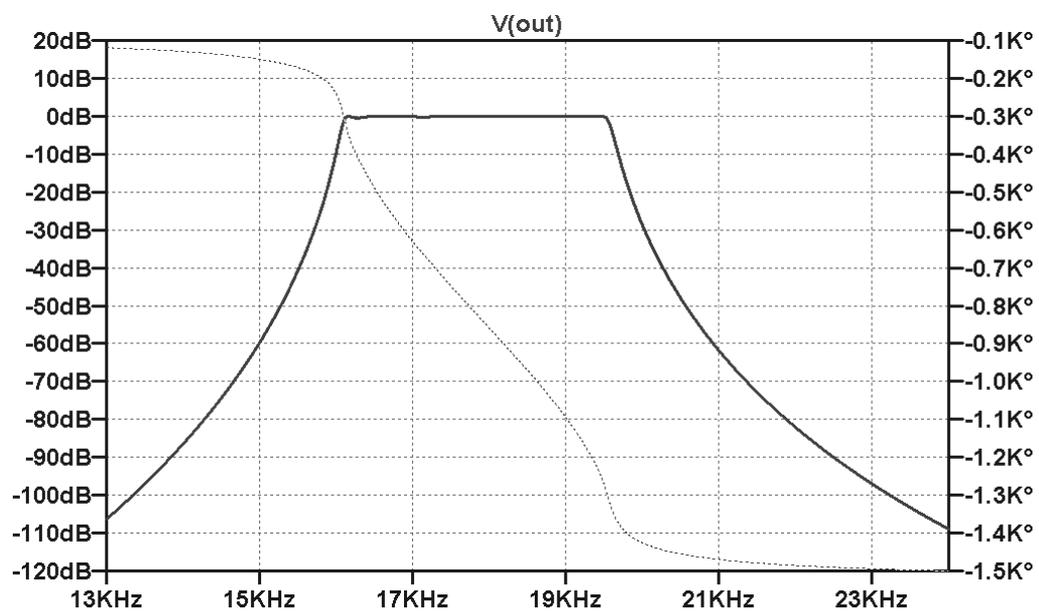
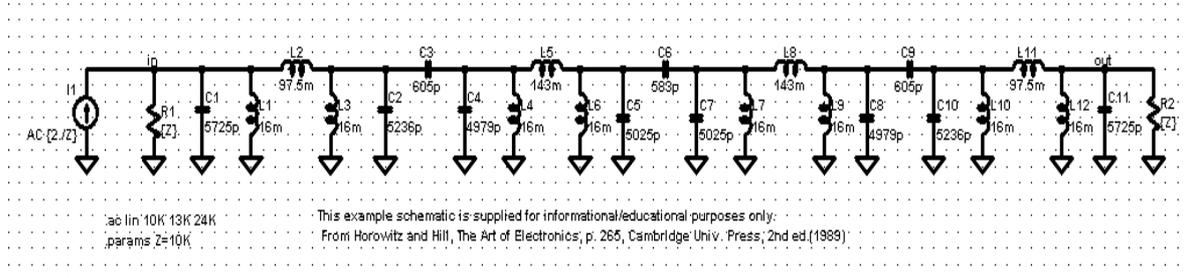
Opamp.asc - частотные характеристики схемы на операционных усилителях



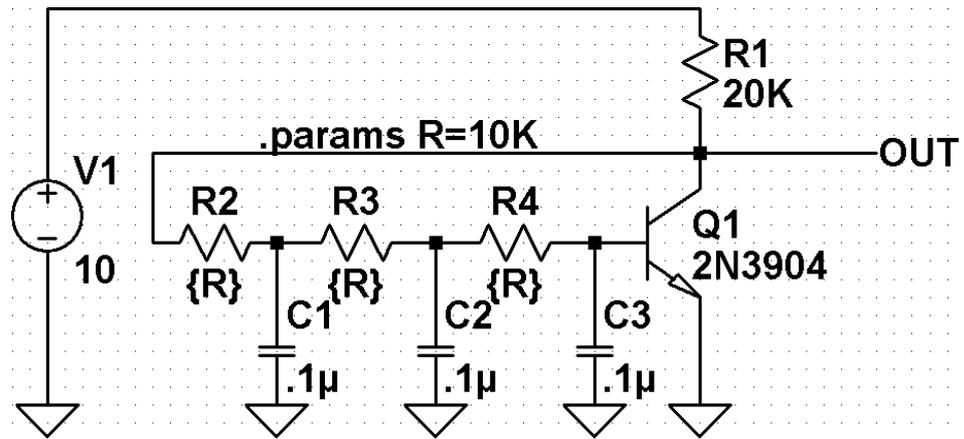
P2.asc - получение осциллограмм работы сложной транзисторной схемы



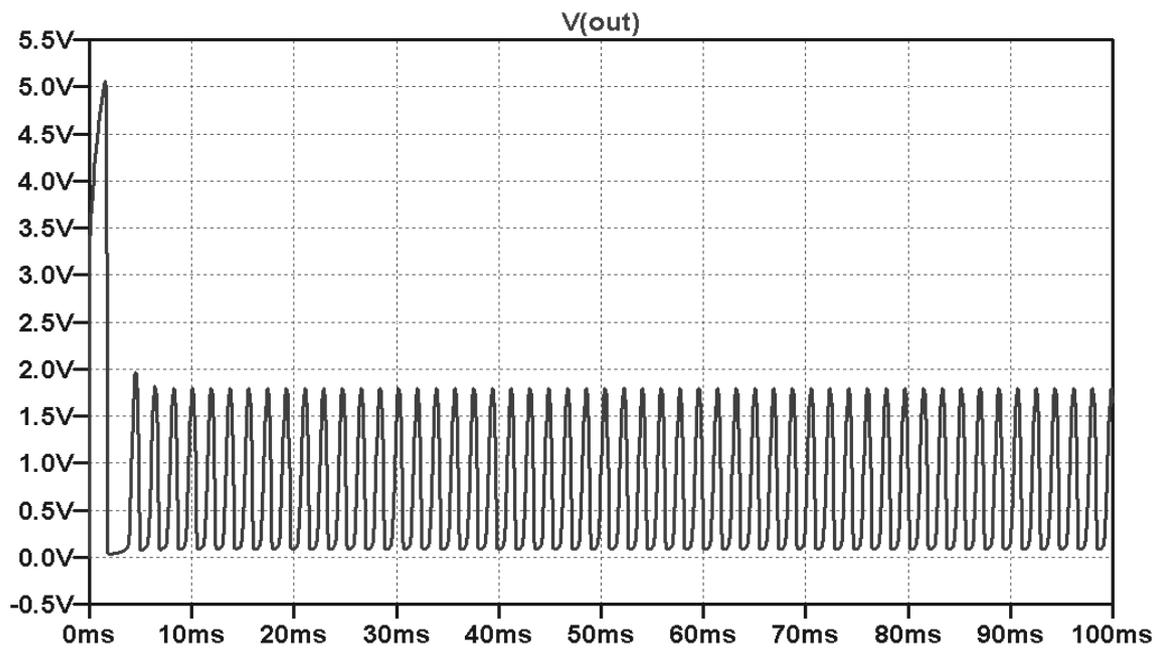
Passive.asc - частотные характеристики пассивного фильтра



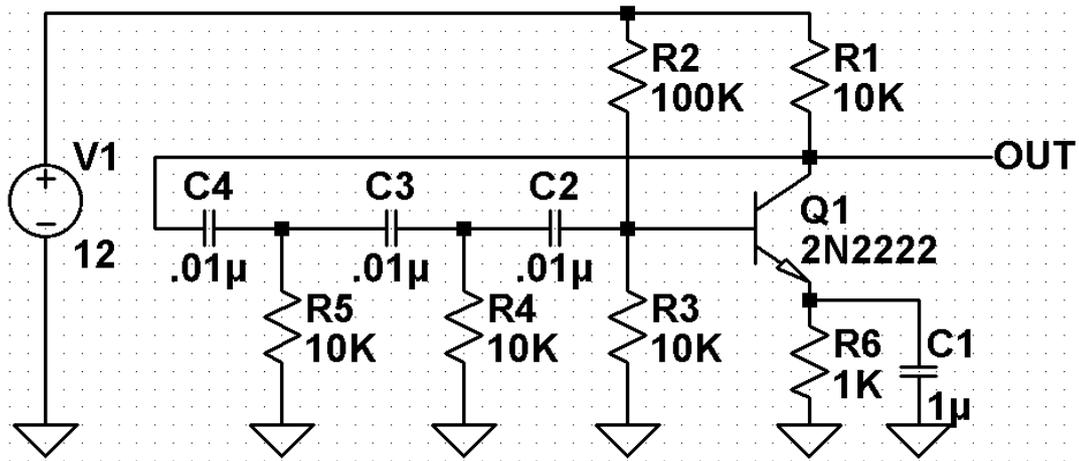
PhaseShift2.asc - транзисторная генераторная схема



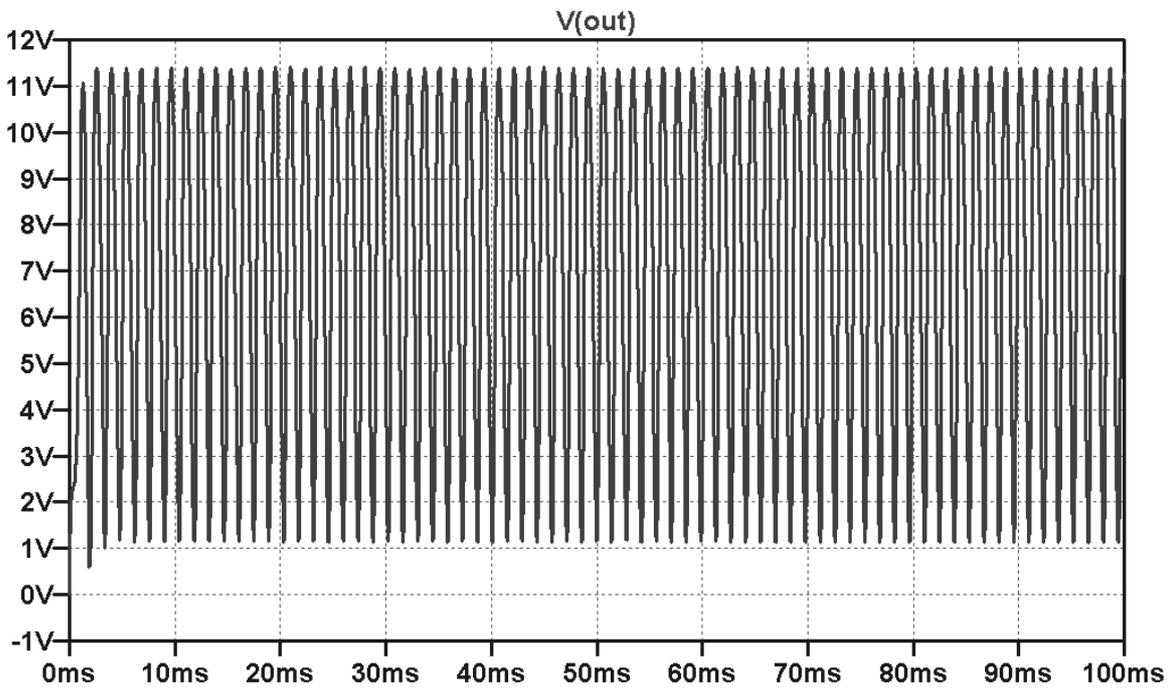
```
.tran 100m startup .options maxstep=.02m
```



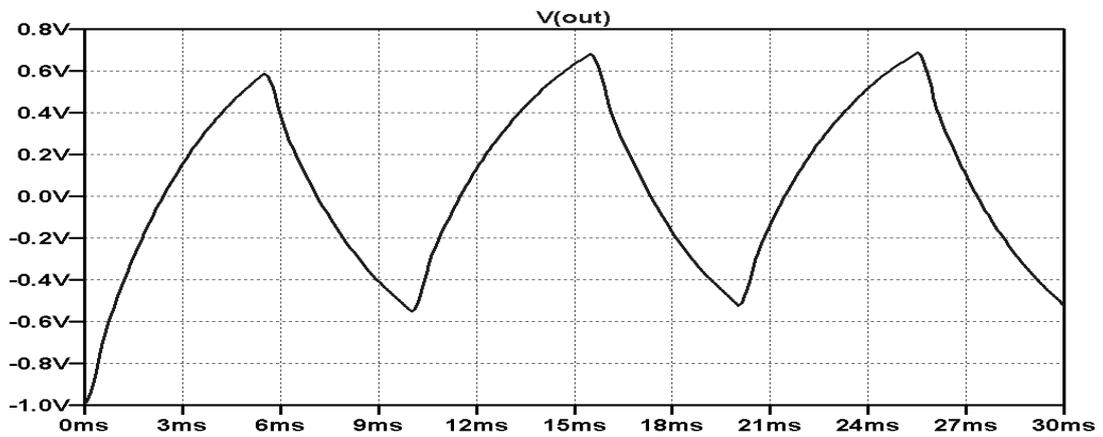
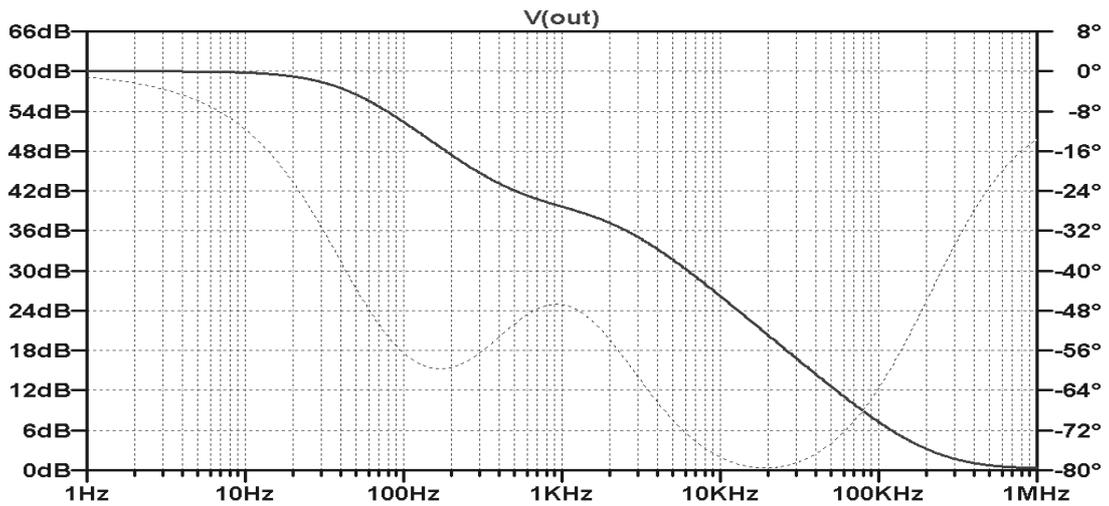
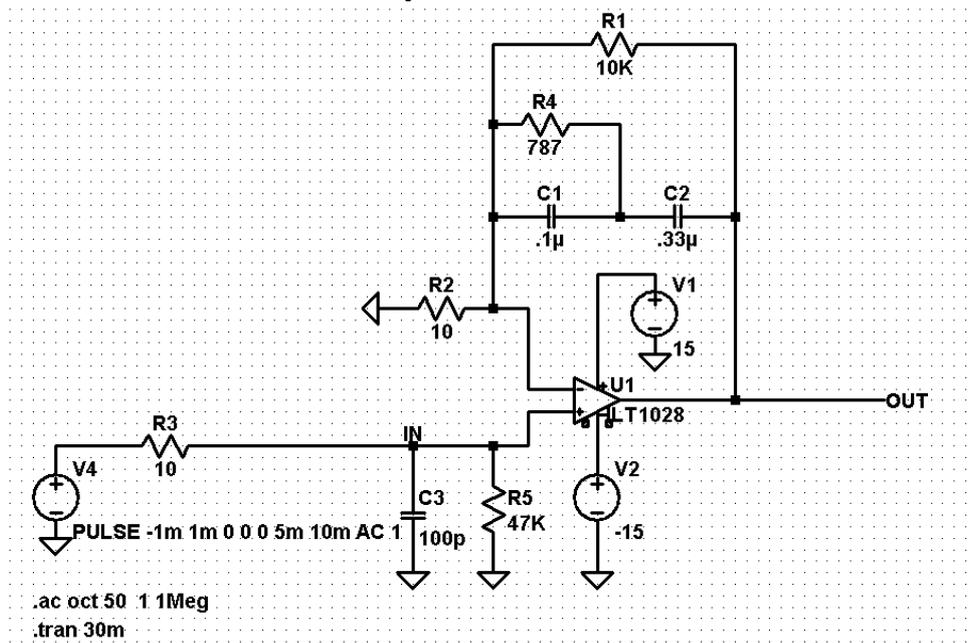
PhaseShift.asc - транзисторная генераторная схема.



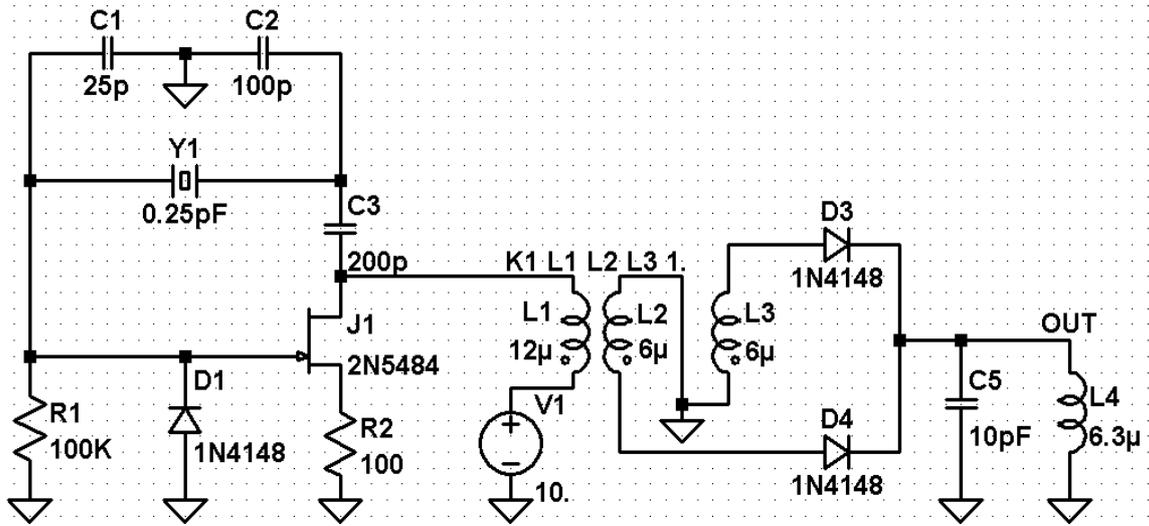
`.tran 100m startup`



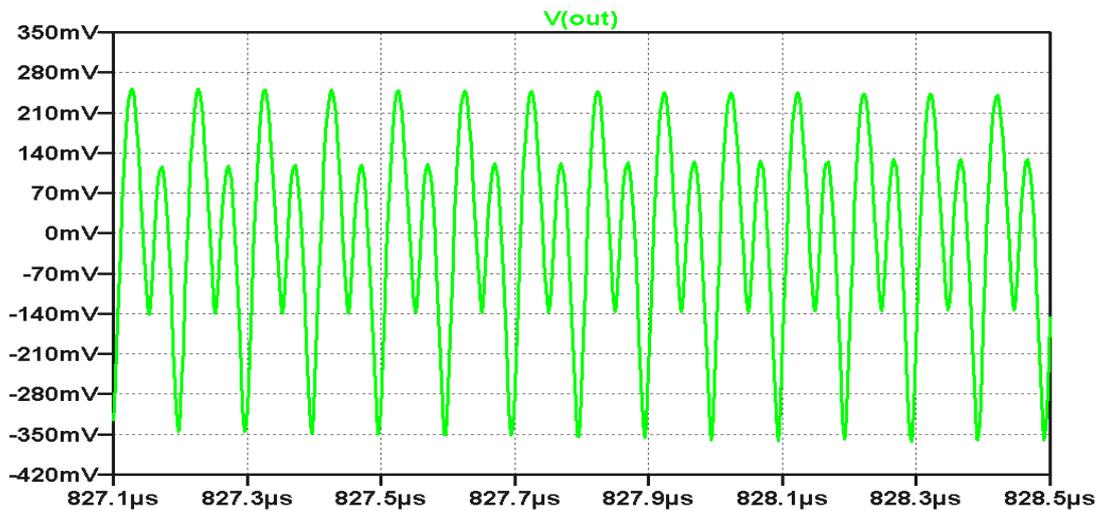
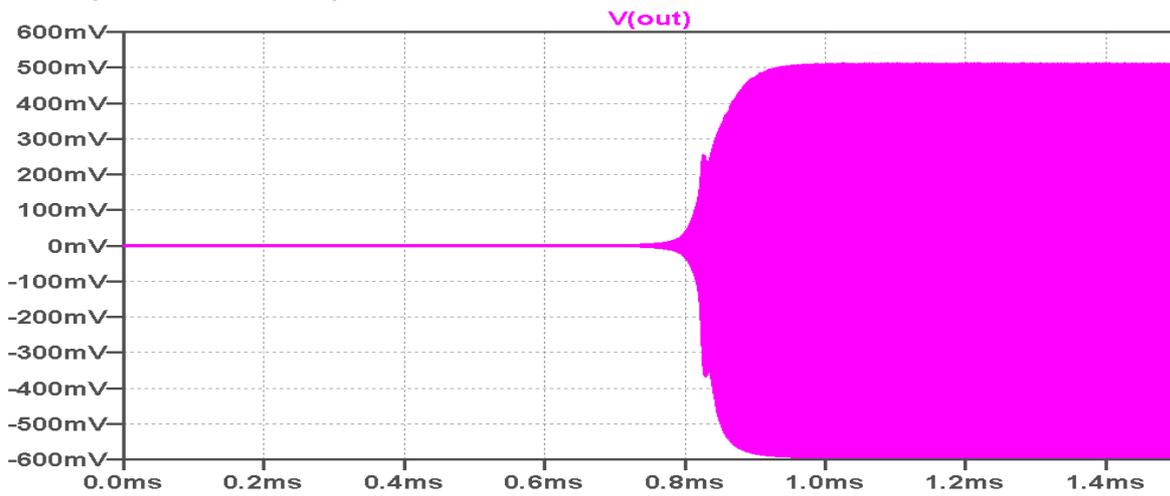
Phono.asc - частотный и временной анализ схемы на операционном усилителе



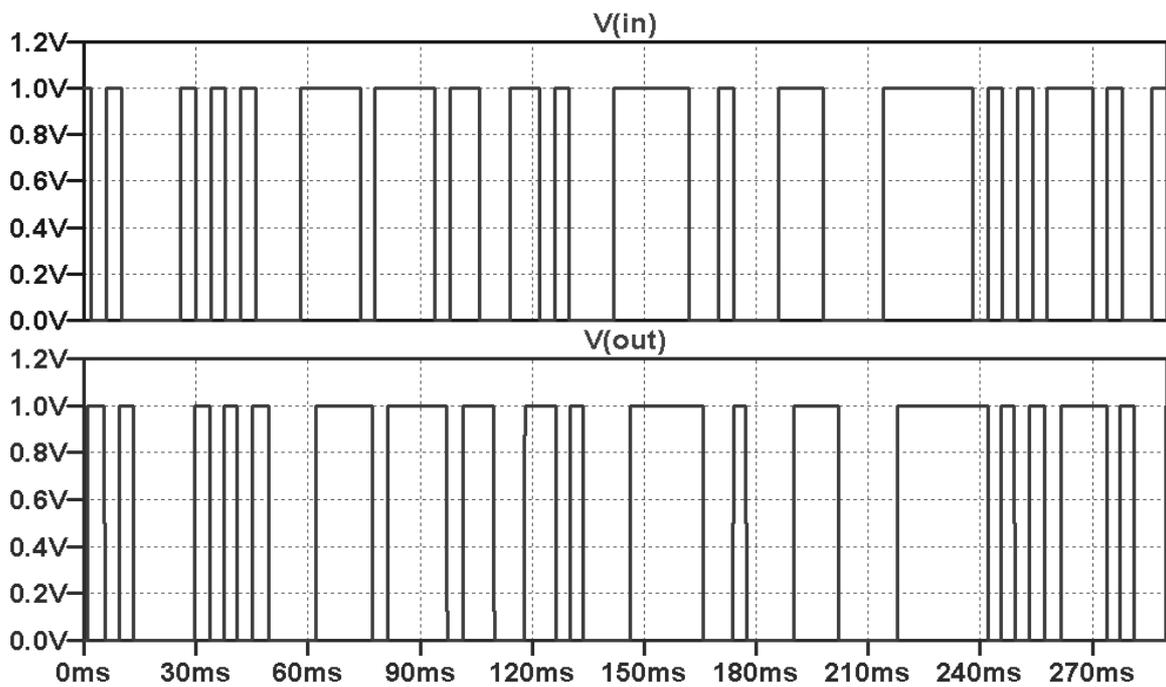
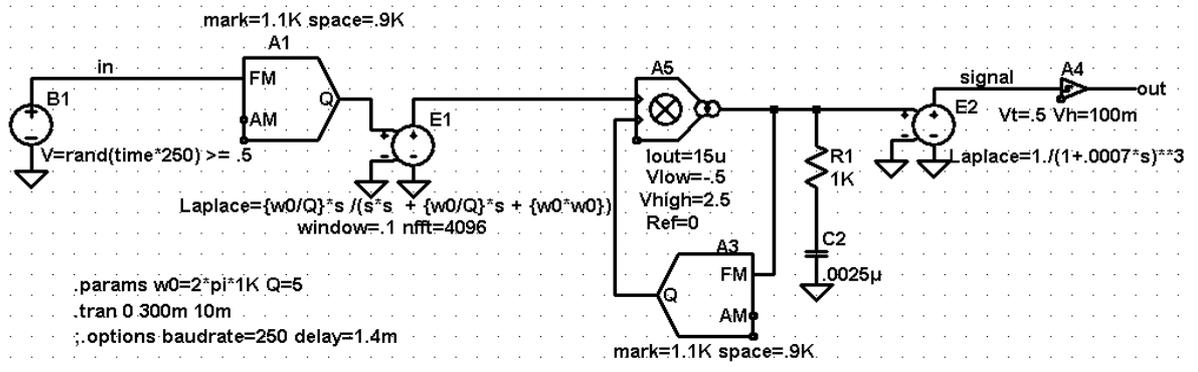
Pierce.asc - транзисторный генератор переменного сигнала



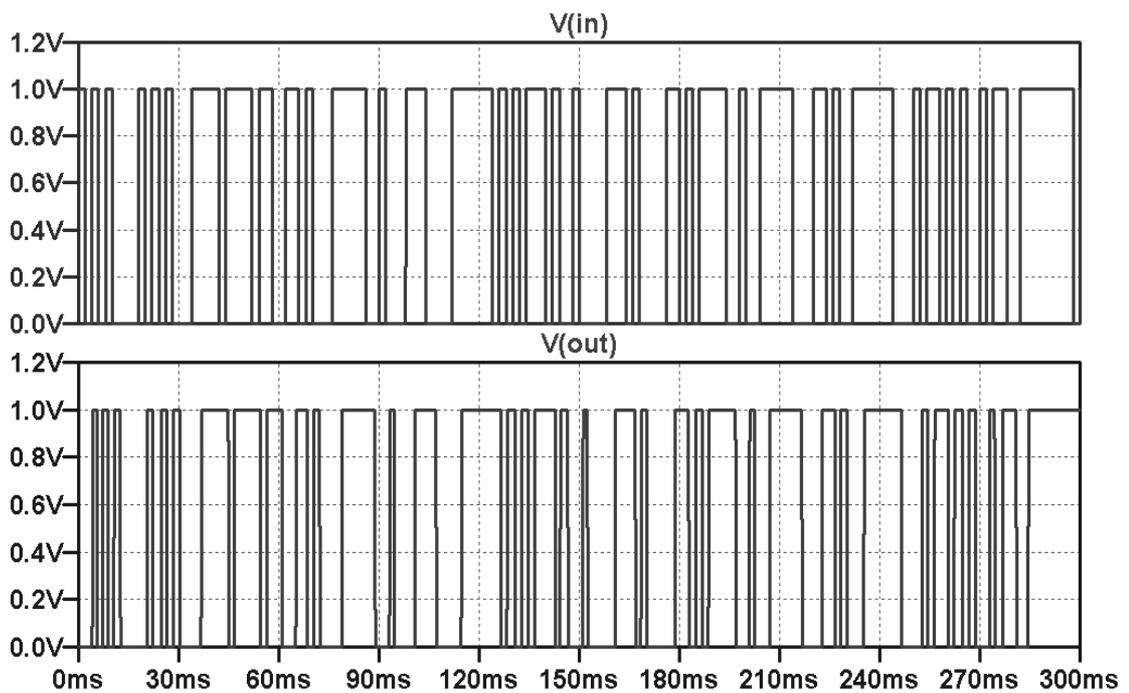
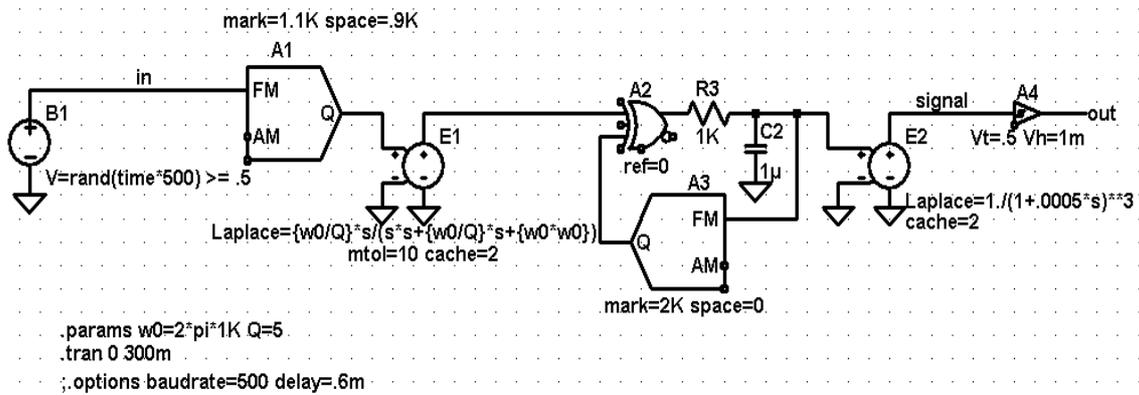
```
.tran 1.5m startup
.options method=trap
```



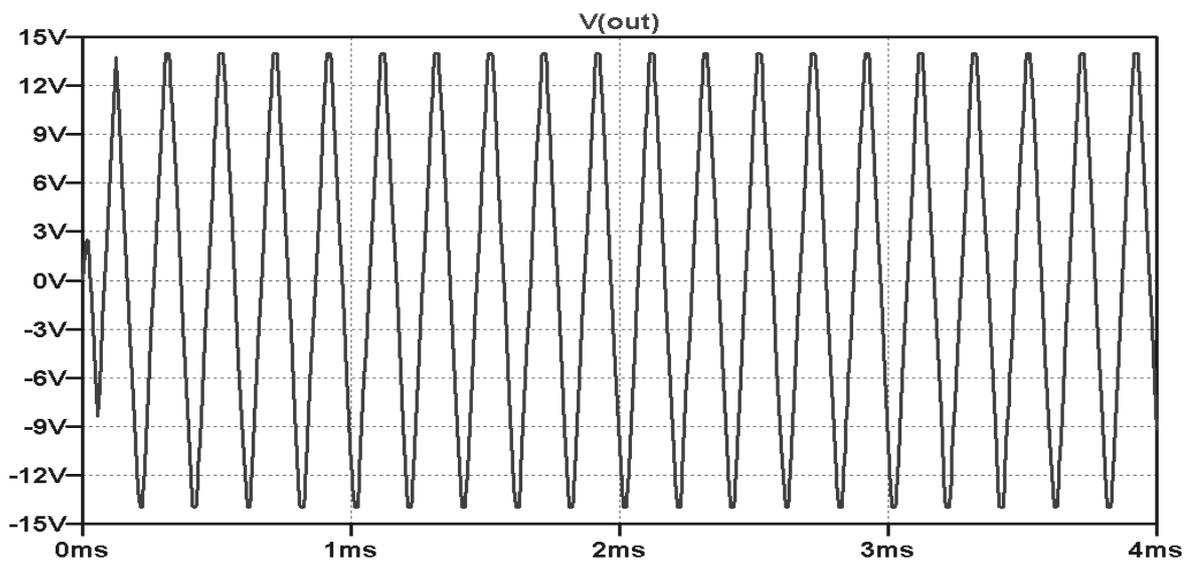
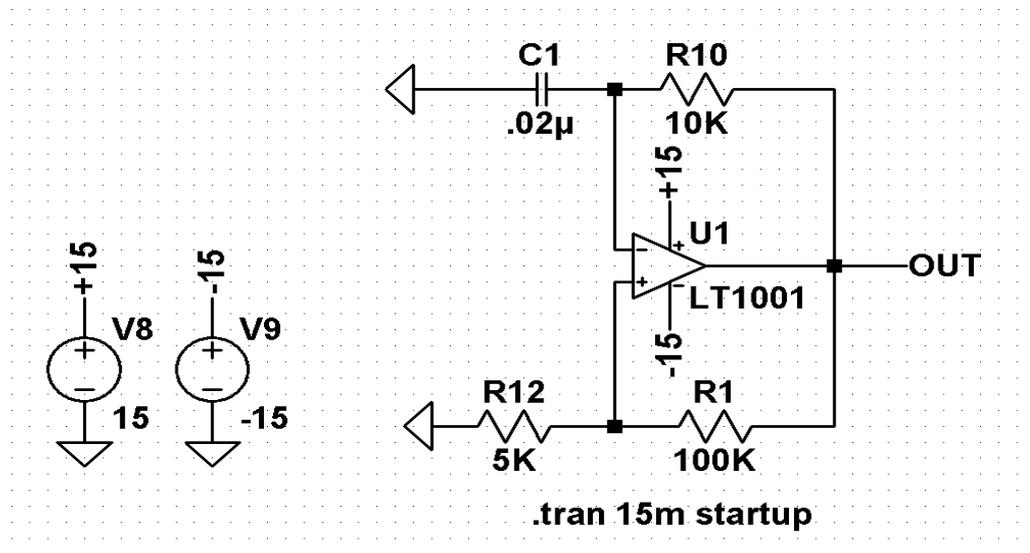
PLL2.asc - применение функциональных звеньев и звеньев, представленных преобразованиями Лапласа



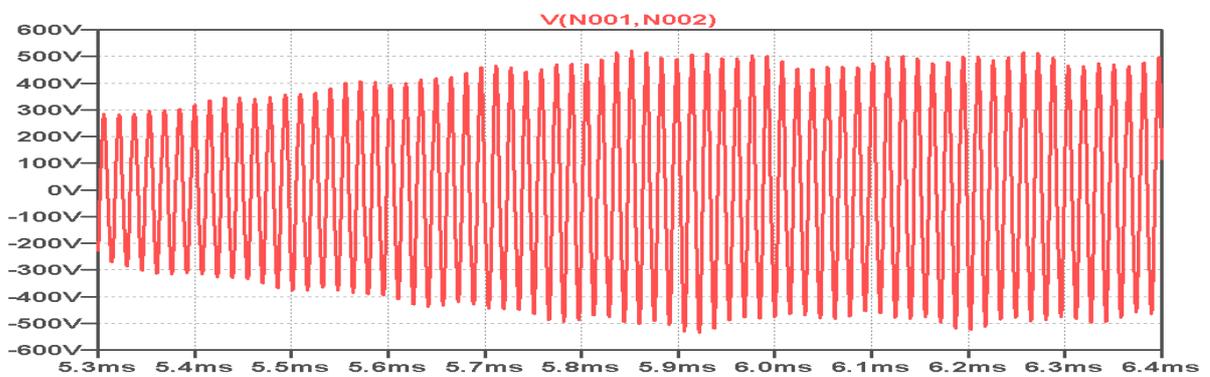
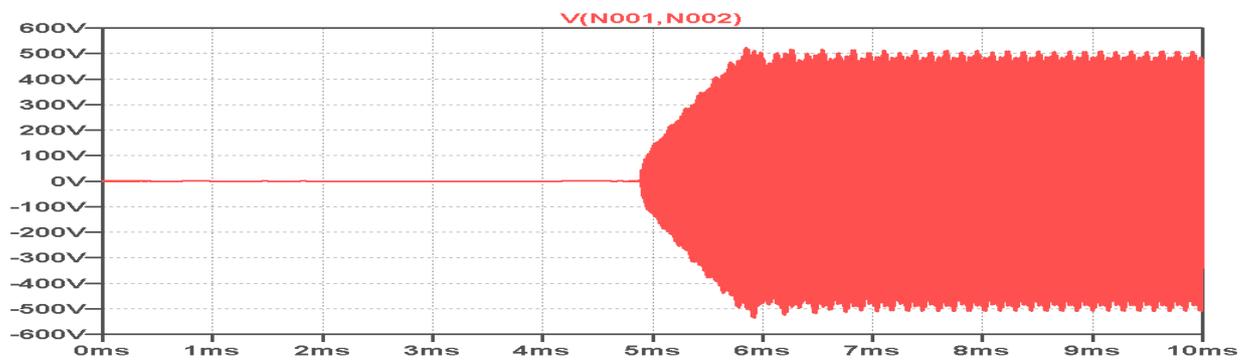
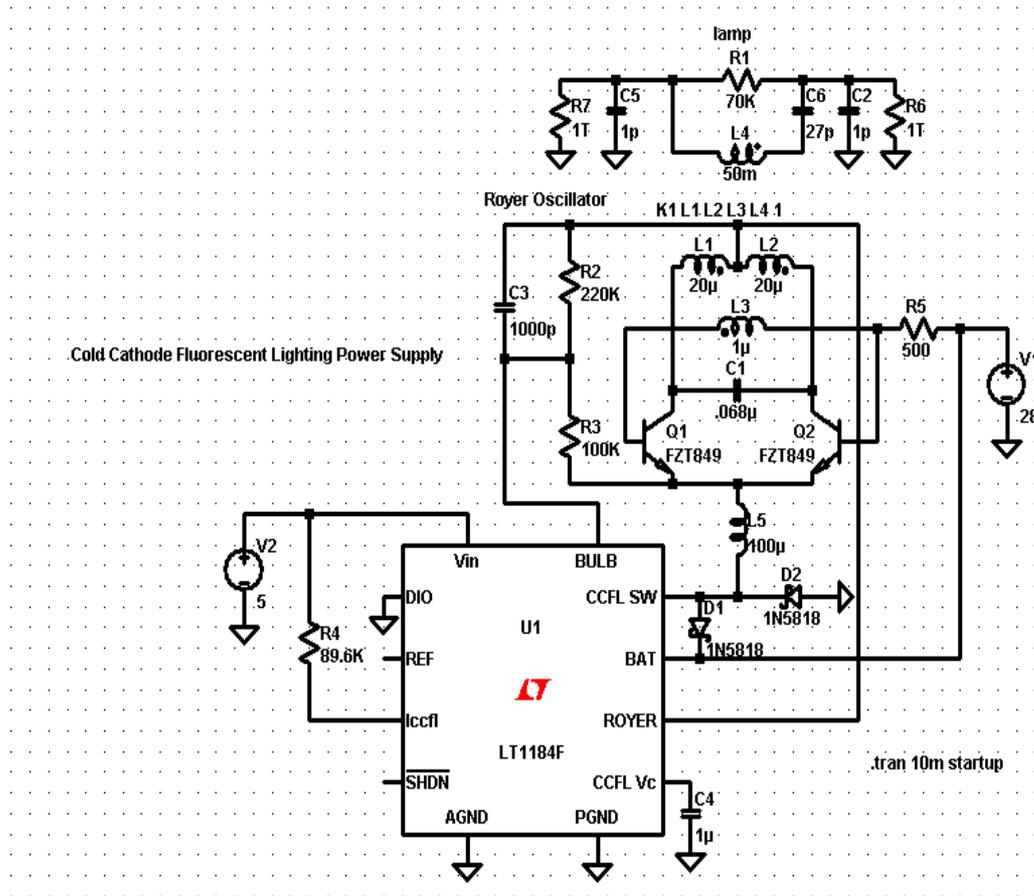
PLL.asc - применение функциональных звеньев и звеньев, представленных преобразованиями Лапласа



Relax.asc - генератор пилообразного сигнала на операционном усилителе

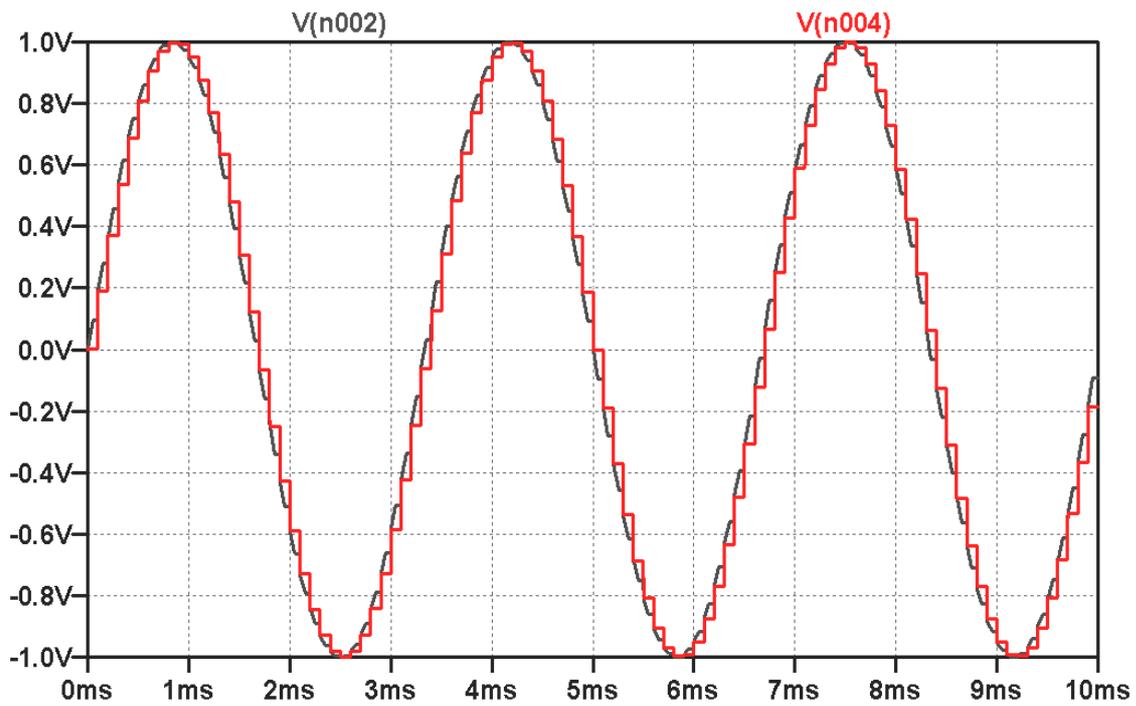
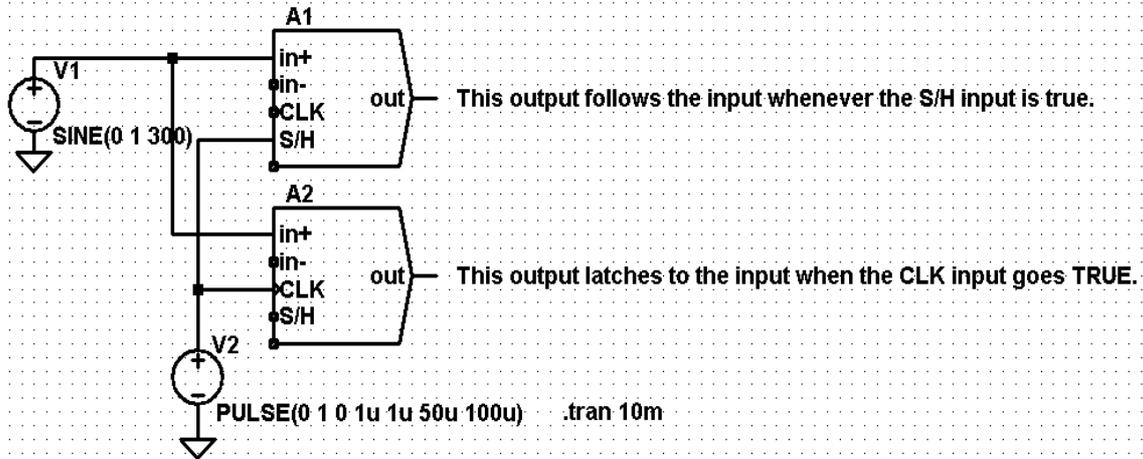


Royer.asc - генератор сигнала

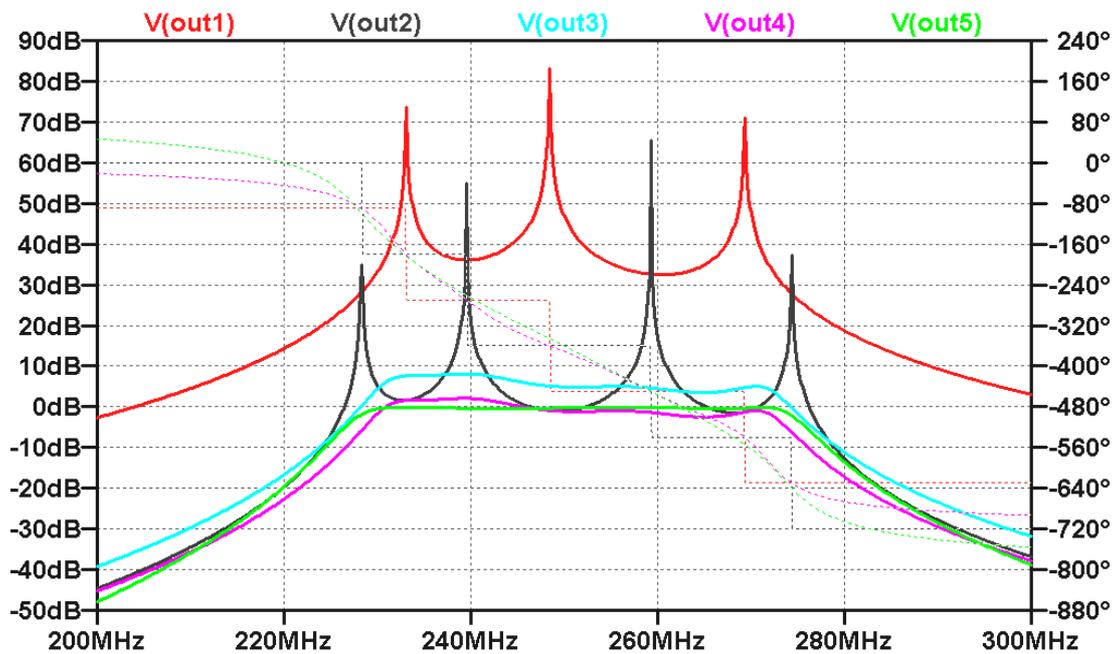
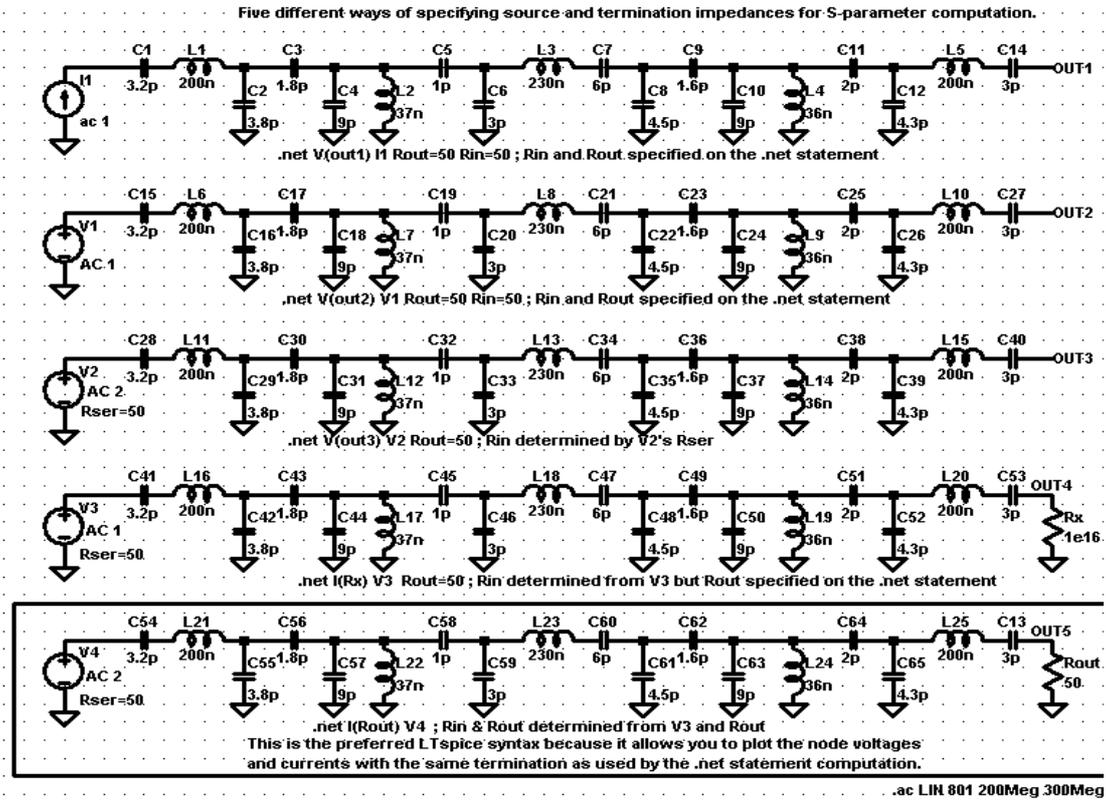


SampleAndHold.asc - функциональная модель квантователя

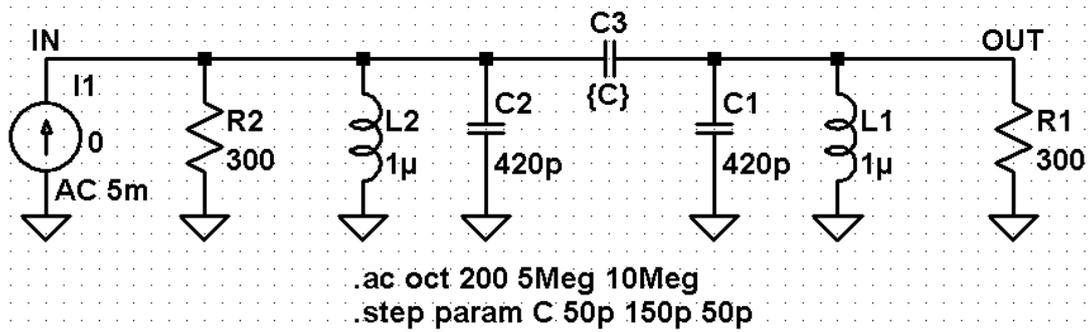
The behavioral Sample and Hold has two modes of operation.



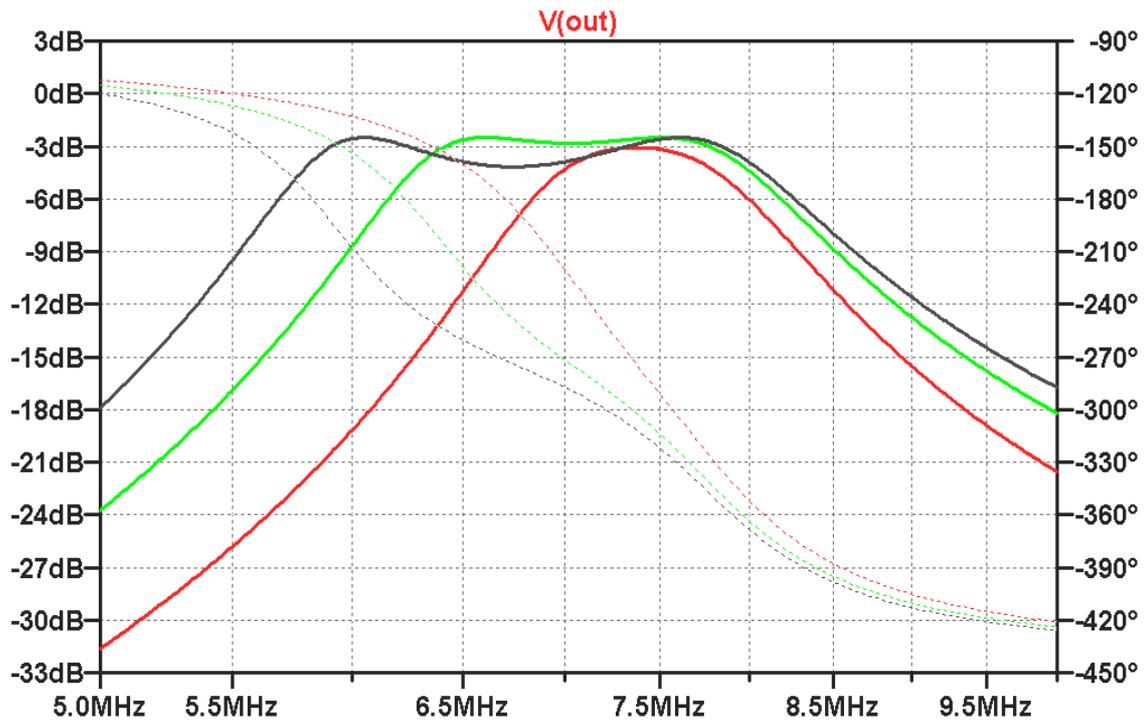
S-param.asc - многовариантный анализ частотных характеристик пассивного фильтра



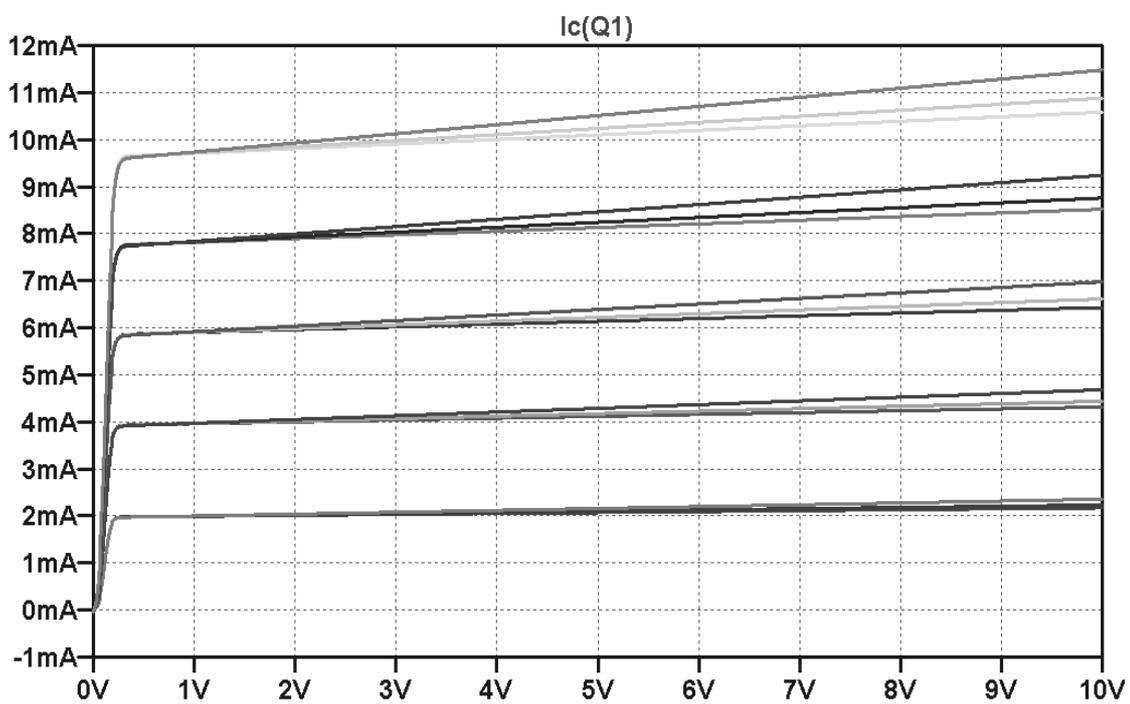
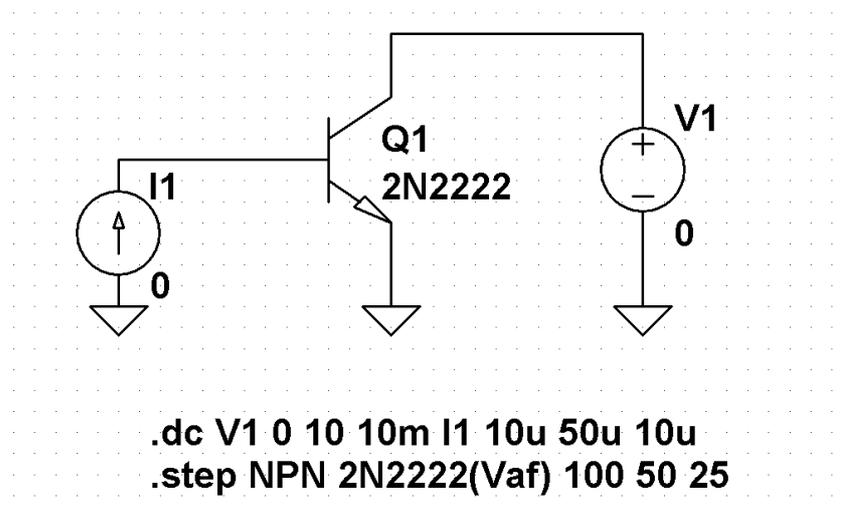
StepAC.asc - многовариантный частотный анализ с пошаговым изменением одного параметра схемы



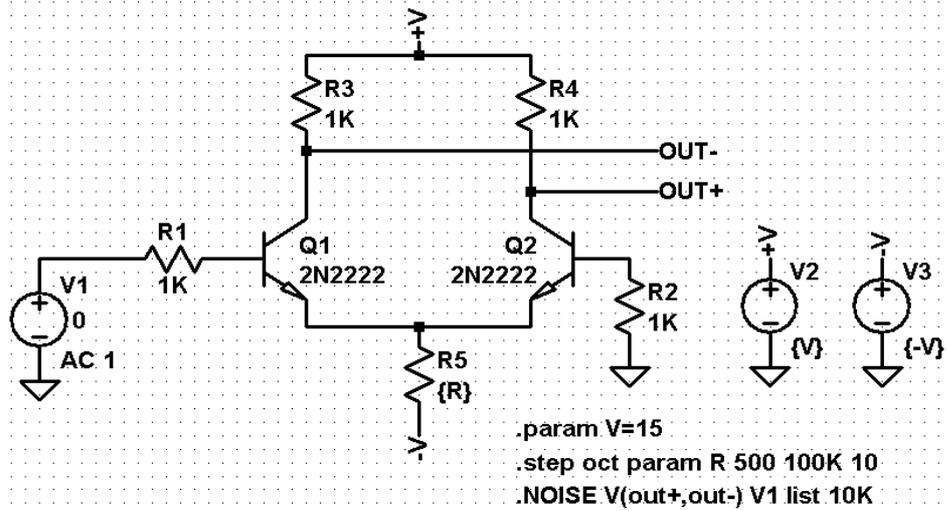
This example demonstrates .stepping a global parameter, C, while computing the transfer function of the filter.



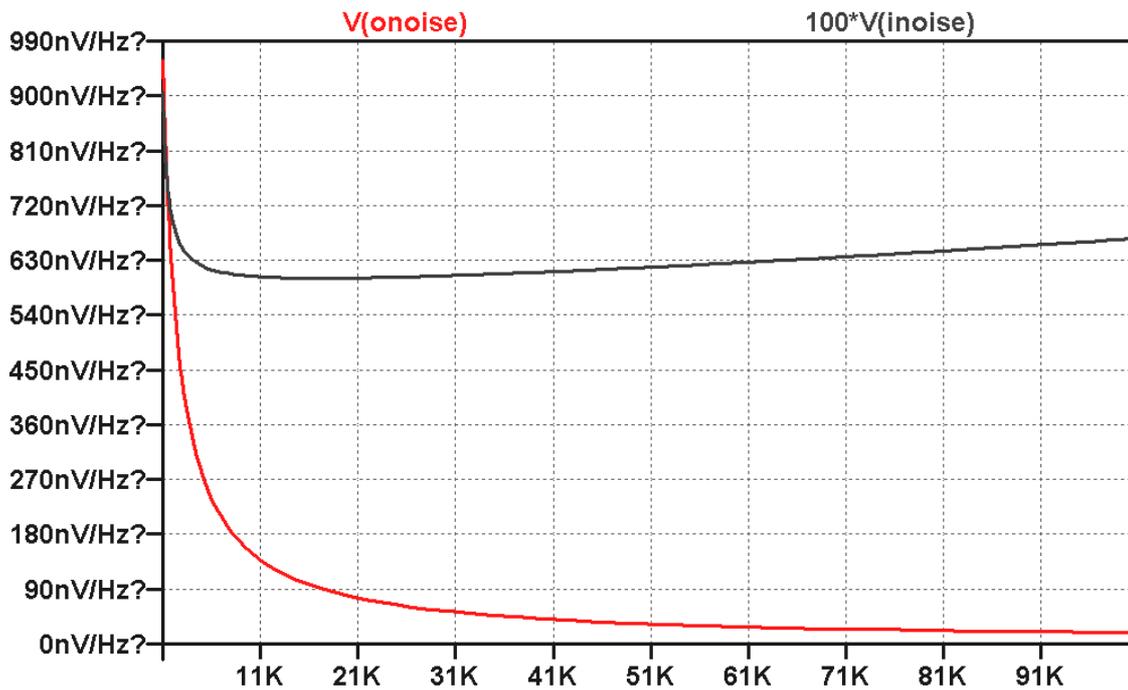
StepModelParam.asc - статические характеристики транзистора с применением пошагового изменения параметра



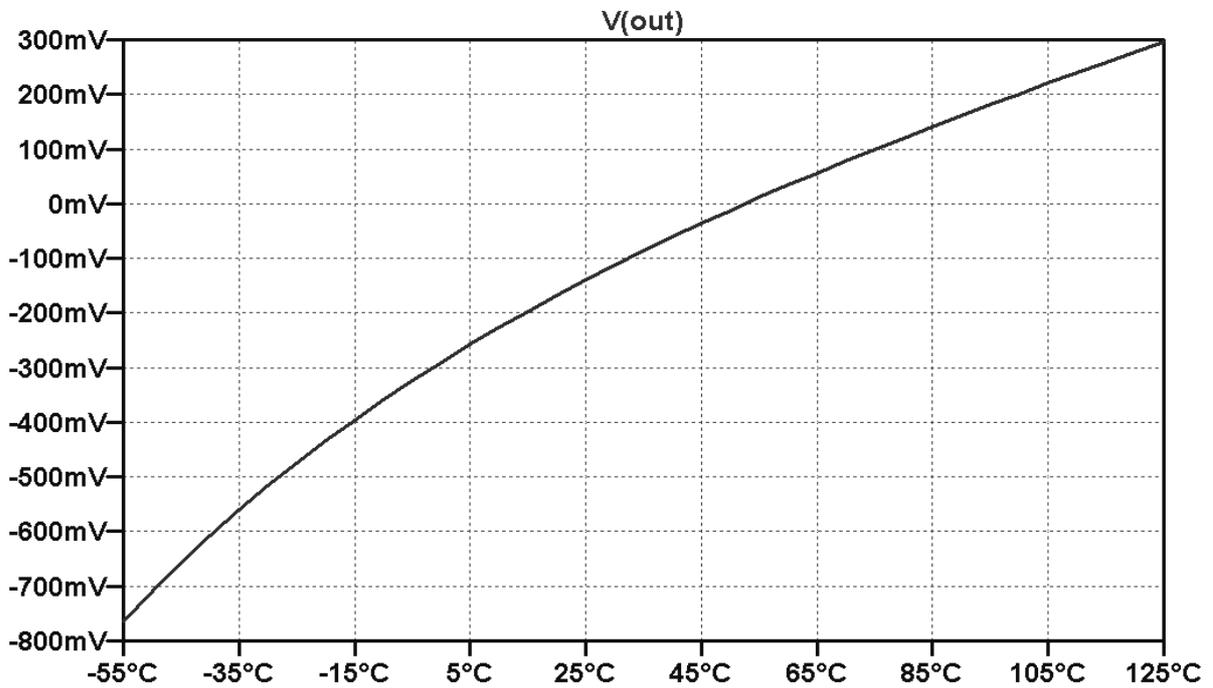
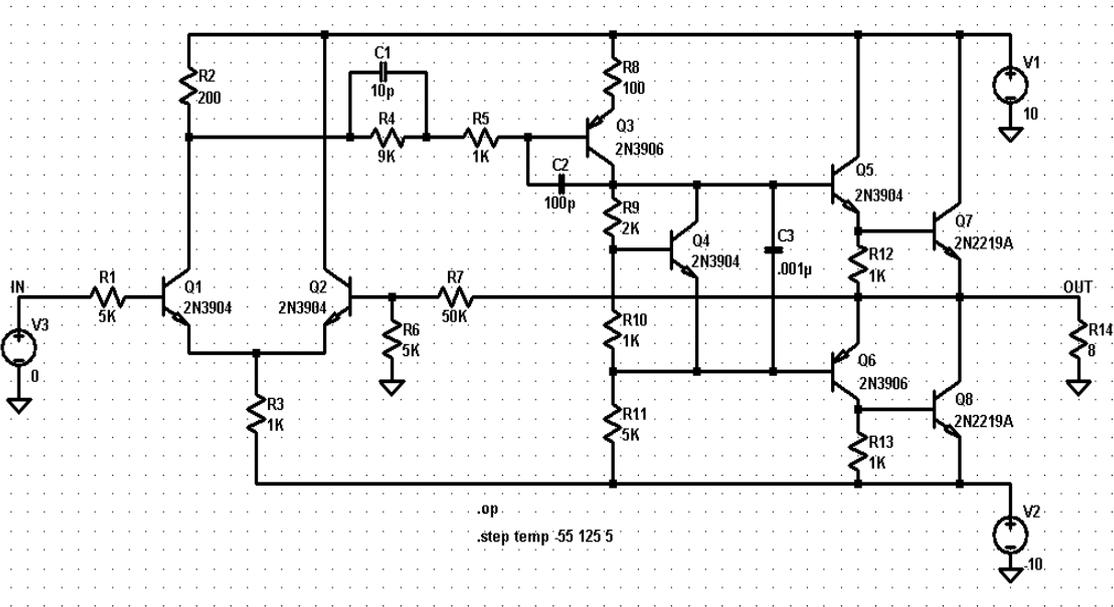
StepNoise.asc - анализ шума при пошаговом изменении параметра



This example demonstrates stepping a global parameter, R, while computing the noise at a single frequency. The resultant plot of V(noise_density) vs. R shows a minimum noise with a tail resistance around 16kOhms.

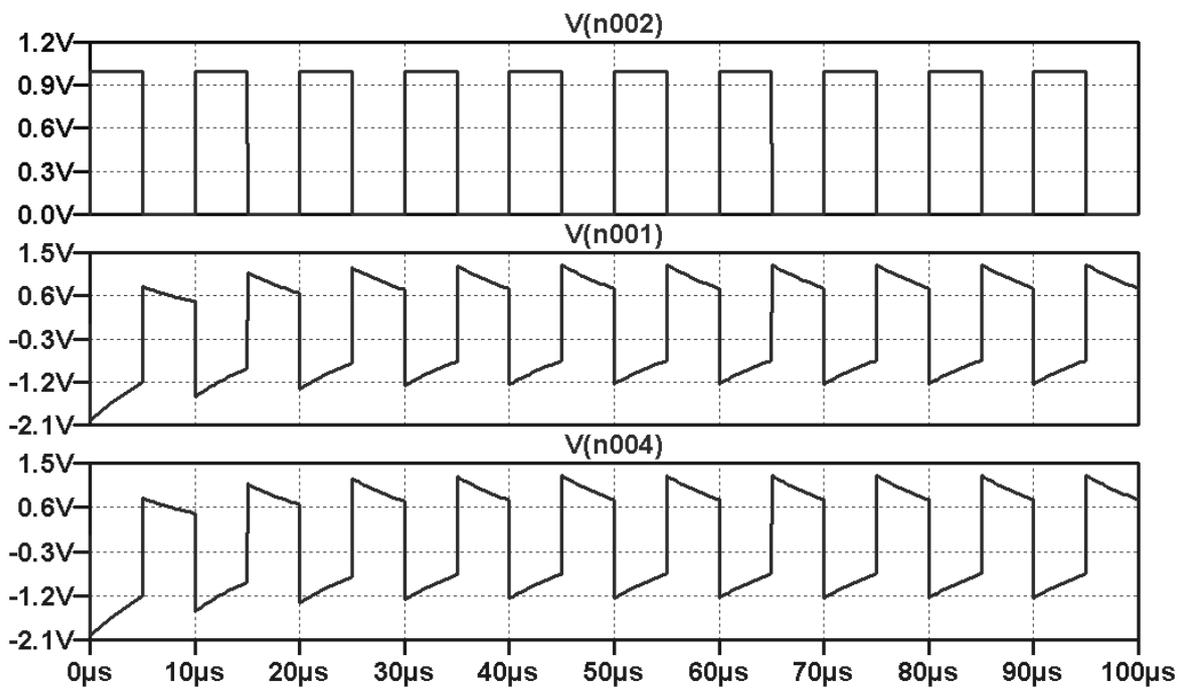
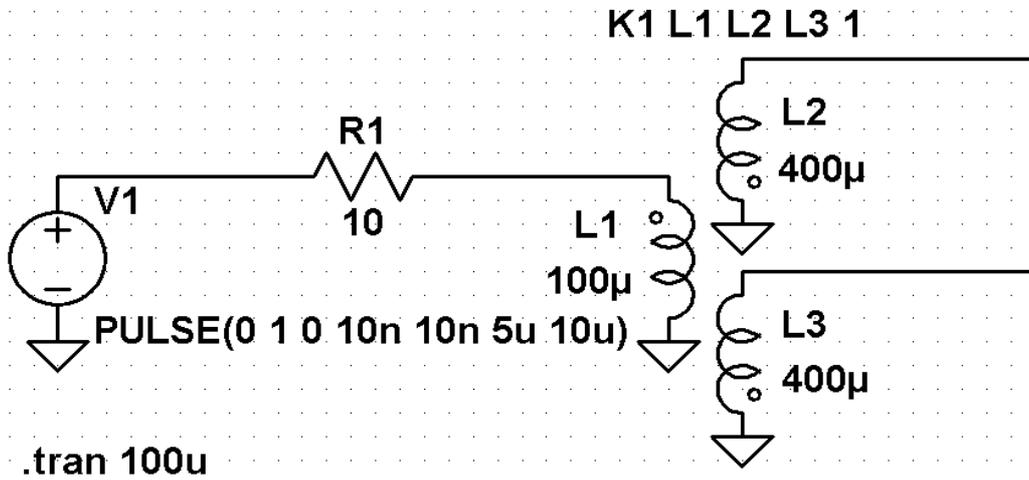


StepTemp.asc - анализ рабочей точки усилительной схемы при пошаговом изменении температуры



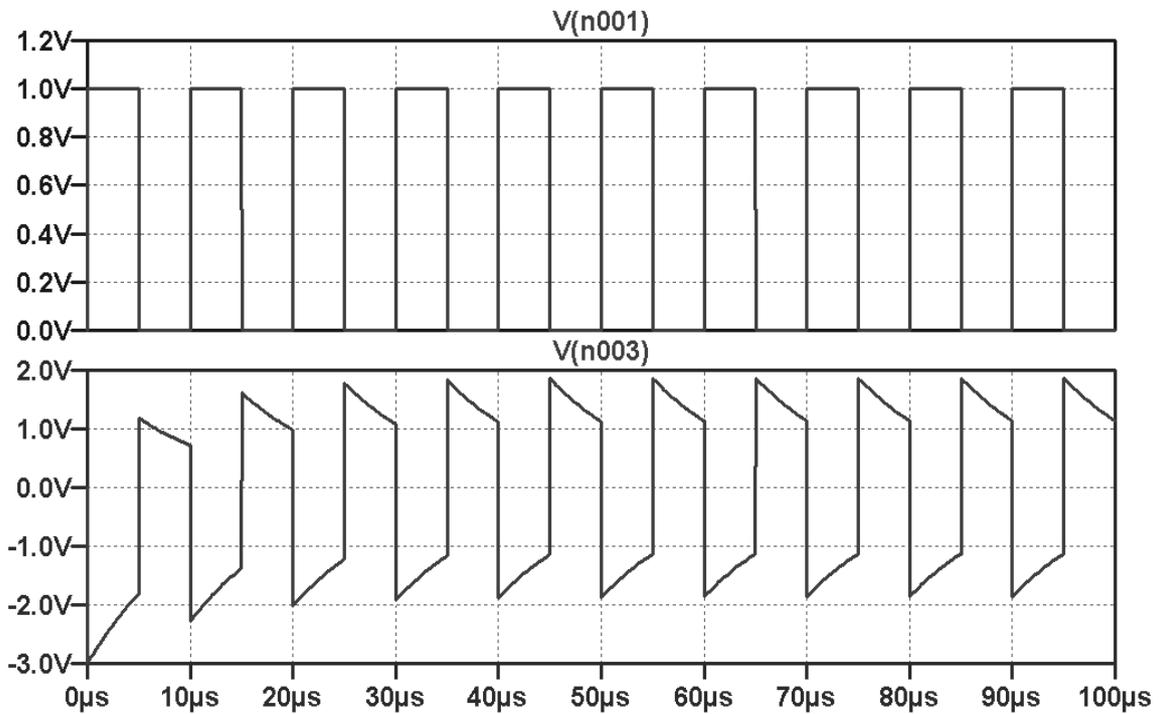
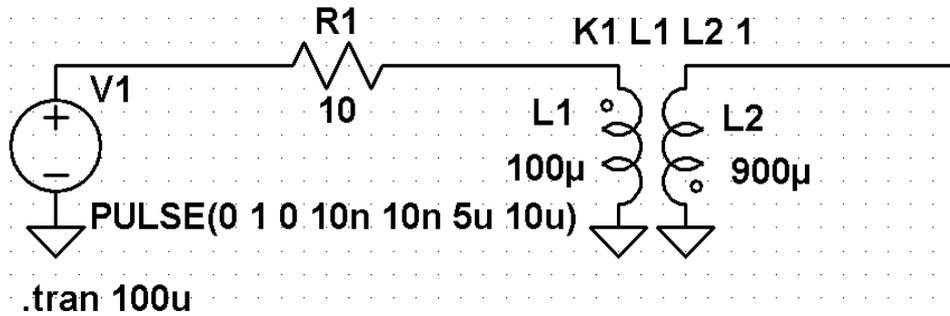
**Transformer2.asc - анализ переходных процессов в схеме с
взаимными индуктивностями**

A transformer with three windings



Transformer.asc - схема с трансформатором

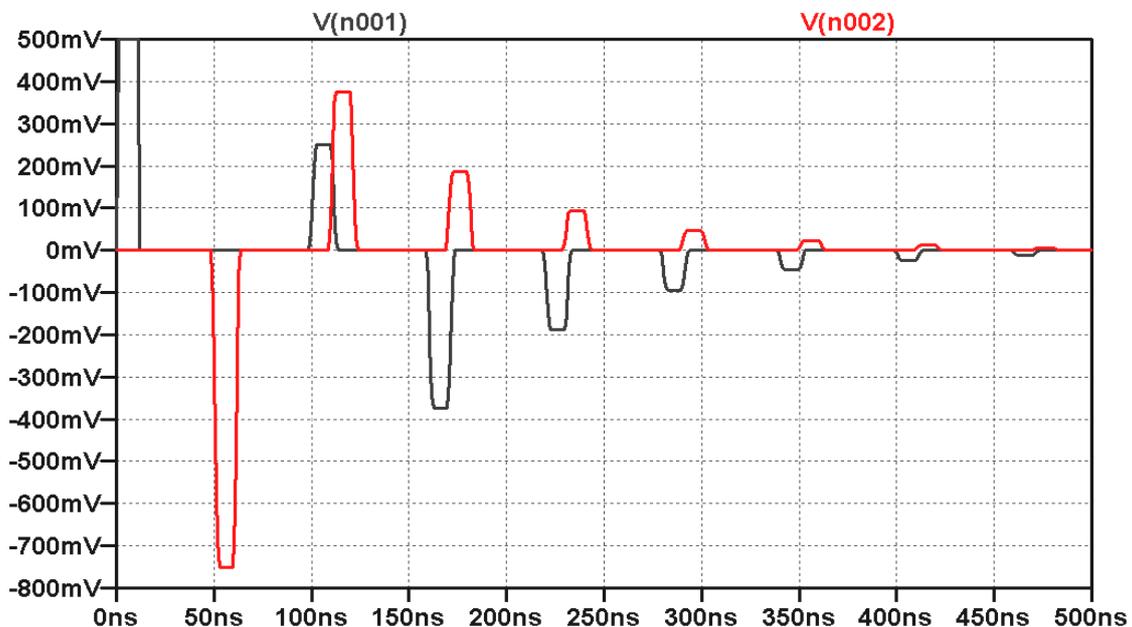
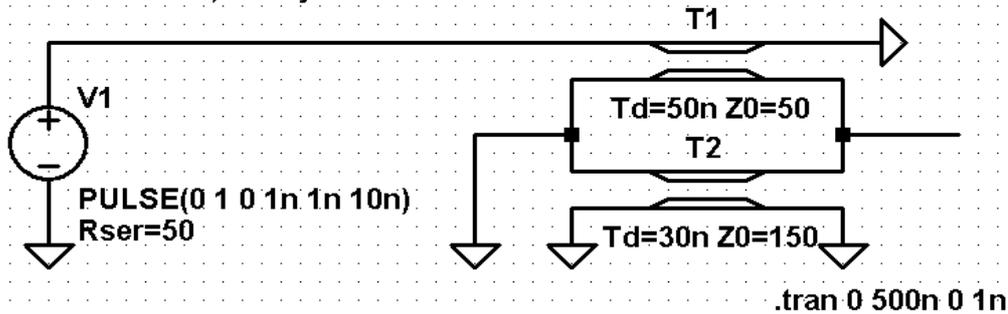
A transformer with two windings, 1 to 3 turns winding ratio



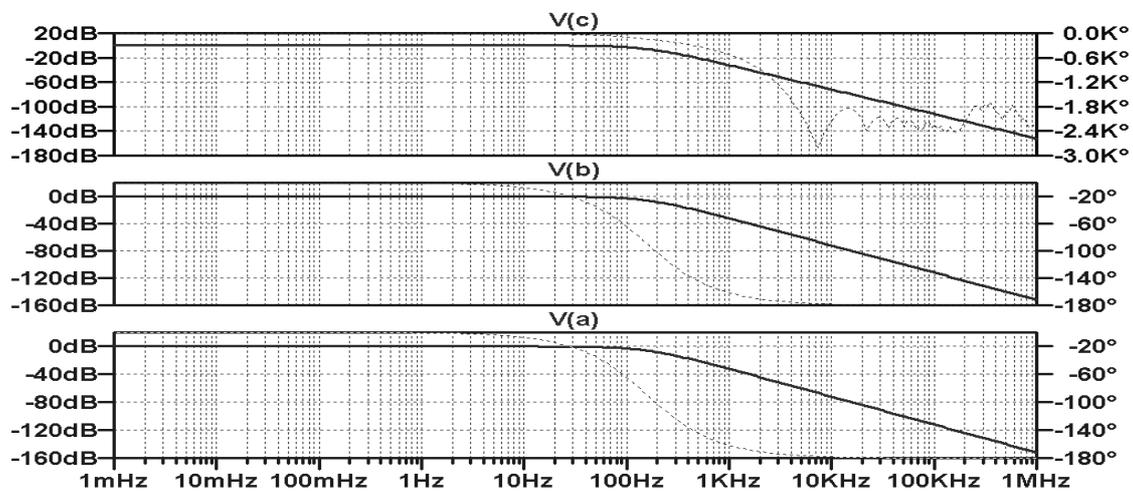
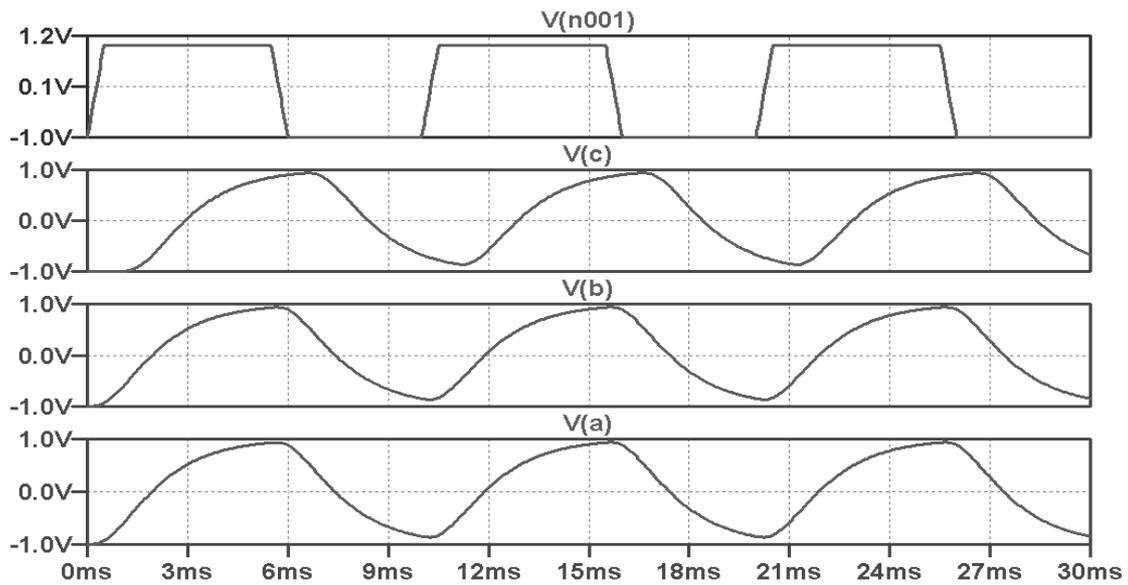
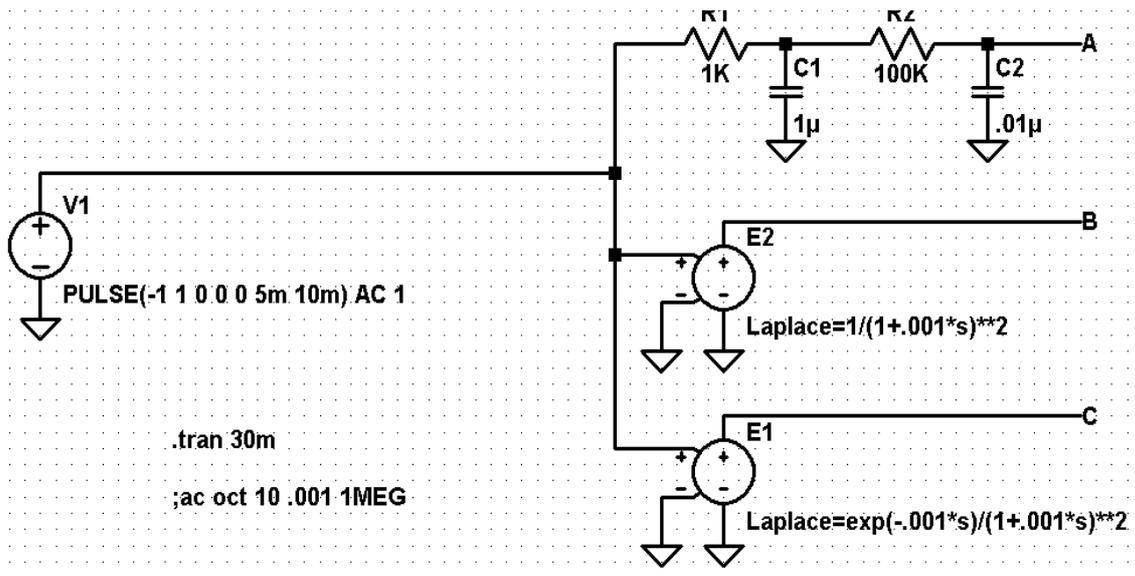
TransmissionLineInverter.asc - модель длинной линии

This examples illustrates the fundamental difference between a SPICE transmission line element and a length of coax. The SPICE transmission line element supports a single transmission line mode whereas a cable will have any many modes as it has independent conductors. A piece of coax has two conductors, a central conductor and an outer shield, giving rise to two modes.

To model both modes of a length of coax, you will need two SPICE transmission line elements. One for the normal(differential) mode and the other for the common mode. Below, T1 is the normal mode and T2 is the mode between the shield and the rest of the world. These modes will have different propagation speeds and impedances. If both modes are modeled, then you can simulate a transmission line inverter.

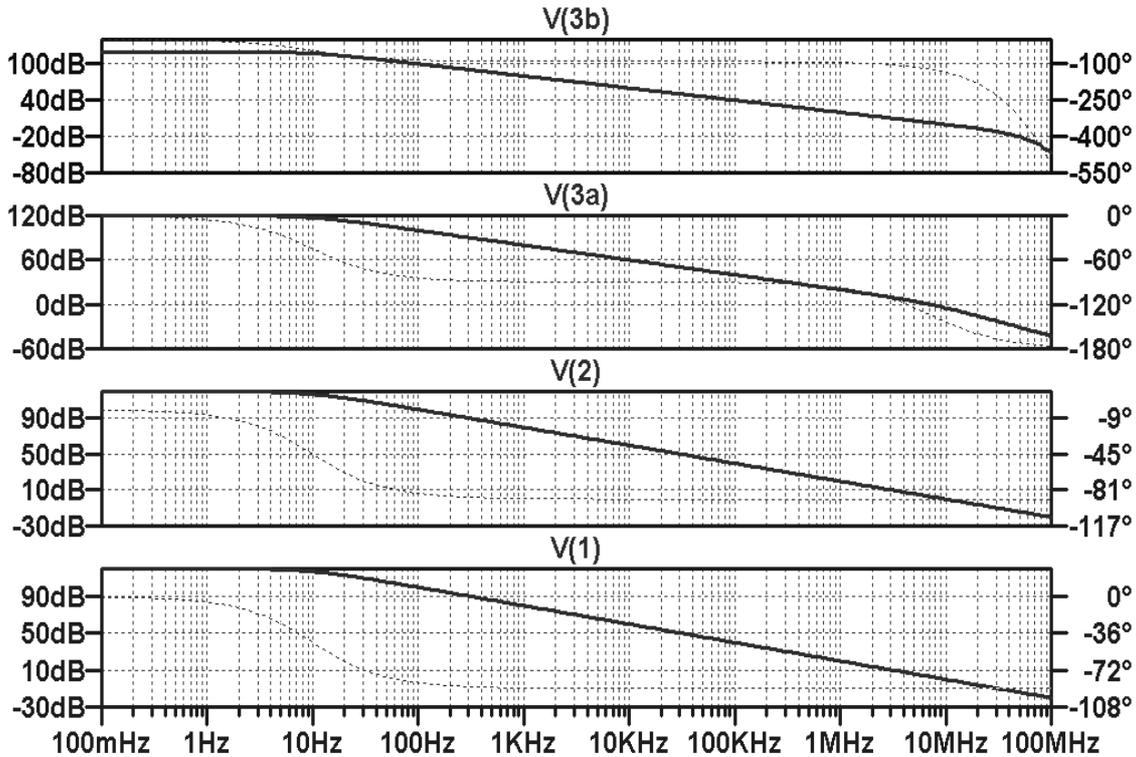
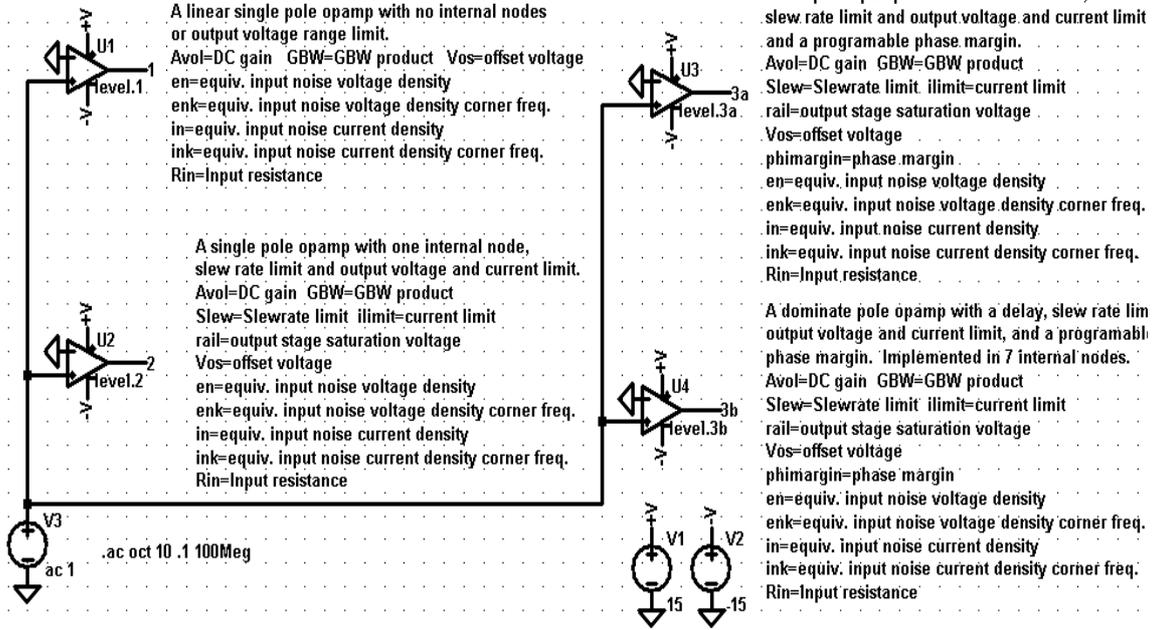


TwoTau.asc - применение звеньев представленных преобразованием Лапласа.

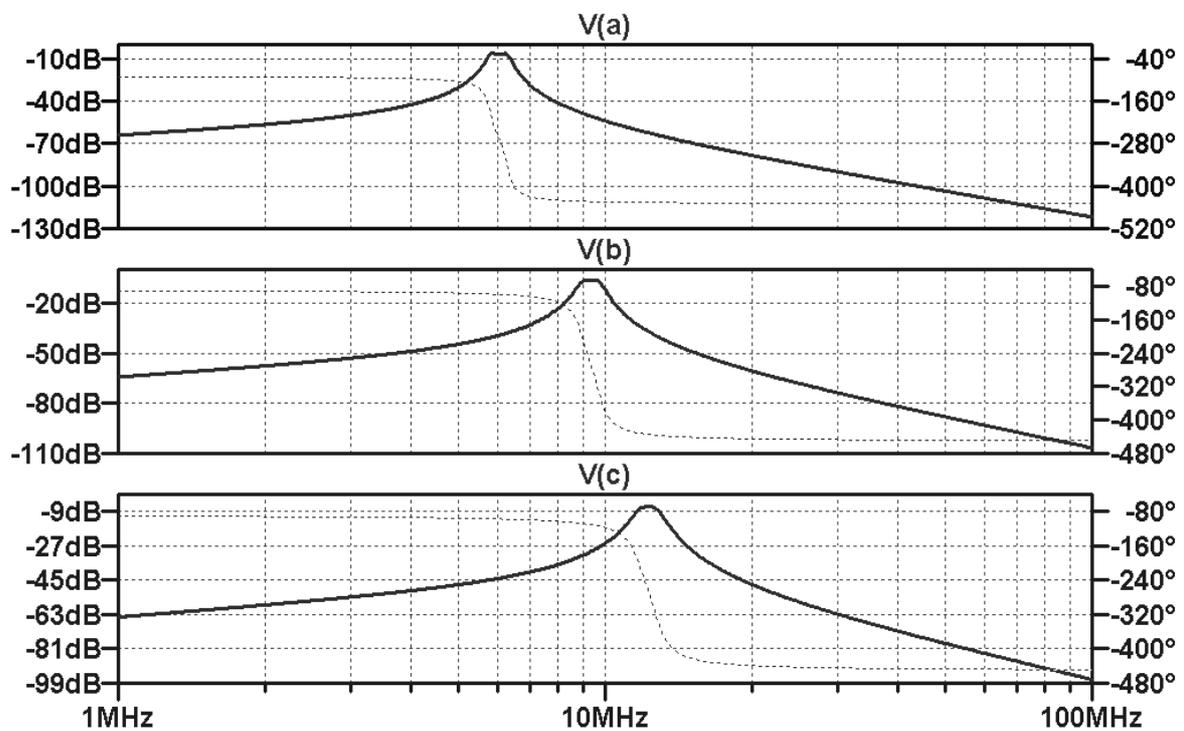
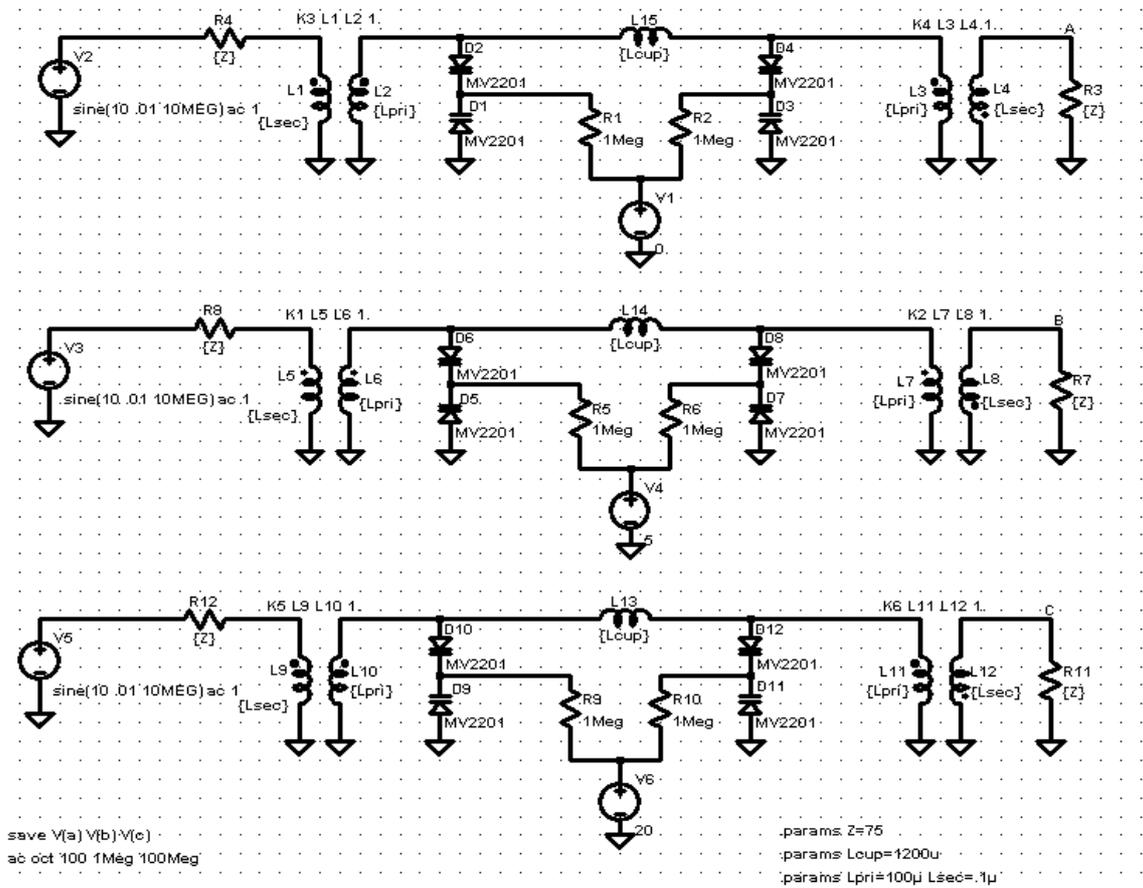


UniversalOpamp2.asc — частотные характеристики операционных усилителей различного уровня

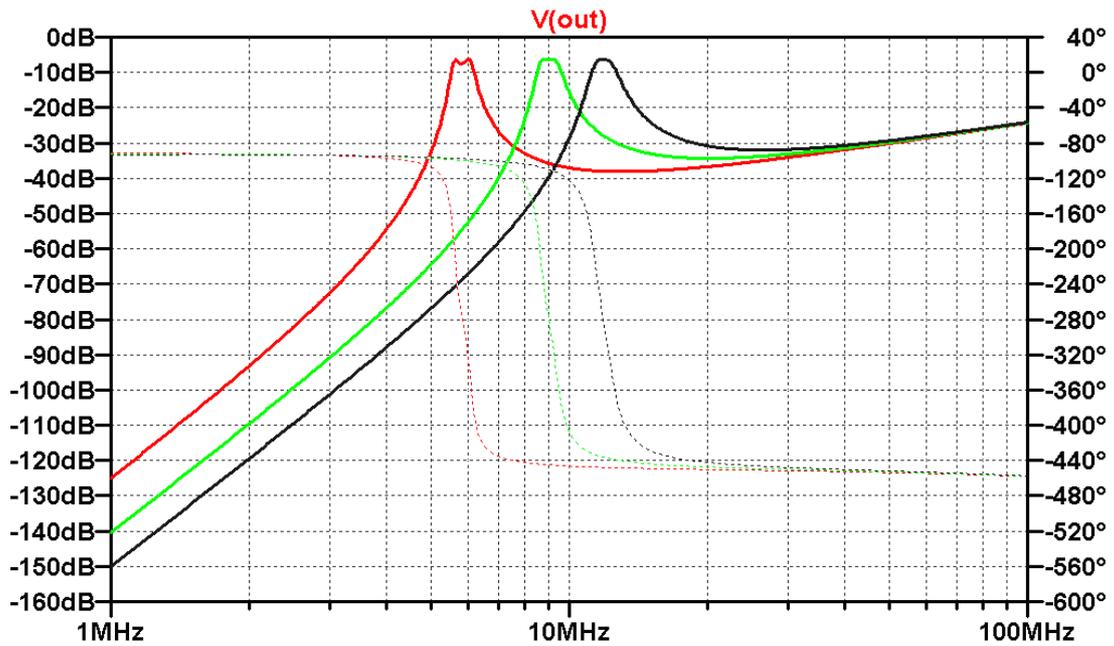
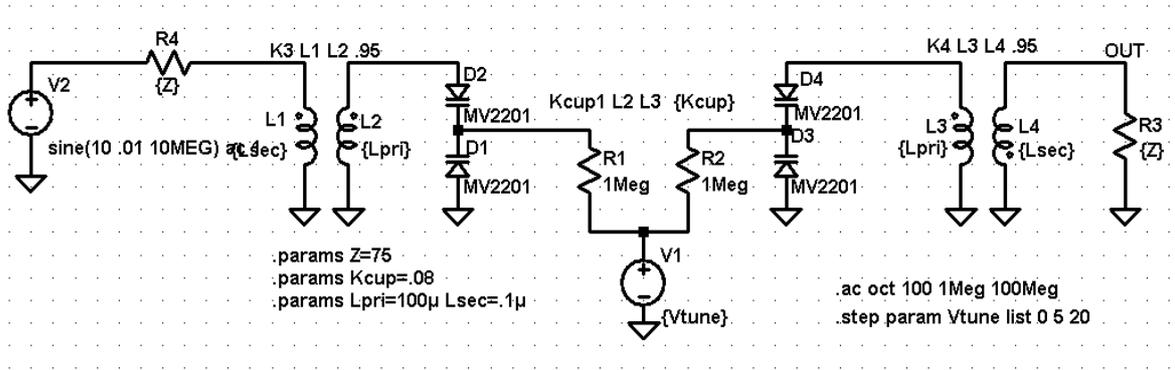
This demonstrates the use of the symbol UniversalOpamp2(improved version to the UniversalOpamp). You set the SpiceModel to be higher to simulate more aspects of opamp behavior. Level1 is merely a transconductance working into an R||C and doesn't use power from the supplies. Level2 adds slewrate, current and voltage limits. Level3a adds a second pole. Level3b adds a delay to the dominate pole response. Noise is modeled at all levels.



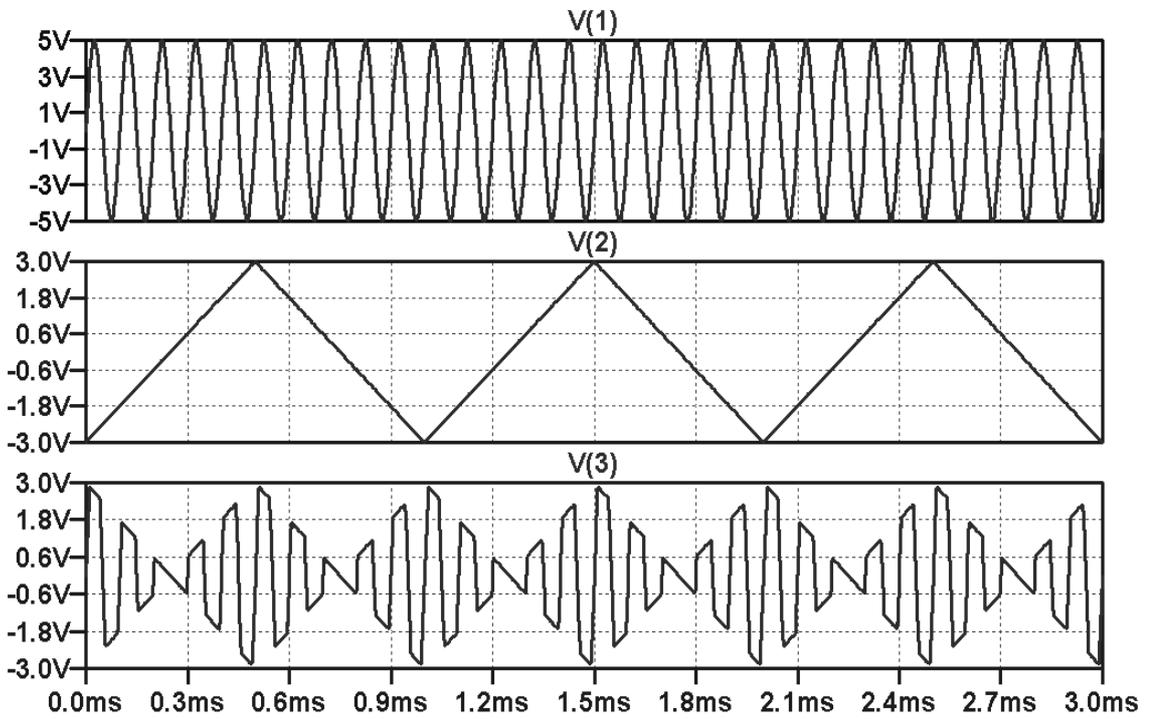
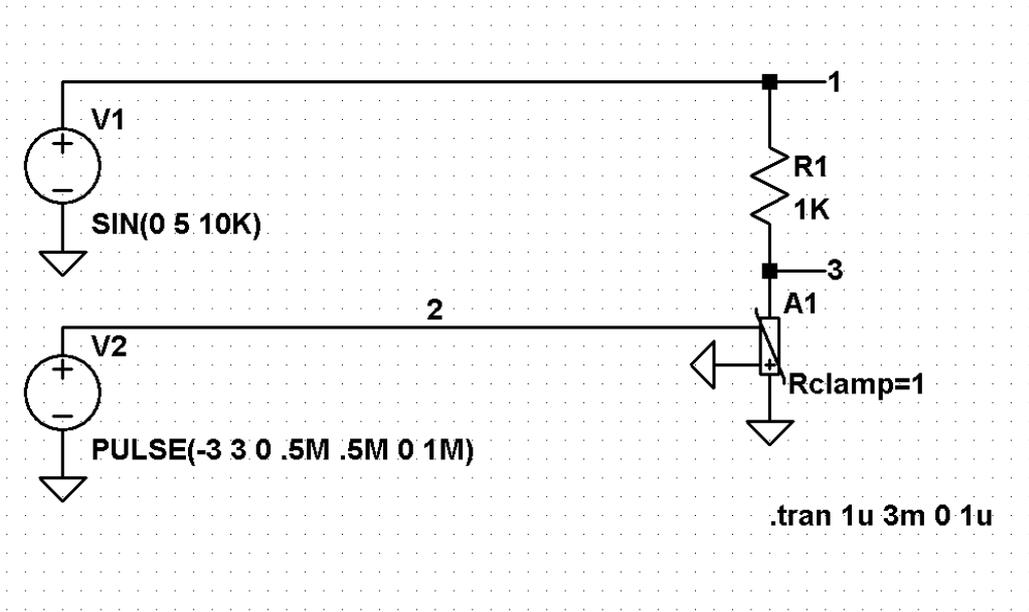
Varactor2.asc - многовариантный анализ частотных характеристик схемы с варактором



Varactor.asc - многовариантный анализ частотных характеристик схемы с варактором

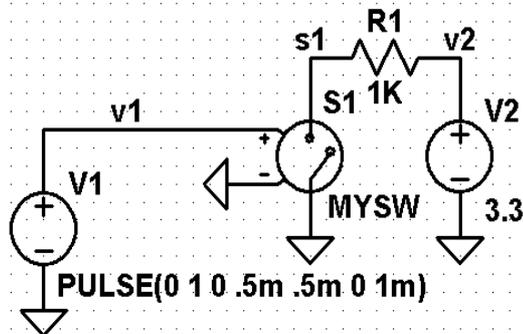


Varistor.asc - временной анализ схемы с варистором



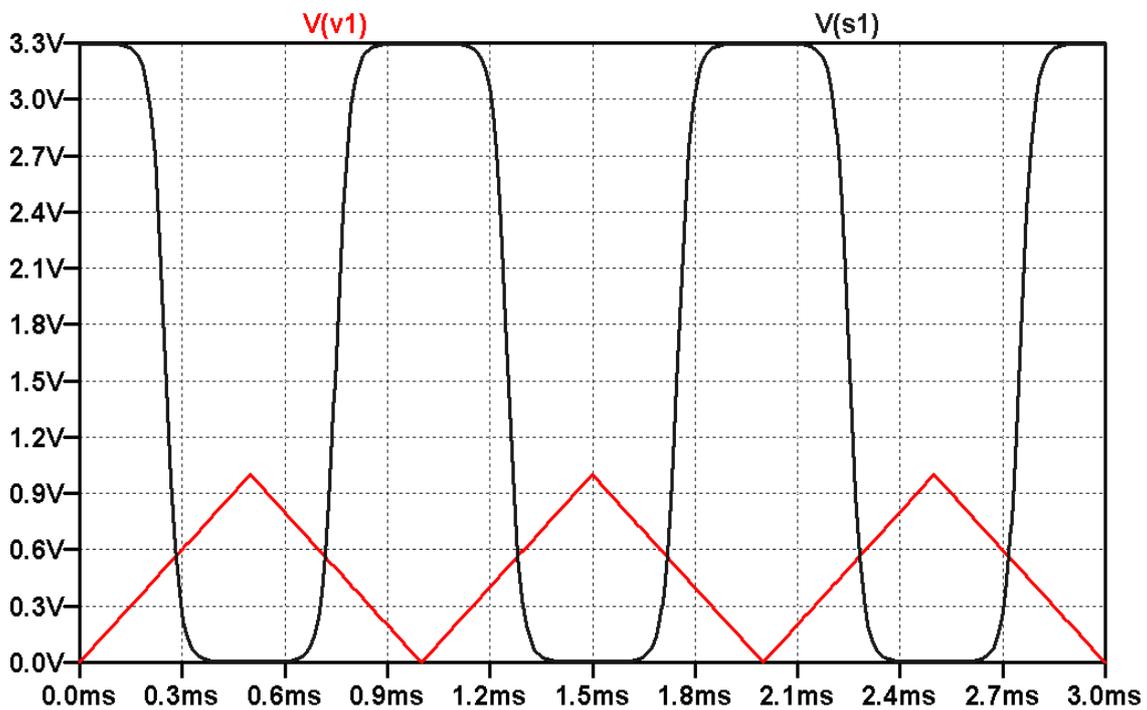
Vswitch.asc - применение модели ключа, управляемого напряжением.

This shows an example of supplying a .model statement as a SPICE directive directly on the schematic to define a voltage controlled switch.



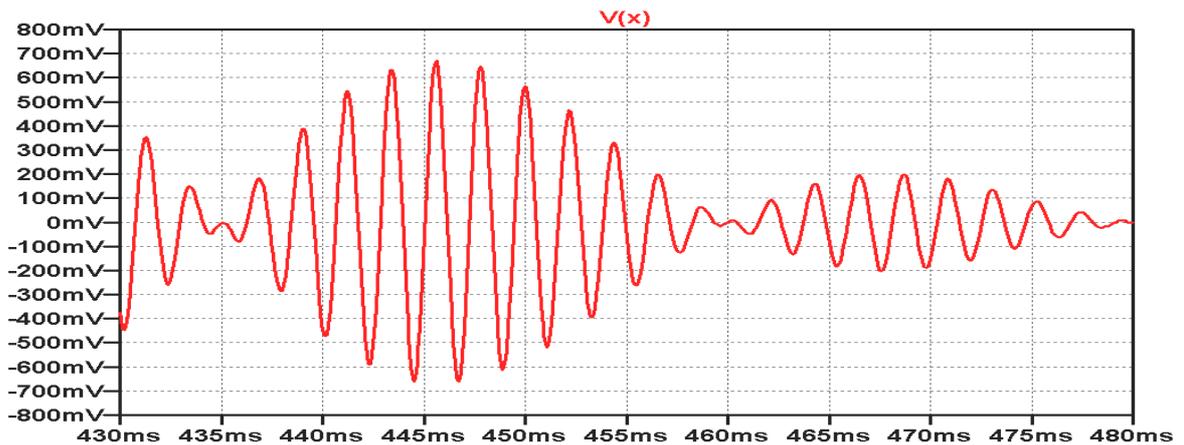
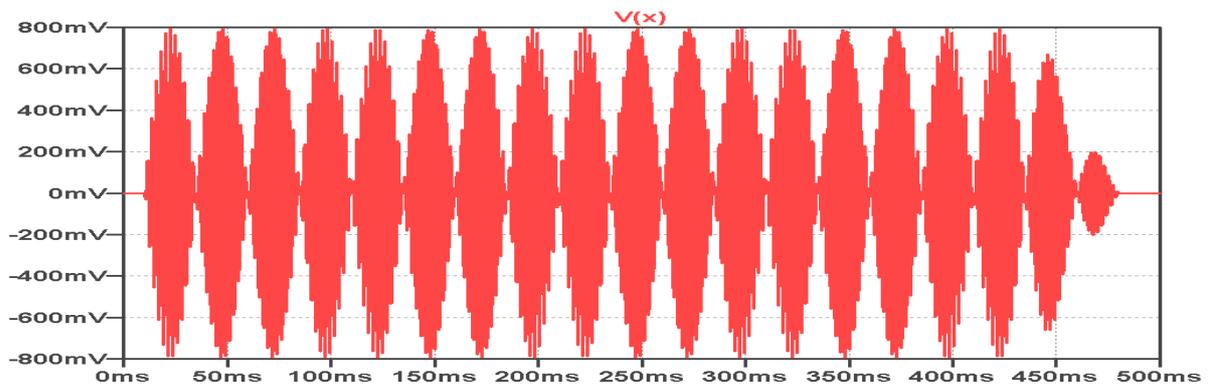
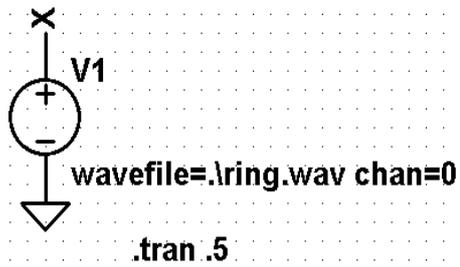
```
.tran 3m
```

```
.model MYSW SW(Ron=1 Roff=1Meg Vt=.5 Vh=-.4)
```

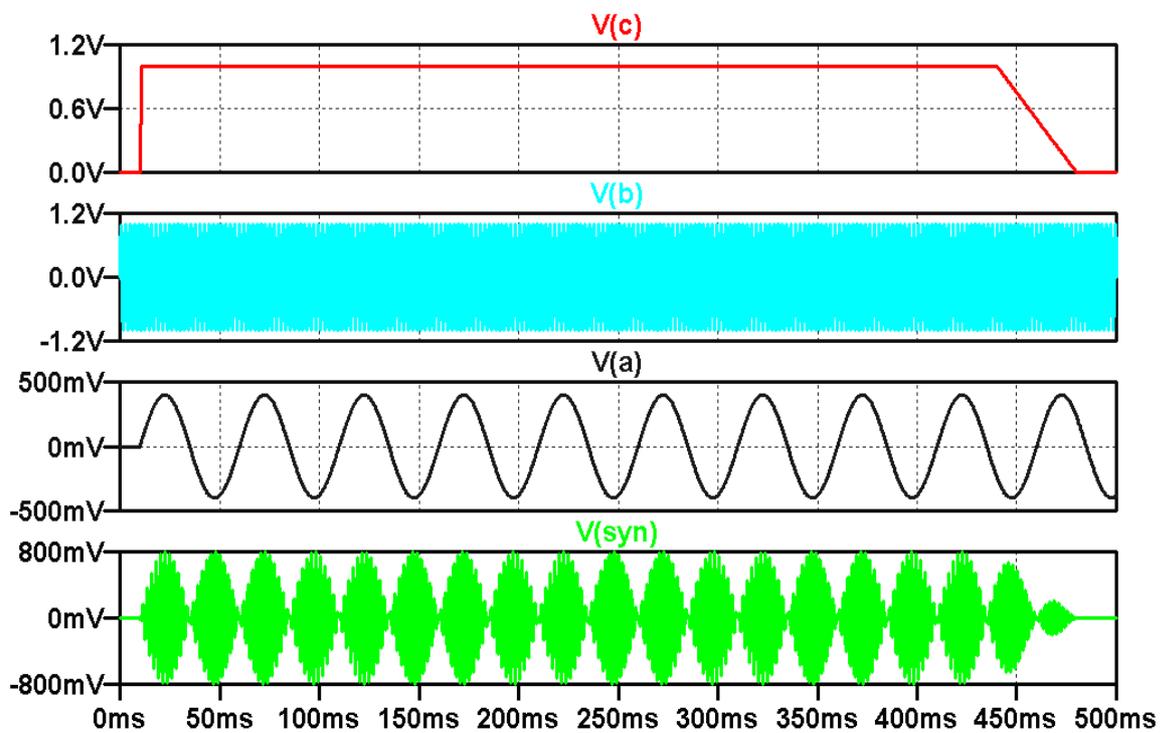
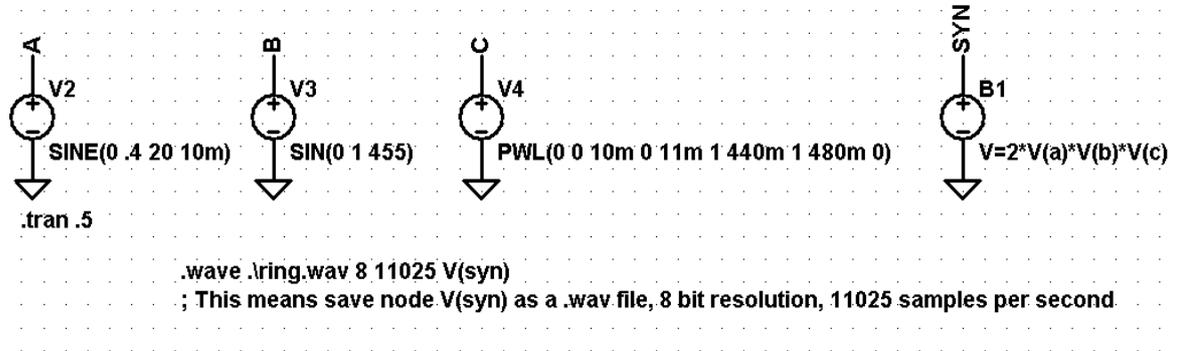


WaveIn.asc — ввод в схему сигнала из wav-файла

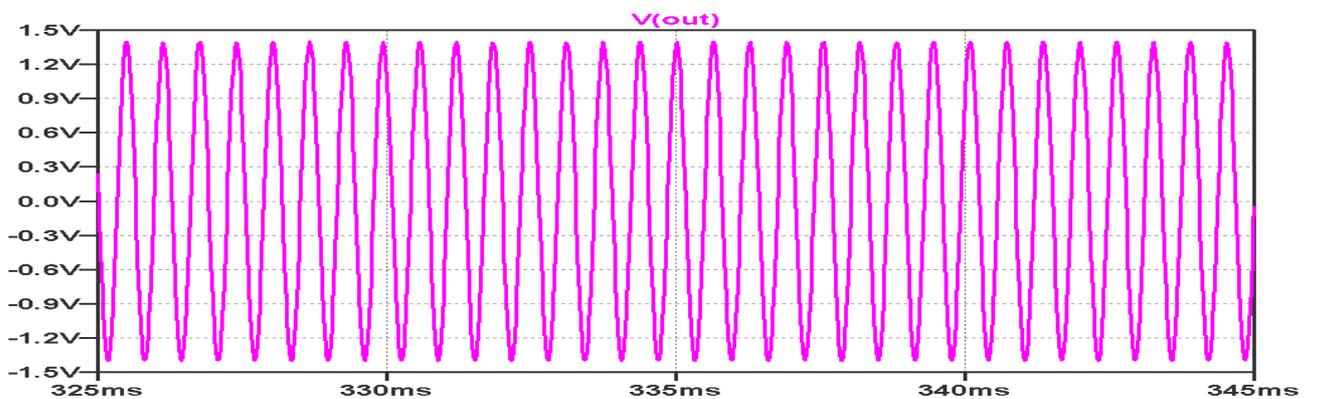
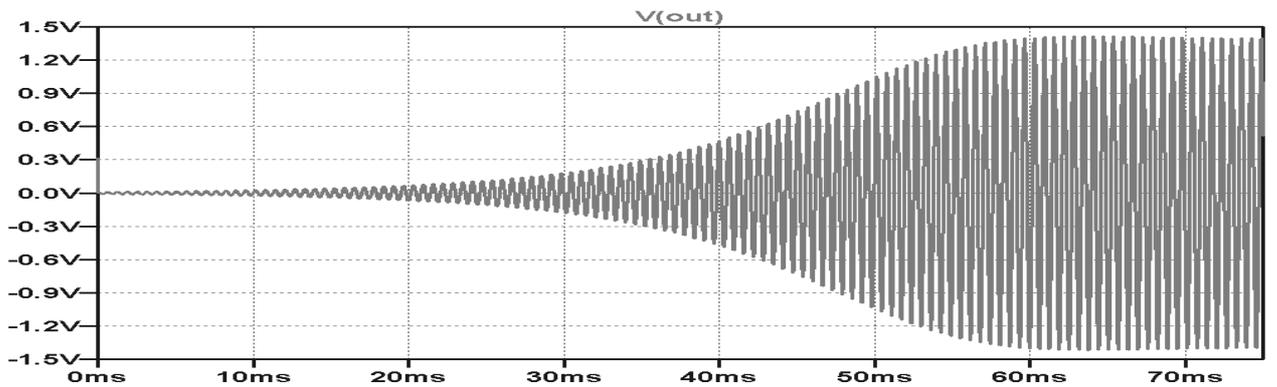
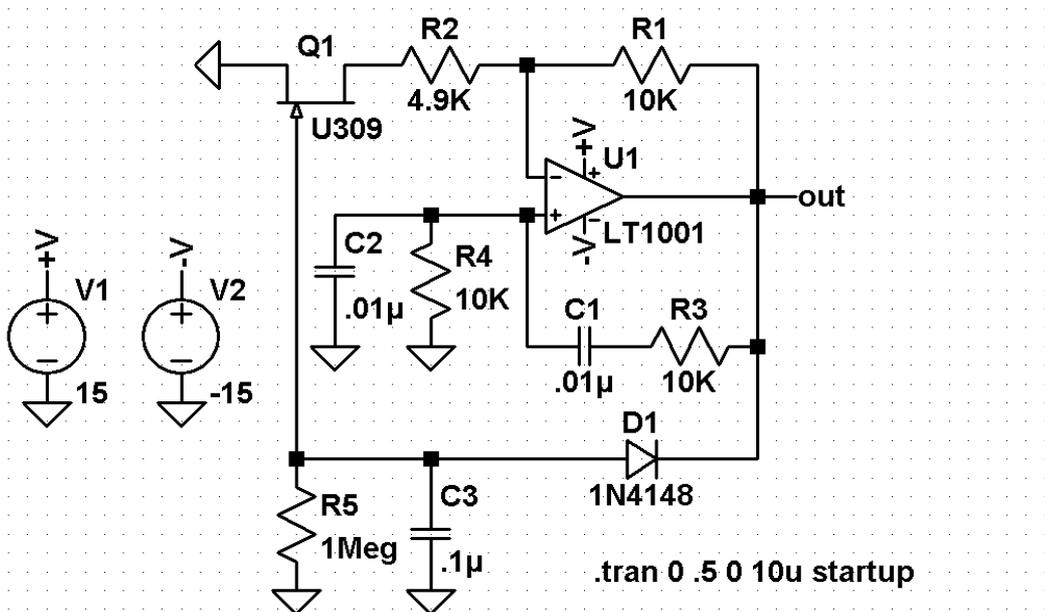
This demonstrates using a .wav file into an LTspice simulation.



WaveOut.asc - ВЫВОД В wav-ФАЙЛ СИГНАЛА.



Wein.asc - схема генератора синусоидального напряжения



Список литературы

1. Описание системы моделирования LTspice. // Интернет-ресурс - <http://LTspice.linear-tech.com/software/scad3.pdf>.
2. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: В 4 выпусках. Вып.3: Моделирование аналоговых устройств. – М.: Радио и связь, 1992. – 120с.
3. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab8.0 - М.: Изд-во "Солон-Р", 2000. – 704с.

Краткое руководство по симулятору LTspice

Валентин Володин

valvolodin@narod.ru

Конструирование, изготовление и наладка источников питания имеет свои специфические особенности. Например, авария источника и выход из строя его элементов происходит за тысячные и миллионные доли секунды, что практически не даёт шанса рассмотреть её причины и последовательность. В этом случае многих проблем можно избежать, если предварительно моделировать работу схемы источника. Моделирование позволяет проверять работу элементов источника питания в критических режимах, производить замеры, которые обычно проблематичны или даже не возможны на реальном устройстве. Моделирование позволяет уточнять и оптимизировать результаты предварительных расчётов, а порой экспериментально подбирать параметры элементов и режимы работы схемы. Все выше перечисленные и не перечисленные соображения делают моделирование кровно необходимым этапом конструирования источников питания.

В настоящее время любителю и профессионалу доступно большое количество программ для персонального компьютера, позволяющих производить моделирование работы электронных схем. Зачастую эти программы используют различные базовые математические алгоритмы, что даёт им определённые преимущества при моделировании определённого типа электронных устройств. Наибольшей популярностью пользуются программы, использующие SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) алгоритм моделирования процессов протекающих в электронных схемах. Алгоритм SPICE, разработанный в конце 70-х годов в университете Беркли (Калифорния), де-факто стал стандартом для разрабатываемых и уже эксплуатируемых в настоящее время коммерческих систем схемотехнического моделирования для персонального компьютера. К таким системам относятся:

- HSPICE (фирма “MetaSoftware”);
- PSpice (“Microsim”);
- MicroCap V (“Spectrum Software”);
- Circuit Maker (“The Virtual Electronics Lab”);
- Dr. Spice;
- ViewSpice (“Deutsch Research”) и другие.

Учитывая тот факт, что не для всех представляется возможным приобретение коммерческой системы схемотехнического моделирования, остановим свой выбор на прекрасном и к тому же бесплатном симуляторе LTspice от корпорации Linear Technology. SwCad можно бесплатно скачать с сайта корпорации Linear Technology[7]. Программа может работать под управлением ОС:

- Windows 98;
- Windows 2000;
- Windows NT4.0;
- Windows Me;
- Windows XP;
- Linux RedHat 8.0 с WINE версии 20030219.

Несмотря на свою бесплатность программа является настоящим и полноценным SPICE-симулятором, позволяет моделировать аналогово-цифровые схемы, имеет дружелюбный интерфейс и обеспечивает вполне приличную скорость моделирования. Кроме этого имеется отличный (правда англоязычный) встроенный Help[9], который является прекрасным и лучшим руководством. В интернете существует достаточно много ресурсов, где обсуждается и поддерживается эта прекрасная программа[4, 5].

Данный раздел написан в виде пошаговой инструкции, которая поможет начинающим достаточно быстро освоить эту прекрасную и полезную программу. Разумеется, при этом не затрагиваются некоторые важные моменты, которые можно будет позже разобрать самостоятельно, исследуя примеры и встроенную помощь. Так же существует большое количество различной литературы, посвящённой SPICE-симуляторам[1, 2, 6], которая в большей мере будет справедлива и для программы LTspice.

Программа заточена для анализа процессов, происходящих в импульсных источниках питания. Однако, благодаря своим особенностям, программа снискала большую популярность и среди аудиофилов. При наличии подключения к Интернету программа регулярно обновляется.

Программа достаточно универсальна и позволяет создавать новые библиотечные элементы, редактировать схемные решения, производить моделирование и просматривать его результаты. В программе имеется встроенная библиотека моделей большинства микросхем DC-DC преобразователей, выпускаемых корпорацией Linear Technology. Однако библиотека моделей может пополняться самостоятельно собственными моделями и моделями от производителей электронных компонентов. Во многом эта работа уже проделана фанатами LTspice. Например, основной набор моделей можно найти на домашней страничке Андрея Кадатч [3], где надо скачать архив EXTRA. В архиве находятся библиотека моделей транзисторов, диодов, тиристоров, симисторов и т.д. от ведущих мировых производителей. Там же находится подробная инструкция по установке этой библиотеки.

1. Установка и запуск программы LTspice

Как уже говорилось ранее, программа LTspice IV работает на персональном компьютере под управлением операционной системы Windows 98, 2000, NT 4.0, ME или XP. Так как программа генерирует много данных, то желательно, чтобы на жёстком диске было свободное пространство размером не менее 200 Мб, а размер оперативной памяти был более 128 Мб.

Установочный файл LTspice IV можно бесплатно скачать с сайта корпорации Linear Technology [8]. После того как вы скачали самораспаковывающийся архив LTspiceIV.exe, запустите его и следуйте инструкциям. Процесс установки обычно не вызывает проблем, просто надо соглашаться со всеми предложенными настройками.

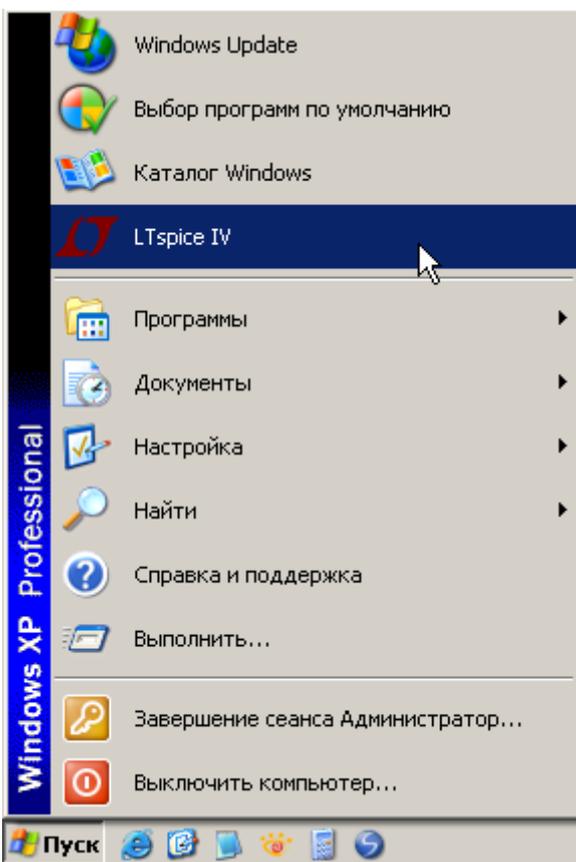


Рис. 1. Меню запуска программы LTspice в классическом представлении меню Пуск Windows XP.

После установки программы на рабочем столе



появится иконка , а в верхней части меню Пуск появится строчка LTspice IV (рис. 1). Программу можно запустить как с помощью иконки на рабочем столе, так и через меню Пуск. В результате откроется стартовое окно программы (рис. 2), которое имеет:

- строку заголовка;
- панель команд;
- панель инструментов;
- рабочее поле;
- строку подсказки.

В левой части строки заголовка прописано название программы. В правой части этой строки сгруппированы стандартные кнопки управления размером окна и завершения программы. Цвет строки заголовка отражает активность окна, и если он синий, то окно активно, а если серый, то пассивно. На панели команд расположены стандартные меню, набор которых может меняться в зависимости от активного приложения, расположенного в рабочем поле программы. На панель инструментов вынесены иконки часто используемых команд и настроек. В рабочем поле располагаются подокна рабочих приложений, которыми являются редактор схем, плоттер, редактор символов и

окно текстовых сообщений. В строке подсказки отображается текущее состояние программы и актуальные настройки симулятора. В рассматриваемый момент там отображается надпись **Ready**, которая говорит, что программа загружена и ждёт дальнейших действий пользователя.

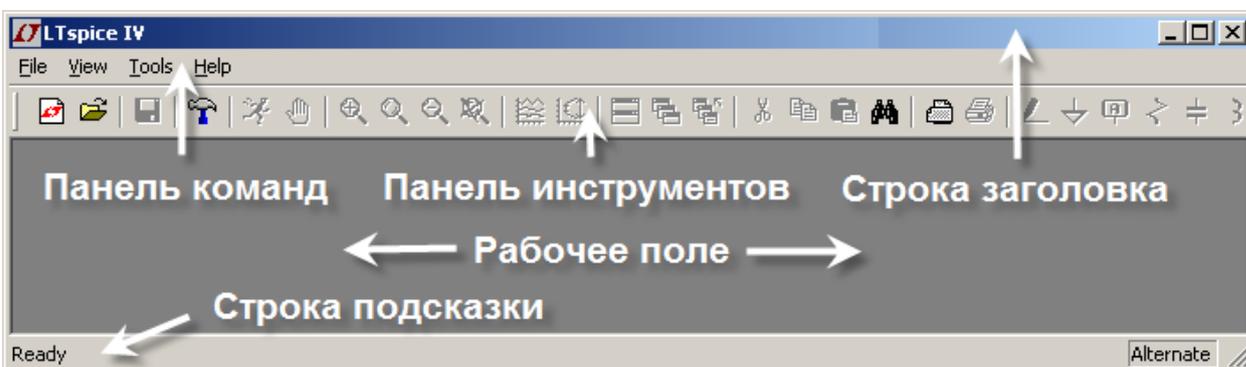


Рис. 2. Стартовое окно программы LTspice.

2. Быстро осваиваем LTspice

Данный раздел написан в виде пошаговой инструкции, которая поможет начинающим пользователям достаточно быстро освоить эту прекрасную и полезную программу. Разумеется, при этом не затрагиваются некоторые важные моменты, которые будут рассмотрены в последующих главах.

Для загрузки схемы в программу LTspice требуется специальный текстовый файл списка соединений (netlist). Этот файл имеет расширение sig и содержит перечень схемных компонентов, узлов, с которыми эти компоненты связаны, определения моделей и различные SPICE директивы. Для загрузки текстового файла списка соединений достаточно выполнить команду меню **File** (Файл) => **Open** (Открыть), т. е. активизировать подпункт **Open** в меню **File**, расположенном на панели команд. При этом из всех предложенных типов файлов нужно выбрать sig.

Списки соединений генерируются многими программами. Например, подобный файл генерируется программой проектирования фильтров FilterCAD производства той же корпорации Linear Technology. Кроме этого, текстовый файл списка соединений может быть создан вручную, при помощи любого текстового редактора. Именно таким образом описывались схемы в ранних SPICE симуляторах. Однако данный способ описания схем нельзя назвать очень удобным и поэтому многие современные SPICE симуляторы имеют в своём составе редактор схем.

LTspice также содержит редактор схем, который сохраняет введённую схему в специальном файле с расширением asc. Перед началом симуляции, из ASC-файла извлекается описание схемы и автоматически генерируется sig-файл, который в дальнейшем используется симулятором.

Чтобы преждевременно не забивать себе голову ненужной информацией о внутреннем функционировании программы LTspice, перейдём к более практическим вопросам. Известно, что лучшим способом изучения программы является попытка что-либо в ней сделать. Для начала нарисуем схему простейшего мультивибратора и промоделируем его работу. Чтобы начать рисовать новую схему, нужно

щёлкнуть левой кнопкой мышки по иконке , расположенной на панели инструментов, или выполнить команду **File** (Файл) => **New Schematic** (Новая схема). Чтобы редактировать ранее созданную схему, следует

щёлкнуть левой кнопкой мышки по иконке , расположенной на панели инструментов, или выполнить команду **File** (Файл) => **Open** (Открыть), а затем выбрать входной файл с расширением asc.

Следствием указанных действий будет активизация редактора схем. Активность редактора схем подтверждается символом синего транзистора в левой части панели команд. Если создаётся новая схема, то LTspice сам присваивает ей имя Draft<порядковый номер>.asc. Например, в данном случае схеме присвоено имя Draft1.asc (рис. 3). Если название не пришлось вам по вкусу, то его можно изменить, сохранив схему под другим именем с помощью команды **File** (Файл) => **Save As** (Сохранить как).

Нельзя не заметить, что, в отличие от стартового окна, на панели команд окна редактора схем появились дополнительные меню: **Edit**, **Hierarchy**, **Simulate** и **Window**, а также стали активными значки на панели инструментов. Рабочее поле редактора схем окрасилось в светло-серый цвет, установленный по умолчанию. При необходимости, с помощью комбинации клавиш <Ctrl>+<G>, можно нанести сетку на рабочее поле редактора схем. Аналогичный результат можно получить с помощью команды **View** (Вид) => **Show Grid** (Показать сетку).

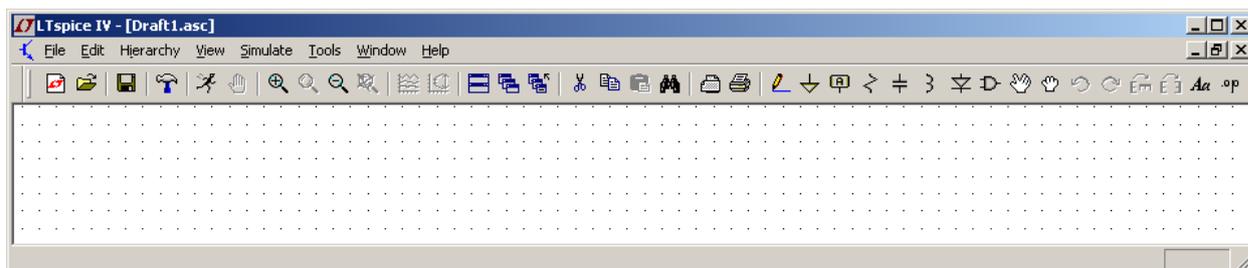


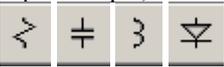
Рис. 3. Окно схемного редактора LTspice

Немного забегаая вперёд, отметим, что в правой части строки подсказки отображается алгоритм работы вычислителя SPICE симулятора. Пользователю доступны два алгоритма работы вычислителя:

- Normal;
- Alternate.

По умолчанию устанавливается алгоритм Normal, который несколько быстрее алгоритма Alternate. Однако алгоритм Alternate обеспечивает большую внутреннюю точность и устойчивость процесса вычислений. Благодаря этому, для многих схем, алгоритм Alternate способен обеспечить и большую скорость моделирования. Так что если симулятор надолго "задумывается", то первое, что стоит сделать, —

это изменить алгоритм работы вычислителя. Для этого надо щёлкнуть левой кнопкой мышки по иконке  на панели инструментов или выполнить команду **Simulate** (Моделирование) => **Control Panel** (Панель управления). В возникшем после этого окне **Control Panel** надо выбрать вкладку **SPICE** и в строке **Solver**(*) установить требуемый алгоритм.

Для выбора часто используемых компонентов, таких как резисторы, конденсаторы, индуктивности и диоды можно воспользоваться соответствующими иконками , расположенными на панели инструментов.

Применительно к мультивибратору получится примерно следующая картина (рис. 4).

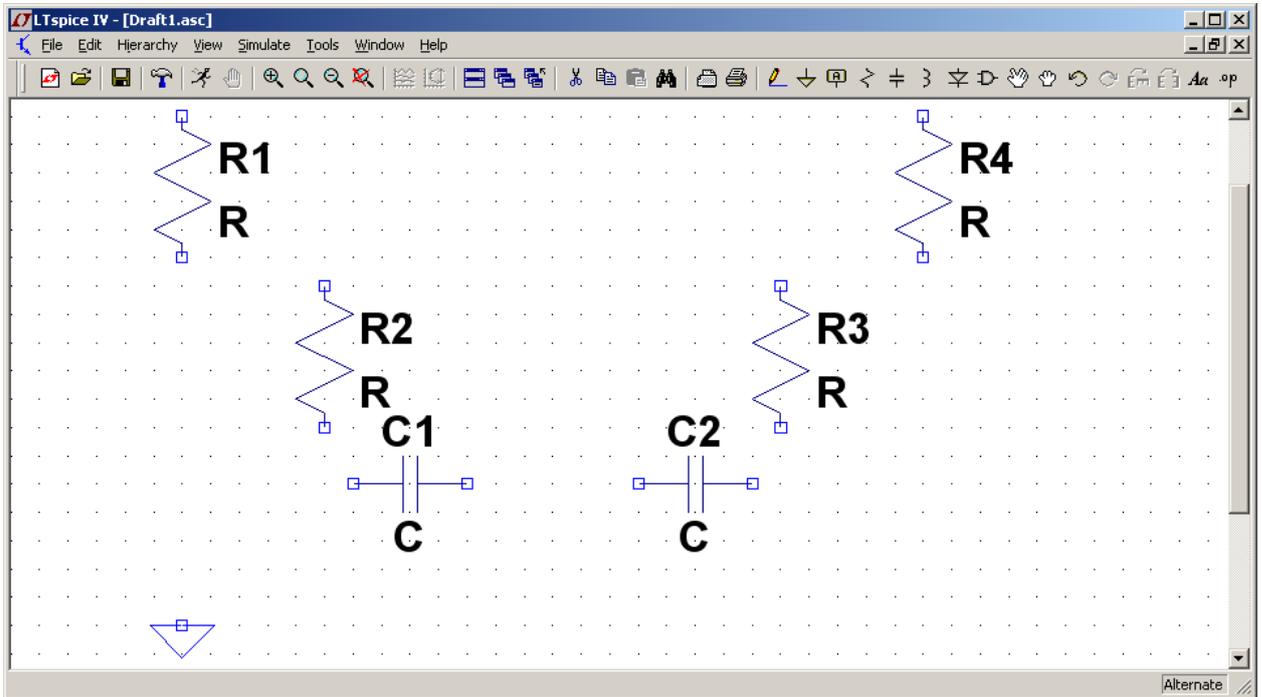


Рис. 4. Размещение компонентов в окне редактора схем LTspice.

Для выбора остальных компонентов необходимо выполнить команду **Edit** (Редактировать) => **Component** (Компонент), которая вызывает диалоговое окно **Select Component Symbol** (рис. 5). Аналогичное действие производит нажатие функциональной клавиши <F2>, а также щелчок левой кнопкой мышки по иконке , расположенной на панели инструментов. Выбрав требуемый компонент, нужно щёлкнуть левой кнопкой мышки по кнопке **OK**, после чего компонент переносится на рабочее поле в окне редактора схем.

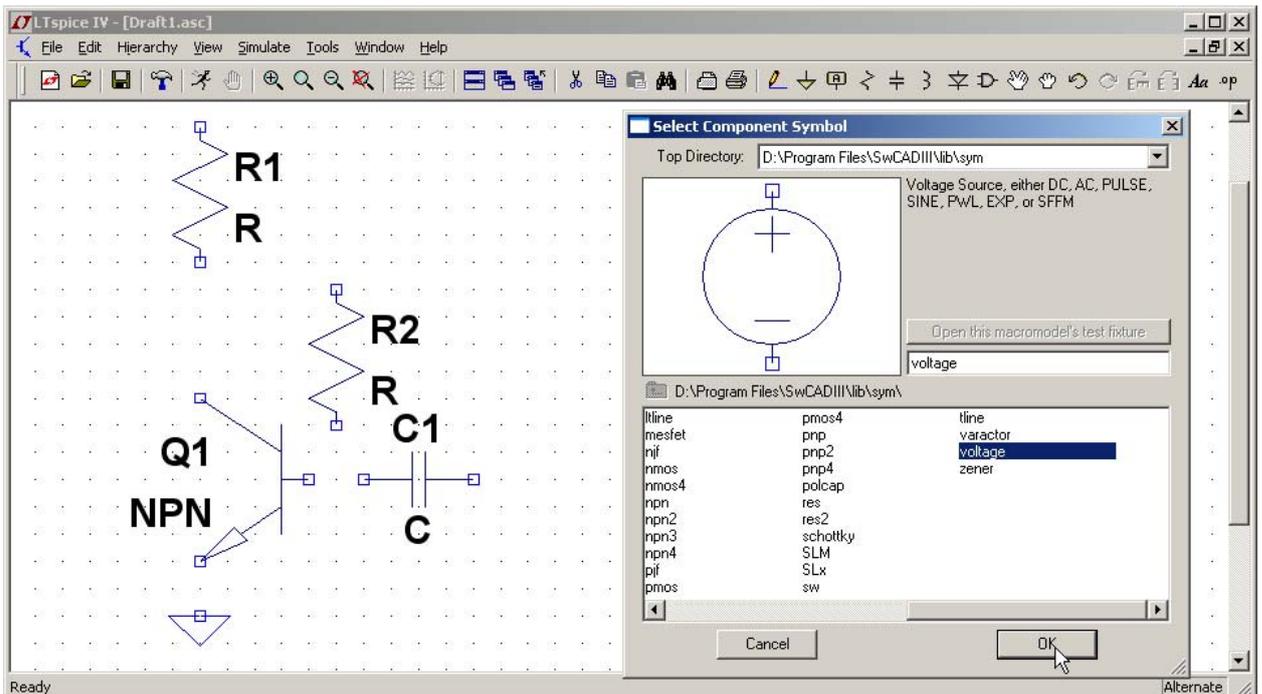
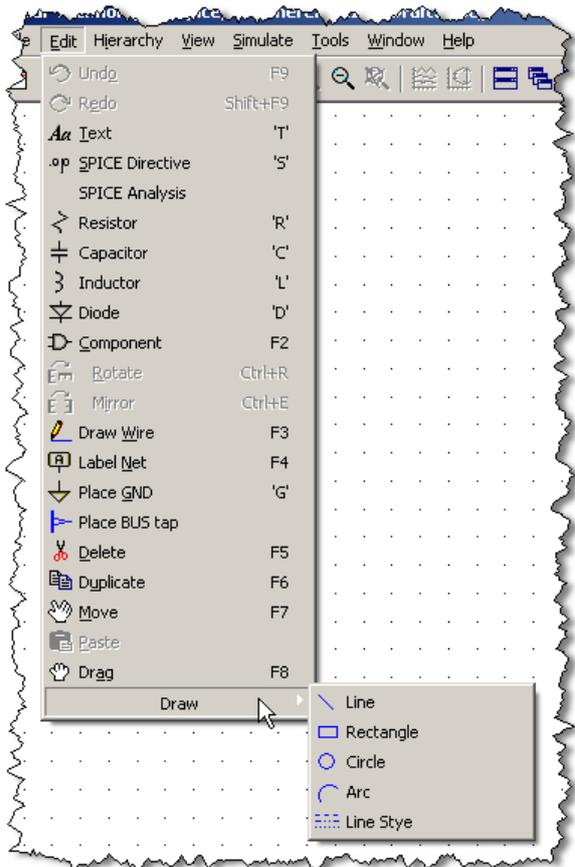


Рис. 5. Выбор компонентов из диалогового окна **Select Component Symbol**

Необходимое пространственное положение компонента можно обеспечить, вращая его комбинацией

клавиш <Ctrl>+<R>. Также на панели инструментов есть специальные иконки , предназначенные для вращения и зеркального отображения выбранного компонента. Кроме этого, на панели инструментов присутствуют иконки, позволяющие осуществлять стандартные операции редактирования:



-  или <F5> — удалить один либо группу схемных элементов;
 -  или <F6> — копировать один либо группу схемных элементов;
 -  — вставить схемные элементы, скопированные в другом документе (например, из другого ASC-файла);
 -  — найти компонент в большой схеме. Найденный компонент подсвечивается жёлтым цветом;
 -  или <F7> — переместить один либо группу схемных элементов;
 -  или <F8> — перетащить один либо группу схемных элементов. Отличается от перемещения тем, что позволяет перетаскивать компоненты без разрыва электрических связей. Таким образом, например, можно проводить линии под углом, отличным от прямого;
 -  или <F9> — вернуться к предыдущему состоянию;
 -  или <Shift>+<F9> — вернуться к последующему состоянию;
- Все перечисленные здесь, а также дополнительные действия можно производить через меню **Edit** (Редактировать) на панели команд (рис. 6).

Рис. 6. Вид меню **Edit** на панели команд.

После размещения всех компонентов получим картинку, изображённую на рис. 7.

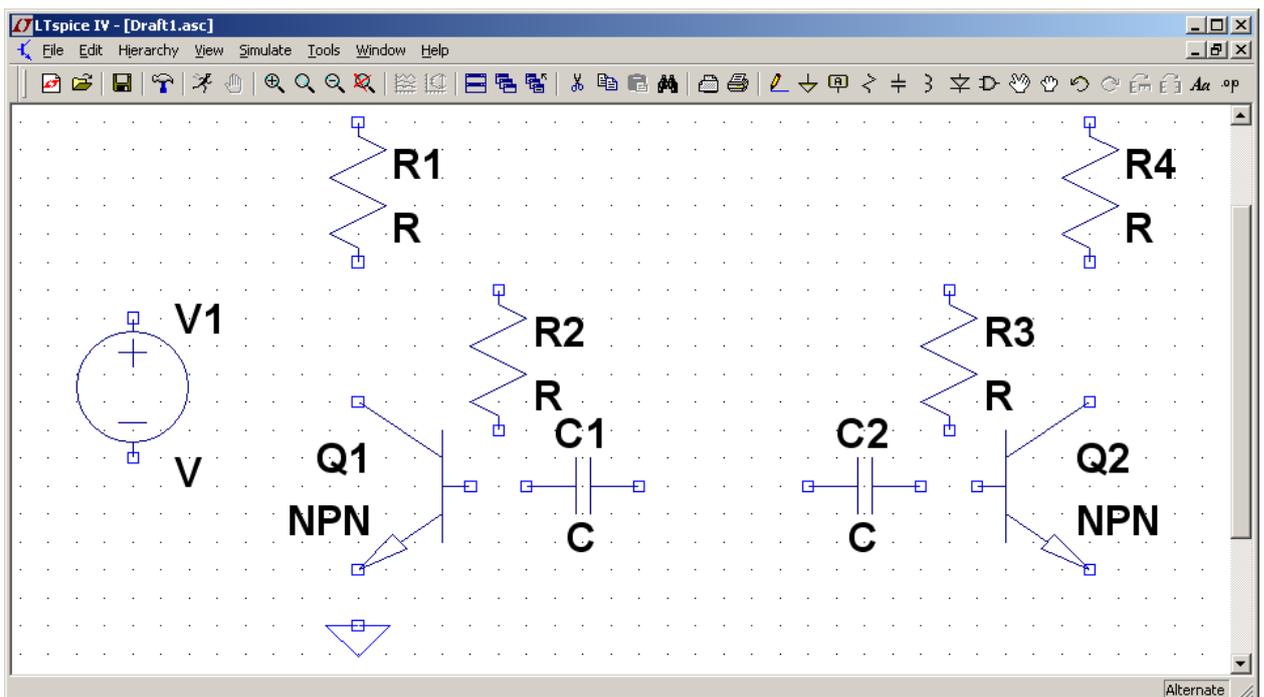


Рис. 7. Размещение компонентов в окне редактора схем LTspice.

На схеме, в обязательном порядке, должен присутствовать компонент "Земля" , с которым должны быть связаны все остальные компоненты. "Подвешенные цепи", т. е. фрагменты схемы гальванически не связанные с компонентом "Земля" недопустимы. Данное требование по началу кажется чрезмерным, но реально не вызывает ни каких особых проблем.

Для рисования связей между компонентами необходимо активизировать иконку карандаша  на панели инструментов или в меню **Edit** (Редактировать) на панели управления (рис. 6).

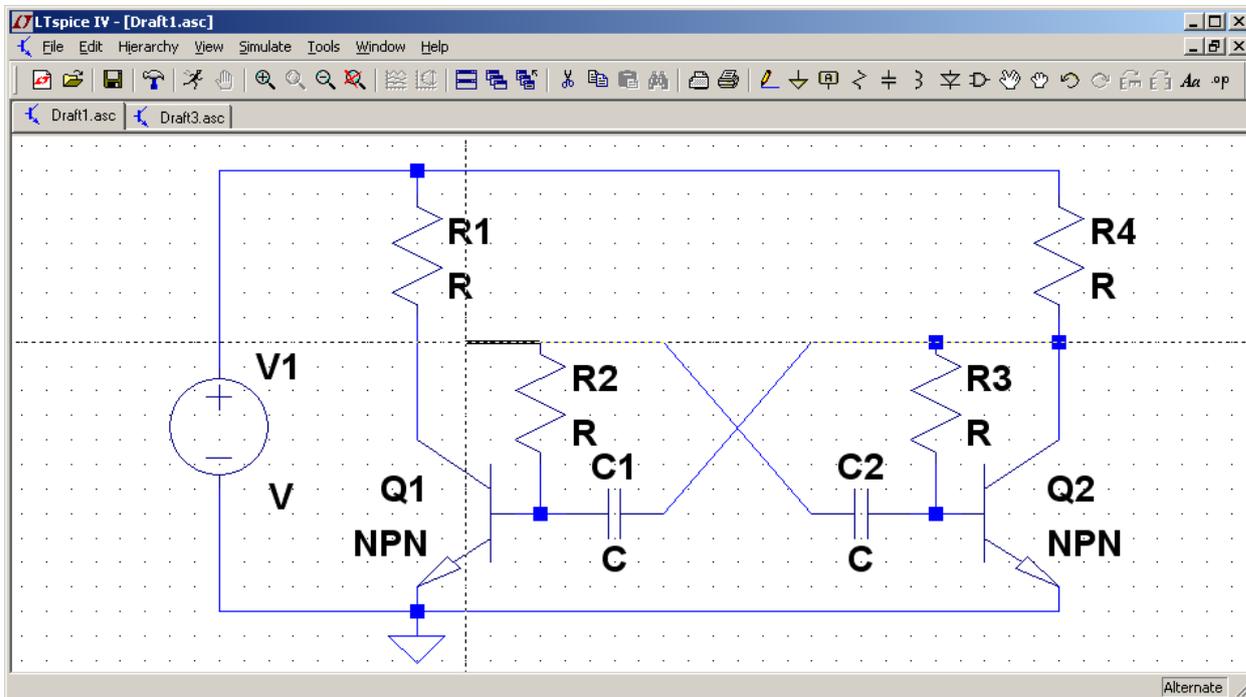


Рис. 8. Соединение компонентов.

Теперь, когда схема нарисована (рис. 8), необходимо определить числовые параметры и типы компонентов. Для этого подводим курсор к редактируемому компоненту. При совмещении курсора с позицией компонента, курсор меняет своё начертание и из крестика превращается в указательный палец .

Теперь, после щелчка правой кнопкой мышки, появляется соответствующее окно, в котором можно определить числовые параметры компонента.

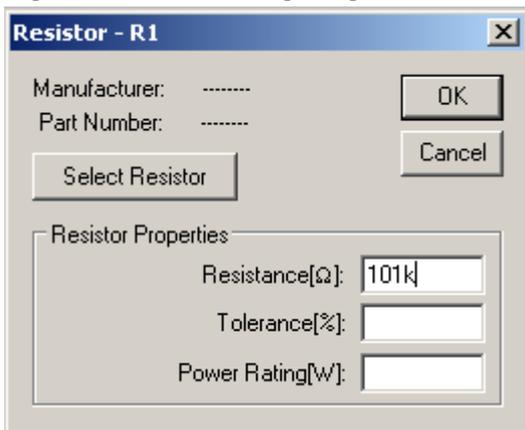


Рис. 9. Меню настройки резистора.

Рис. 10. Эквивалентная схема конденсатора.

Для резистора (рис. 9) можно определить:

- **Resistance** (сопротивление в омах);
- **Tolerance** (разброс значения в процентах);
- **Power Rating** (допустимая рассеиваемая мощность в ваттах).

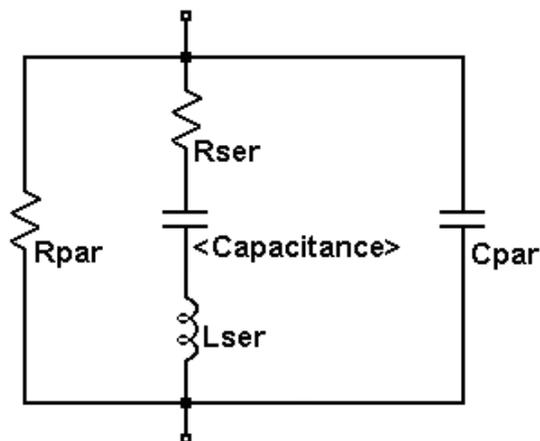
Нажав на кнопку **Select Resistor** (выбор резистора), можно получить доступ к заранее подготовленной базе параметров резисторов.

Устанавливаем следующие номиналы резисторов:

$R1 = R4 = 2 \text{ кОм}$, $R2 = 101 \text{ кОм}$, $R3 = 100 \text{ кОм}$.
Небольшая разница номиналов $R2$ и $R3$ необходима для устойчивого запуска мультивибратора.

В отличие от модели резистора, модель конденсатора в LTspice имеет достаточно сложную структуру (рис. 10). Кроме ёмкости (Capacitance), модель учитывает массу паразитных параметров:

- **Rpar** (Parallel Resistance) - сопротивление потерь между выводами конденсатора;
- **Rser** (Series Resistance) - последовательное сопротивление;



- **Lser** (Series Inductance) - последовательная индуктивность;
- **Cpar** (Parallel Capacitance) - параллельная ёмкость.

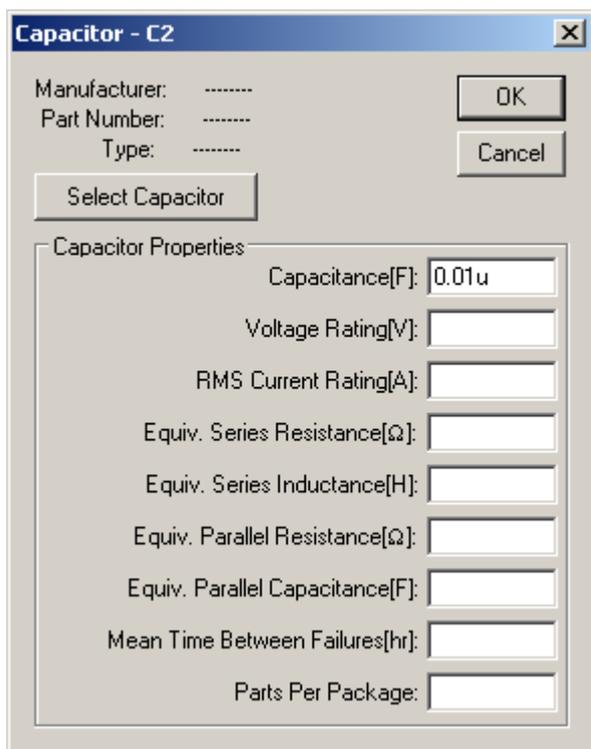


Рис. 11. Меню настройки конденсатора.

Настроить основные и паразитные параметры модели можно в окне настройки (рис. 11), которое вызывается щелчком правой кнопки мышки по конденсатору C1 (или C2). Здесь ёмкость измеряется в фарадах, индуктивность в генри, а сопротивление в омах. В LTspice имеется заранее подготовленная библиотека моделей конденсаторов, куда можно попасть, щёлкнув левой кнопкой мышки по кнопке **Select Capacitor** (выбор конденсатора).

Числовые значения параметров компонентов могут масштабироваться при помощи суффиксов. Масштабные коэффициенты указаны в табл. 1. Также допустима экспоненциальная форма записи.

В табл. 2 приведено соответствие между обозначениями единиц измерения электрических величин, принятых у нас (ГОСТ 8.417-2002), и используемых в LTspice.

Устанавливаем следующие номиналы конденсаторов C1, C2: $C1 = C2 = 0.01 \text{ мкФ}$.

Примечание:

LTspice воспринимает как масштабный коэффициент только первый символ после числового параметра и поэтому запись 0.01u эквивалентна

записи 0.01uF.

Таблица 1. Масштабные коэффициенты.

суффикс	масштабный коэффициент	Наименование
f	1e-15	Фемто
p	1e-12	Пико
n	1e-9	Нано
u(или μ)	1e-6	Микро
m	1e-3	Милли
k	1e3	Кило
meg	1e6	Мега
g	1e9	Гига
t	1e12	Тера

Таблица 2. Соответствие обозначений единиц измерения электрических величин

Наименование величины	Единица измерения	Обозначение единицы измерения	
		ГОСТ 8.417-2002	LTspice
Электрическое напряжение	вольт	В	V
Сила электрического тока	ампер	А	A
Энергия	джоуль	Дж	J
Мощность	ватт	Вт	W
Частота	герц	Гц	Hz
Магнитная индукция	тесла	Тл	T
Электрическая ёмкость	фарад	Ф	F
Электрическое сопротивление	ом	Ом	Ω
Индуктивность	генри	Гн	H
Время	секунда	с	s

Для транзисторов, щёлкнув левой кнопкой мышки по кнопке **Pick New Transistor** (Выбрать новый транзистор), показанной на рис. 12, выбираем меню **Select Bipolar Transistor** (Выбрать биполярный транзистор), в котором выбираем транзистор 2N3904, производства Philips.

Установим напряжение питания мультивибратора равным 12 В. Для этого щелчком правой кнопки мышки по символу источника напряжения V1 вызываем его меню настройки (рис. 13). В строке **DC value** пропишем требуемое значение напряжения и закроем окно **Voltage Source**, щёлкнув левой кнопкой мышки по кнопке **OK**.

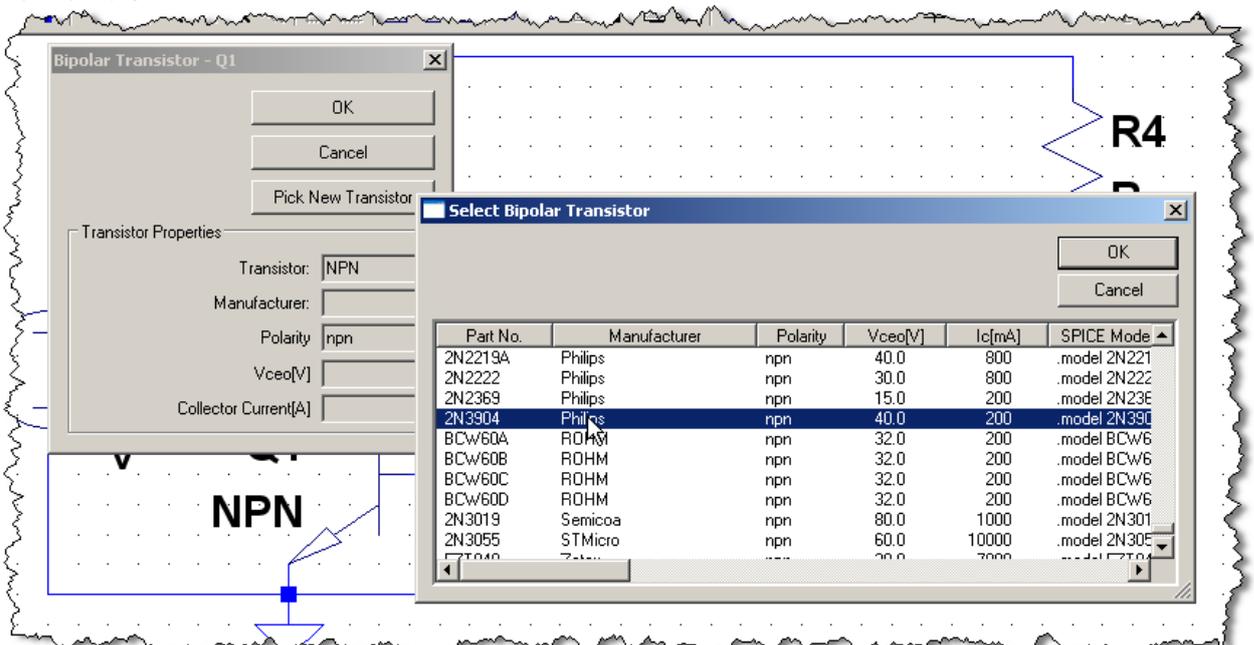


Рис. 12. Выбор модели биполярного транзистора из библиотеки LTspice.

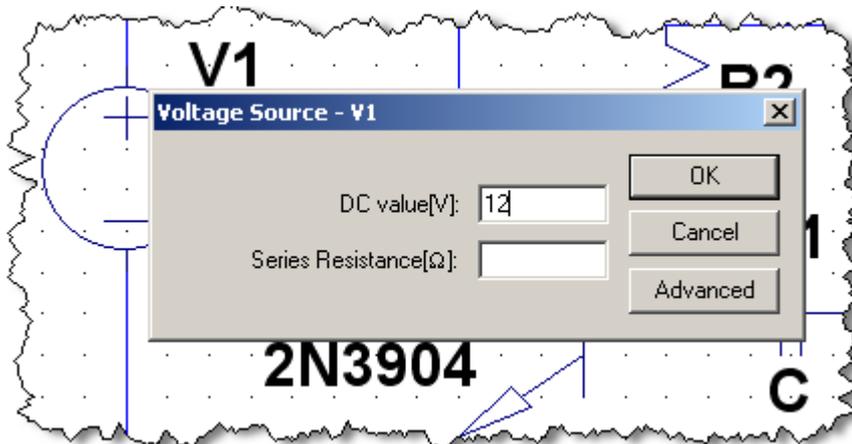


Рис. 13. Меню настройки источника постоянного напряжения. Схема нарисована, и в ней определены все компоненты (рис. 14).

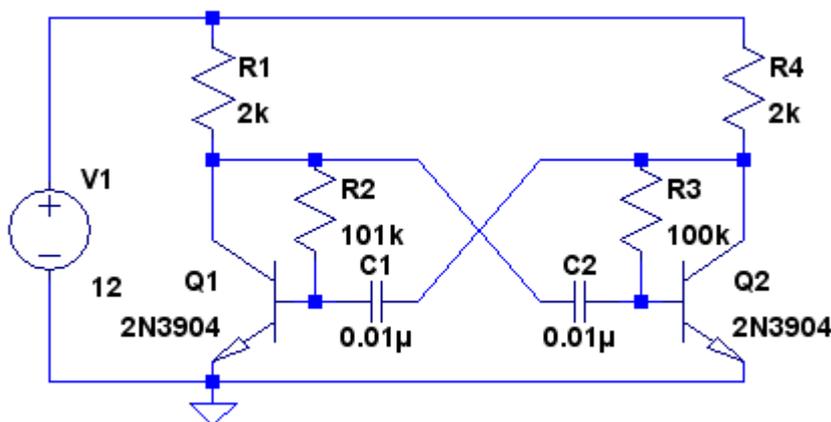


Рис. 14. Результирующая схема мультивибратора.

Теперь можно приступить к имитационному моделированию работы мультивибратора. Программа LTspice позволяет разнообразные исследования электронных схем:

1. **Transient** — выполняется анализ переходных процессов. Исследуется поведение схемы после подачи питания;
2. **AC Analysis** — расчёт частотных характеристик;
3. **DC sweep** — выполняется анализ режима по постоянному току при изменении постоянного напряжения или тока;
4. **Noise** — Расчёт уровня внутреннего шума;
5. **DC Transfer** — определяется переходная функция по постоянному току;
6. **DC op pnt** — Определяется режим схемы по постоянному току (рабочая точка).

В данном случае нас интересуют поведение схемы мультивибратора после подачи питания.

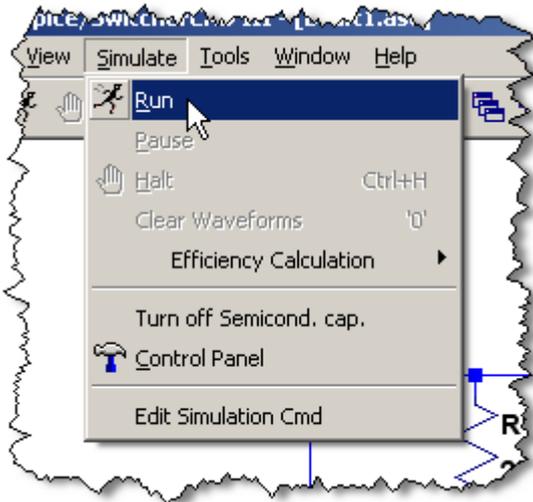


Рис. 15. Запуск процесса моделирования (симуляции).

Для проведения анализа переходных процессов воспользуемся командой **Simulate** (Моделирование) => **Run** (рис. 15), или щёлкнем

левой кнопкой мышки по иконке **Run** на панели инструментов. После этого активизируется окно **Edit Simulation Command** (Редактирование команды моделирования), в котором, по умолчанию, выбрана вкладка **Transient** (рис. 16). На этой вкладке, как минимум, нужно определить время остановки анализа переходного процесса (**Stop Time**). Это необходимо сделать только при первом запуске моделирования. Все последующие запуски производятся согласно установленным значениям. При необходимости редактирования, окно **Edit Simulation Command** можно

вызвать командой **Simulate** (Моделирование) => **Edit Simulation Cmd** (Редактирование команды моделирования) или щёлкнув правой кнопкой мышки по директиве **.tran** в рабочем поле редактора схем. Кроме времени окончания анализа переходного процесса (**Stop Time**), в окне **Edit Simulation Command**, выбрав вкладку **Transient**, можно определить:

- **Time to Start Saving Data** - время начала записи результатов моделирования;
- **Maximum Timestep** - максимальный шаг интегрирования.

Если шаг интегрирования не указан, то программа сама выбирает для него максимально возможное значение.

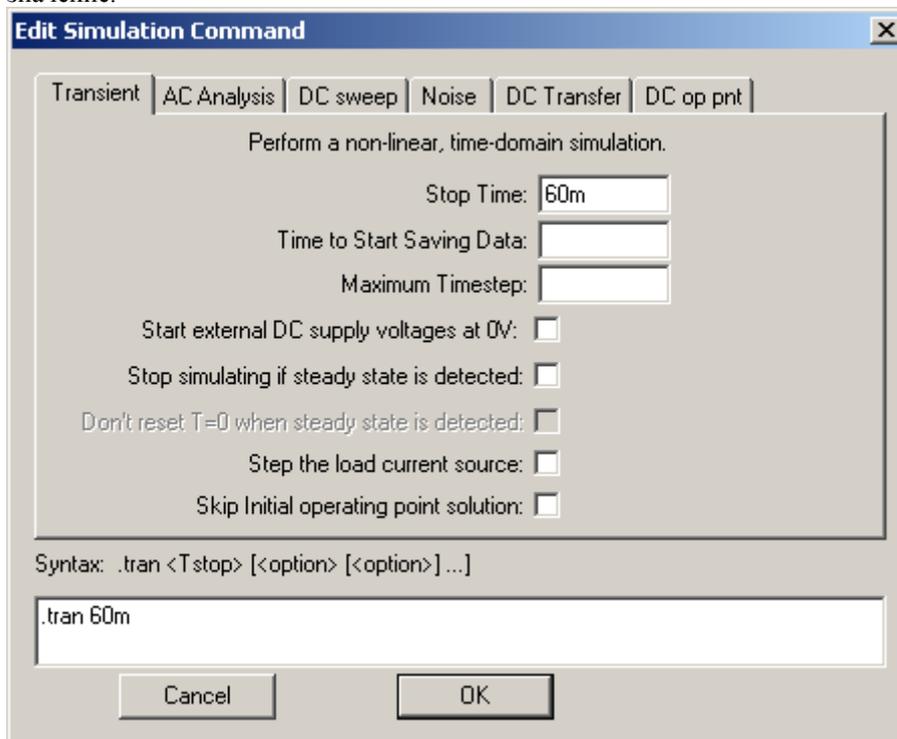


Рис. 16. Окно команд моделирования.

В окне **Edit Simulation Command** присутствуют дополнительно опции, позволяющие более тонкую настройку процесса моделирования, но нас они пока не интересуют.

Установим время остановки равным 60 мс. В строке **Syntax** появилась директива для симулятора — **.tran 60m**. После щелчка левой кнопкой мышки по кнопке **OK**, директива **.tran 60m** будет скопирована в окно редактора схем, где ее надо разместить в любом выбранном месте. После этого автоматически начнется анализ переходного процесса, окно со схемой Draft1.asv сожмётся, а на освободившееся место будет вставлено окно плоттера Draft1.raw, которое пока выглядит как пустой прямоугольник (рис. 17).

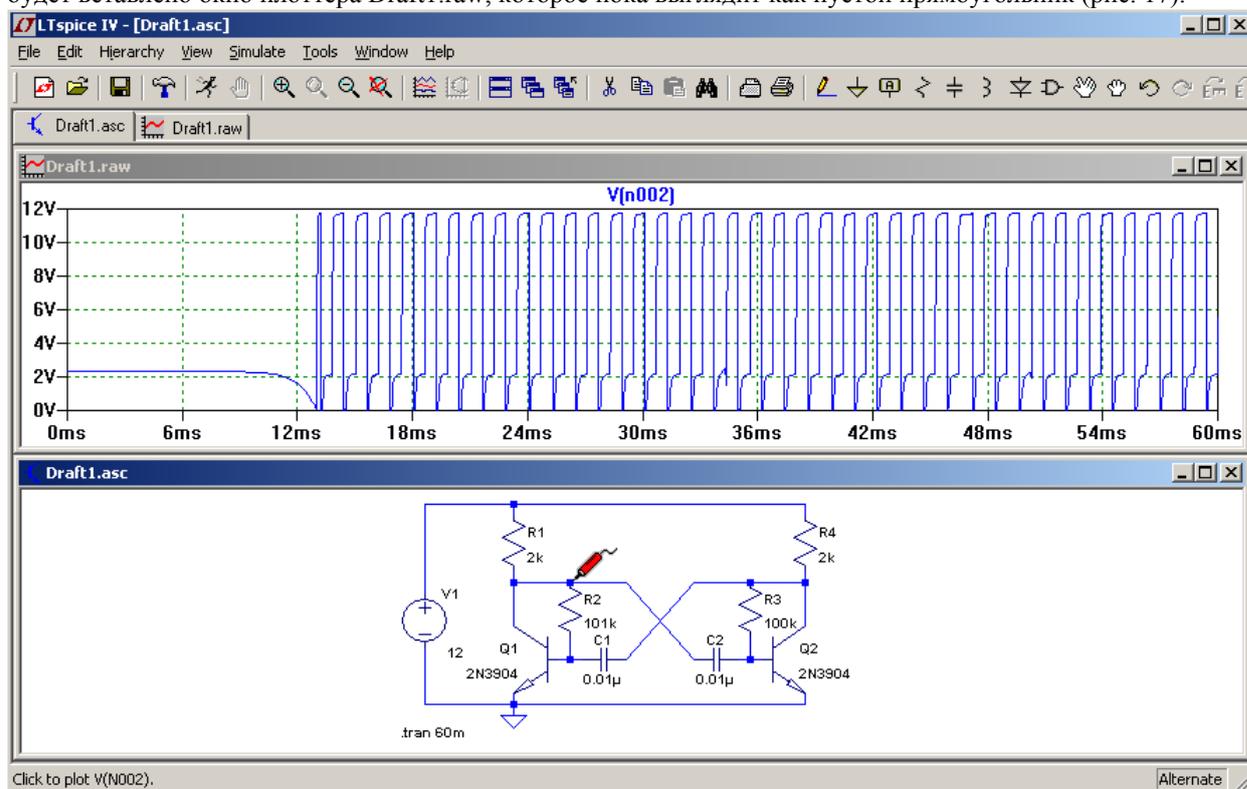


Рис. 17. Вид окна программы LTspice после завершения моделирования.

Щелчок левой кнопкой мышки в области окна делает это окно активным. В зависимости от того, какое окно активно, меняется содержание панели команд. Если активно окно схемы Draft1.asc, то на панели присутствуют меню:

- **File;**
- **Edit;**
- **Hierarchy;**
- **View;**
- **Simulate** и т. д.

Если активно окно плоттера Draft1.raw, то на панели команд присутствуют меню:

- **File;**
- **View;**
- **Plot Setting;**
- **Simulation** и т. д.

Неактивный вид иконки **Run**  говорит о том, что идёт процесс моделирования. При этом в строке подсказки отображается текущее время и процент выполнения моделирования.

Наблюдать диаграммы сигналов в различных точках схемы можно как в процессе моделирования, так и после его завершения. В первом случае процесс моделирования несколько растягивается, т. к. процессор компьютера загружается дополнительными операциями вывода изображения.

Моделирование будет автоматически завершено после достижения времени остановки. При необходимости, процесс можно остановить и раньше комбинацией клавиш <Ctrl>+<N> или щёлкнув левой кнопкой мышки по иконке  на панели инструментов.

Поместить диаграмму в окно плоттера можно тремя способами.

Непосредственно зондируя схему.

Через меню команд **Plot Settings** (Установки плоттера) => **Visible Traces** (Показать диаграммы).

Через меню команд **Plot Settings** (Установки плоттера) => **Add Trace** (Добавить диаграмму).

Вспользуемся пока самым простым способом, т. е. непосредственным зондированием схемы.

Чтобы посмотреть форму напряжения на произвольном узле (проводнике) схемы, надо приблизить к нему курсор мышки. Оказавшись в районе проводника, курсор трансформируется в шуп красного цвета. Одновременно в строке подсказки, в левой нижней части окна, отображается приглашение щёлкнуть левой

кнопкой мышки для вывода диаграммы напряжения на плоттер — **Click to plot V(N002)**. После щелчка, в окне плоттера будет построена соответствующая временная диаграмма напряжения узла N002, которой будет присвоено название в виде выражения V(N002).

Сама диаграмма и её название окрашены в одинаковый цвет, который выбирается автоматически, но может быть изменён вручную в окне **Expression Editor** (редактирование выражения). Это окно можно вызвать, щелкнув правой кнопкой мышки по названию диаграммы.

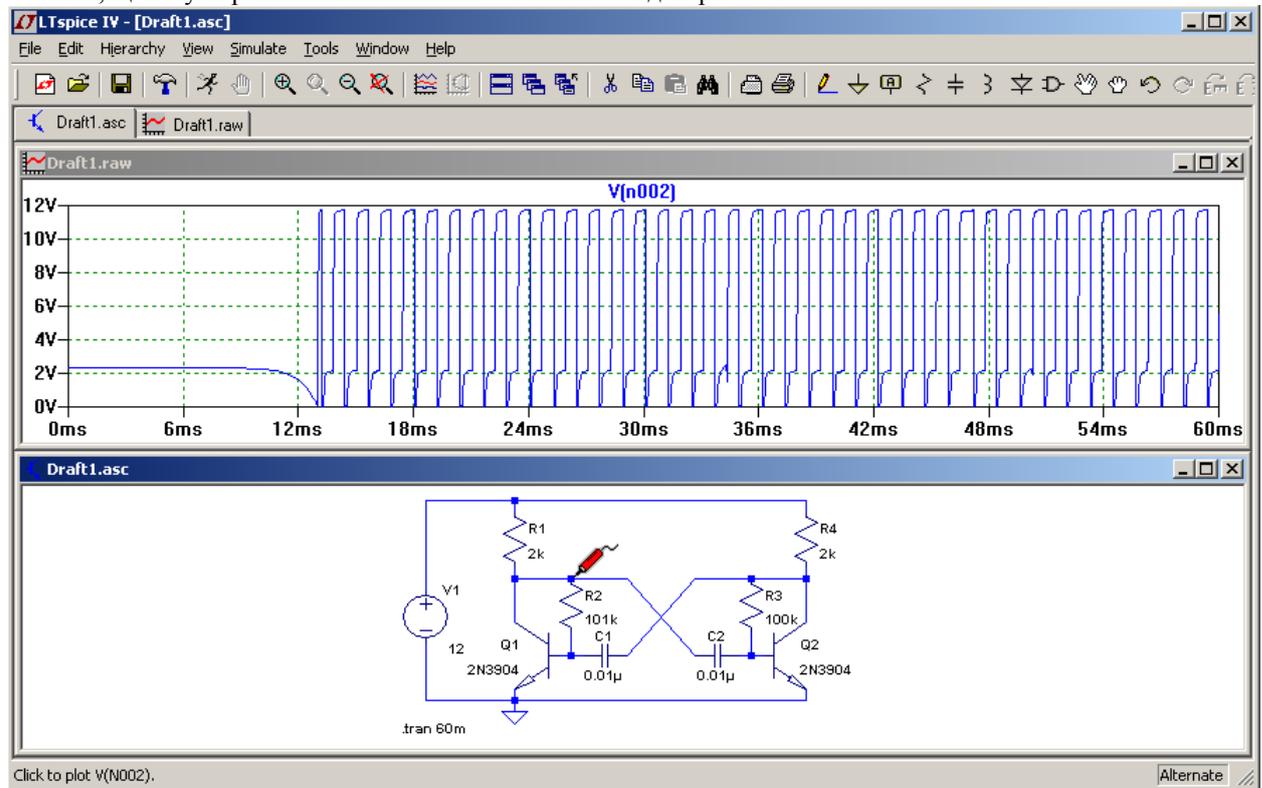


Рис. 18. Диаграмма напряжения на коллекторе транзистора Q1.

В данном случае (рис. 18) отображается напряжение на коллекторе транзистора Q1.

При удалении курсора от выбранного узла, он превратится в крестик и, соответственно, вновь трансформируется в щуп при приближении к любому узлу схемы мультивибратора. По умолчанию плоттер

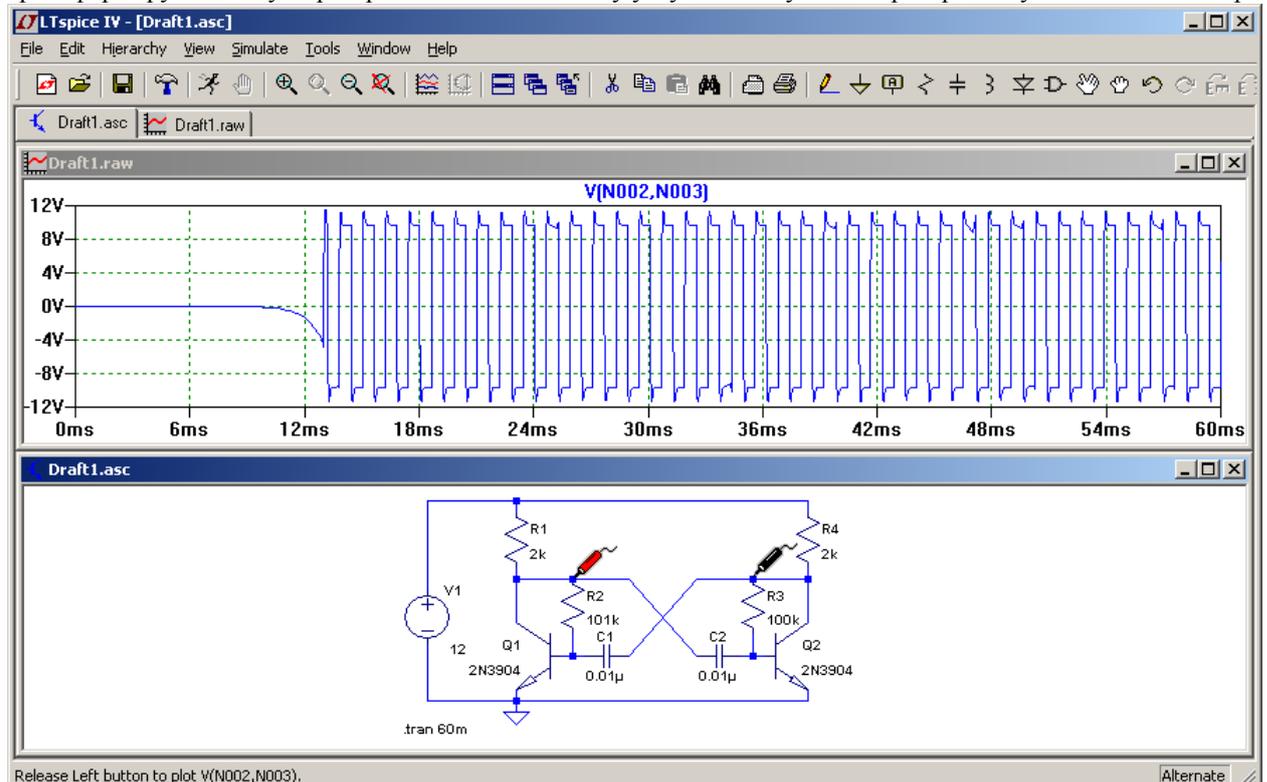


Рис. 19. Диаграмма напряжения между коллекторами транзисторов Q1 и Q2.

Показывает напряжение на выбранном узле, относительно "земли" . Чтобы увидеть напряжение между узлами, следует щёлкнуть левой кнопкой мышки по первому узлу и, не отпуская кнопки мышки, переместить курсор ко второму узлу. По мере перемещения, щуп сначала окрасится в серый цвет, а затем, в районе второго узла, в чёрный цвет. После этого отпускаем левую кнопку мыши. Для примера, на рис. 19 показана диаграмма напряжения между коллекторами транзисторов Q1 и Q2.

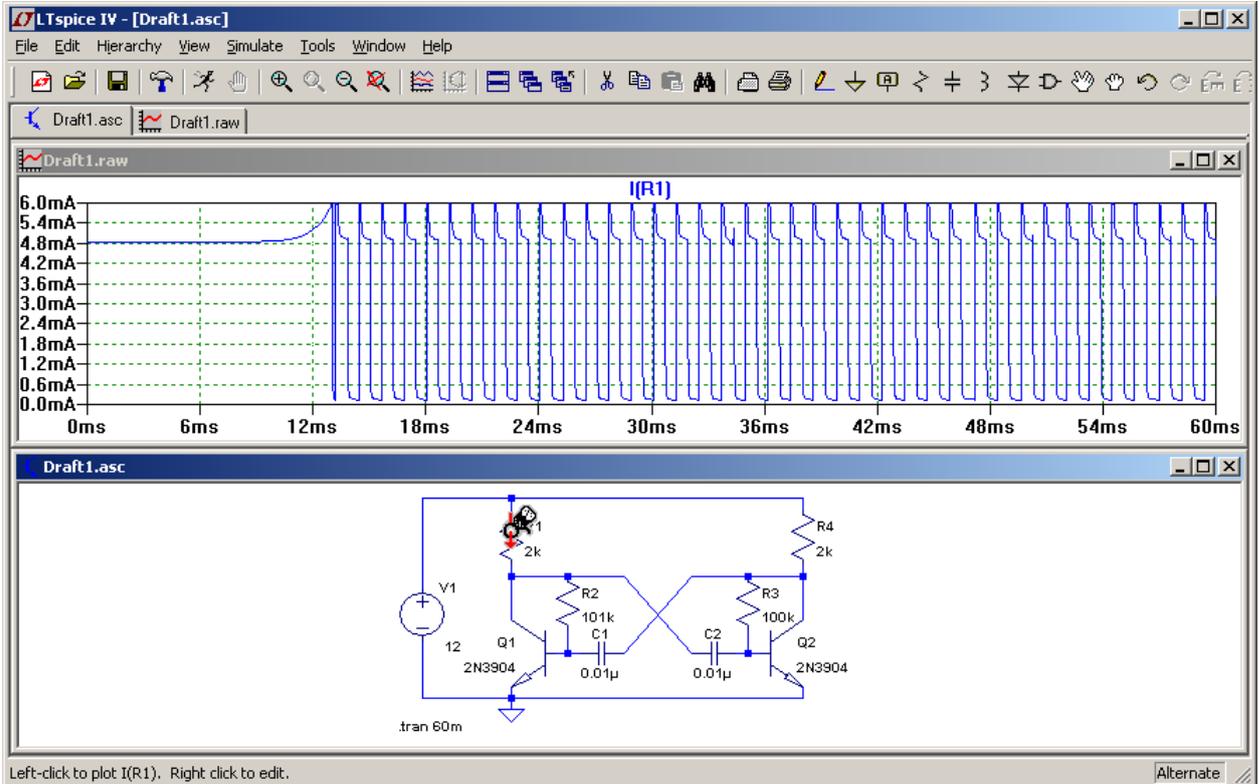


Рис. 20. Диаграмма тока в резисторе R1.

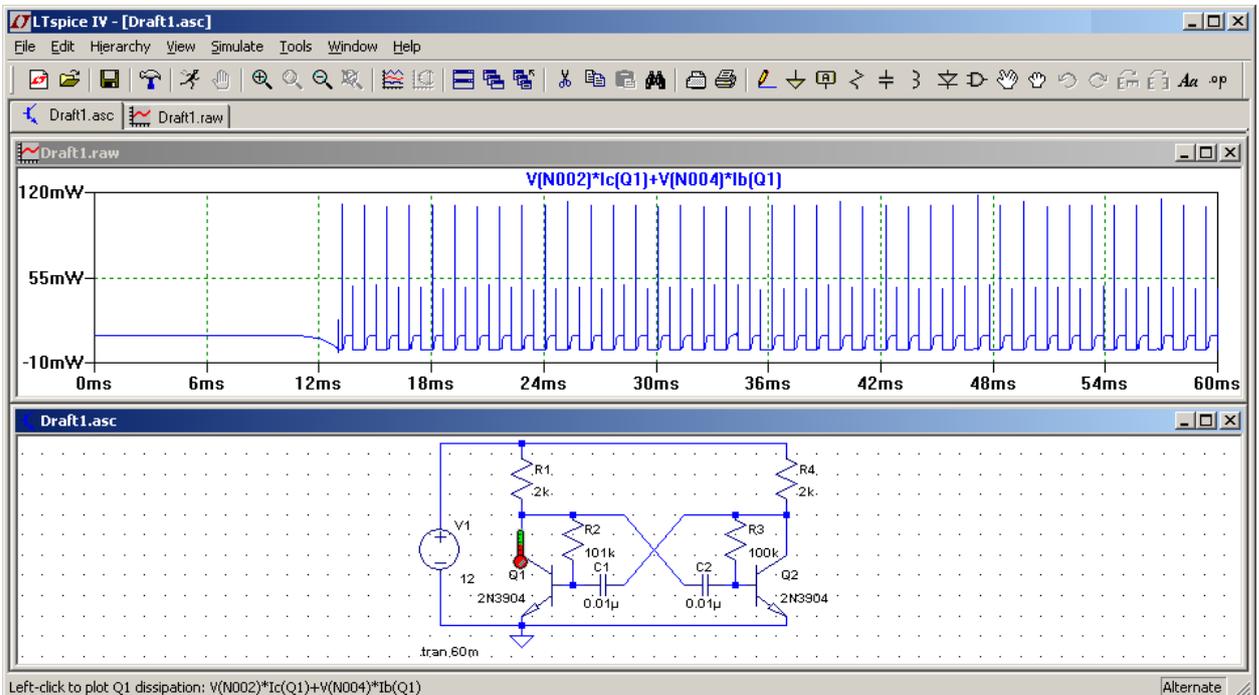


Рис. 21. Диаграмма мощности выделяемой на транзисторе Q1.

Чтобы увидеть токи в компонентах схемы, достаточно навести курсор на компонент или подвести к одному из выводов компонента, имеющего более двух выводов. Курсор трансформируется в токовые клещи



Причём красная стрелочка будет показывать условно положительное направление тока. Теперь, чтобы посмотреть диаграмму тока, достаточно щёлкнуть левой кнопкой мышки. Для примера посмотрим ток в резисторе R1 (рис. 20).

Аналогично току, можно посмотреть диаграмму мгновенной мощности, выделяемой на компоненте. Для этого нужно нажать клавишу <Alt> и, удерживая её, щёлкнуть левой кнопкой мышки по компоненту

или по выводу компонента. Теперь курсор будет похож не на токовые клещи, а на градусник . На рис. 21 показана диаграмма мгновенной мощности, выделяемой на транзисторе Q1.

Вычислить среднее значение мощности, а также средние и действующие значения напряжений и токов можно только после окончания моделирования. Усреднение производится за весь период времени, отображаемый в окне плоттера. Чтобы воспользоваться функцией усреднения, достаточно нажать клавишу <Ctrl> и, удерживая её, щёлкнуть левой кнопкой мышки по интересующему выражению. Для напряжений и токов рассчитываются среднее (Average) и действующее (RMS) значения (рис. 22). Для мощности (рис. 23) рассчитывается средняя (Average) мощность и энергия (Integral) за отображаемый период времени.

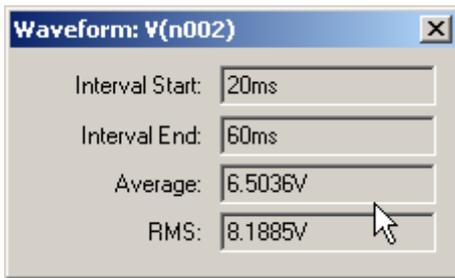
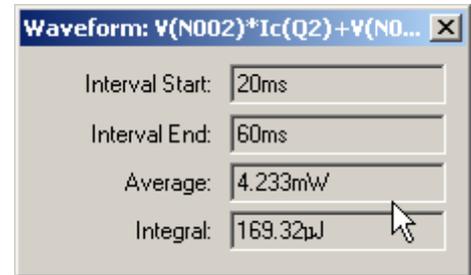


Рис. 22. Среднее и действующее значения параметра за отображаемый период времени.

Рис. 23. Средняя мощность и энергия за отображаемый период времени.

Для настройки временного интервала можно щёлкнуть левой



кнопкой мышки в области окна плоттера, после чего курсор превратится в лупу. Затем, не отпуская левую кнопку мышки, выделить требуемый фрагмент диаграммы.

В качестве альтернативы можно навести курсор на временную ось, после чего он трансформируется в линейку.

Теперь, щёлкнув левой кнопкой мышки, можно вызвать окно настройки горизонтальной оси — **Horizontal Axis** (рис. 24). В этом окне можно выставить левую (**Left**) и правую (**Right**) временные границы, а также цену деления (**tick**). Аналогичным образом можно настраивать верхнюю (**Top**) и нижнюю (**Bottom**) границы для вертикальной оси (рис. 25).

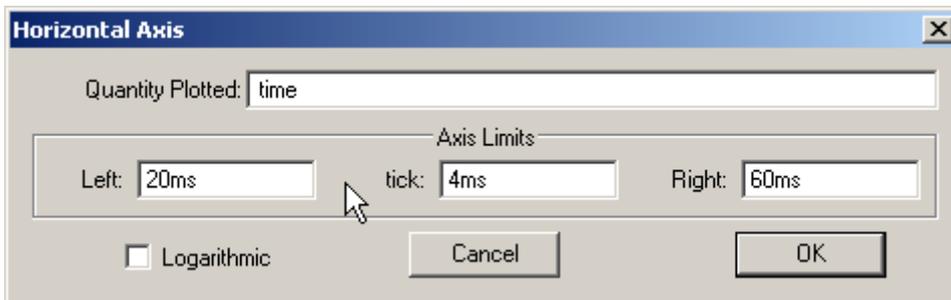


Рис. 24. Меню настройки горизонтальной оси плоттера.

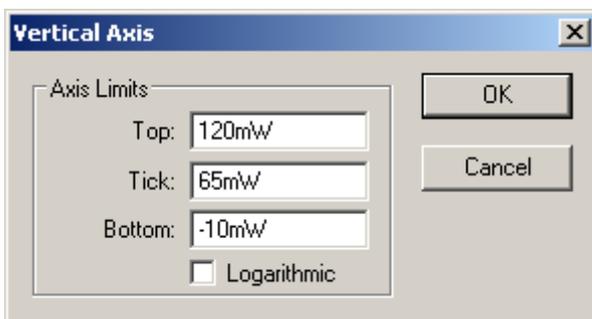


Рис. 25. Меню настройки вертикальной оси плоттера.

В настройках горизонтальной оси, в отличие от оси вертикальной, есть дополнительная строка **Quantity Plotted** (Величина развертки). В эту строку записывается базовая переменная величина, которая формирует горизонтальную развертку в окне плоттера. По умолчанию такой переменной величиной является время, но в качестве неё можно использовать любое другое значение, вычисляемое при моделировании схемы. Описанная возможность далее пригодится при

визуализации различных функциональных зависимостей, характерных для анализируемой схемы.

Например, чтобы увидеть траекторию движения рабочей точки транзистора Q1, нужно отложить по горизонтали напряжение на коллекторе этого транзистора — $V(N002)$. А по вертикали — ток коллектора транзистора Q1, $I_c(Q1)$. То, что получилось, можно увидеть на рис. 26.

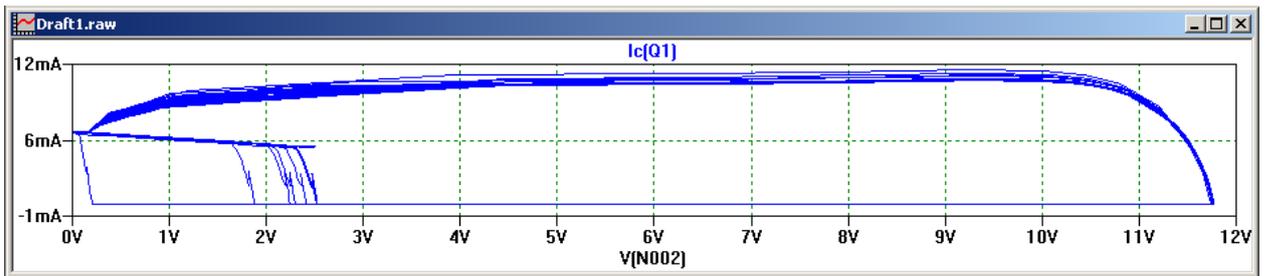


Рис. 26. Траектория рабочей точки транзистора VT1.

На этот раз, немного разобравшись с интерфейсом программы LTspice, займёмся источниками питания. Рассмотрим работу простейшего низковольтного источника постоянного тока, работающего от сети 220 В переменного тока частотой 50 Гц. Источник должен обеспечивать на выходе 12 В при токе нагрузки 0.1 А. Источник состоит из понижающего трансформатора и простейшего однополупериодного выпрямителя с конденсаторным фильтром (рис. 27).

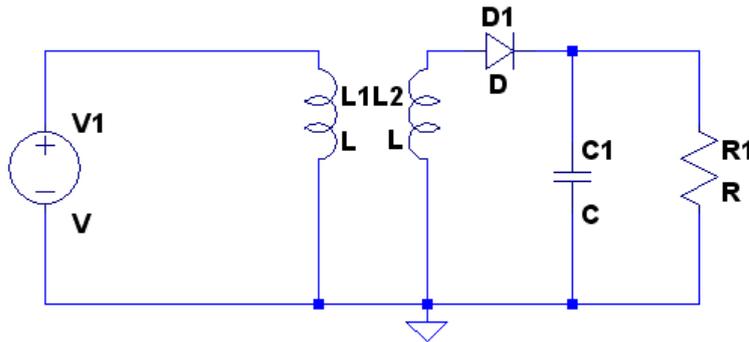


Рис. 27. Низковольтный источник постоянного тока.

Первым делом настроим источник напряжения V1, который имитирует питающую сеть. Щелчком правой кнопки мышки по символу источника вызовем его меню настройки.

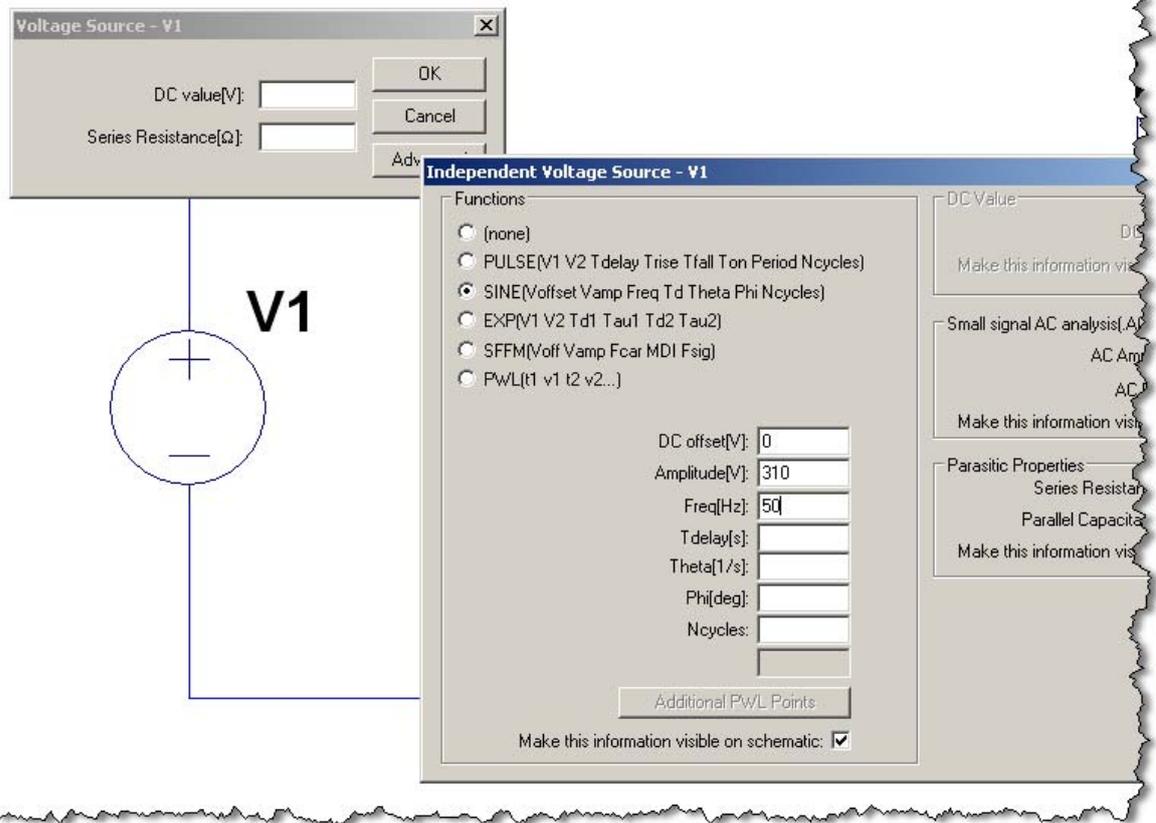


Рис. 28. Меню настройки независимого источника напряжения.

По умолчанию считается, что источник напряжения генерирует постоянное напряжения. Чтобы заставить его генерировать переменное напряжение, перейдём в продвинутый режим настройки, щёлкнув

левой кнопкой мышки по кнопке **Advanced** (Расширенные настройки). После этого появляется меню настройки независимого источника напряжения (Independent Voltage Source) (рис. 28), в котором источнику напряжения назначается функция генератора импульсов (**PULSE**), синусоиды (**SINE**), экспоненты (**EXP**), частотно модулированного синусоидального сигнала (**SFFM**) или генератора сигнала произвольной формы (**PWL**). В последнем случае пользователь может задать любую форму сигнала путём кусочно-линейной аппроксимации. Выбираем функцию генератора синусоиды. Далее назначаем постоянную составляющую (**DC offset**) — 0 В, амплитуду (**Amplitude**) — 310 В и частоту переменного синусоидального напряжения (**Freq**) — 50 Гц. Возможно, в этих настройках определённое неудобство вызывает необходимость указывать амплитудное, а не действующее значение переменного напряжения. Для вычисления амплитудного значения U_{amp} из известного действующего U_{rms} , можно воспользоваться формулой

$$U_{amp} = \sqrt{2} \cdot U_{rms} = 1.414 \cdot 220 \approx 310 \text{ В.}$$

Сетевое напряжение получили, теперь требуется понизить его до 10.5 В. Предполагается, что в последствии, за счёт разницы между действующей и амплитудной составляющих синусоиды, напряжение на конденсаторе C1 (рис. 38) поднимется до уровня 12 В. Попробуем средствами LTspice изготовить трансформатор. Для этого берём две индуктивности L1 и L2, которые будут имитировать индуктивность первичной и вторичной обмоток трансформатора. Но этого недостаточно, надо ещё имитировать связь между обмотками трансформатора. В SPICE принята модель, согласно которой связь между обмотками определяется фиктивным схемным компонентом, который называется коэффициентом связи K (рис. 29). При этом коэффициент связи двух обмоток определяется выражением $K = M12 / \sqrt{L1 \cdot L2}$, где L1, L2 — индуктивности обмоток, а M12 — их взаимная индуктивность. На рис. 29 также присутствуют индуктивности Ls1 и Ls2, которые обычно называются индуктивностями рассеяния и символизируют несвязанные между собой части первичной и вторичной обмоток трансформатора.

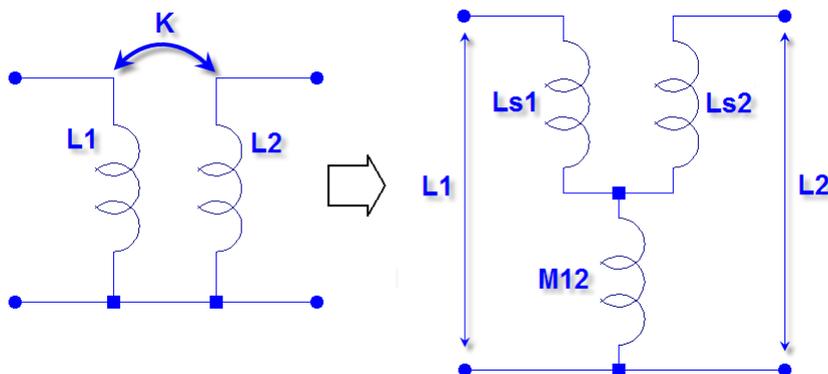


Рис. 29. Моделирование взаимной индуктивности двух обмоток через их коэффициент связи.

Допустимо изменение коэффициента связи в диапазоне $-1 \dots 1$. Если $K = 0$, то связь между обмотками отсутствует, а если $K = 1$, то связь полная. Минус перед коэффициентом связи позволяет поменять местами начало и конец вторичной обмотки трансформатора. Из-за индуктивности рассеяния коэффициент связи реальных трансформаторов меньше единицы и обычно находится в диапазоне $0.9 \dots 0.999$.

Коэффициент связи K размещается непосредственно на схеме в виде SPICE директивы. Для его размещения щёлкнем левой кнопкой мышки по иконке **SPICE Directive** (Директива симулятора)  на панели инструментов. В результате появится окно ввода текста (рис. 30). Вводим следующую строку: K1 L1 L2 0.999, которая означает, что индуктивности L1, L2 связаны между собой, а их коэффициент связи равен 0.999.

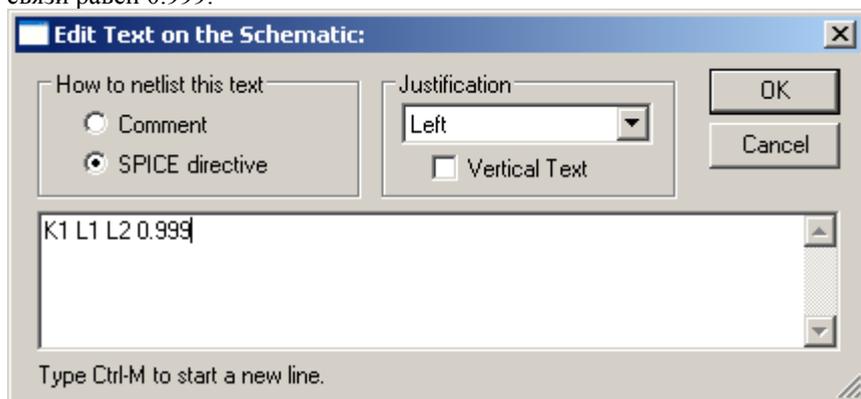


Рис. 30. Создания связи между индуктивностями.

Далее, щёлкнув левой кнопкой мышки по кнопке **OK**, переносим введённую строчку в окно редактора схем (рис. 31).

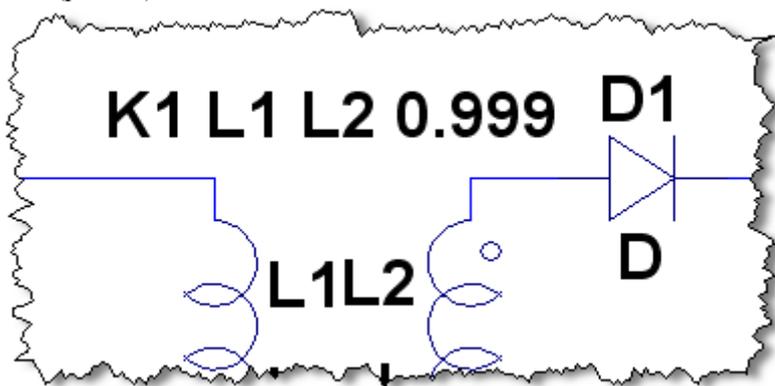


Рис. 31. Размещение директивы связи в окне редактора схем.

Теперь осталось настроить коэффициент трансформации K_{mp} трансформатора. Известно, что индуктивность обмотки пропорциональна квадрату витков этой обмотки. Примем индуктивность первичной обмотки $L1 = 700$ Гн. Следовательно, если $K_{mp} = \frac{W1}{W2} = \frac{U1}{U2} = \frac{220}{10.5} \approx 21$, то $L2 = \frac{L1}{K_{mp}^2} = \frac{700}{21^2} = 1.59$ Гн.

Описанным способом можно создавать не только двух-, но и многообмоточные трансформаторы. Например, директива $K1 \ L1 \ L2 \ L3 \ L4 \ 1.0$ создаёт четырехобмоточный трансформатор. Многократные объявления коэффициента связи внутри одного трансформатора недопустимы. В этом случае LTspice потребует использования одной директивы коэффициента связи.

Модель индуктивности в LTspice имеет вид, представленный на рис. 32. Здесь, кроме индуктивности (Inductance), учитывается масса паразитных параметров:

- R_{ser} (Series Resistance) - последовательное сопротивление обмотки;
- R_{par} (Parallel Resistance) - сопротивление потерь между выводами обмотки;
- C_{par} (Parallel Capacitance) - межвитковая ёмкость.

Настроить основные и паразитные параметры модели можно в окне настройки (рис. 33), которое вызывается щелчком правой кнопки мышки по индуктивности L1 (или L2). Здесь индуктивность измеряется в генри, ёмкость — в фарадах, а сопротивление — в омах. Опцией **Show Phase Dot** (Отметить точкой начало обмотки) можно делать видимой и скрывать индикацию начала обмотки.

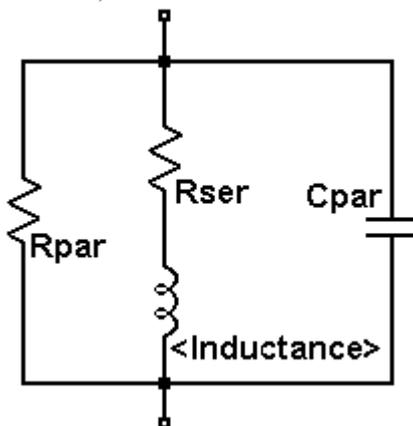


Рис. 32. Модель индуктивности, используемая в программе LTspice.

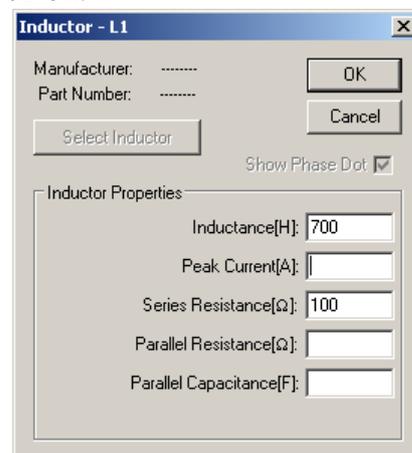
Указание паразитных параметров компонентов позволяет получить более реалистичную картину моделирования. Некоторые паразитные параметры LTspice определяет сам, если пользователь не указывает их конкретную величину. Например, по умолчанию, LTspice считает, что $R_{ser} = 0.001$ Ом.

Устанавливаем индуктивность $L1 = 700$ Гн и последовательное сопротивление $R_{ser} = 100$ Ом (рис. 33). Для

$L2$ соответственно $L2 = 1.59$ Гн и $R_{ser} = 1$ Ом.

Выберем конденсатор C1 и установим значение ёмкости 470 мкФ. Обычно в подобных устройствах устанавливают электролитические конденсаторы, которые имеют достаточно высокое внутреннее сопротивление, поэтому устанавливаем последовательное сопротивление $R_{ser} = 1$ Ом.

Рис. 33 Меню настройки индуктивности.



Так как источник должен обеспечивать 12 В при токе нагрузки 0.1 А, то $R1 = \frac{12}{0.1} = 120$ Ом.

Для диода оставляем идеальную модель, выбранную по умолчанию. При желании можно выбрать модель реального диода из встроенной библиотеки LTspice. Для этого щелчком правой кнопки мышки по символу диода вызываем его окно настройки. Затем вызываем список доступных моделей, щёлкнув левой кнопкой мышки по кнопке **Pick New Diode** (Выбрать новый диод).

Полностью настроенная схема изображена на рис. 34.

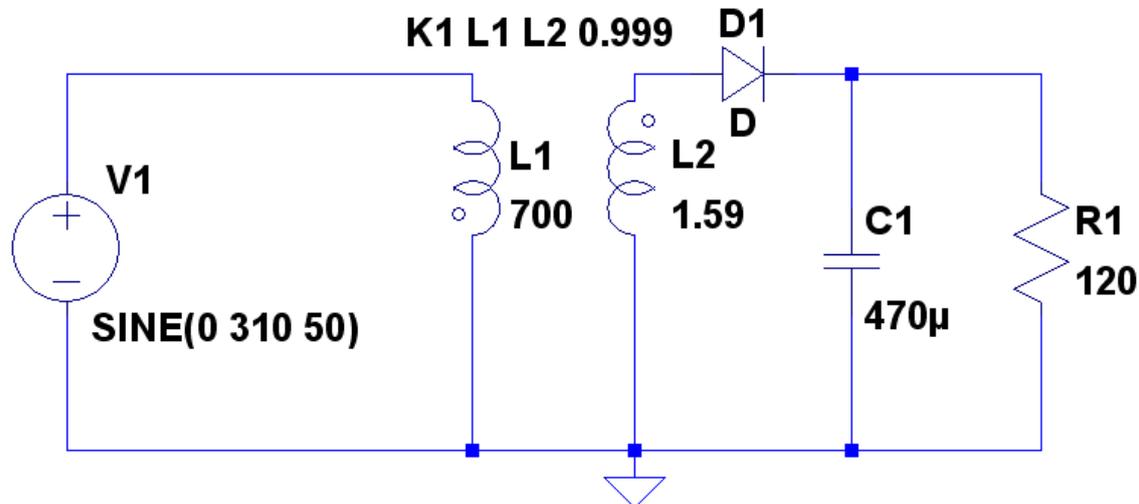


Рис. 34. Схема модели маломощного источника постоянного тока.

Щёлкнув левой кнопкой мышки по символу **Run**  на панели инструментов, попадаем в окно **Edit Simulation Command**, где устанавливаем время окончания анализа переходного процесса **Stop Time** равным 5 с и время начала записи результатов моделирования **Time to Start Saving Data** — 4.96 с. В этом случае в окне плоттера будут выведены последние два периода работы схемы, а предшествующий им переходный процесс останется вне поля зрения. На рис. 35 изображено состояние после окончания моделирования. В окне плоттера выведены диаграммы: $V(n002)$ — напряжение на вторичной обмотке трансформатора, $V(n003)$ — напряжение на резисторе R1, $I(L1) * 21$ — ток первичной обмотки, приведённый ко вторичной обмотке (умножен на коэффициент трансформации), $-I(L2)$ — ток вторичной обмотки (символ минус "-" использован для изменения полярности отображаемого тока). Видно, что, в момент, когда напряжение на вторичной обмотке трансформатора превышает напряжение нагрузки, во вторичной обмотке возникают короткие импульсы тока амплитудой до 900 мА. Ток в первичной обмотке трансформатора отличается от тока вторичной. Видно, что в паузах между импульсами, он меняет свою полярность. Такое поведение тока первичной обмотки трансформатора характерно для случая использования однополупериодного выпрямления. Постоянный ток нагрузки, протекает через вторичную обмотку трансформатора, а трансформатор, как известно, не может трансформировать постоянный ток. В результате, в первичной обмотке возникает размагничивающий ток отрицательной полярности, который компенсирует постоянную составляющую входного тока.

В данном примере мы использовали идеализированную линейную модель трансформатора. К сожалению, идеализированная модель не всегда уместна, т. к. не учитывает насыщение и гистерезис, которые присущи магнитным сердечникам реальных трансформаторов. Например, в рассмотренной ситуации, диаграмма тока в первичной обмотке реального трансформатора, скорее всего, будет сильно отличаться от диаграммы, полученной для идеализированной модели.

В LTspice предусмотрено два способа задания нелинейности индуктивности:

- **первый способ** позволяет аналитически задавать зависимости потока магнитной индукции от тока в обмотке катушки индуктивности;
- **второй способ** позволяет использовать упрощённую гистерезисную модель магнитного сердечника, которую впервые предложил Джон Чан.

Модель использует только основные параметры петли гистерезиса, перечисленные в таблице 3 и показанные на рис. 36.

Таблица 3. Параметры петли гистерезиса ферромагнитного материала

Параметр	Описание	Единицы измерения
H_c	Коэрцитивная сила	А/м
B_r	Остаточная индукция	Тл
B_s	Индукция насыщения	Тл

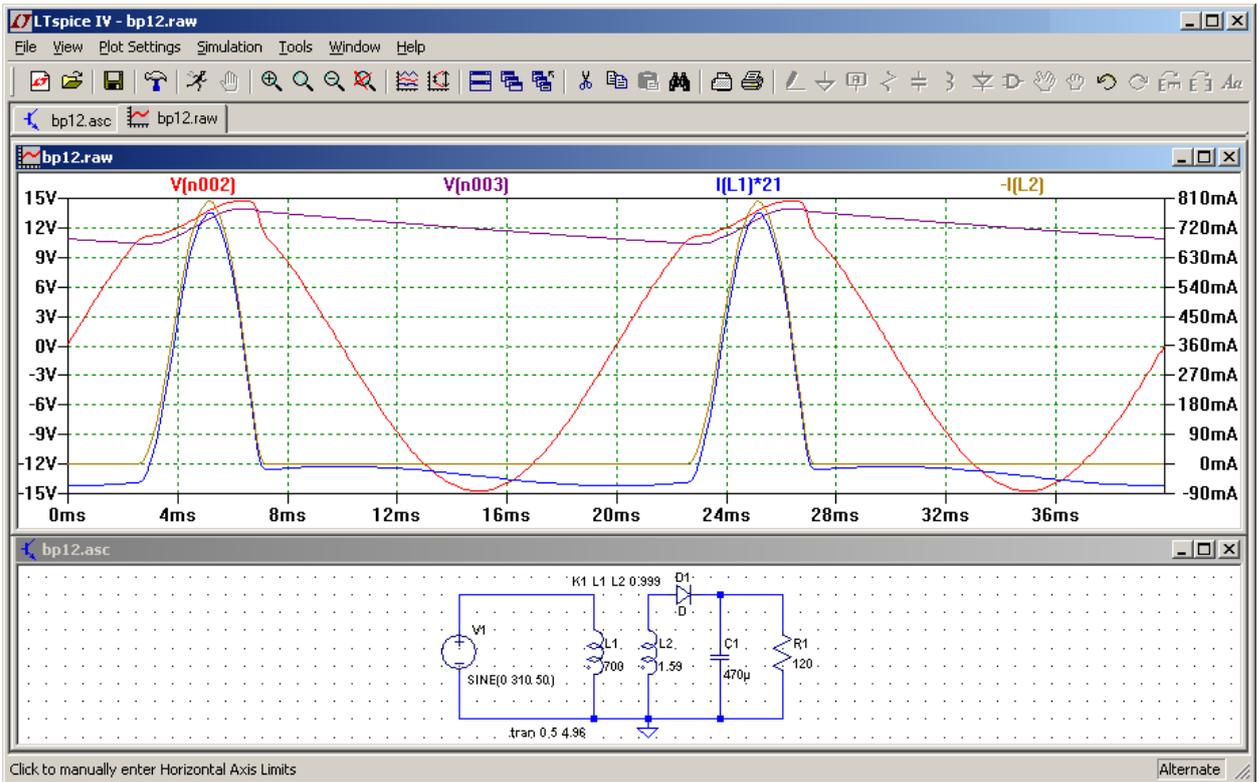


Рис. 35. Состояние после окончания моделирования источника постоянного тока.

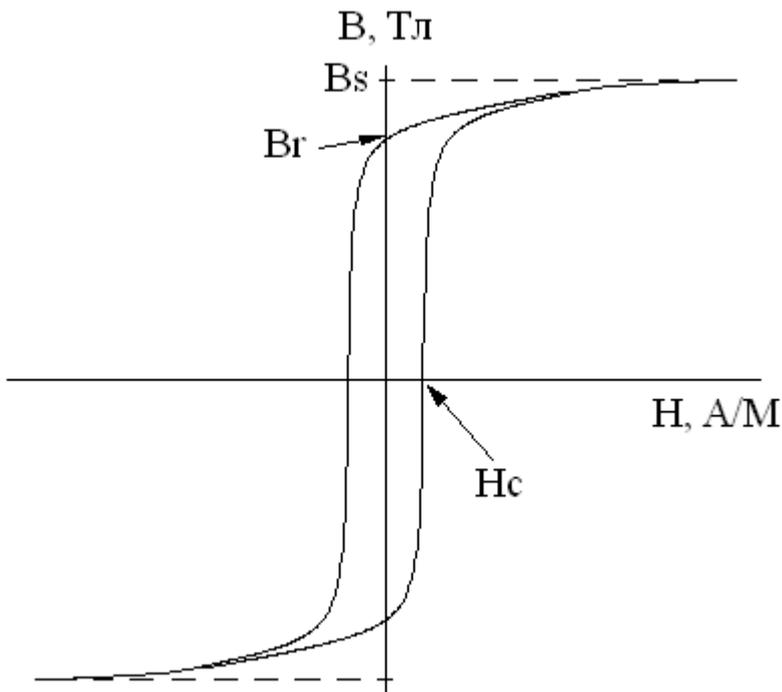


Рис. 36. Параметры петли гистерезиса магнитного материала.

Наряду с параметрами петли гистерезиса, при описании нелинейной индуктивности, учитываются линейные размеры сердечника, а также количество витков катушки (табл. 4).

Таблица 4. Конструктивные параметры нелинейной индуктивности

Параметр	Описание	Единицы измерения
L_m	Средняя длина магнитной линии (исключая немагнитный зазор)	м
L_g	Длина немагнитного зазора	м
A	Сечение сердечника	м ²
N	Количество витков	—

Согласитесь со мной, что второй способ задания нелинейной индуктивности более привлекателен, т. к. он использует минимальное количество справочных данных, а также понятные и легко контролируемые параметры самого сердечника и катушки.

На частоте 50 Гц в трансформаторах обычно применяется электротехническая сталь с толщиной листа 0.27—0.5 мм. Для холоднокатаной электротехнической стали типов 3411—3413 (Э310—Э330) можно использовать следующие параметры петли гистерезиса: $H_c = 95$ А/м, $B_r = 1.2$ Тл, $B_s = 1.75$ Тл.

Примем следующие конструктивные параметры нелинейной индуктивности, предназначенной для моделирования параметров трансформатора источника постоянного тока: $L_m = 0.1$ м, $L_g = 0$ м,

$$A = 1.1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, N = 6000 \text{ витков.}$$

В основе модели нелинейного трансформатора (на рис. 37 обведен пунктирной линией) лежит всё тот же идеальный трансформатор L1, L2. Здесь он служит для имитации гальванической развязки и коэффициента трансформации. Нелинейная индуктивность L3, подключена параллельно первичной (или вторичной) обмотке идеального трансформатора. Чтобы не возникла ошибка моделирования (запрет на параллельное включение индуктивностей), нужно последовательно с индуктивностью L3 включить низкоомное сопротивление R2 (или указать последовательное сопротивление в меню настройки индуктивности).

Так как обмотки идеального трансформатора теперь полностью связаны, то последовательно с первичной и вторичной обмотками надо включить индуктивности рассеяния L4 и L5, которые имитируют поля рассеяния реального трансформатора. Индуктивности L1, L2, L4, L5 — линейные и настраиваются описанным ранее способом, согласно табл. 5.

Таблица 5. Значения параметров индуктивностей в модели трансформатора

Поз. обозначение	Inductance[H] (Индуктивность[Гн])	Series Resistance[Ω] (Последовательное сопротивление[Ом])
L1	700	—
L2	1.59	—
L4	350m	100
L5	0.8m	1

Теперь, щёлкнув правой кнопкой мышки по символу L3, вызовем меню настройки и впишем определённый ранее перечень параметров в строку **Inductance** (Индуктивность): $H_c = 95$, $B_r = 1.2$, $B_s = 1.75$, $L_m = 0.1$, $L_g = 0$, $A = 0.00011$, $N = 6000$.

После ввода всех параметров, при помощи иконки  на панели инструментов, раздвинем позиционные обозначения и строки параметров таким образом, чтобы они друг друга не заслоняли и хорошо читались (рис. 37).

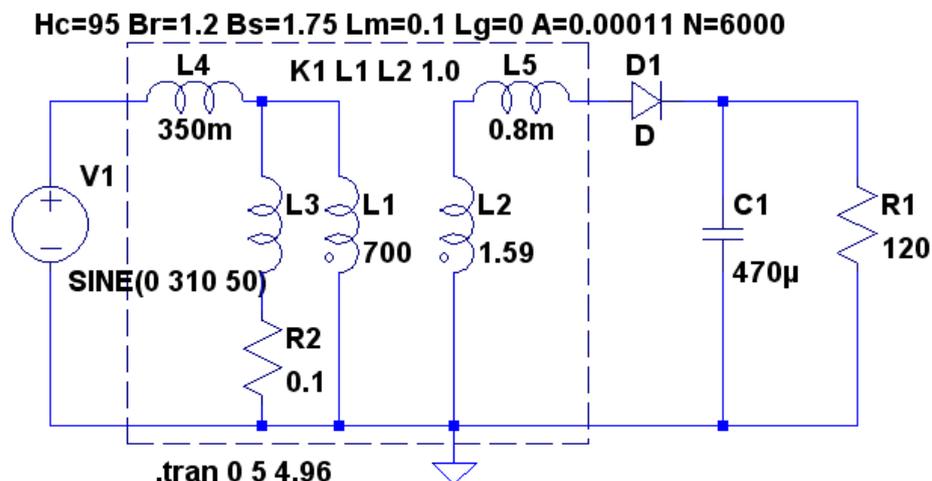


Рис. 37. Схема модели маломощного источника постоянного тока с нелинейным трансформатором.

На рис. 38 изображено состояние после окончания моделирования. В окно плоттера выведены диаграммы:

- $V(n004)$ — напряжение на вторичной обмотке трансформатора;
- $V(n005)$ — напряжение на резисторе R1;
- $I(L4)*21$ — ток первичной обмотки, приведённый ко вторичной обмотке (умножен на коэффициент трансформации);
- $I(L5)$ — ток вторичной обмотки.

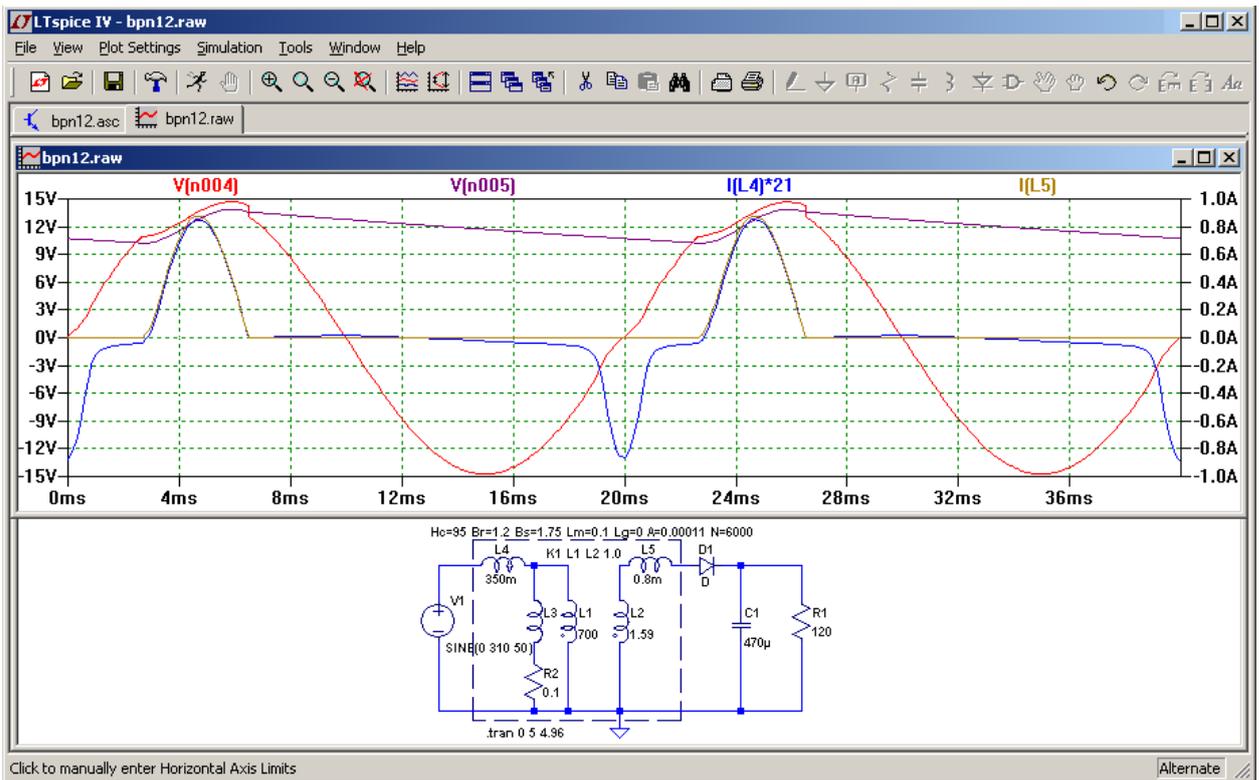


Рис. 38. Состояние после окончания моделирования источника постоянного тока с нелинейным трансформатором.

На диаграмме тока первичной обмотки $I(L4) \cdot 21$, кроме небольшой составляющей намагничивания, виден отрицательный импульс тока, который отсутствовал в случае использования линейного трансформатора. Этот импульс не связан с током нагрузки (в это время ток во вторичной обмотке отсутствует) и, следовательно, вызван односторонним насыщением сердечника трансформатора. Насыщение происходит в конце отрицательного полупериода сетевого напряжения, когда индукция в сердечнике достигает своего максимального значения.

К сожалению, в LTspice нет встроенной функции, позволяющей отобразить траекторию перемагничивания магнитного сердечника. Но данную проблему можно решить, добавив простейший тестовый узел в модель источника питания (рис. 39).

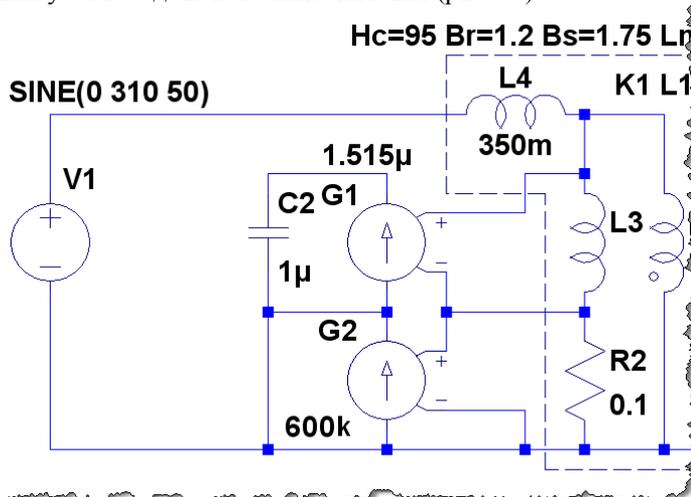


Рис. 39. Тестовый узел, позволяющий наблюдать траекторию перемагничивания магнитного сердечника.

Тестовый узел построен на двух источниках тока, G1 и G2, управляемых напряжением, которые используются для измерения и нормирования отображаемых параметров.

Известно, что скорость изменения индукции в сердечнике прямо пропорциональна приложенному напряжению U и обратно пропорциональна площади сечения A и виткам обмотки N .

$$\frac{dB}{dt} = \frac{U}{A \cdot N}$$

Следовательно, подав напряжение U на вход интегратора, на его выходе мы получим сигнал, пропорциональный индукции в сердечнике. В нашем случае роль интегратора возложена на узел, состоящий из источника G1 и конденсатора C2. Коэффициент передачи управляемого источника тока G1, обеспечивающий выходное напряжение интегратора, равное индукции, можно вычислить по формуле:

$$K_{G1} = \frac{C2}{A \cdot N} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{110 \cdot 10^{-6} \cdot 6000} = 1.515 \cdot 10^{-6}$$

Вычисленное значение коэффициента передачи необходимо записать в строке **Value** меню настройки управляемого источника тока G1.

Коэффициент передачи управляемого источника тока G2, обеспечивающий выходной ток, равный напряженности в сердечнике нелинейного трансформатора, можно вычислить по формуле:

$$K_{G2} = \frac{N}{R2 \cdot Lm} = \frac{6000}{0.1 \cdot 0.1} = 6 \cdot 10^5$$

Вычисленное значение коэффициента передачи необходимо записать в строке **Value** меню настройки управляемого источника тока G2.

Для устранения дрейфа показаний интегратора G1, C2 необходимо установить параметр вычисления переходного процесса Maximum Timestep 10 мс или меньше. В настройках горизонтальной оси, в строке **Quantity Plotted** (Величина развертки), вместо **time** впишем "I(G2)". По вертикали выводим напряжение на выходе интегратора, щёлкнув левой кнопкой мышки по верхнему выводу конденсатора C2 (рис. 40).

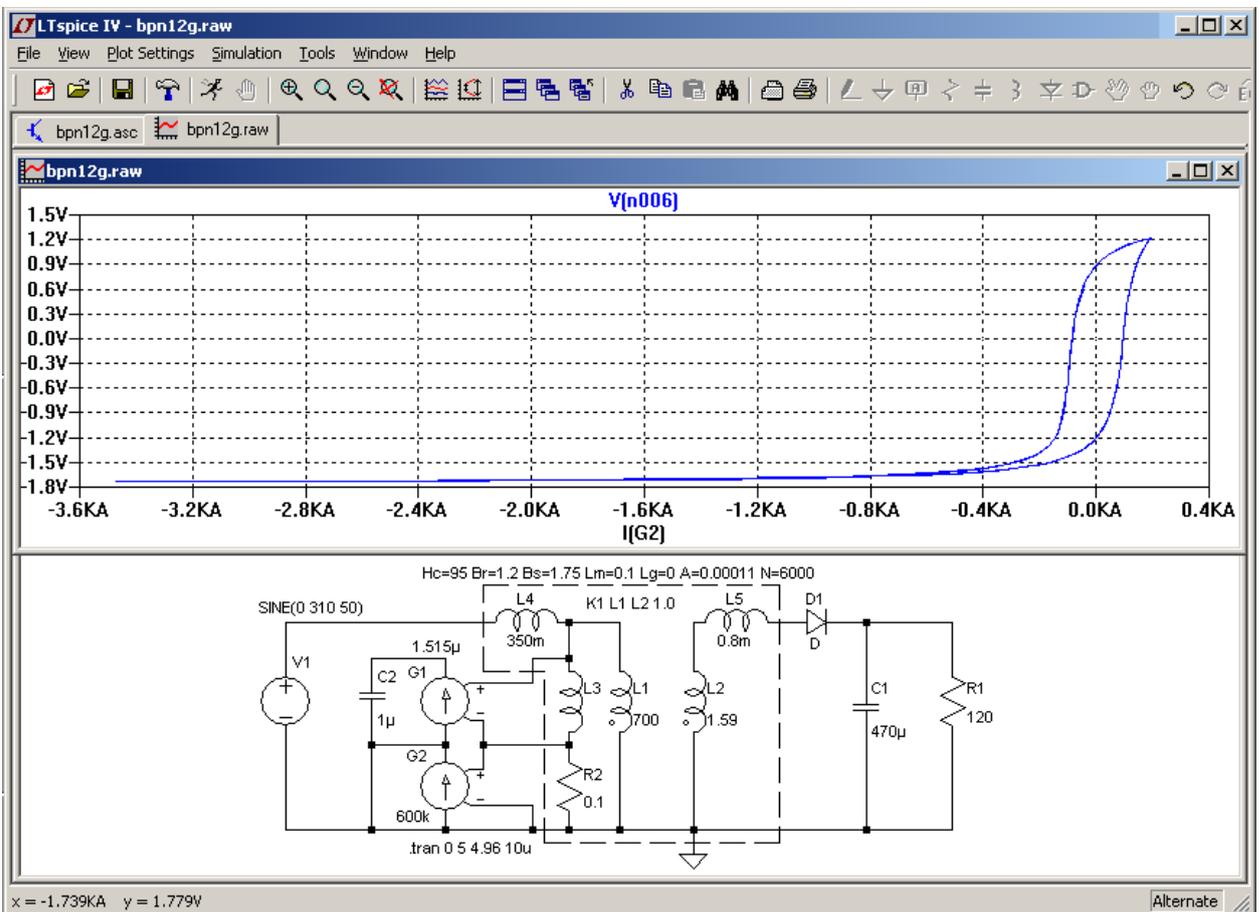


Рис. 40. Траектория перемagnetизации сердечника нелинейного трансформатора.

Из диаграммы перемagnetизации (рис. 40) видно, что сердечник подвержен сильному одностороннему насыщению. В направлении насыщения напряженность магнитного поля достигает 3500 А/м. Очевидно, одностороннее насыщение вызвано постоянной составляющей выходного тока источника, который протекает через вторичную обмотку трансформатора. Чтобы убедиться в справедливости наших подозрений, заменим однополупериодный выпрямитель на двухполупериодный (рис. 41).

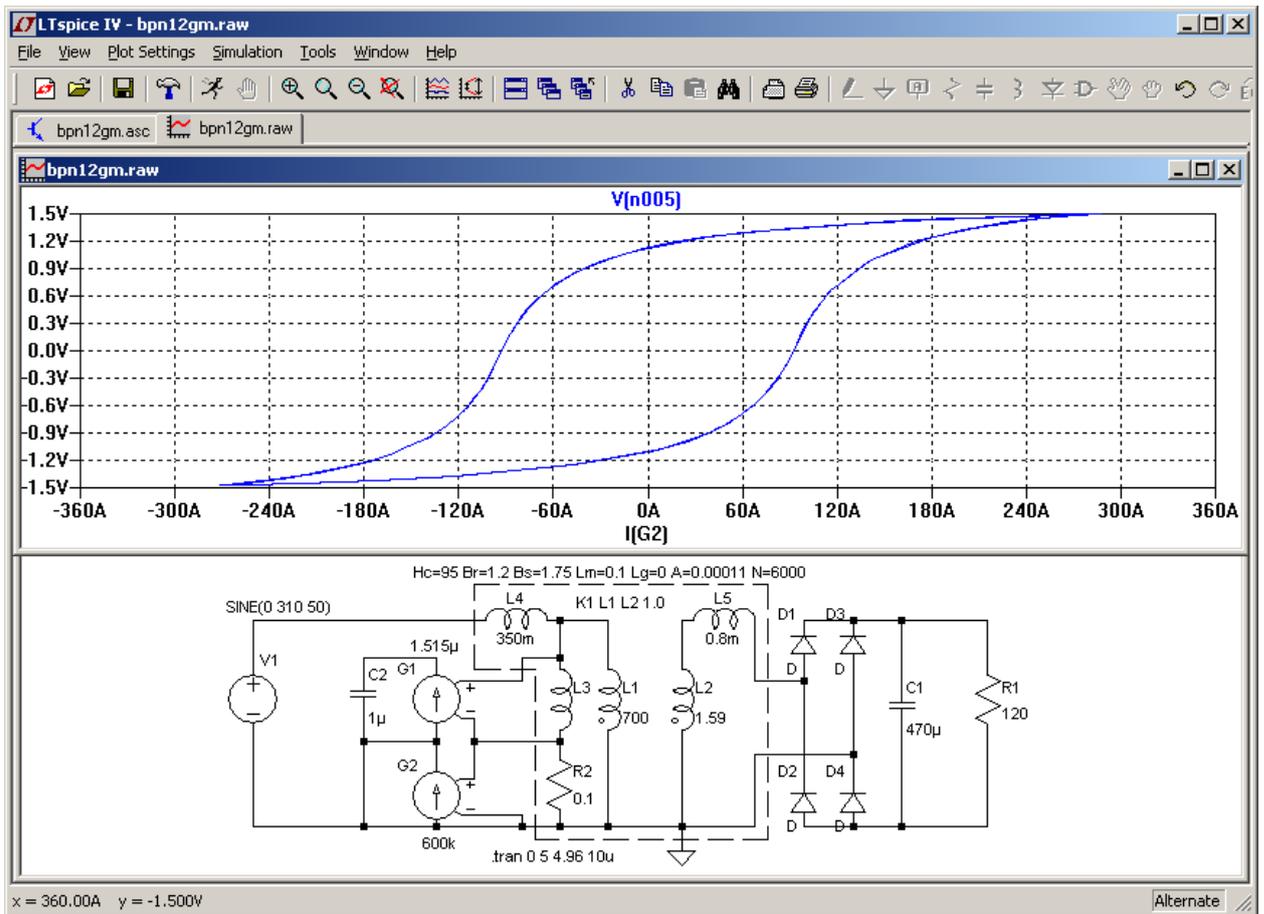


Рис. 41. Траектория перемагничивания сердечника трансформатора в источнике постоянного тока с двухполупериодным выпрямителем.

На рис. 40 изображено состояние после окончания моделирования источника постоянного тока с двухполупериодным выпрямителем. В данном случае цикл перемагничивания сердечника симметричен и не выходит в область насыщения. Отсюда можно сделать вывод, что использование однополупериодного выпрямителя на выходе трансформатора недопустимо, т. к. вызывает одностороннее насыщение его сердечника.

Список используемых информационных источников:

1. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. — М.: Солон. — 1999.
2. Хайнеман Роберт. PSPICE. Моделирование работы электронных схем. — М.: ДМК. — 2005.
<http://forest2.homeip.net/Electronics/extra.rar>
4. <http://tech.groups.yahoo.com/group/LTspice/>
5. <http://valvol.ru/topic36.html>
6. http://valvolodin.narod.ru/soft/sp_rdoc.rar
7. <http://www.linear.com>
8. <http://www.linear.com/designtools/softwareRegistration.jsp>
9. <http://www.linear.com/software/scadpdf>

Окончание. Начало в № 11 `2008

Программа схемотехнического моделирования SwitcherCAD III

Михаил ПУШКАРЕВ

В данной части статьи — продолжение описания моделей компонентов на языке LTSpice.

МОП-транзистор

Имена компонента: NMOS, NMOS3, PMOS, PMOS3, VDMOS.

В LTSpice есть две существенно отличающиеся модели МОП-транзисторов: модель интегрального МОП-транзистора и новая модель силового вертикального МОП-транзистора с двойной диффузией.

Интегральный МОП-транзистор

Синтаксис: Mxxx <порт стока> <порт затвора> <порт истока> <порт подложки> <имя модели> [m=<значение>] [L=<значение>] [W=<значение>] [AD=<значение>] [AS=<значение>] [PD=<значение>] [PS=<значение>] [NRD=<значение>] [NRS=<значение>] [off] [Ic=<Vds, Vgs, Vbs>] [temp=<температура>].

Например:

```
M1 Nd Ng Ns 0 MypMOSFET
.model MypMOSFET NMOS(KP=.001)
```

```
M1 Nd Ng Ns Nb MypMOSFET
.model MypMOSFET PMOS(KP=.001)
```

Мощный вертикальный МОП-транзистор с двойной диффузией

Синтаксис: Mxxx <порт стока> <порт затвора> <порт истока> <имя модели> [L=<значение>] [W=<значение>] [m=<значение>] [off] [IC=<Vds, Vgs, Vbs>] [temp=<температура>].

Например:

```
M1 Nd Ng Ns Si4410DY
.model Si4410DY VDMOS(Rd=3m Rs=3m Vto=2.6 Kp=60
Cgdmax=1.9n Cgdmin=50p Cgs=3.1n Cjo=1n Is=5.5p Rb=5.7m)
```

Описание модели МОП-транзистора определяет рассматриваемый тип транзистора. Ключевые слова модели NMOS и PMOS определяют интегральный *n*- или *p*-канальный МОП-транзистор. Ключевое слово модели VDMOS определяет мощный вертикальный МОП-транзистор с двойной диффузией.

Интегральные МОП-транзисторы — устройства с четырьмя выводами Nd, Ng, NS и Nb, соответственно, это выводы стока, затвора, истока и подложки. L и W — длина и ширина канала в метрах. AD и AS — площади диффузионных областей стока и истока в квадратных метрах. Отметим, что суф-

фик **u** определяет мкм, а **p** — мкм². Если какой-либо из параметров L, W, AD или AS не определен, используется значение по умолчанию. По умолчанию PD и PS равны нулю, а NRD и NRS равны единице. Ключевое слово **off** указывает на наличие начальных условий при DC-анализе. Начальные условия Ic = VDS, VGS, VBS предназначены для .TRAN-анализа с модификатором UIC, когда анализ переходного процесса желательно начать в отличной от статической рабочей точке. Дополнительная величина TEMP задает рабочую температуру конкретного устройства и аннулирует для него задание температуры в управляющей строке .OPTION. Указать температуру можно только для МОП-транзисторов уровней 1, 2, 3 и 6, но не для устройств BSIM уровней 4, 5 или 8.

Физические параметры МОП-транзисторов перечислены в таблице 28.

Таблица 28. Физические параметры МОП-транзистора

Обозначение	Параметр	Единица измерения
L	Длина канала	м
W	Ширина канала	м
AD	Площадь диффузионной области стока	м ²
AS	Площадь диффузионной области истока	м ²
PD	Периметр диффузионной области стока	м
PS	Периметр диффузионной области истока	м
NRD	Удельное поверхностное сопротивление стока	—
NRS	Удельное поверхностное сопротивление истока	—

LTSpice поддерживает семь различных моделей интегральных МОП-транзисторов и одну модель мощного вертикального с двойной диффузией МОП-транзистора. Для интегральных МОП-транзисторов параметр модели LEVEL указывает на используемую модель. По умолчанию этот параметр равен единице.

Характеристики постоянного тока МОП-транзисторов уровней с 1-го по 3-й определены параметрами VTO, KP, LAMBDA, PHI и GAMMA. Эти параметры рассчитываются по известным параметрам процесса (NSUB, TOX, ...), при этом пользовательские значения всегда аннулируются. VTO положительно (отрицательно) для обогащенных и отрицательно (положительно) для обедненных *n*-канальных (*p*-канальных) приборов.

Накопление заряда моделируется тремя постоянными емкостями CGSO, CGDO и CGBO, которые представляют собой емкости перекрытия, тонкопленочные нелинейные конденсаторы, распределенные над затвором, истоком, стоком, и нелинейные емкости обедненного слоя обоих переходов с подложкой. Они, в свою очередь, подразделяются на основные и периферические, которые изменяются с приложенным к переходам напряжением с коэффициентами MJ и MJSW соответственно и определены параметрами CBD, CBS, CJ, CJSW, MJ, MJSW и PB. Эффект накопления заряда описывается моделью емкости, линейно зависящей от напряжения, предложенной Мейером. Эффекты накопления заряда в тонком окисле отличаются для модели Level = 1. Эти зависящие от напряжения емкости подключаются, только если задана Tox.

Параметры, описывающие переходы, несколько перекрываются, например, обратный ток может быть специфицирован либо через Is (А) либо через Js (А/м²). Поскольку первое — абсолютная величина второго, умноженного на AD и AS, то имеем обратные точки переходов стока и истока соответственно. Это относится и к емкостям переходов при нулевом смещении CBD и CBS (Ф) в одном варианте и CJ (Ф/м²) в другом. Паразитные последовательные сопротивления стока и истока могут быть выражены как RD и RS (Ом) или RSH (Ом/кв.), последнее умножается на количество квадратов NRD и NRS, приходящихся на длину элемента прибора.

Параметры моделей МОП-транзисторов уровней 1, 2 и 3 перечислены в таблице 29.

Дискретный вертикальный МОП-транзистор с двойной диффузией (ДМОП), обычно используемый в ИИП, ведет себя качественно по-другому, чем вышеупомянутые модели интегральных МОП-транзисторов. В частности, встроенный диод ДМОП-транзистора подключен к внешним выводам иначе, чем диод подложки интегрального МОП-транзистора, а нелинейная емкость затвор-сток (Cgd) не может быть смоделирована простым масштабированием емкостей моделей интегральных МОП-транзисторов. В ДМОП-транзисторе Cgd резко изменяется в окрестности нулевого напряжения затвор-исток (Vgd). Когда напряжение Vgd отрицательно, Cgd физиче-

Таблица 29. Параметры модели интегрального МОП-транзистора

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию	Пример
Af	Показатель степени фликкер-шума	—	1	1,2
Cbd	Емкость перехода сток–подложка при нулевом смещении	фФ	0	20
Cbs	Емкость перехода исток–подложка при нулевом смещении	фФ	0	20
Cgbo	Удельная емкость перекрытия затвор–подложка	Ф/м	0	2×10^{-10}
Cgdo	Удельная емкость перекрытия затвор–сток	Ф/м	0	4×10^{-11}
Cgso	Удельная емкость перекрытия затвор–исток	Ф/м	0	4×10^{-11}
Cj	Удельная емкость переходов сток (исток) – подложка	Ф/м ²	0	2×10^{-4}
Cjsw	Удельная емкость боковой поверхности переходов сток (исток) – подложка при нулевом смещении	пФ/м	0	1
Delta	Коэффициент влияния ширины канала на пороговое напряжение (уровни 2 и 3)	—	0	1
Eta	Коэффициент влияния напряжения сток–исток на пороговое напряжение (только уровень 3)	—	0	1
Fc	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода	—	0,5	
Gamma	Коэффициент влияния потенциала подложки на пороговое напряжение	V ^{1/2}	0	0,37
Is	Ток насыщения переходов сток (исток) – подложка	A	1×10^{-14}	1×10^{-15}
Js	Плотность тока насыщения переходов сток (исток) – подложка	A/м ²	0	1×10^{-8}
Kappa	Параметр модуляции длины канала напряжением сток–исток (только уровень 3)	—	0,2	0,5
Kf	Коэффициент фликкер-шума	—	0	1×10^{-26}
Kp	Крутизна	A/B ²	2×10^{-5}	3×10^{-6}
Lambda	Параметр модуляции длины канала (только для уровней 1 и 2)	1/B	0	0,02
Ld	Боковая диффузия	мкм	0	0,8
Mj	Коэффициент плавности переходов сток (исток) – подложка	—	0,5	0,5
Mjsw	Коэффициент наклона боковой поверхности переходов сток (исток) – подложка	—	0,50 уровень 1 0,33 уровни 2, 3	
N	Коэффициент неидеальности перехода сток–подложка	—	1	
Neff	Коэффициент коррекции концентрации примеси в канале (только уровень 2)	—	1	5
Nfs	Плотность быстрых поверхностных состояний	1/см ²	0	1×10^{-10}
Nss	Плотность медленных поверхностных состояний	1/см ²	0	1×10^{-10}
Nsub	Уровень легирования подложки	1/см ³	0	4×10^{15}
Pb	Потенциал инверсии приповерхностного слоя подложки	B	0,8	0,87
Phi	Поверхностный потенциал инверсии	B	0,6	0,65
Rd	Объемное сопротивление стока	Ом	0	1
Rs	Объемное сопротивление истока	Ом	0	1
Rsh	Сопротивление диффузионных областей стока и истока	Ом	0	10
Theta	Коэффициент модуляции подвижности (только уровень 3)	—	0	0,1
Tnom	Рабочая температура	°C	27	50
Tox	Толщина оксида	м	1×10^{-7}	1×10^{-7}
TRG	Тип легирования затвора:			
	+1 (примесью того же типа, как и подложки)	—	1	
	-1 (примесью противоположного типа)			
0 (алюминиевый затвор)				
Ucrit	Критическая напряженность поля (только уровень 2)	B/см	1×10^4	1×10^4
Uexp	Эмпирическая константа подвижности носителей (только уровень 2)	—	0	0,1
Uo	Подвижность носителей в поверхностном слое	см ² /B-с	600	700
Utra	Коэффициент поперечного поля (только уровень 2)	—	0	0,3
Vmax	Максимальная скорость дрейфа носителей (только уровни 2 и 3)	м/с	0	5×10^4
Vto	Пороговое напряжение	B	0	1
Xj	Глубина металлургического перехода	мкм	0	1

ски базируется на конденсаторе с затвором в качестве первого электрода и стока, а в конечном итоге — подложки, в качестве второго электрода. Эта емкость весьма мала вследствие большой толщины непроводящей подложки. Когда же Vgd положительно, подложка в проводящем состоянии, и Cgd физически основана на конденсаторе с толщиной затворного оксида.

Традиционно для имитации поведения мощных МОП-транзисторов используются сложные макромодели. Новое встроенное SPICE-устройство было создано с целью ускорения расчетов, надежности преобразования и упрощения записи моделей. Эквивалентная схема устройства представлена на рис. 55.

Модель для постоянного тока аналогична модели уровня 1 интегрального МОП-транзистора, за исключением того, что длина и ширина канала опускаются, а крутизна задается непосредственно, без вычислений. Модель для переменного тока следующая. Емкость затвор–исток принята постоянной. Как установлено опытным пу-

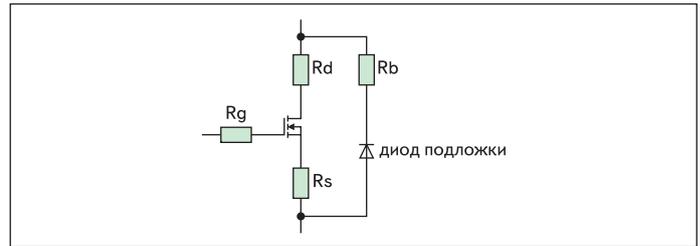


Рис. 55. Эквивалентная схема мощного МОП-транзистора

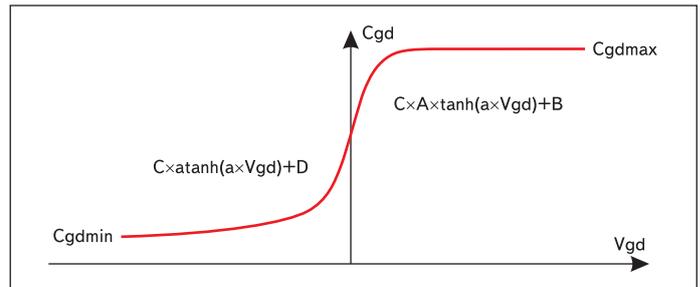


Рис. 56. Зависимость емкости затвор–сток

тем, это хорошее приближение для мощного МОП-транзистора, если напряжение затвор–исток не становится отрицательным. Емкость затвор–сток определяется эмпирической зависимостью, изображенной на рис. 56.

Емкость затвор–сток Cgd изменяется как гиперболический тангенс напряжения затвор–сток Vgd для положительного напряжения и как арктангенс для отрицательного напряжения. Параметры модели Cgdmax и Cgdmin определяют емкость затвор–сток. Емкость исток–сток представлена емкостью встроенного диода, подключенного непосредственно к электродам истока и стока для исключения влияния сопротивлений истока и стока.

Параметры модели вертикального ДМОП-транзистора в таблице 30.

Таблица 30. Параметры модели ДМОП-транзистора

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию	Пример
A	Параметр нелинейности емкости затвор–сток	—	1	0,5
Af	Показатель степени фликкер-шума	—	1	
Cgdmax	Максимум нелинейной емкости затвор–сток	пФ	0	1000
Cgdmin	Минимум нелинейной емкости затвор–сток	пФ	0	300
Cgs	Емкость затвор–исток	пФ	0	500
Cjo	Емкость перехода диода подложки при нулевом смещении	пФ	0	1
Eg	Ширина запрещенной зоны для диода подложки	эВ	1×10^{-11}	
Fc	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного диода подложки	—	0,5	
Is	Ток насыщения диода подложки	A	1×10^{-14}	1×10^{-15}
Kf	Коэффициент фликкер-шума	—	0	
Kp	Параметр крутизны	A/B ²	1	0,5
L	Коэффициент для длины канала	—	1	
Lambda	Параметр модуляции длины канала	1/B	0	0,02
M	Коэффициент плавности перехода диода подложки	—	0,5	0,5
N	Коэффициент эмиссии диода подложки	—	1	
nchan[*]	n-канальный вертикальный ДМОП	—	(true)	
Phi	Поверхностный потенциал инверсии	B	0,6	0,65
pchan[*]	p-канальный вертикальный ДМОП	—	(false)	
Rb	Омическое сопротивление диода подложки	Ом	0	0,5
Rd	Омическое сопротивление стока	Ом	0	1
Rds	Сопротивление утечки сток–исток	МОм	∞	10
Rg	Омическое сопротивление затвора	Ом	0	2
Rs	Омическое сопротивление истока	Ом	0	1
Tnom	Температура	°C	27	50
tt	Время переноса заряда для диода подложки	нс	0	10
Vj	Пороговый потенциал диода подложки	B	1	0,8
Vto	Пороговое напряжение	B	0	1
Xti	Температурный коэффициент тока насыщения диода подложки	—	3	
W	Коэффициент для ширины канала	—	1	

Имя модели VDMOS используется как для n -канальных, так и для p -канальных транзисторов. По умолчанию устанавливается n -проводимость. Для того чтобы определить p -канал, следует дополнить модель ключевым словом **pchan**, например, “.model xyz VDMOS(Kp=3 pchan)” определяет p -канальный транзистор.

Линия передачи с потерями

Имя символа: LTLIN.

Синтаксис: Oxxx <узел порта L+> <узел порта L-> <узел порта R+> <узел порта R-> <имя модели>.

Например:

```
O1 in 0 out 0 MyLossyTline
.model MyLossyTline LTRA(len=1 R=10 L=1u C=10n)
```

Это однопроводная линия передачи с потерями. L+ и L- — узлы одного порта. R+ и R- — узлы другого порта. Электрические характеристики определяются строкой .MODEL.

Параметры модели линии передачи с потерями приведены в таблице 31.

Таблица 31. Параметры линии передачи с потерями

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию
R	Погонное сопротивление	Ом/ед. длины	0
L	Погонная индуктивность	Гн/ед. длины	0
G	Погонная проводимость	1/Ом/ед. длины	0
C	Погонная емкость	Ф/ед. длины	0
Len	Количество единиц длины	—	0

Биполярный транзистор

Имя символа: NPN, PNP, NPN2, PNP2.

Синтаксис: Qxxx <узел коллектора> <узел базы> <узел эмиттера> [узел подложки] <имя модели> [коэффициент кратности] [проводимость] [IC=<Vbe, Vce>] [temp=<T>].

Например:

```
Q1 C B E MyNPNmodel
.model MyNPNmodel NPN(Bf=75)
```

Чтобы задать характеристики биполярных транзисторов, используется описание модели. Ключевые слова в строке модели NPN и PNP указывают на проводимость транзистора. Множитель **area** определяет количество эквивалентных устройств соответствующей модели, включенных параллельно.

Модель биполярного транзистора — это адаптированная модель Гуммеля-Пуна. Модификация расширила модель, чтобы учесть некоторые эффекты при больших уровнях смещения, в режиме квазинасыщения, и проводимость подложки. Модель автоматически упрощается до модели Эберса-Молла, когда опущены некоторые параметры. На постоянном токе модель задана параметрами Is, Bf, Nf, Ise, Icf, Ne, определяющими характеристики в прямом включении, Is, Br, Nr, Isc, Ikr, Nc, определяющими характеристики в обратном включении, и Vaf, Var, определяющими выходную проводимость для прямого и обратного включения. Модель включает в себя три омических сопротивления Rb, Rc и Re, при этом Rb может зависеть от величины протекающего тока. Накопление заряда в базе моделируется временами переноса заряда в прямом и обратном включении (Tf и Tr), причем Tf можно сделать зависящим от уровня смещения, и нелинейными емкостями обедненного слоя, заданными параметрами Cje, Vje, Mje для перехода база-эмиттер, Cjc, Vjc для перехода база-коллектор и Cjs, Vjs, Mjs для перехода коллектор-подложка. Температурная зависимость тока насыщения Is определяется шириной запрещенной зоны полупроводника Eg и экспоненциальным температурным коэффициентом Xti. Температурная зависимость коэффициента передачи в новой модели моделируется экспоненциальным температурным коэффициентом Xtb. Значение температуры

Таблица 32. Параметры модифицированной модели Гуммеля-Пуна биполярного транзистора

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию
Af	Показатель степени фликкер-шума	—	1
Bf	Идеальный максимальный коэффициент передачи в нормальном режиме	—	100
Br	Идеальный максимальный коэффициент передачи в инверсном режиме	—	1
BVcbo	Пробивное напряжение перехода база-коллектор	В	?
Cjc	Емкость перехода база-коллектор при нулевом смещении	Ф	0
Cje	Емкость перехода база-эмиттер при нулевом смещении	Ф	0
Cjs	Емкость перехода коллектор-подложка при нулевом смещении	Ф	0
Cn	Температурный коэффициент квазинасыщения подвижности неосновных носителей	2,42 NPN 2,2 PNP	
D	Температурный коэффициент квазинасыщения скорости рассасывания неосновных носителей	0,87 NPN 0,52 PNP	
Eg	Ширина запрещенной зоны	эВ	1,11
Fc	Коэффициент нелинейности барьерных емкостей при прямом смещении	—	0,5
Gamma	Коэффициент легирования эпитаксиальной области		1×10^{-11}
Ikf	Ток начала спада коэффициента передачи в нормальном режиме	А	∞
Ikr	Ток начала спада коэффициента передачи в инверсном режиме	А	∞
Irb	Ток базы, при котором сопротивление базы уменьшается на величину, равную половине разности между максимальным и минимальным значениями	А	∞
Is	Ток насыщения	А	1×10^{-16}
Isc	Обратный ток перехода база-коллектор	А	0
Ise	Обратный ток перехода база-эмиттер	А	0
Iss	Обратный ток перехода коллектор-подложка	А	0
Itf	Параметр, определяющий зависимость Tf при больших токах	А	0
Kf	Коэффициент спектральной плотности фликкер-шума	—	0
Mjc	Коэффициент плавности перехода база-коллектор	—	0,33
Mje	Коэффициент плавности перехода база-эмиттер	—	0,33
Mjs	Коэффициент плавности перехода коллектор-подложка	—	0
nBVcbo	Коэффициент неидеальности в режиме пробоя перехода база-коллектор	—	1
Nc	Коэффициент неидеальности перехода база-коллектор	—	2
Ne	Коэффициент неидеальности перехода база-эмиттер	—	1,5
Nf	Коэффициент неидеальности в нормальном режиме	—	1
Nr	Коэффициент неидеальности в инверсном режиме	—	1
Ns	Коэффициент неидеальности перехода коллектор-подложка	—	1
Ptf	Фазовый сдвиг на граничной частоте $f = 1/(Tf \times 2 \times \pi)$	—	0
Qco	Множитель, определяющий заряд в эпитаксиальной области	К	0
Quasimod	Флаг квазинасыщения температурной зависимости	—	не установлен
Rb	Объемное сопротивление базы при нулевом смещении	Ом	0
Rbm	Сопротивление базы при больших токах	Ом	Rb
Rc	Объемное сопротивление коллектора	Ом	0
Rco	Сопротивление эпитаксиальной области	Ом	0
Re	Объемное сопротивление эмиттера	Ом	0
Tf	Идеальное время переноса в нормальном режиме	с	0
Tnom	Температура измерений	°C	27
Tr	Идеальное время переноса в инверсном режиме	с	0
Trb1	Линейный температурный коэффициент Rb	1/°C	0
Trb2	Квадратичный температурный коэффициент Rb	1/°C ²	0
Trc1	Линейный температурный коэффициент Rc	1/°C	0
Trc2	Квадратичный температурный коэффициент Rc	1/°C ²	0
Tre1	Линейный температурный коэффициент Re	1/°C	0
Tre2	Квадратичный температурный коэффициент Re	1/°C ²	0
Trm1	Линейный температурный коэффициент Rmb	1/°C	0
Trm2	Квадратичный температурный коэффициент Rmb	1/°C ²	0
TBVcbo1	Линейный температурный коэффициент пробивного напряжения перехода коллектор-база	1/°C	0
TBVcbo2	Квадратичный температурный коэффициент пробивного напряжения перехода коллектор-база	1/°C ²	0
Vaf	Напряжение Эрли в нормальном режиме	В	∞
Var	Напряжение Эрли в инверсном режиме	В	∞
Vg	Напряжение ширины запрещенной зоны, экстраполированное для 0 К	В	1,206
Vjc	Контактная разность потенциалов перехода база-коллектор	В	0,75
Vje	Контактная разность потенциалов перехода база-эмиттер	В	0,75
Vjs	Контактная разность потенциалов перехода коллектор-подложка	В	0,75
Vo	Напряжение, определяющее перегиб зависимости тока эпитаксиальной области	В	10
Vtf	Коэффициент, описывающий зависимость Tf от напряжения коллектор-база	В	∞
Xcjc	Коэффициент расщепления емкости база-коллектор	—	1
Xtb	Температурный коэффициент Bf и Br	—	0
Xtf	Коэффициент, описывающий зависимость Tf от напряжения база-коллектор	—	0
Xti	Экспоненциальный температурный коэффициент для Is	—	3

Tnom может быть задано директивой .OPTIONS или отвергнуто приоритетной записью в строке .MODEL.

Параметры биполярного транзистора, использованные в модифицированной модели Гуммеля-Пуна, приведены в таблице 32.

Установив параметр модели Level = 9, в LTSpice можно воспользоваться другой моделью биполярного транзистора, VBIC, являющейся расширенной модификацией стандартной модели Гуммеля-Пуна, ориентированной на интегральные биполярные транзисторы современных полупроводниковых технологий.

Дополнительные возможности, которые дает модель VBIC в сравнении со стандартной моделью Гуммеля-Пуна:

- интегрированный паразитный транзистор подложки для интегральных схем;
- модель лавинного пробоя база–эмиттер;
- улучшенное моделирование эффекта Эрли;
- физическое разделение Ic и Ib;
- улучшенная модель барьерной емкости;
- улучшенное температурное моделирование;
- моделирование саморазогрева (в LTSpice отсутствует).

Резистор

Имя символа: RES, RES2.

Синтаксис: Rxxx <узел 1> <узел 2> <сопротивление> [tc=линейный температурный коэффициент, квадратичный температурный коэффициент, ...] [temp=<значение>].

Резистор представляется простым линейным сопротивлением между узлами n1 и n2. Температурная зависимость может быть определена для каждого резистора встроенным параметром tc. Сопротивление R равно:

$$R = R_0 \times (1 + dt \times tc_1 + dt^2 \times tc_2 + dt^3 \times tc_3 + \dots),$$

где R0 — сопротивление при номинальной температуре, a dt — разница между температурой резистора и номинальной температурой.

Ключ, управляемый напряжением

Имя символа: SW.

Синтаксис: Sxxx <узел 1> <узел 2> <управляющий узел+> <управляющий узел-> <имя модели> [on,off].

Таблица 33. Параметры модели ключа, управляемого напряжением

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию
Vt	Пороговое напряжение	В	0
Vh	Напряжение гистерезиса	В	0
Ron	Сопротивление замкнутого ключа	Ом	1
Roff	Сопротивление разомкнутого ключа	Ом	1/Gmin
Lser	Последовательная индуктивность	Гн	0
Vser	Последовательное напряжение	В	0
Ilimit	Ограничение тока	А	∞

Например:

```
S1 out 0 in 0 MySwitch
.model MySwitch SW(Ron=.1 Roff=1Meg Vt=0 Vh=-.5 Lser=10n
Vser=.6)
```

Напряжение между узлами <управляющий узел+> <управляющий узел-> управляет полным сопротивлением ключа между узлами <узел 1> и <узел 2>. Требуется определить поведение ключа в директиве .MODEL. В файле .\examples\Educational\Vswitch.asc показан пример с размещением директивы .MODEL непосредственно в схеме.

Параметры модели ключа, управляемого напряжением, приведены в таблице 33.

Ключ имеет три различных способа управления напряжением, в зависимости от величины напряжения гистерезиса Vh. Если Vh равно нулю, ключ всегда полностью замкнут или разомкнут в зависимости от того, выше или ниже порога входное напряжение. Если Vh положительно, ключ имеет гистерезис, как будто он управляется триггером Шмитта с точками переключения Vt-Vh и Vt+Vh. Vh равно половине напряжения между точками переключения, и в этом отличие от других известных моделей. Если Vh отрицательно, ключ плавно переключается между замкнутым и разомкнутым состояниями. Переключение происходит между управляющими напряжениями Vt-Vh и Vt+Vh.

Есть модель ключа, управляемого напряжением, уровня 2, являющаяся более совершенной

версией ключа уровня 1 с отрицательным гистерезисом. Ключ уровня 2 никогда полностью ни замкнут, ни разомкнут. Проводимость в функции управляющего напряжения Vc:

$$g(V_c) = \exp(A \times \operatorname{atan}((V_c - V_t)/V_h) + B),$$

где $A = \pi \times (\log(1/R_{on}) - \log(1/R_{off}))$;
 $B = (\log(1/R_{on}) + \log(1/R_{off}))$.

Переключение ключа уровня 2 до ограничения тока плавное, а не внезапное. При фиксированном управляющем напряжении вольт-амперная характеристика описывается уравнением:

$$I(V) = I_{limit} \times \tanh(g(V_c) \times V).$$

Ключ уровня 2 поддерживает режим проводимости только в одном направлении, если установлен флаг **oneway** или задано падение напряжения параметром **Vser**. Плавность переключения из проводящего состояния в запертое может быть задана установкой параметра **epsilon** не равным нулю.

На рис. 57 показаны результаты моделирования различных вариантов ключа.

Линия передачи без потерь

Имя символа: TLINE.

Синтаксис: Txxx <узел порта L+> <узел порта L-> <узел порта R+> <узел порта R-> Zo=<значение> Td=<значение>. L+ и L- — узлы одного порта. R+ и R- — узлы другого порта. Zo — полное характеристическое сопротивление. Длина линии определяется временем задержки сигнала Td.

Распределенная RC-цепь

Имя символа: URC.

Синтаксис: Uxx <узел 1> <узел 2> <узел общий> <имя модели> L=<len> [N=<lumps>].

N1 и N2 — два узла подключения к RC-цепи, Ncom — узел, в котором связаны емкости. LEN — длина RC-цепи в метрах. Lumps, если задано, — количество RC-сегментов, используемых в моделировании RC-цепи. Если

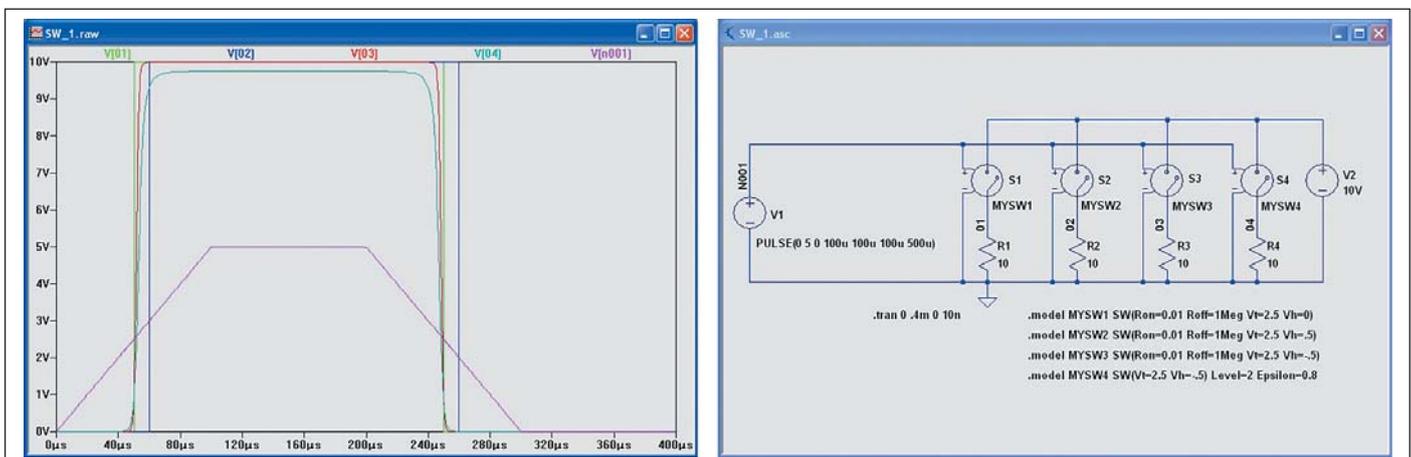


Рис. 57. Результаты моделирования ключа, управляемого напряжением

количество сегментов не задано, подбирается их подходящее количество.

Модель выполнена в макровиде. Сегменты RC находятся в геометрической пропорции, с возрастающим отношением к середине цепи с коэффициентом пропорциональности K.

Цепь URC создается из сегментов, состоящих из резистора и конденсатора, если же задана не нулевая величина параметра ISPERL, конденсаторы заменяются обратносмещенными диодами с эквивалентной емкостью, током насыщения ISPERL и дополнительным последовательным эквивалентным сопротивлением RSPERL.

Параметры распределенной RC-цепи приведены в таблице 34.

Таблица 34. Параметры модели распределенной RC-цепи

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию
K	Постоянная распространения	—	2
Fmax	Максимальная интересуемая частота	ГГц/м	1
Rperl	Погонное сопротивление	кОм/м	1
Cperl	Погонная емкость	Ф/м	1×10^{-15}
Isperl	Ток насыщения на единицу длины	А/м	0
Rspert	Сопротивление диода на единицу длины	Ом/м	0

Источник напряжения

Имя символа: VOLTAGE, BATTERY.

Синтаксис: Vxxx <узел+> <узел-> <напряжение> [AC=<амплитуда>] [Rser=<значение>] [Cpar=<значение>]. Это источник постоянного напряжения между узлами **узел+** и **узел-**. Для AC-анализа как амплитуда источника на частоте анализа используется значение AC. Могут быть заданы последовательное сопротивление **Rser** и параллельная емкость **Cpar**.

Эквивалентная схема источника напряжения показана на рис. 58.

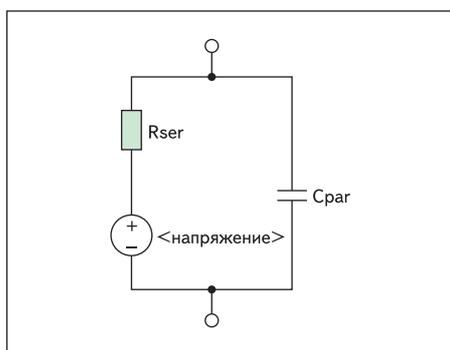


Рис. 58. Эквивалентная схема источника напряжения

Источники напряжения исторически используются в SPICE для измерения тока в цепи и как датчики тока для управляемых током элементов, для чего в ветвь электрической цепи намеренно включается источник напряжения с нулевым значением напряжения. Если задано последовательное сопротив-

ление, источник напряжения не может быть использован как датчик тока для F, H или W элементов. Тем не менее, ток любого элемента ветви цепи, включая источник напряжения, можно отобразить.

Синтаксис: Vxxx <узел+> <узел-> PULSE(V1 V2 Tdelay Trise Tfall Ton Tperiod Ncycles). Так описывается источник импульсного напряжения, параметры модели которого приведены в таблице 35.

Таблица 35. Параметры модели источника импульсного напряжения

Обозначение	Параметр	Единица измерения
Vof	Начальное значение напряжения	В
Vop	Значение напряжения в импульсе	В
Tdelay	Задержка	с
Tr	Время нарастания	с
Tf	Время спада	с
Ton	Длительность импульса	с
Tperiod	Период следования импульсов	с
Ncycles	Количество циклов (опускается для источника с неограниченным количеством импульсов)	число

Синтаксис: Vxxx <узел+> <узел-> SINE(Voffset Vamp Freq Td Theta Phi Ncycles). Это форма записи источника синусоидального напряжения, параметры его модели приведены в таблице 36.

Таблица 36. Параметры модели источника синусоидального напряжения

Обозначение	Параметр	Единица измерения
Voffset	Постоянное смещение	В
Vamp	Амплитуда напряжения	В
Freq	Частота	Гц
Td	Задержка	с
Theta	Коэффициент демпфирования	1/с
Phi	Фаза синусоиды	°
Ncycles	Количество периодов (опускается для источника с неограниченным количеством периодов)	число

В течение времени, меньшего Td, или времени после завершения Ncycles выходное напряжение равно:

$$Voffset + Vamp \times \sin(\pi \times \text{phi} / 180).$$

В иное время напряжение равно:

$$Voffset + Vamp \times \exp(-(\text{time} - Td) \times \text{Theta}) \times \sin(2 \times \pi \times \text{Freq} \times (\text{time} - Td) + \pi \times \text{phi} / 180).$$

Коэффициент демпфирования, **Theta**, является аналогом постоянной времени спада.

Синтаксис: Vxxx <узел+> <узел-> EXP(V1 V2 Td1 Tau1 Td2 Tau2). Это — источник экспоненциального напряжения с параметрами модели, приведенными в таблице 37.

В течение времени, меньшего Td1, выходное напряжение — V1. Для времени между Td1 и Td2 напряжение равно:

$$V1 + (V2 - V1) \times (1 - \exp(-(\text{time} - Td1) / \text{Tau1})).$$

Таблица 37. Параметры модели источника экспоненциального напряжения

Обозначение	Параметр	Единица измерения
V1	Начальное значение напряжения	В
V2	Импульсное значение напряжения	В
Td1	Время задержки нарастания	с
Tau1	Постоянная времени нарастания	с
Td2	Время задержки спада	с
Tau2	Постоянная времени спада	с

В течение времени после Td2 напряжение равно:

$$V1 + (V2 - V1) \times (1 - \exp(-(\text{time} - Td1) / \text{Tau1})) + (I1 - I2) \times (1 - \exp(-(\text{time} - Td2) / \text{Tau2})).$$

Синтаксис: Vxxx n+ n- SFFM(Voff Vamp Fcar MDI Fsig). Так описывается источник синусоидального напряжения с частотной модуляцией с параметрами модели, приведенными в таблице 38.

Таблица 38. Параметры модели источника синусоидального напряжения с частотной модуляцией

Обозначение	Параметр	Единица измерения
Voff	Постоянное смещение	В
Vamp	Амплитуда напряжения	В
Fcar	Несущая частота	Гц
MDI	Индекс модуляции	—
Fsig	Частота сигнала	Гц

Напряжение равно:

$$Voff + Vamp \times \sin((2 \times \pi \times \text{Fcar} \times \text{time}) + \text{MDI} \times \sin(2 \times \pi \times \text{Fsig} \times \text{time})).$$

Синтаксис: Vxxx n+ n- PWL(t1 v1 t2 v2 t3 v3...). Это источник напряжения с кусочно-линейным сигналом, задаваемым координатами точек излома (ti, vi).

В течение времени до t1 напряжение равно v1. В течение времени между t1 и t2 напряжение изменяется линейно от v1 до v2. Допускается любое количество точек время-напряжение. Для времени после последнего значения напряжения равно последнему значению.

Синтаксис: Vxxx n+ n- wavefile=<имя файла> [chan=<nnn>]. Такая модель позволяет использовать файл .wav в качестве входного для LTSpice. <Имя файла> — это либо полный, абсолютный путь к файлу .wav, либо относительный путь, определяемый каталогом, содержащим моделируемую схему или список соединений. Двойные кавычки могут использоваться для определения пути. Файл .wav может содержать до 65 536 каналов, пронумерованных от 0 до 65 535. Следует определить используемый канал. По умолчанию используется первый канал под номером 0. Файл .wav интерпретируется как имеющий полную шкалу от -1 до 1 В. Этот источник имеет применение только в .TRAN-анализе.

Ключ, управляемый током

Имя символа: CSW. Синтаксис: Wxxx <узел 1> <узел 2> <имя управляющего источника напряжения> <имя модели> [on,off].
Например:

```
W1 out 0 Vsense MySwitch
Vsense a b 0.
.model MySwitch CSW(Ron=.1 Roff=1Meg It=0 Ih=-.5)
```

Ток через источник напряжения Vsense управляет сопротивлением ключа. Требуется определить поведение ключа в строке .MODEL.

Параметры модели ключа, управляемого током, приведены в таблице 39.

Таблица 39. Параметры модели ключа, управляемого током

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию
It	Пороговый ток	А	0
Ih	Ток гистерезиса	А	0
Ron	Сопротивление замкнутого ключа	Ом	1
Roff	Сопротивление разомкнутого ключа	Ом	1/Gmin

Ключ имеет три различных способа управления, в зависимости от величины тока гистерезиса **Ih**. Если **Ih** равен нулю, ключ всегда полностью замкнут или разомкнут, в зависимости от того, выше или ниже порога управляющий ток. Если **Ih** положителен, ключ имеет гистерезис с точками переключения **It-Ih** и **It+Ih**. Если **Ih** отрицателен, ключ плавно переключается между замкнутым и разомкнутым состояниями. Переключение про-

исходит между управляющими токами **It-Ih** и **It+Ih**.

Макромодель

Синтаксис: Xxxx <узел 1> <узел 2> <узел 3> ... <имя макромодели> [<parameter>=<выражение>].

Макромодели позволяют определить и сохранить схему в библиотеке для позднейшего поиска по имени. Пример описания в виде макромодели делителя:

```
* calling a subcircuit
*
* This is the circuit
X1 in out 0 divider top=9K bot=1K
V1 in 0 pulse(0 1 0 .5m .5m 0 1m)
* This is the subcircuit
.subckt divider A B C
R1 A B {top}
R2 B C {bot}
.ends divider
.tran 3m
.end
```

Полевой транзистор с затвором Шоттки (MESFET)

Имя символа: MESFET. Синтаксис: Zxxx <узел стока> <узел затвора> <узел истока> <имя модели> [area] [проводимость] [IC=<Vds, Vgs>] [temp=<значение>].

Для MESFET-транзистора необходима строка модели, определяющая характеристики. Ключевые слова NMF и PMF в строке модели определяют проводимость транзистора.

Параметры модели полевого транзистора с затвором Шоттки приведены в таблице 40.

Стоит отметить, что часть моделей компонентов отличается по обозначению и описа-

Таблица 40. Параметры модели полевого транзистора с затвором Шоттки

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию
AF	Экспоненциальный коэффициент фликкер-шума	—	1
Alpha	Параметр напряжения насыщения	1/В	2,0
B	Параметр легирования	—	0,3
Beta	Кругизна	A/В	1×10 ⁻⁴
Cgd	Емкость перехода затвор–сток при нулевом смещении	Ф	0
Cgs	Емкость перехода затвор–исток при нулевом смещении	Ф	0
Fc	Коэффициент нелинейности емкостей при прямом смещении	—	0,5
KF	Коэффициент фликкер-шума	—	0
Lambda	Параметр модуляции длины канала	1/В	0
Pb	Контактная разность потенциалов p-n-перехода затвора	В	1
Rd	Омическое сопротивление стока	Ом	0
Rs	Омическое сопротивление истока	Ом	0
Vto	Барьерный потенциал перехода Шоттки	В	-2,0

нию от широко используемых моделей в формате PSpice. При необходимости использования таких моделей в LTSpice следует внимательно проанализировать текст модели и внести необходимые изменения. Это весьма непростая задача, требующая соответствующей подготовки.

Этим материалом заканчивается цикл, посвященный программе схемотехнического моделирования Switcher CAD. Автор программы Майкл Энгельгарт (Mike Engelhardt) создал замечательный продукт, за который ему благодарны специалисты, работающие в различных областях электроники. ■

Программа схемотехнического моделирования SwitcherCAD III

Михаил ПУШКАРЕВ
pmm@midaus.com

В статье описаны возможности бесплатной программы схемотехнического моделирования SwitcherCAD III и приемы работы в ней.

Введение

Специалистам известны коммерческие программы автоматизированного проектирования в электронике, включающие в себя и возможности моделирования, такие как OrCAD, Proteus, Micro-Cap, Multisim (Electronics Workbench). Их возможности, приемы работы в них описаны в литературе, в том числе и русскоязычной. К сожалению, легальные версии этих программ недоступны для многих предприятий, не говоря уже об отдельных пользователях. Фирма Linear Technology свободно распространяет программу моделирования LTSpice/SwitcherCAD III, имеющую более скромные, но вполне достаточные для большинства известных видов анализа возможности.

Программа включает в себя самую полную и регулярно обновляемую библиотеку компонентов фирмы Linear Technology, имеющих Spice-модели, в том числе импульсных регуляторов и контроллеров, и незаменима для разработчиков, предпочитающих продукцию Linear Technology. Кстати сказать, модели импульсных регуляторов и контроллеров практически отсутствуют в других программах.

К счастью, для пользователей программы ее возможности не исчерпываются моделированием схем с применением только изделий фирмы-разработчика, и ее с успехом применяют те, кто специализируется на аналоговой схемотехнике.

SwitcherCAD III — это третье поколение программы моделирования импульсных регуляторов компании Linear Technology. Программа состоит из эффективного Spice-симулятора смешанного моделирования, включающего Spice-устройства с новыми свойствами для макромоделирования импульсных источников питания (ИИП) на основе контроллеров и регуляторов. Программа рисования иерархических схем позволяет пользователю редактировать встроенные примеры схем или создавать новые схемы. В окне графиков отображаются результаты моделирования с возможностью дальнейшего анализа полученных данных. Имеется встроенная база интегральных схем Linear Technology и многих пассивных компонентов. В одной програм-

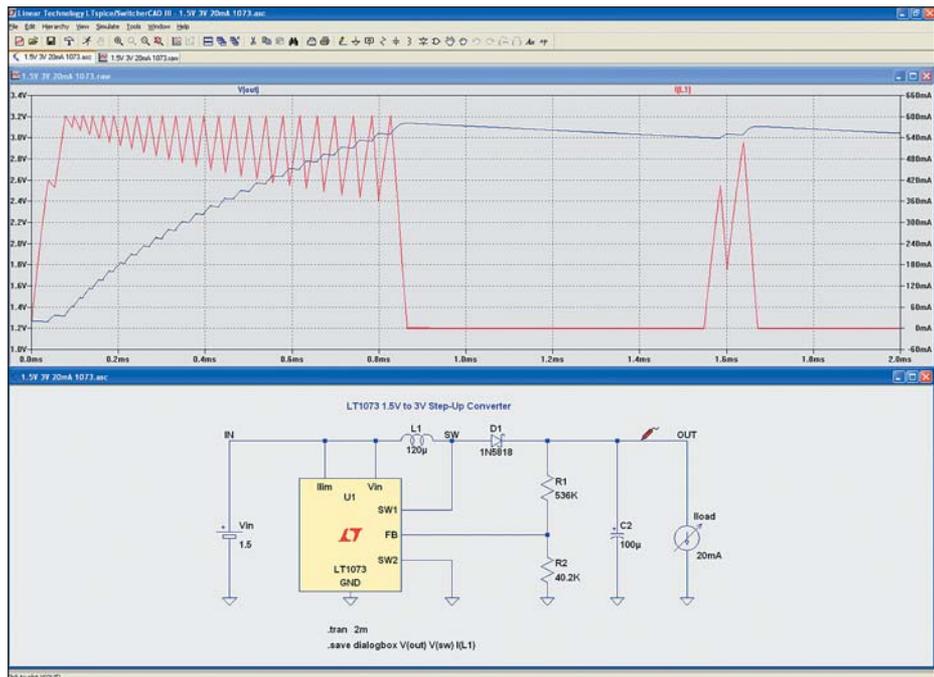


Рис. 1. Экран программы

ме объединены база компонентов, редактирование схем, управление моделированием и анализ графиков.

На рис. 1 показан экран программы.

Установка программы

SwitcherCAD III и руководство пользователя [1] можно загрузить с сайта Linear Technology. Прямая ссылка на файл установки — <http://ltspice.linear.com/software/swcadiii.exe>. Файл **swcadiii.exe** — это самораспаковывающийся архив для установки SwitcherCAD III.

Программа часто обновляется. После первоначальной установки SwitcherCAD III можно использовать команду **Tools>Sync Release** встроенного меню, которая изменит программу до текущей версии, если есть доступ в Интернет. Процесс обновления сначала загрузит мастер-файл с сайта LTC, содержащий размер и контрольную сумму каждого файла. Если какой-то файл отсутствует или отличается по размеру либо контрольной сумме, содержащейся в мастер-файле, он будет

автоматически обновлен. Компоненты базы данных в процессе модернизации будут добавлены так, как будто вы добавили собственные устройства, то есть дополнения не будут потеряны, как будто утилита автоматического обновления и не использовалась.

Файл **changelog.txt** в каталоге с установленной программой содержит информацию о всех модернизациях программы.

Режимы работы

Краткий обзор

Для SwitcherCAD III возможны два основных режима использования симулятора:

1. Использование программы как универсальной программы рисования схем с интегрированным симулятором. Команда меню **File>New** и **File>Open** (файлы типа **asc**).
2. Загрузка в симулятор списка соединений (**netlist**), созданного вручную, или списка соединений, сгенерированного различными инструментами создания схем. Команда меню **File>Open** (файлы типа **cir**).

LTSpice/SwitcherCAD III предназначен для использования в качестве универсальной программы рисования схем с интегрированным Spice-симулятором. Вы рисуете свою оригинальную схему (или открываете имеющуюся схему из примеров) и наблюдаете ее работу в симуляторе. В процессе разработки вносите изменения, пока при моделировании не будет достигнуто желаемое поведение схемы. Более ранние версии LTSpice/SwitcherCAD III включали в себя синтезатор, пытавшийся создавать совершенный проект ИИП по спецификации пользователя, но теперь такой режим работы исключен.

В результате схема преобразуется в текстовый список соединений, который запускается в симулятор. Если обычно список соединений извлекается из графической схемы, выполненной в LTSpice/SwitcherCAD III, импортированный список соединений может быть использован непосредственно, без схемы. Несколько примеров такого использования:

- Программа синтеза фильтров от Linear Technology's FilterCAD может синтезировать список соединений для LTSpice, чтобы моделировать фильтр в частотной или временной области.
- Осуществляется более простое эталонное тестирование LTSpice в сравнении с другими Spice-программами.
- Профессионалы уже знакомы со Spice-симуляторами, работающими непосредственно с текстовым списком соединений, поскольку в старых системах рисование схемы не было объединено со Spice-симулятором.

Примеры схем

Есть несколько ресурсов с примерами схем для LTSpice/SwitcherCAD III, поставляемых с программой. Как правило, они установлены в каталоге C:\Program Files\LTC\SwCADIII\examples\Educational, содержащем множество примеров Spice-моделирования для некоммерческого использования, они демонстрируют различные виды анализа, методы и возможности программы. В каталоге C:\Program Files\LTC\SwCADIII\examples\jigs есть пример моделирования для каждого устройства Linear Technology, имеющего макромодель в LTSpice/SwitcherCAD III.

По адресу http://www.kit-e.ru/assets/My_Examples.zip размещена папка со схемами устройств, на примере которых демонстрируются некоторые возможности программы, и библиотеками входящих в них компонентов.

Внешне сгенерированные списки соединений

Используя программу, можно открыть списки соединений, созданные вручную или другими программами рисования схем. Эти файлы обычно имеют в названии известные расширения .cir, .but, .net или .sp. Ранее перечислены примеры использования импортированных (внешне сгенерированных) списков соединений. ASCII-редактор, ис-

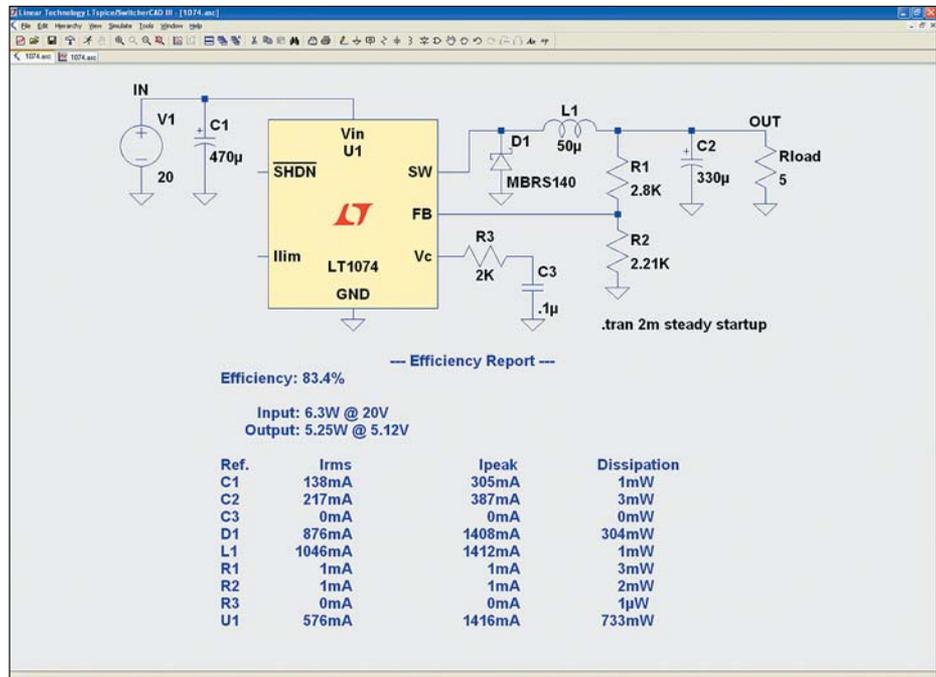


Рис. 2. Окно схемы с отчетом о потерях

пользуемый для файлов списка соединений, поддерживает неограниченный размер файла и неограниченное количество команд **Undo/Redo**. Для изменения цветов, используемых в ASCII-редакторе, применяется команда меню **Tool>Color Preferences**.

Отчет о потерях

По результатам TRAN-анализа (анализа переходного процесса) с модификатором steady можно получить отчет о потерях в преобразователе. По окончании моделирования отчет о потерях может быть отображен на схеме в виде блока текста комментария, как показано на рис. 2.

Эффективность преобразователя определяется следующим образом. Чтобы идентифицировать вход и выход, требуется хотя бы по одному источнику напряжения и источнику тока. По умолчанию источник напряжения является входным источником питания, а источник тока — выходной нагрузкой. Для использования в качестве нагрузки программа

имеет два специфических компонента — источника тока, точнее, потребителя тока; load и load2. Можно использовать в качестве нагрузки резистор, обозначив его Rload. Схему запускают до тех пор, пока при моделировании не будет обнаружен установившийся режим работы. Для этого необходимо, чтобы макромодели ИИП содержали информацию о том, как обнаруживать установившийся режим. Макромодели импульсных регуляторов LTC имеют такую информацию. Обычно установившийся режим можно обнаружить, когда отмечено, что ток усилителя ошибки, усредненный по циклу переключения, уменьшается до малой величины в нескольких циклах. Тогда энергия в каждой реактивности на фронте импульса вычисляется и запоминается, а моделирование продолжают еще до десяти тактов, интегрируя потери в каждом устройстве. На фронте последнего импульса энергия, сохраненная в каждой реактивности, снова запоминается и моделирование останавливается. Информация о потерях представля-

Таблица 1. Ключи командной строки

Флаг	Описание
-ascii	Использование ASCII .raw файлов. Seriously ухудшается работа программы
-b	Управление пакетным режимом. Например "scad3.exe - b deck.cir" сохранит данные в файле deck.raw
-big	Старт в максимальном окне
-encrypt	Шифрование библиотеки моделей. При желании можно сделать так, чтобы пользователи третьей стороны не видели деталей библиотеки. Не используется в моделях Linear Technology Corporation
-FastAccess	Преобразование бинарного .raw файла в формат Fast Access
-max	Синоним для -big
-netlist	Преобразование схемы в список соединений
-nowine	Предотвращение использования работы WINE (Linux)
-PCBnetlist	Преобразование схемы в формат PCBnetlist
-registry	Сохранение пользовательских установок, MRU и т. д. в регистре вместо файла %WINDIR%\scad3.ini
-Run	Старт моделирования схемы из командной строки без нажатия кнопки Run
-SOI	Позволяет иметь в макромодели МОП-транзистора до 7 узлов
-uninstall	Выполнение процесса деинсталляции
-web update	Эквивалент команды меню Tools>Sync Release
-wine	Ускорение работы WINE (Linux)

ется как отношение выходной мощности в нагрузке к мощности входного источника напряжения после коррекции по изменению в энергии, сохраненной в реактивностях. Так как потери в каждом устройстве также известны, можно определить, насколько контрольная сумма энергии близка к нулю.

Можно рассчитать эффективность спроектированной схемы ИИП, используя команду **Stop simulating if steady state is detected** («Остановка моделирования по обнаружению установившегося режима») в диалоговом окне **Edit Simulation Command**. После моделирования используется команда меню **View>Efficiency Report** для вывода сообщения о потерях.

Автоматическое обнаружение установившегося режима работает не всегда. Иногда критерии для обнаружения установившегося режима слишком строги, а порой и слишком расплывчаты. Тогда следует подобрать параметр выбора *sstol* или просто в интерактивном режиме установить пределы для расчета потерь.

Ключи командной строки

В таблице 1 перечислены ключи командной строки, понятные и исполняемые LTSpice (*scad3.exe*).

Рисование схемы

Основы редактирования схемы

Чтобы создать новые схемы или изменить предоставленные примеры схем, используется программа рисования. Размер схемы и глубина иерархии ограничены только ресурсами компьютера. Создание новой схемы начинается с команды меню **File->New Schematic**, а ранее созданная схема или встроенный пример открываются командой **File->Open**. На рис. 3 показан открытый файл проекта с меню редактирования **Edit**.

Программа включает в себя около 800 компонентов. Это большинство интегральных схем для источников питания, операционных усилителей, компараторов компании LTC и много устройств общего назначения. Можно создать и собственные символы компонентов для устройств, которые вам нужно импортировать в программу.

В отличие от многих программ рисования схем, эта была написана специально для управления Spice-моделированием. При нажатии на объект по умолчанию отображается график напряжения в цепи или тока через компонент без выбора объекта для редактирования или какого-либо редактирования поведения, отменяющего только что выполненное моделирование. Для перемещения, зеркального отражения, вращения, рисования или удаления объектов сначала следует выбрать соответствующую команду. После этого можно выбрать объект нажатием на него. Можно выбрать несколько объектов, обведя их рамкой. Программа останется в режиме перемещения, рисования или удаления, по-

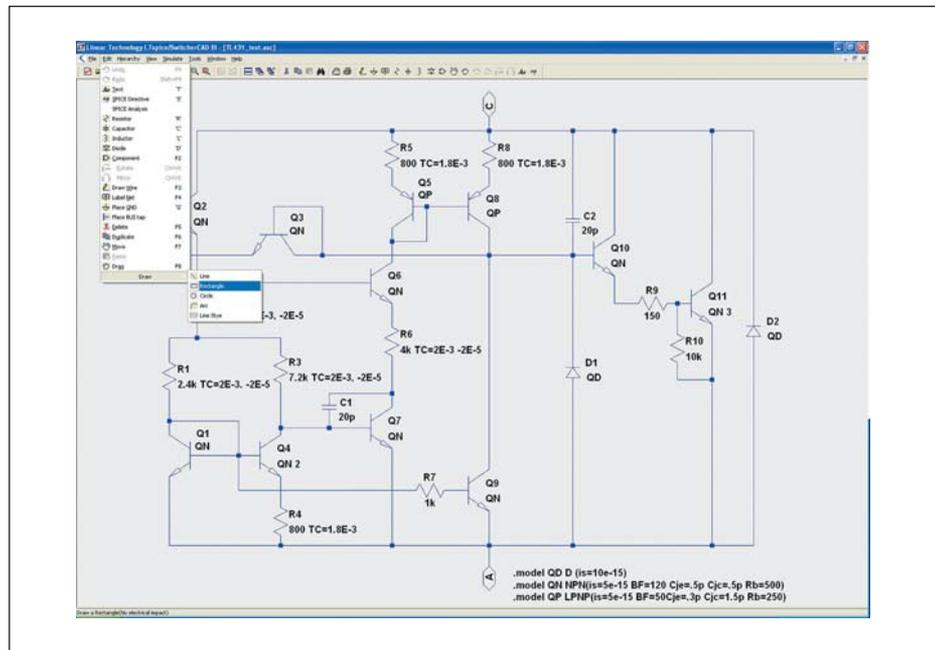


Рис. 3. Окно схемы и меню Edit

Таблица 2. Команды меню Edit (редактирование)

Команда (горячие клавиши)	Выполняемая функция
Undo (F9)	Восстановить удаленный объект (откат назад)
Redo (Shift+F9)	Отменить удаление объекта (откат вперед)
Text (T)	Размещение текста на схеме. Это просто информация о схеме. Этот текст не имеет электрического воздействия на схему
SPICE Directive (S)	Размещение текста на схеме, который будет включен в список соединений. Это позволяет объединить схему со списком соединений Spice. Таким путем устанавливаются режимы моделирования, подключаются файлы, содержащие модели, определяются новые модели или используются любые другие существующие Spice-команды. Можно даже запускать макромоделю, не имеющую символа управления макромоделю, не имея ее компонента для установки, к примеру, строкой модели (Spice-команда начинается с "X") в схеме, включая определение
SPICE Analysis	Ввод и редактирование команд моделирования
Resistor (R)	Размещение резистора
Capacitor (C)	Размещение конденсатора
Inductor (L)	Размещение индуктивности
Diode (D)	Размещение диода
Component (F2)	Размещение компонента на схеме. Команда открывает диалоговое окно с базой данных компонентов. Это более общая форма по сравнению с командами Resistor , Capacitor , Inductor и Diode
Rotate (Ctrl+R)	Вращение редактируемого объекта на 90° по часовой стрелке. Соответствующая кнопка имеет серый цвет, когда не выбран никакой объект
Mirror (Ctrl+E)	Зеркальное отражение редактируемого объекта. Соответствующая кнопка имеет серый цвет, когда не выбран никакой объект
Draw Wire (F3)	Нажатием левой кнопкой мыши начинается рисование проводника. Каждое нажатие определяет новый сегмент проводника. Нажатие на существующем сегменте проводника присоединяет новый проводник или продолжает существующий. Нажатие правой кнопки отменяет рисование проводника. Следующее нажатие правой кнопки отменяет команду рисования. Можно тянуть проводники через компоненты типа резисторов. Автоматически будет выполнен разрыв проводника так, чтобы резистор включился в цепь последовательно
Label Net (F4)	Определение имени узла, предотвращающее его произвольное наименование при генерации списка соединений
Place GND (G)	Размещение символа GROUND . Это узел "0", обычно глобальный для схемы
Place BUS tap	Размещение указателя подключения к шине (линии групповой связи)
Delete (F5)	Удаление объектов нажатием на них или вычерчиванием рамки вокруг них
Duplicate (F6)	Копирование объектов нажатием на них или вычерчиванием рамки вокруг них. Можно скопировать объект из одной схемы в другую, если они обе открыты в LTSpice / SwitcherCAD III. Начните команду копирования в окне первой схемы. Далее сделайте вторую схему активным окном и выполните Ctrl-V
Move (F7)	Перемещение объекта нажатием на него или вычерчиванием рамки вокруг объектов, которые необходимо переместить. После этого можно переместить объекты в новое местоположение
Paste	Размещение объектов в окне новой схемы, когда они уже были выбраны командой Duplicate
Drag (F8)	Нажмите на объект или начертите рамку вокруг объектов, которые следует перетянуть. После этого можно переместить объекты и присоединенные проводники без их разрыва в новое местоположение
Draw>Line	Рисование линии
Draw>Rectangle	Рисование прямоугольника
Draw>Circle	Рисование окружности
Draw>Arc	Рисование дуги на схеме
Draw>Line Style	Изменение стиля линий графических объектов

ка не нажаты правая кнопка мыши или кнопка Esc. При редактировании вся схема может быть удалена или перерисована. Команды меню **Edit** перечислены в таблице 2.

Команды меню **Edit**, за исключением команд **Place BUS tap** и **Draw**, дублированы кнопками на панели инструментов.

Графические объекты (линии, прямоугольники, окружности и дуги) не имеют электрических свойств и используются на схеме для ввода дополнительной информации. По умолчанию графические объекты в схеме привязаны к той же сетке, что используется для электрического контакта с проводниками и выво-

дами. Привязка к сетке отключается, если при рисовании удерживать нажатой клавишу **Ctrl**.

Присвоение имени узлу

Каждый узел в схеме должен иметь уникальное имя. Во избежание произвольного именования узла в списке соединений можно присвоить ему определенное имя. Узел «0» — «общая земля» схемы и изображается специальным символом без имени «0».

Есть также графический символ, определенный для узла «COM», но этот узел не имеет никакого специального значения. Таким образом, это не Spice глобальное подключение и даже не глобальный узел. Просто иногда удобно иметь графический символ, связанный с узлом, отличающимся от «земли». Если присвоить узлу имя, начинающееся с символов «\$G_», как, например, «\$G_VDD», тогда этот узел является глобальным независимо от иерархии схемы.

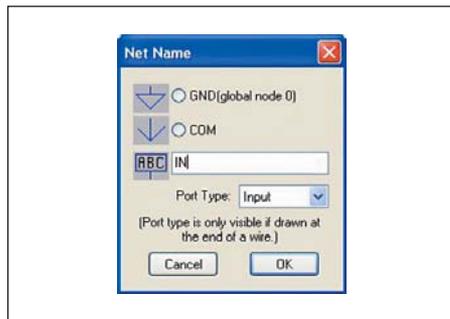


Рис. 4. Присвоение имени узлу

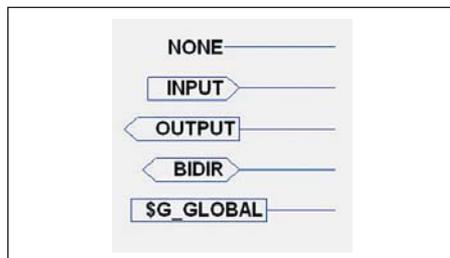


Рис. 5. Типы портов

Присвоение имени узлу и определение типа порта выполняется в диалоговом окне (рис. 4), вызываемом по команде меню **Edit>Label Net**.

Можно указать, что узел — порт типа «вход», «выход» или «двунаправленный». Эти типы портов имеют различные изображения, но это не имеет никакого значения для формирования списка соединений. Указание типа порта делает схему более «удобочитаемой». Глобальные узлы также изображаются с рамкой вокруг имени. Возможные типы портов изображены на рис. 5.

Цвета в схеме

Команда меню **Tools>Color Preferences**, вызывающая диалоговое окно регулировки цвета (рис. 6), позволяет установить предпочтительные цвета для отображения схемы.

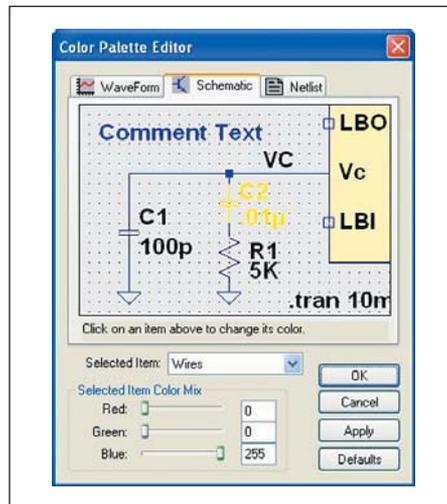


Рис. 6. Редактирование цвета

Нажав на объект на рисунке схемы в окне или выбрав требуемый объект из списка в открывающемся меню, можно отрегулировать цвета по своему предпочтению, пользуясь «ползунками» red (красный), green (зеленый) и blue (синий).

Неэлектрические графические объекты на схеме, типа линий и окружностей, будут изображены в цвете компонентов.

Размещение новых компонентов

Некоторые часто используемые компоненты типа резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности могут быть выбраны для размещения на схеме кнопкой на панели инструментов. Для большинства компонентов используется команда меню **Edit>Component** с открытием диалогового окна поиска требуемого устройства, показанного на рис. 7.

Программирование «горячих» клавиш

Команда меню **Tools>Control Panel>Drafting Options>Hot Keys**, вызывающая диалоговое окно (рис. 8), позволяет программировать «горячие» клавиши для большинства команд. Просто нажмите мышью на команду, а затем

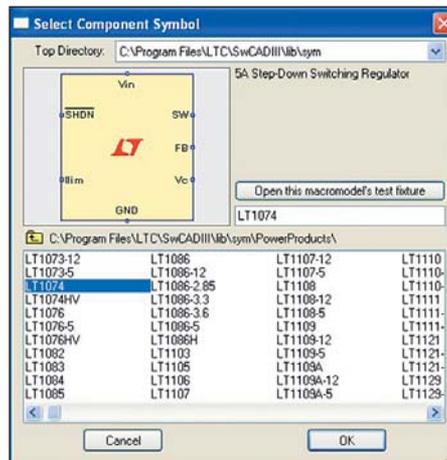


Рис. 7. Выбор символа компонента



Рис. 8. Программирование «горячих» клавиш

нажмите клавишу или комбинацию клавиш, которой требуется сопоставить команду. Чтобы удалить «горячую» клавишу, сначала нажмите команду и затем клавишу Delete.

Извлечение списка соединений для программ проектирования печатных плат

По команде меню схемы **Tools>Export Netlist** генерируется ASCII список соединений для программы создания печатной платы. Может потребоваться создание ряда компонентов с соответствующим порядком следования имен выводов. Например, при импорте списка соединений из схемы LTSpice в ExpressPCB нужно создать компоненты либо для LTSpice, либо для ExpressPCB, с одинаковым порядком следования выводов в списках соединений. Иначе диоды в списке соединений могут оказаться перевернутыми или выводы транзисторов перепутанными.

Доступны следующие форматы: Accel, Algorex, Allegro, Applicon Bravo, Applicon Leap, Cadnetix, Calay, Calay90, CBDS, Computervision, EE Designer, ExpressPCB, Intergraph, Mentor, Multiwire, PADS, Scicards, Tango, Telesis, Vectron и Wire List.

Редактирование компонентов

Компоненты могут быть отредактированы двумя или тремя различными способами, в зависимости от типа компонента.

Редактирование видимых атрибутов

Видимые непосредственно на поле схемы атрибуты можно отредактировать указав на них мышью с последующим нажатием ее правой кнопки. Курсор мыши превратит-

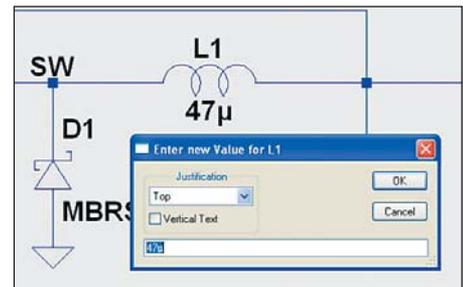


Рис. 9. Редактирование видимых атрибутов

ся в окно вставки текста, показанное на рис. 9. Это удобный способ изменения значения параметра компонента.

Специальные редакторы компонентов

Многие типы компонентов, такие как резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, биполярные транзисторы, МОП-транзисторы, полевые транзисторы, независимые источники напряжения, независимые источники тока и иерархические схемные блоки, имеют специальные редакторы. Эти редакторы позволяют получить доступ к соответствующей базе данных устройств. Для использования этих редакторов правой кнопкой мыши нажимают на тело компонента. Диалоговое окно редактора параметров индуктивности показано на рис. 10.

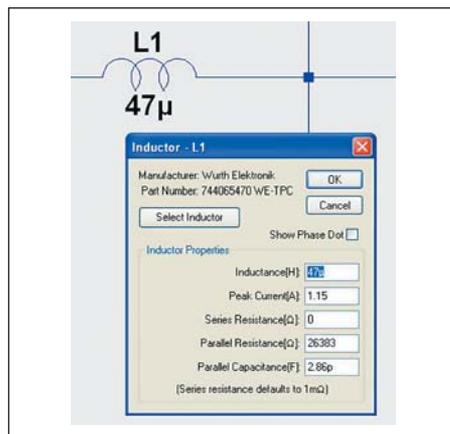


Рис. 10. Редактор компонентов

Полное редактирование атрибутов

Иногда желательно получить прямой доступ ко всем имеющимся атрибутам компонента, чтобы редактировать их содержание и видимость. Редактор, позволяющий делать это, можно вызвать, если поместить курсор на компонент, нажать сначала клавишу Ctrl и затем — правую кнопку мыши. Появится диалоговое окно (рис. 11), в котором показаны все имеющиеся атрибуты компонента. В каждой строке есть ячейка с индикатором видимости признака на схеме. При рисовании схемы полезно сделать видимыми паразитные характеристики компонентов, такие как, например, эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора.

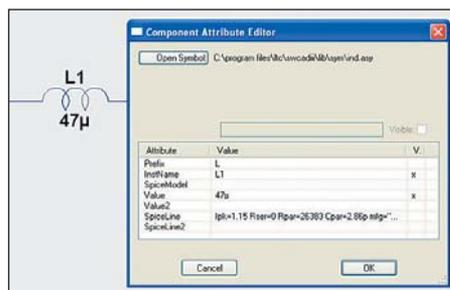


Рис. 11. Редактор атрибутов компонентов

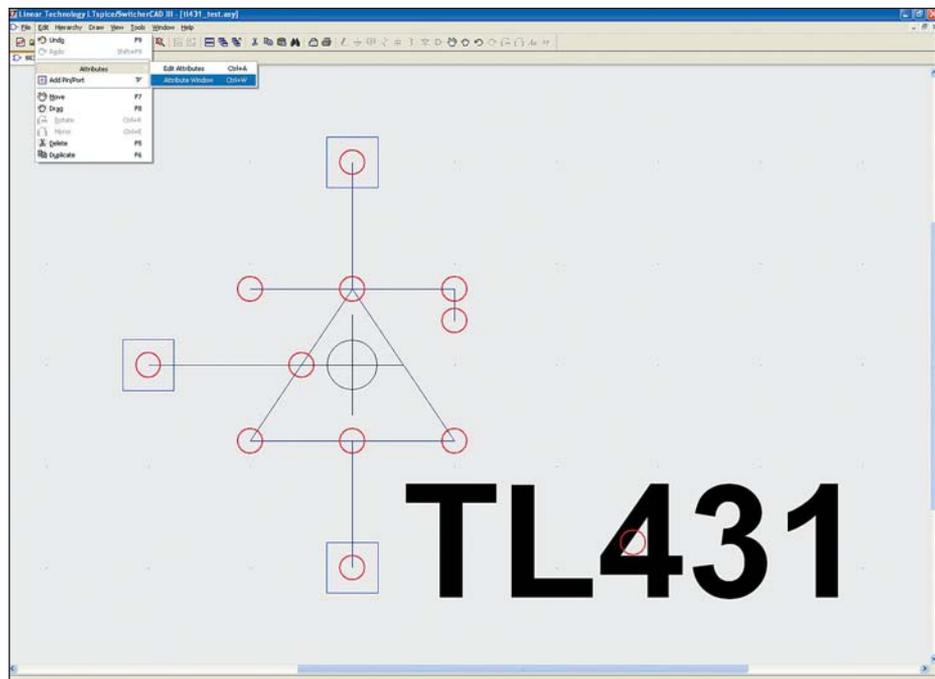


Рис. 12. Окно схемы в режиме рисования символа

Первый символ имени компонента определяет его тип. Специфический символ атрибута Prefix приписывается в первую позицию, если он отличается от первого символа имени, определяющего тип компонента. Атрибуты Prefix и InstName в таком случае будут разделены символом «\$». Например, для атрибута Prefix «M» и атрибута InstName «Q1» имя в списке соединений будет M\$Q1. Допускается использовать атрибут InstName, отличающийся от используемого Spice для идентификации типа устройства. Заменяв в схеме атрибут InstName для биполярного транзистора на привычный «VT1», получим имя компонента в списке соединений Q\$VT1.

Есть три исключения из этого правила:

1. Специальный символ, джампер (jumper), который не считается элементом схемы, но указывает генератору списка соединений, что две цепи с разными именами электрически связаны.
2. Символ, имеющий префикс «X», и оба определенных атрибута — Value и Value2. Такой компонент представлен в списке соединений двумя строками:

```
.lib <SpiceModel>
<имя> <узел1> <узел2> [...] <Value2>
```

Так к соответствующему символу автоматически подключается библиотека, содержащая описание макромодели компонента. Компилятор списка соединений удаляет дублирующиеся ссылки к библиотекам. Такие компоненты нельзя отредактировать в листе схемы.

3. Символ с префиксом «X», имеющий атрибут ModelFile. Такой компонент представлен в списке соединений двумя строками:

```
.lib <ModelFile>
<имя> <узел1> <узел2> [...] <SpiceModel> <Value> <Value2>
<SpiceLine> <SpiceLine2>
```

Примечание. Здесь и далее по тексту обязательный по правилам переноса строк в Spice-выражениях знак «+», предваряющий каждую последующую строку, сознательно опущен. При работе с программой нарушение этого правила недопустимо.

Этот метод используется, когда желательно автоматически подключить файл библиотеки и иметь возможность редактирования символа. Если атрибут символа SpiceModel существует и имя макромодели определено в файле <ModelFile>, тогда раскрывающийся список имен всех макромодели будет доступен для редактирования символа в листе схемы.

Создание новых символов

Символы могут представлять примитивное устройство типа резистора или конденсатора, либо макромодели с библиотекой в отдельном файле или на странице схемы. Для создания нового символа используется команда меню File>New Symbol.

Графика символа компонента

Графически символ компонента изображается рядом линий, прямоугольников, окружностей и дуг. Эти объекты не имеют электрического влияния на схему. С помощью команды Draw>Text можно поместить в символ компонента текст, также не влияющий на схему. Точки привязки объектов отмечены маленькими красными кружками, показывающими, что их следует захватить для перемещения. Красные маркеры можно отключить командой меню View>Mark Object Anchors.

Окно схемы в режиме создания нового символа показано на рис. 12.

Добавление выводов

Электрическое подключение компонента в схеме обеспечивается через выводы символов. Чтобы добавить новый вывод, используется команда меню **Edit>Add Pin/Port**, по которой вызывается диалоговое окно редактирования свойств выводов (портов), показанное на рис. 13.

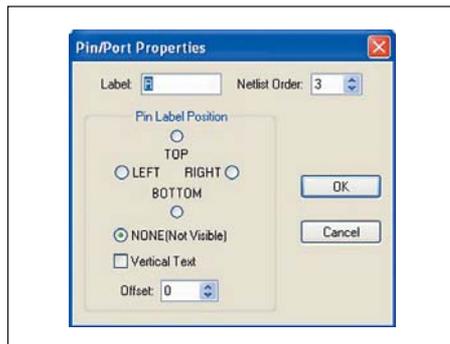


Рис. 13. Редактирование выводов

Хотя **Pin Label Position** должна определять, как будет показано имя вывода, в действительности **TOP** (сверху), **BOTTOM** (снизу), **LEFT** (слева) и **RIGHT** (справа) определяют положение вывода относительно текста его имени. Например, если положение вывода определено как **TOP**, вывод будет выше имени. Если символ представляет собой Spice-примитив или макромодель с библиотекой, тогда имя вывода не упоминается в списке соединений и, следовательно, не оказывает прямого электрического воздействия на схему. Однако если символ представляет схему низшего уровня иерархической схемы, имя вывода служит именем цепи схемы более низкого уровня.

Netlist Order определяет порядок следования выводов в списке соединений для Spice.

Добавление атрибутов

Можно изменить атрибуты символа, установленные по умолчанию, используя команду меню **Edit>Attributes>Edit Attributes**, по которой вызывается диалоговое окно, показанное на рис. 14. Наиболее важный атрибут — **Prefix**. Он в основном определяет тип символа. Если символ представляет Spice-примитив, он должен иметь соответствующий префикс: R для резистора, C для конденсатора, M для МОП-транзистора и т. д. Для символа, представленного макромоделью с определением в библиотеке, префикс должен быть X.

Атрибуты символа могут отвергаться, если символ представляет компонент с собственной схемой. Например, для символа МОП-транзистора атрибут **Prefix** «M», однако, если конкретный транзистор представлен в виде макромодели, то он будет иметь префикс X.

Специальная комбинация атрибутов заставляет подключить необходимую библио-

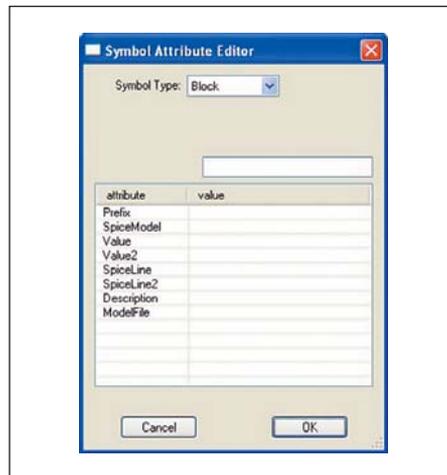


Рис. 14. Редактирование атрибутов символа

теку автоматически в каждую схему, в которой используется компонент с префиксом X:

- **SpiceModel**: <имя файла подключаемой Spice-модели>;
- **Value**: <значение, отображаемое на листе схемы>;
- **Value2**: <значение, отображаемое в списке соединений>.

Value2 должно совпадать с именем макромодели, определенном в файле подключаемой модели, и может содержать дополнительные параметры макромодели. Когда символ определен в такой манере, невозможно редактировать различные атрибуты компонента в листе схемы.

Если необходимо, чтобы символ представлял следующую страницу в иерархической схеме, все атрибуты нужно оставить пустыми, а тип компонента **Symbol Type** должен быть изменен с **Cell** на **Block**. Не должны быть установлены значения никаких атрибутов. Есть атрибут символа, **ModelFile**, который может быть указан. При этом используется имя файла, включаемого в список соединений как библиотека. Пример использования этого атрибута в файле .LTC\SwCADIII\lib\Misc\neobulb. Если атрибут **Prefix** — «X» и определен атрибут символа **SpiceModel**, указывающий на макромодель с файлом модели, будет доступен ниспадающий список всех имен макромоделей на случай редактирования символа в схеме.

Видимость атрибута

Можно редактировать видимость атрибутов в диалоговом окне (рис. 15), используя команду меню **Edit>Attributes>Attribute Window**. После того, как выбран соответствующий атрибут в диалоговом окне, можно переместить его относительно символа так, как в данный момент необходимо.

Можно изменить ориентацию текста и содержание атрибутов, которые уже сделаны видимыми, в диалоговом окне (рис. 16), оно появляется при нажатии правой кнопки мыши на текст атрибута.



Рис. 15. Редактирование видимости атрибутов символа

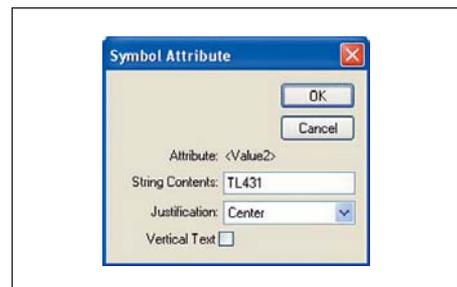


Рис. 16. Коррекция положения атрибута символа

Иерархия

Иерархическое построение схем имеет большие преимущества. Достаточно большие схемы могут быть нарисованы на одном листе с ясностью изображения, характерной для небольших схем. Просто изобразить повторяющиеся узлы. Блоки схемы могут быть включены в библиотеку для последующего использования в другом проекте.

Правила иерархии

Для использования какой-либо схемы в качестве блока в схеме высшего уровня необходимо создать символ с тем же самым именем, что и у схемы блока, а затем поместить этот символ в схему высшего уровня. Например, есть схема высшего уровня, названная TL431_test_pulse.asc, и есть файл другой схемы с именем TL431_test.asc, которую желательно поместить в схему TL431_test_pulse.asc. Создадим символ, названный TL431_test.asy, и поместим его в схему TL431_test_pulse.asc. Этот иерархический проект показан на рис. 17. Электрические соединения между схемами можно установить путем подсоединения проводников схемы более высокого уровня к выводам символа блока более низкого уровня, которые соответствуют именам узлов в схеме низшего уровня. Как имена символов, использованных в качестве блоков схемы, так и имена схем соответствующих блоков должны состоять из разрешенных символов. Недопустимо использование пробелов.

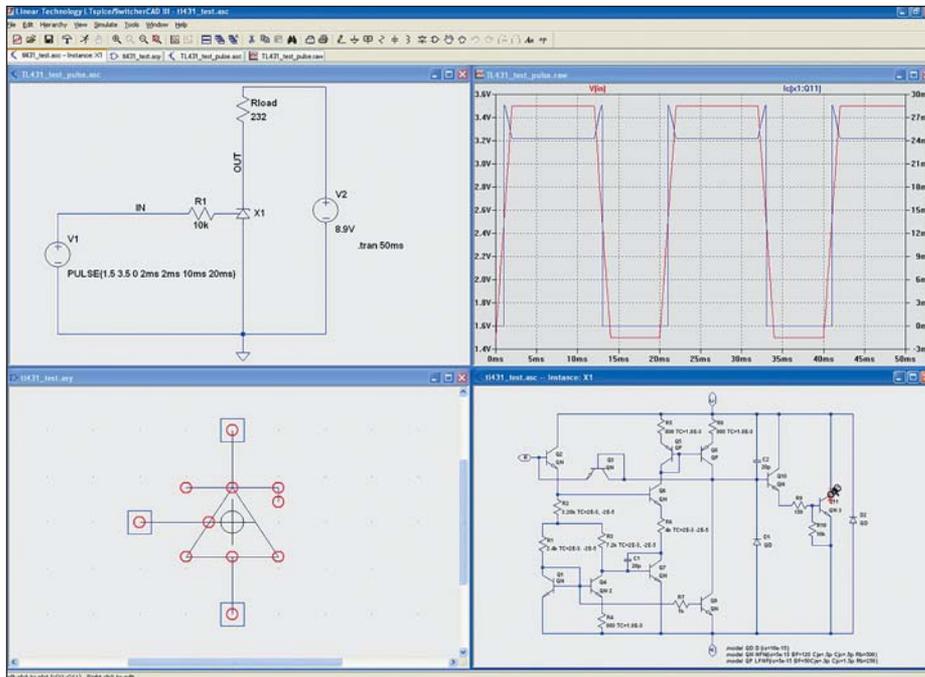


Рис. 17. Окно программы в режиме иерархического проекта

LTSpice ищет в каталоге схемы высшего уровня схемы символов и блоков, чтобы комплектовать схему высшего уровня.

Для символа, создаваемого как блок схемы низшего уровня, не должны быть определены никакие атрибуты.

Навигация в иерархии

Любой файл, открытый командой **File>Open**, рассматривается как схема высшего уровня. Можно добавить Spice-директивы к блоку и начать моделирование, используя схему любого уровня.

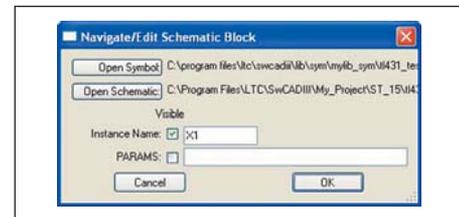


Рис. 18. Редактирование в иерархическом проекте

Чтобы открыть схему блока, входящего в схему более высокого уровня, сначала откройте схему более высокого уровня, а затем переместите курсор на символ вызываемого блока. При нажатии правой кнопкой мыши на выбранном символе отобразится диалоговое окно (рис. 18), позволяющее открыть схему и символ. Диалоговое окно позволяет вводить параметры блока при их наличии.

Когда схема будет открыта, можно исследовать узловые напряжения и токи в блоке. Отметим, что необходимо включить режимы **Save Subcircuit Node Voltages** и **Save Subcircuit Device Currents** в окне **Save Defaults** в **Control Panel**. Если подсветить цепь на схеме более высокого уровня, она так же подсветится в блоке нижнего уровня.

В следующей части статьи будет рассказано, как отображаются результаты моделирования и какие операции можно выполнять над ними. ■

Продолжение следует

Продолжение. Начало в № 11 `2008

Программа схемотехнического моделирования SwitcherCAD III

Михаил ПУШКАРЕВ

В данной части статьи речь пойдет об отображении результатов моделирования и возможных операциях с этими результатами.

Окно графиков

SwitcherCAD III включает в себя интегрированное окно графиков, обеспечивающее полное управление отображением данных моделирования. Окно графиков открывается одновременно с запуском процесса моделирования по команде **Simulate->Run**.

Выбор графика

Есть три основных средства выбора отображаемых графиков.

1. Использование пробника в схеме. Это самый простой метод. Выбираете цепь и щелкаете по проводнику, чтобы построить график напряжения на этом проводнике. Для отображения графика тока через любой компонент с двумя выводами (резистор, конденсатор или катушка индуктивности) нужно нажать на изображение компонента. Способ работает на любом уровне иерархии схемы. Чтобы вывести график тока через соответствующий вывод компонента, имеющего более двух выводов,

следует щелкнуть по нужному выводу компонента. Двойной щелчок стирает все предыдущие графики, отобразится один график, вызванный двумя щелчками. Можно удалить отдельные графики, нажав на имя графика и выбрав команду удаления.

Как отобразить ток в цепи, показано на рис. 17. Курсор мыши превращается в изображение, похожее на зажим амперметра, когда он указывает на ток, который будет отображен. По принятому условию втекающий ток считается положительным.

Можно также указать мышью на разность напряжений. Нажмите на проводник и тяните курсор к другому проводнику. Увидите красный пробник напряжения на первом проводнике и черный пробник на втором. Это позволяет отобразить разность напряжений, как показано на рис. 19.

Еще один схемный пробник позволяет отобразить график мощности, рассеиваемой в компоненте. Для этого нажмите на компонент, удерживая клавишу Alt. Отобразится график мгновенной мощности как произведение напряжений и токов. Он будет изображен со своей шкалой в ваттах. Курсор мыши превращается в изображение, похожее на термометр (рис. 20), когда он указывает на потери, которые будут отображены. Можно найти средние потери, для этого нужно щелкнуть на имени графика при нажатой клавише Ctrl.

2. Команда меню **Plot Settings->Visible Traces**. Эта команда показывает диалоговое окно (рис. 21) для начала отображения данных, полученных при моделировании. Окно

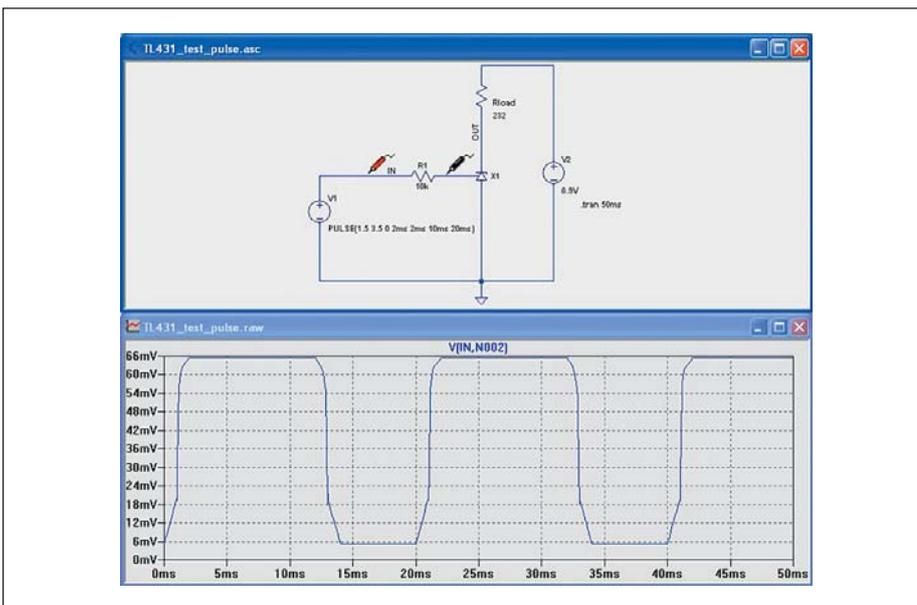


Рис. 19. Выбор отображаемой разности напряжений потенциальными пробниками

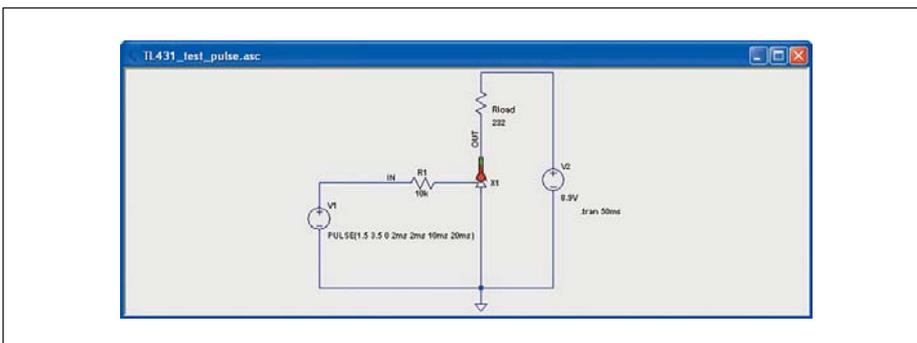


Рис. 20. Пробник мощности

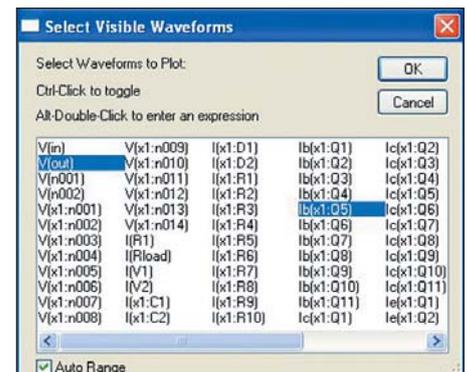


Рис. 21. Выбор отображаемых графиков

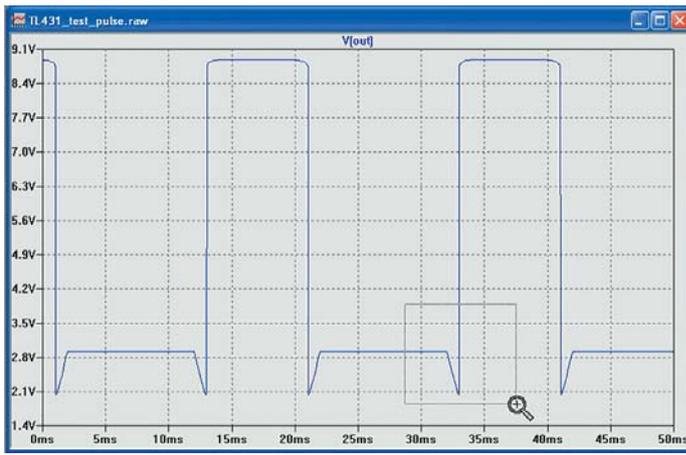


Рис. 22. Изменение масштаба

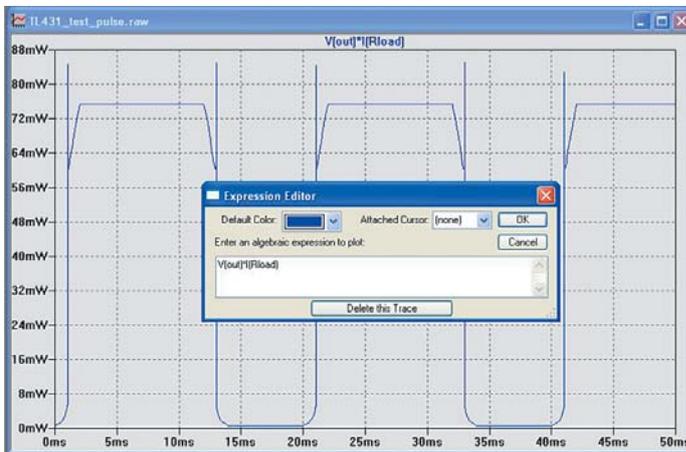


Рис. 23. Редактор математических выражений

позволяет выбрать графики перед отображением. Оно также дает произвольный доступ к полному списку отображаемых графиков. Удерживая нажатой клавишу Ctrl, можно добавлять графики к списку одновременно отображаемых графиков. Двойной щелчок при нажатой клавише Alt открывает диалоговое окно для ввода математического выражения.

- Команда **Plot Settings>Add Trace** подобна команде **Plot Settings>Visible Traces**. Однако при ее использовании не удаляются графики, отображенные ранее. Имеются две полезных возможности. Введите в ячейку редактирования вверху диалогового окна часть имени графика. В диалоговом окне будут показаны имена только тех графиков, которые соответствуют образцу. Это очень полезно при поиске нужного графика, когда известна только часть его имени. Кроме того, несколько легче составлять выражения из данных графиков, потому что можно нажимать на имя графика в списке вместо его вписывания. Команды **Undo** и **Redo** позволяют просматривать разные графики независимо от использованного способа выбора.

Изменение масштаба изображения

LTspice/SwitcherCAD III автоматически изменяет масштаб изображения всякий раз, когда появляются новые данные для отображения. Чтобы изменить масштаб изображения области, просто начертите рамку вокруг области (рис. 22), которую следует увеличить.

Есть кнопки на панели инструментов и команды меню для изменения масштаба изображения и возврата к автоматически установленному масштабу. Команды **Undo** и **Redo** при просмотре графиков тоже действуют.

Математические операции с графиками

С данными графиков могут быть выполнены три типа математических операций.

1. Отображение преобразованных графиков.

Обе команды, **Plot Settings>Visible Traces** и **Plot Settings>Add Trace**, позволяют вводить выражения для преобразования данных. При другом методе вывода графиков преобразованных данных моделирования нужно поместить курсор на имя графика в верхней части окна графиков и щелкнуть правой кнопкой мыши. Диалоговое окно редактирования выражений (рис. 23) позволяет также

установить цвет графика и подключить курсор к кривой. LTspice проанализирует размерность выражения и разметит вертикальную ось в соответствующих единицах измерений. Все графики отобразятся в тех же единицах, что указаны на соответствующей оси.

Разность двух напряжений, например, $V(a) - V(b)$, может быть эквивалентно записана как $V(a, b)$.

Для данных в действительных величинах доступны функции, перечисленные в таблице 3.

Для данных в комплексных числах функции **ATAN2(,)**, **SGN(,)**, **U(,)**, **BUF(,)**, **INV(,)**, **URAMP(,)**, **INT(,)**, **FLOOR(,)**, **CEIL(,)**, **RAND(,)**, **MIN(,)**, **LIMIT(,)**, **IF(,,)** и **TABLE(...)** недоступны.

Операции, доступные для действительных чисел, приведены в таблице 4.

Таблица 3. Математические функции для преобразования графиков

Функция	Определение
ABS(x)	Абсолютное значение x
ACOS(x)	Аркосинус x
ARCOS(x)	Синоним для acos(x)
ACOSH(x)	Гиперболический косинус x
ASIN(x)	Арсинус x
ARCSIN(x)	Синоним для asin(x)
ASINH(x)	Гиперболический синус x
ATAN(x)	Арттангенс x
ARCTAN(x)	Синоним для atan(x)
ATAN2(y, x)	Арттангенс y/x
ATANH(x)	Гиперболический тангенс x
BUF(x)	buf(x)=1, если x>0,5; buf(x)=0, если x<0,5
CEIL(x)	Целое число, равное или большее, чем x
CONJ(x)	Комплексная функция, сопряженная x
COS(x)	Косинус x
COSH(x)	Гиперболический косинус x
D(x)	Производная dx/dt
EXP(x)	Экспонента числа x
FLOOR(x)	Целое число, равное или меньшее, чем x
HUPOT(x,y)	sqrt(x**2 + y**2)
IF(x, y, z)	y, если x истинно, иначе z
IM(x)	Мнимая часть комплексного аргумента
INT(x)	Округление x до целого числа
INV(x)	inv(x)=0, если x>0,5; inv(x)=1, если x<0,5
LIMIT(x,y,z)	x, если y<x<z; y, если x<y; z, если x>y
LN(x)	Натуральный логарифм x
LOG(x)	Альтернативный синтаксис для ln(x)
LOG10(x)	Десятичный логарифм x
MAG(x)	Действительная часть, равная амплитуде комплексного аргумента
MAX(x,y)	Максимальное из x или y
MIN(x,y)	Минимальное из x или y
PH(x)	Действительная часть, равная фазе комплексного аргумента
POW(x, y)	x**y
PWR(x, y)	abs(x)**y
PWRS(x, y)	sgn(x)*abs(x)**y
RAND(x)	Случайные числа между 0 и 1 в зависимости от значения x
RANDOM(x)	Функция, подобная rand(x), но с более плавными переходами между значениями
RE(x)	Действительная часть комплексного аргумента
ROUND(x)	Ближайшее целое к x
SGN(x)	Знак числа x
SIN(x)	Синус x
SINH(x)	Гиперболический синус x
SQRT(x)	Квадратный корень из x
TABLE(x,a,b,c,d,...)	Табличная зависимость функции от x. Координаты точек (x, y) в виде таблицы, в промежутках между точками линейная аппроксимация
TAN(x)	Тангенс x
TANH(x)	Гиперболический тангенс x
U(x)	Ступенчатая функция: u(x)=1, если x>0; u(x)=0, если x<0
URAMP(x)	Функция ограничения: uramp(x)=x, если x>0; uramp(x)=0, если x<0
WHITE(x)	Случайные числа между -0,5 и 0,5 с плавными переходами между значениями, даже более плавными, чем в random()

Таблица 4. Математические операции для преобразования графиков

Символ операции	Назначение
&	Преобразование, эквивалентное логическому И (AND)
	Преобразование, эквивалентное логическому ИЛИ (OR)
^	Преобразование, эквивалентное логическому исключающему ИЛИ (XOR)
>	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева больше выражения справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
<	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева меньше выражения справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
>=	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева больше или равно выражению справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
<=	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева меньше или равно выражению справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
+	Сложение
-	Вычитание
*	Умножение
/	Деление
**	Возведение в степень
!	Преобразование, эквивалентное логической инверсии
@	Оператор выбора шага

ИСТИНА (TRUE) в цифровой форме равна 1, а ЛОЖЬ (FALSE) — 0. В булевом преобразовании значение преобразуется в 1, если оно больше 0,5, иначе преобразованное значение 0.

Оператор выбора шага @ используется, когда возможны многократные проходы моделирования как в .STEP, .TEMP или .DC анализе. Так выбираются данные из определенного прохода. Например, V(1)@3 отобразил бы данные от 3-го прохода независимо от того, какие шаги выбраны для отображения.

Для комплексных чисел доступны только операции +, -, *, /, **, и @. Также для комплексных чисел булев оператор XOR, ^, понимается как возведение в степень, **.

Встроенные в программу константы перечислены в таблице 5.

Таблица 5. Встроенные константы

Символ	Описание	Величина
E	e	2,7182818284590452354
Pi	π	3,14159265358979323846
K	Постоянная Больцмана	1,3806503e-23
Q	Заряд электрона	1,602176462e-19

Ключевое слово **time** подразумевается при подготовке к отображению результатов анализа переходных процессов. Точно так же **freq** и **omega** подразумеваются при подготовке отображения данных анализа по переменному току. Знак **w** может использоваться как синоним для омеги.

2. Вычисление среднего или среднеквадратичного значения для графика.

В окне графиков можно интегрировать графики, чтобы получить среднее или среднеквадратичное значения в указанном диапазоне. Увеличьте масштаб изображения кривой до интересующего участка, затем переместите курсор на имя графика и, удерживая нажатой клавишу Ctrl, щелкните левой кнопкой мыши. В табличке (рис. 24) показаны результаты.

3. Показ Фурье-преобразования графика.

Используйте команду **View->FFT** для вызова диалогового окна выбора графиков (рис. 25), чтобы выполнить быстрое преобразование Фурье над данными различных графиков.

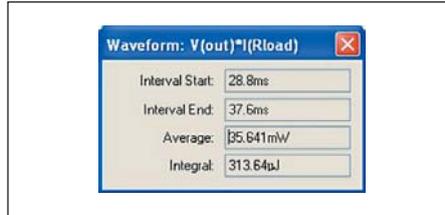


Рис. 24. Окно результатов вычисления средних значений

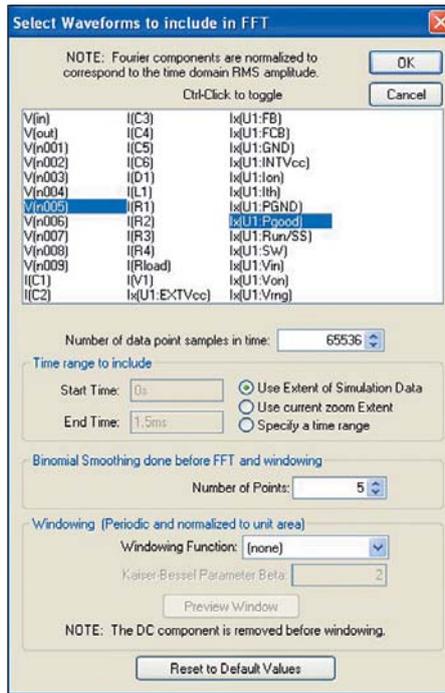


Рис. 25. Выбор графиков для быстрого преобразования Фурье

Функции, определяемые пользователем

Команда меню **Plot Settings->Edit Plot Defs File** позволяет вводить собственные определения функций и параметров для использования в окне графиков. Эти функции сохра-

няются в файле plot.defs в том же каталоге, что и исполняемый файл SwCADIII, scad3.exe.

Синтаксис тот же самый, что и в директивах .PARAM и .FUNC, которые будут рассмотрены далее. Например, строка `.func Pythag(x,y) {sqrt(x*x+y*y)}` определяет функцию Pythag() как квадратный корень из суммы двух ее аргументов. Точно так же строка `.param twopi = 2*pi` определяет twopi равным 6.28318530717959. При этом используется встроенная константа π.

Управление осями

Если переместить курсор мыши за пределы области данных, он превращается в линейку. Это показывает возможность изменения атрибутов соответствующей оси. Щелчком левой кнопки мыши открывается диалоговое окно ручного ввода данных для масштабирования оси графика. Например, для данных в действительных числах, если переместить курсор мыши в низ экрана и щелкнуть левой кнопкой, можно войти в диалог для изменения масштаба горизонтальной оси. Это позволяет изменить параметры изображения.

Для данных в комплексных числах можно отобразить любую фазу, групповую задержку или что-то иное с правой вертикальной осью. Можно изменить представление комплексных данных от диаграмм Боде к годографу Найквиста или декартовым координатам, переместив мышью к левой вертикальной оси комплексных данных и нажав левую кнопку мыши.

Панели отображения графиков

Несколько панелей графиков могут быть размещены в одном окне по команде **Plot Setting->Add Plot Pane**. Это обеспечивает лучшее разделение между графиками и независимое масштабирование разных графиков (рис. 26). Графики можно перемещать между панелями путем перетягивания метки. Копия графика может быть сделана в другой панели.

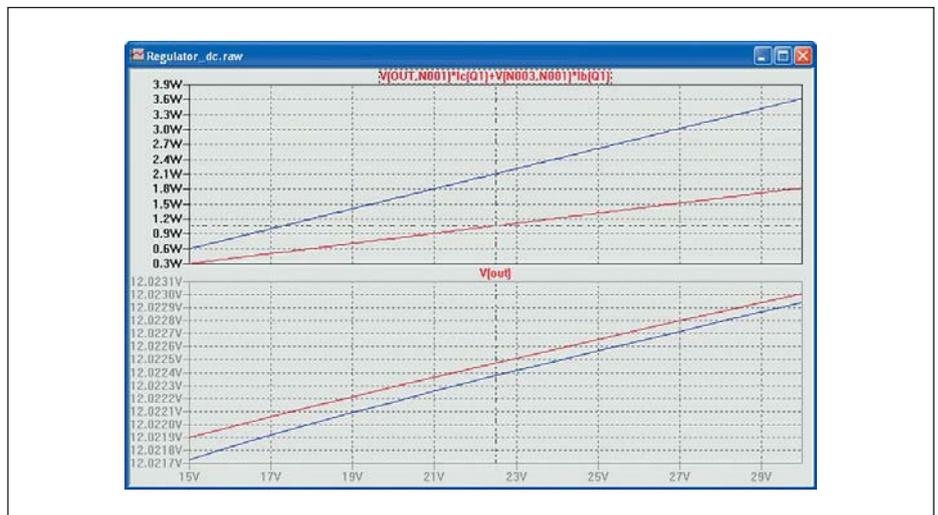


Рис. 26. Отображение графиков на нескольких панелях

Если в меню **Plot Setting** пометить ячейку **Grid**, панель отображения графиков будет дополнена сеткой.

Управление цветом

Команда меню **Tools->Color Preferences** позволяет установить цвета, используемые для отображения данных (рис. 27). Нажмите на объект и, используя красный, зеленый и синий ползунки, изменяйте цвета по вашему желанию.

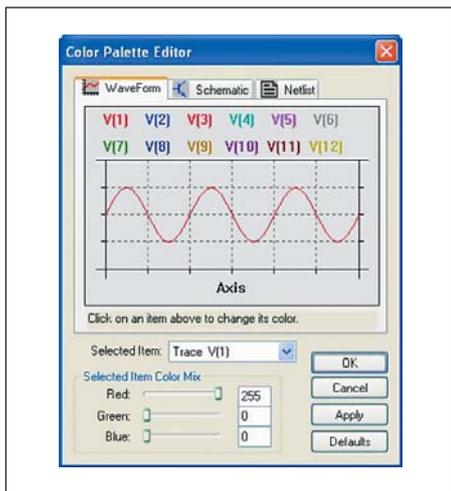


Рис. 27. Управление цветами графиков

Подключаемые курсоры

Два курсора доступны для подключения. Подключить курсор к графику можно щелчком левой кнопки мыши на имени графика. Можно подключить оба курсора к одному графику, нажав правую кнопку мыши на имени графика и выбрав **1st & 2nd** в ячейке **Attached Cursor** всплывающего меню. Можно также подключить 1-й или 2-й курсор или оба курсора к любому графику по выбору (рис. 28). Подключенные курсоры могут перемещаться перетягиванием мышью или при помощи курсорной клавиатуры.

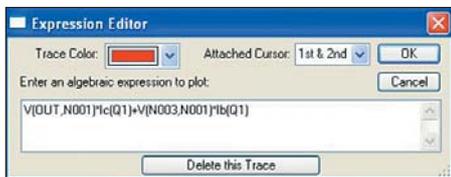


Рис. 28. Подключение курсоров

С подключением курсоров появляется окно, в котором показаны координаты и разность координат курсоров.

Возможно также считывание позиции курсора мыши, независимо от вышеупомянутого считывания подключенным курсором (рис. 29). При перемещении курсора мыши по окну графиков, положение мыши отображается в управляющей строке. Если перемещать мышью, как при изменении масштаба изображения, в строке управления отобра-



Рис. 29. Координаты курсоров

жается размер рамки. Это позволяет быстро проводить различные измерения с помощью курсора мыши. Если координата горизонтальной оси — время, то разность координат преобразуется в частоту.

Таким способом можно измерить разность координат, не изменяя масштаба изображения, если нажать клавишу Esc или правую кнопку мыши, перед тем как отпустить левую кнопку мыши.

Подключенные курсоры можно использовать для считывания сведений о графике соответствующей ступени в семействе графиков, полученных .step/.dc/.temp моделированием (рис. 30). Курсор можно перемещать от графика одной ступени к графику другой ступени клавишами вверх/вниз курсорной клавиатуры и, нажав затем на курсор правой кнопкой мыши, увидеть информацию о соответствующем графике.

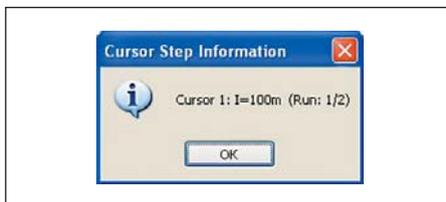


Рис. 30. Окно информации о графике

Сохранение конфигурации отображения графиков

Команды меню **Plot Settings->Save Plot Settings/Open Plot Settings File** позволяют прочитать и записать конфигурацию отображения на диск. Файлы настройки отображения графиков — ASCII файлы с расширением .plt. По умолчанию имя файла совпадает с именем файла данных с заменой расширения .raw файла данных на .plt. Если файл с таким именем существует, то, когда открывается файл данных, считывается и соответствующий файл конфигурации отображения.

Каждый тип анализа — .TRAN, .AC, .NOISE и пр. — имеет собственный файл настроек отображения. Это не дает возможности загружать параметры настройки от одного вида анализа к другому. Но можно использовать файл параметров настройки отображения от другого моделирования такого же вида анализа.

Формат файла быстрого доступа Fast Access

В процессе моделирования программа LTspice обычно использует формат сжатого бинарного файла, позволяющий присоединить дополнительные данные моделирования без изменения остальной части файла. Но когда моделирование закончено, может оказаться, что этот формат файла слишком медленный для доступа с целью добавления единственного нового графика в файл.

Чтобы сократить время, можно преобразовать файл в альтернативный формат **Fast Access**. Это может быть сделано только после того, как моделирование закончено, то есть никакие новые данные не будут добавлены к файлу. Как только файл преобразован в этот формат, время загрузки новых графиков будет уменьшено пропорционально количеству графиков, сохраненных в файле. Например, для файла объемом 5 Гбайт с данными на 2000 графиков может потребоваться 4 мин, чтобы добавить новый график. После преобразования этого файла в формат Fast Access, время загрузки с четырех минут уменьшится до секунды. Это облегчает многократный анализ больших схем с огромными файлами данных моделирования. Время, требуемое для того, чтобы загрузить файл графика в формате Fast Access, в большей степени зависит от количества имеющейся памяти и скорости жесткого диска.

Чтобы преобразовать графики в формат Fast Access, нужно сделать окно графиков активным и выполнить команду меню **File->Convert to Fast Access**. Процесс преобразования потребует свободного дискового пространства, равного размеру преобразуемого файла, но преобразованный файл будет только на 11 байт больше оригинального.

Процесс преобразования может занять много времени и использовать до одной четверти оперативной памяти. Фактически для преобразования файла в формат Fast Access может потребоваться больше времени, чем было необходимо для первоначального моделирования. Точное время преобразования будет зависеть от фрагментации жесткого диска и количества имеющейся оперативной памяти. В течение преобразования можно заметить, что компьютер неохотно откликается на действия мыши и клавиатуры. Возможно преобразование файлов командой из командной строки со следующим синтаксисом:

```
scad3.exe -FastAccess <file>
```

Здесь <file> — название .raw файла, который преобразуется в формат Fast Access. Этот формат поддерживается только для действительных данных, а не комплексных данных, получаемых при .AC анализе.

Далее будет рассмотрен синтаксис и директивы моделирования языка LTSpice.

Продолжение следует

Продолжение. Начало в № 11 `2008

Программа схемотехнического моделирования SwitcherCAD III

Михаил ПУШКАРЕВ

В этой части статьи рассмотрены синтаксис языка LTspice и директивы моделирования.

Кратко о LTspice

LTspice — инструмент моделирования схем в SwitcherCAD III. Это программа моделирования схем с поддержкой рисования. LTspice-симулятор первоначально базировался на Berkeley SPICE 3F4/5. Симулятор претерпел полную переработку с целью улучшения работы, обнаружения ошибок и доведен до состояния промышленного стандарта в полупроводниковых и поведенческих моделях. Наряду с расширением возможностей аналогового SPICE-моделирования добавлена возможность цифрового моделирования, чтобы сделать LTspice симулятором аналогового и смешанного моделирования промышленного уровня для большого класса схем импульсных регуляторов и фильтров на переключаемых конденсаторах.

Многие продукты Linear Technology смоделированы с использованием составляющих собственность блоков и (или) составляющих собственность языка, которые объединяют реалистичное поведение с традиционными макромоделями. Это дает возможность быстро смоделировать систему питания и изготовить прототип.

LTspice может использоваться как SPICE-симулятор схем общего назначения. Новые схемы можно создать с использованием подключенной программы рисования. Команды моделирования и параметры помещаются на схему как текст с использованием синтаксиса SPICE. Щелчком мыши на цепи схемы в процессе моделирования или после моделирования на экран выводятся графики напряжений и токов.

LTspice — зарегистрированная торговая марка Linear Technology Corporation.

Описание схемы

Схемы описываются текстом списка соединений (netlist). Список соединений состоит из списка элементов схемы и их узлов, определенных моделей и других SPICE-команд.

Обычно список соединений формируется при графическом вводе схемы. Чтобы начать новую схему, выберите в меню **File>Open**. Появится окно файлового браузера. Выберите любую имеющуюся схему и сохраните ее

под новым именем или создайте новый чистый файл схемы под новым именем. LTspice использует различные типы файлов и документов. Описание схемы сохраняется в файле с расширением .asc. Команды рисования схемы находятся в меню **Edit**. Клавиши быстрого вызова показаны в списке команд редактора схем.

Когда схема моделируется, информация для списка соединений извлекается из графической информации для создания файла с именем схемы, но с расширением .net. LTspice читает его как netlist.

Можно также открывать, моделировать и редактировать текстовый список соединений, созданный вручную или сгенерированный извне. Файлы с расширениями .net, .cir и .sp распознаются LTspice как список соединений.

Общая структура и соглашения

Анализируемая схема описывается текстовым файлом, называемым списком соединений. Первая строка в списке соединений игнорируется, так как по предположению является комментарием. Последняя строка списка соединений обычно просто строка .END, но она может быть опущена. Любые строки после строки .END игнорируются.

Порядок строк между комментарием и концом не регламентирован. Строки могут быть комментариями, параметрами элементов схемы или директивами моделирования. Начнем с примера:

```
* Первая строка игнорируется
* Схема представляет собой резистивно-емкостной фильтр
* с входным сигналом прямоугольной формы 1 МГц
R1 n1 n2 1k; резистор 1 кОм между узлами n1 и n2
C1 n2 0 100p; конденсатор 100 пФ между узлами n2 и «землей»
V1 n1 0 PULSE(0 1 0 0.5u 1u); прямоугольный сигнал 1 МГц
.tran 3u; анализ переходного процесса продолжительностью 3 мкс
.end
```

Первые две строки — комментарии. Любая строка, начинающаяся с «*», является комментарием и игнорируется. Строка, начинающаяся с «R1», объявляет, что есть резистор сопротивлением 1 кОм, включенный между узлами n1 и n2. Отметим, что при этом может использоваться точка с запятой «;», что-

бы начать комментарий в середине строки. Строка, начинающаяся с «C1», объявляет, что есть конденсатор емкостью 100 пФ между узлом n2 и «землей». Узел «0» — глобальная «земля» схемы.

Случайные знаки, пробелы и табуляции игнорируются.

Первый отличный от пробела знак в строке (табл. 6) определяет тип элемента схемы.

Числа могут быть выражены не только в научном написании, например, 1e12, но и с ис-

Таблица 6. Первый символ в строке

Символ, начинающий строку	Тип строки
*	Комментарий
A	Устройство со специальными функциями
B	Источник с произвольным поведением
C	Конденсатор
D	Диод
E	Источник напряжения, управляемый напряжением
F	Источник тока, управляемый током
G	Источник тока, управляемый напряжением
H	Источник напряжения, управляемый током
I	Независимый источник тока
J	Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом (JFET)
K	Взаимная индуктивность
L	Индуктивность
M	МОП-транзистор (MOS)
O	Линия передачи с потерями
Q	Биполярный транзистор
R	Резистор
S	Ключ, управляемый напряжением
T	Линия передачи без потерь
U	Распределенная RC-цепь
V	Независимый источник напряжения
W	Ключ, управляемый током
X	Макромодель
Z	Полевой транзистор с затвором Шоттки (MESFET)
.	Директива моделирования, например: .options reltol=1e-4
+	Продолжение предыдущей строки. «+» не учитывается и продолжение строки считается частью предшествующей строки

Таблица 7. Масштабные коэффициенты

Суффикс	Масштабный коэффициент
T	1×10 ¹²
G	1×10 ⁹
Meg	1×10 ⁶
K	1×10 ³
Mil	25,4×10 ⁻⁴
M	1×10 ⁻³
u (или μ)	1×10 ⁻⁴
n	1×10 ⁻⁹
p	1×10 ⁻¹²
f	1×10 ⁻¹⁵

пользованием инженерных множителей. Таким образом, 1000 или 1e3 может также быть записано как 1 К. В таблице 7 перечислены масштабные коэффициенты.

Не специфицированные буквы, следующие после числа или инженерного множителя, игнорируются. Следовательно, 10, 10 V, 10 Volts и 10 Hz представляют одно и то же число, и М, МА, МSec и МMhos представляют один и тот же масштабный коэффициент (0,001). Распространенная ошибка состоит в изображении резистора со значением сопротивления 1М, подразумевая резистор в один мегаом, однако, 1М интерпретируется как резистор с сопротивлением один миллиом. Этим обеспечивается совместимость со стандартными SPICE-правилами.

LTspice воспринимает числа, написанные в форме 6K34, как 6,34 К. Это справедливо для любого из перечисленных множителей. Эта возможность может быть выключена следующим путем **Tools>Control Panel>SPICE** с отключением **Accept 3K4 as 3.4K**.

Имена узлов могут быть произвольным набором символов. Узел глобальной «земли» схемы — «0», хотя есть и «GND» — специальный синоним. Поскольку узлы обозначаются строкой символов, то «0» и «00» — разные цепи.

Во всех последующих разделах угловые скобки, помещенные вокруг полей данных, должны быть заполнены соответствующей информацией, например, <srcname> будет именем некоего определенного источника. Квадратные скобки указывают, что вложенные в поле данные являются дополнительными и необязательными.

Синтаксис компонента

Компоненты, поддерживаемые в LTSpice, и их синтаксис приведены в таблице 8.

Директивы моделирования. Команды с точкой

Для начала моделирования необходимо определить не только схему, но и вид анализа, который будет выполнен. Есть шесть различных типов анализа: линеаризованный анализ на переменном токе в режиме малого сигнала (**linearized small signal AC**), анализ на постоянном токе со ступенчатым изменением параметра (**DC sweep**), анализ шумов (**noise**), расчет рабочей точки на постоянном токе (**DC operating point**), нахождение передаточной функции на постоянном токе в режиме малого сигнала (**small signal DC transfer function**) и анализ переходного процесса (**transient analysis**). Один из этих типов анализа должен быть правильно описан.

Схема обычно изображается графически, а команды помещаются в схему как текст. Все такие команды начинаются с точки и поэтому названы «команды с точкой».

Таблица 8. Синтаксис компонентов

Устройство со специальными функциями	Axx <узел 1> <узел 2> <узел 3> <узел 4> <узел 5> <узел 6> <узел 7> <узел 8> <имя модели> [дополнительные параметры]
Источник с произвольным поведением	Vxx <+узел> <-узел> <V=... или I=...>
Конденсатор	Cxx <+узел> <-узел> <емкость> [[C=<начальное напряжение>] [Rser=<значение>] [Lser=<значение>] [Rpar=<значение>] [Cpar=<значение>] [m=<значение>] [дополнительные параметры]]
Диод	Dxx <узел анода> <узел катода> <имя модели> [коэффициент кратности area]
Источник напряжения, управляемый напряжением	Exx <+узел> <-узел> <+управляющий узел> <-управляющий узел> <коэффициент передачи>
Источник тока, управляемый током	Fxx <+узел> <-узел> <имя управляющего источника напряжения> <коэффициент передачи>
Источник тока, управляемый напряжением	Gxx <+узел> <-узел> <+управляющий узел> <-управляющий узел> <коэффициент передачи>
Источник напряжения, управляемый током	Hxx <+узел> <-узел> <имя управляющего источника напряжения> <коэффициент передачи>
Независимый источник тока	Ixx <+узел> <-узел> <значение тока>
Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом (JFET)	Jxx <узел стока> <узел затвора> <узел истока> <имя модели> [коэффициент кратности area] [проводимость] [IC=<Vds,Vgs>] [temp=<температура>]
Взаимная индуктивность	Kxx L1 L2 L3... <коэффициент связи>
Индуктивность	Lxx <+узел> <-узел> <индуктивность> [[C=<начальный ток>] [Rser=<значение>] [Rpar=<значение>] [Cpar=<значение>] [m=<значение>] [дополнительные параметры]]
МОП-транзистор (MOSFET)	Mxx <узел стока> <узел затвора> <узел истока> <узел подложки> <имя модели> [L=<длина канала>] [W=<ширина канала>] [AD=<площадь стока>] [AS=<площадь истока>] [PD=<периметр стока>] [PS=<периметр истока>] [NRD=<значение>] [NRS=<значение>] [проводимость] [IC=<Vds,Vgs,Vbs>] [temp=<температура>]
Линия передачи с потерями	Oxx <+узел порта L> <-узел порта L> <+узел порта R> <-узел порта R> <имя модели>
Биполярный транзистор	Qxx <узел коллектора> <узел базы> <узел эмиттера> [узел подложки] <имя модели> [коэффициент кратности area] [проводимость] [IC=<Vbe,Vce>] [temp=<температура>]
Резистор	Rxx <узел1> <узел2> <сопротивление> [дополнительные параметры]
Ключ, управляемый напряжением	Sxx <узел1> <узел2> <+управляющий узел> <-управляющий узел> <имя модели> [сопротивление замкнутого ключа, сопротивление разомкнутого ключа]
Линия передачи без потерь	Txx <+узел порта L> <-узел порта L> <+узел порта R> <-узел порта R> [ZO=<значение>] [TD=<значение>]
Однородная RC-линия с распределенными параметрами	Uxx <узел1> <узел2> <узел общий> <имя модели> L=<длина, м> [N=<количество сегментов>]
Независимый источник напряжения	Vxx <+узел> <-узел> <значение напряжения>
Ключ, управляемый током	Wxx <узел1> <узел2> <имя управляющей ветви> <модель> [сопротивление замкнутого ключа, сопротивление разомкнутого ключа]
Макромодель	Xxx n1 n2 n3... <имя макромодели>
Полевой транзистор с затвором Шоттки (MESFET)	Zxx <узел стока> <узел затвора> <узел истока> <имя модели> [коэффициент кратности area] [проводимость] [IC=<Vds,Vgs>]

.AC — анализ на переменном токе в режиме малого сигнала, линеаризованный в окрестности рабочей точки по постоянному току (расчет частотных характеристик)

Для малых приращений сигнала (линейных) на переменном токе LTspice вычисляет комплексные значения узловых напряжений и токов ветвей в функции частоты. Сначала определяется рабочая точка схемы по постоянному току. Затем находятся линеаризованные для малого сигнала модели всех нелинейных компонентов схемы в этой рабочей точке. И, наконец, при использовании независимых источников напряжения и тока как управляющие сигналы результирующая линеаризованная схема обчисляется в заданном диапазоне частот.

Этот метод применяется при анализе фильтров и цепей, устойчивости и шумов.

Синтаксис:

```
.ac <oct, dec, lin> <количество точек> <начальная частота> <конечная частота>
```

Частота изменяется от <начальной частоты> до <конечной частоты>. Ключевые слова **oct**, **dec** устанавливают логарифмический характер изменения частоты октавами и декадами соответственно, **lin** — линейное изменение частоты. Ключевое слово <количество точек> определяет количество точек на октаву, декаду или весь диапазон частот.

Директива .AC вносится в лист схемы по команде **Edit>SPICE Analysis** с последующим вы-

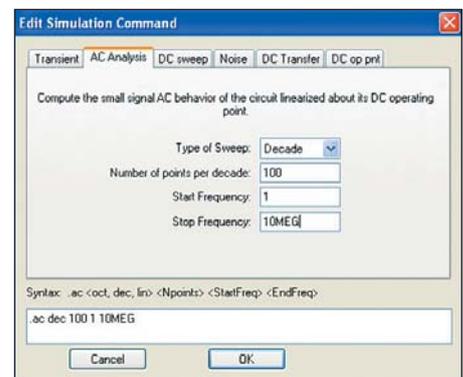


Рис. 31. Задание параметров .AC-анализа

бором в диалоговом окне пункта **AC Analysis** и заполнением чекбоксов соответственно заданию. Диалоговое окно показано на рис. 31.

Один из примеров анализа на переменном токе содержится в файле ...LTC\SwCADIII\examples\Educational\phono.asc.

.BACKANNO — связь имен выводов макромодели с токами портов

Синтаксис:

```
.backanno
```

Эта директива автоматически включается в каждый список соединений, генерируемый SwitcherCAD III из схемы. Она заставляет LTspice включить в .raw файл информацию о связи токов портов с именами выводов. Это

позволяет отображать ток через вывод компонента щелчком мыши на выводе компонента.

.DC — анализ режима по постоянному току с вариацией параметров источников

По этой директиве выполняется анализ по постоянному току со ступенчатым изменением параметра источника постоянного напряжения или тока. Одновременно может быть использовано до трех источников. Директива, в частности, применяется для вычисления передаточной функции усилителя по постоянному току или отображения характеристик для проверки модели транзистора.

Синтаксис:

```
.dc < имя 1-го источника> < начальное значение> <конечное значение> < приращение> [< имя 2-го источника> < начальное значение> <конечное значение> < приращение>]
```

<Имя источника> — имя независимого источника напряжения или тока, выходной сигнал которого задается степенями <приращение> от <начального значения> до <конечного значения>.

Это не документировано разработчиком, но возможно в качестве одного из источников указывать температуру. При вариации температуры в качестве имени источника указывается ключевое слово TEMP.

Параметры моделирования задаются с использованием диалогового окна, вызываемого по команде меню **Edit>SPICE Analysis** с выбором пункта **DC sweep**, показанного на рис. 32.

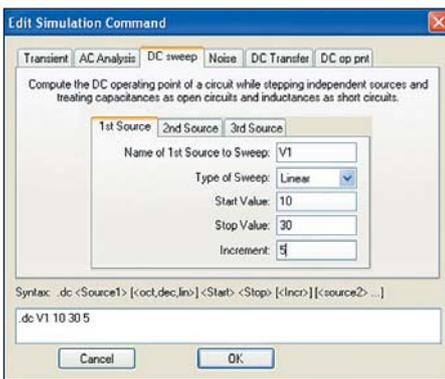


Рис. 32. Задание параметров .DC-анализа

Для каждого от одного до трех независимых источников необходимо указать его имя, характер изменения его выходного сигнала (линейный, логарифмический на октаву или декаду, задаваемый в виде списка значений), начальное и конечное значения, шаг изменения или количество точек.

В качестве выходного сигнала выступают разность узловых потенциалов или ток через ветвь с включенным в нее резистором.

В файле ...LTC\SwCADIII\examples\Educational\stepmodelparam.asc показан пример ис-

пользования .DC-директивы для демонстрации выходных характеристик биполярного транзистора.

.END — конец списка соединений

Эта директива отмечает конец текстового списка соединений. Все строки после нее игнорируются. Не нужно помещать директиву как текст на схеме, поскольку экстрактор списка соединений делает это самостоятельно.

.ENDS — конец описания макромодели

Синтаксис:

```
.ends [имя макромодели]
```

Эта директива отмечает конец описания макромодели. (См. .SUBCKT для дополнительной информации.) Необязательный параметр [имя макромодели] используется для удобства чтения и анализа текстового файла.

.FOUR — вычисление Фурье-компонентов после .TRAN-анализа

Синтаксис:

```
.four <частота первой гармоники> [количество гармоник] [количество периодов] <выходные данные 1> [<выходные данные 2> ...]
```

Например:

```
.four 1kHz V(out)
```

Эта команда выполняется после анализа переходного процесса. Результат выполнения команды печатается в файл **.log**. Для просмотра результата используется команда меню **View>Spice Error Log**. В большинстве случаев для быстрого преобразования Фурье лучше воспользоваться возможностями окна графиков по команде меню **View>FFT**.

Задается частота первой гармоники и количество анализируемых гармоник. По умолчанию рассчитываются первые 9 гармоник.

Фурье-анализ выполняется на отрезке времени, отстоящем от конечного времени, Tend, более чем на период, по меньшей мере, на один период, если после количества гармоник указано количество периодов. Если количество периодов задано равным -1, Фурье-анализ выполняется по всему временному отрезку.

Пример использования директивы .FOUR приведен в файле ...LTC\SwCADIII\examples\Educational\audioamp.asc.

.FUNC — функции, определяемые пользователем

Синтаксис:

```
.func <имя>([аргументы]) {выражение}
```

Например:

```
.func Pythag(x,y) {sqrt(x*x+y*y)}
```

Директива .FUNC позволяет создание пользовательских функций для использования в собственных параметризованных схемах и поведенческих источниках. Этим обеспечивается понятная ассоциативная связь имени с функцией и параметризованной макромоделью, чтобы абстрактные схемы можно было сохранить в библиотеках.

Директива .FUNC может быть включена в описание макромодели, чтобы ограничить использование функции этой макромоделью и макромоделями, входящими в нее.

Чтобы вводить параметр и оценивать выражение пользовательской функции, выражение заключается в фигурные скобки. Вложенное выражение будет заменено числом с плавающей точкой.

Пример использования директив .FUNC и .PARAM:

```
* Example deck using a .func statement
.func myfunc(x,y) {sqrt(x*x+y*y)}
.param u=100 v=600
V1 a 0 pulse(0 1 0 1n 1n .5u 1u)
R1 a b {myfunc(u,v/3)}
C1 b 0 100p
.tran 3u
.end
```

Подстановка параметров делается до начала моделирования.

.FERRET — загрузка файла данных с использованием URL

Эта команда позволяет загружать файлы пакетным способом, указывая URL. Это удобно, когда не хочется указывать пути к каждому файлу через интернет-браузер. Загруженный файл будет в том же каталоге, что и исходная схема или список соединений. Эта команда не имеет никакого воздействия на моделирование:

```
* example deck
.ferret http://tspice.linear.com/software/scad3.pdf
.end
```

.GLOBAL — назначение глобальных узлов

Синтаксис:

```
.global <узел1> [узел2] [узел3] [...]
```

Например:

```
.global VDD VCC
```

Команда .GLOBAL позволяет объявить, что определенные узлы, упомянутые в макромоделях, не локальные для макромодели узлы, а абсолютно глобальные узлы.

Общим глобальным для схемы является узел «O», для этого не требуется использовать директиву .GLOBAL. Узлы с именами в форме «\$G_» также являются глобальными без упоминания в директиве .GLOBAL.

.IC — задание начальных условий

Директива .IC задает начальные условия для анализа переходных процессов. Могут быть заданы узловые напряжения и токи через катушки индуктивности. Решение для постоянного тока выполняется с использованием начальных условий как ограничений. Если катушки индуктивности в решении для постоянного тока в других SPICE-программах обычно рассматриваются коротко замкнутыми, в LTspice, если начальный ток определен, они рассматриваются как источники тока бесконечного импеданса.

Синтаксис:

```
.ic [V(<узел>)=<напряжение>] [I(<катушка>)=<ток>]
```

Например:

```
.ic V(in)=2 V(out)=5 V(vc)=1.8 I(L1)=300m
```

.INCLUDE — подключение текстовых файлов

Синтаксис:

```
.include <имя файла>
```

Эта директива подключает названный файл, как будто этот файл напечатан в списке соединений вместо команды .INCLUDE. Она используется для подключения библиотек моделей или макромодели.

В имени файла должен быть указан полный путь к нему. Иначе LTspice смотрит сначала в каталоге <SwCADIII>\lib\sub, а затем в каталоге, который содержит запрашиваемый список соединений, где <SwCADIII> — каталог, содержащий исполняемый scad3.exe, типично устанавливается как C:\Program Files\LTCSwCADIII.

Недопустимо игнорировать расширение имени файла. Следует использовать **.inc myfile.lib**, а не **.inc myfile**, если файл называется myfile.lib.

Можно определить url как имя файла следующим образом:

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

Файл library.lib будет передан в каталог схемы и подключен. Во избежание повторной загрузки файла при следующем сеансе моделирования можно отредактировать директиву .INC.

```
.inc library.lib
```

Отметим, что если запрашиваемый url не существует, большинство серверов сети не показывают ошибку, но показывают html web-страницу в вашем web-браузере, которая объясняет ошибку. LTspice может не всегда воспринимать эти страницы как указание на ошибку, таким образом, можно получить некое загадочное сообщение об ошибке, когда идет процесс моделирования с включением html web-страницы как директивы SPICE.

Если полученный документ представляет собой .pdf-файл, моделирование прервется после загрузки. Например, после загрузки файла .pdf будет получен следующий комментарий:

```
* Dummy simulation to download the help file.
* The simulation will abort with an error, but
* you'll be left with the file scad3.pdf in the
* same directory containing the netlist.
.inc http://ltspice.linear.com/software/scad3.pdf
.end
```

Директива .INCLUDE использована в примере ...LTC\SwCADIII\examples\Educational\logamp.asc для подключения макромодели компонента opamp, в атрибутах которого нет указания на имя макромодели или файл, ее содержащий.

.LIB — подключение библиотеки

Синтаксис:

```
.lib <имя файла>
```

Эта директива подключает модель и описание макромодели в названном файле, как будто этот файл напечатан в списке соединений вместо команды .lib. Если модель (модели) компонентов в подключаемом файле имеет альтернативные описания в библиотеке LTspice, то последние игнорируются.

В имени файла должен быть указан полный путь к нему. Иначе LTspice смотрит сначала в каталоге <SwCADIII>\lib\sub, а затем в каталоге, который содержит запрашиваемый список соединений, где <SwCADIII> — каталог, содержащий исполняемый scad3.exe, типично устанавливается как C:\Program Files\LTCSwCADIII.

Недопустимо игнорировать расширение имени файла. Необходимо указать **.lib myfile.lib**, а не **.lib myfile**, если файл называется myfile.lib.

Можно определить url как имя файла следующим образом:

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

Файл library.mod будет передан в каталог схемы и подключен. Во избежание повторной загрузки файла при следующем сеансе моделирования можно отредактировать указание .lib:

```
.lib library.mod
```

Зашифрованные библиотеки

LTspice может генерировать и читать библиотеки, зашифрованные в специальной форме. Это позволяет одному пользователю готовить библиотеку для другого пользователя, которую можно использовать в моделировании, не показывая ее содержимое. Резонно попытаться сделать зашифрованную библиотеку, которую исключительно сложно расшифровывать, но такое решение нельзя считать абсолютным, если только не решить проблему непосредственно в программном обеспечении.

Чтобы подготовить зашифрованную библиотеку, нужно вызвать LTspice из командной строки с выбором опции «-encrypt». Сначала следует сделать копию библиотеки, поскольку она будет заменена зашифрованной версией. Нет никакой возможности преобразовать зашифрованную библиотеку обратно в текстовый формат. Уточним эти два шага:

1. Сделайте резервные копии библиотеки.
2. В командной строке напечатайте:

```
scad3.exe -encrypt <filename>
```

Файл <filename> будет заменен зашифрованной версией. Процесс шифрования займет несколько минут.

По окончании этого процесса вы будете иметь зашифрованный ASCII-файл. Можно добавить уведомление об авторском праве выше строки «*Begin:», но первые 9 строк файла должны остаться неизменными, и каждая строка уведомления об авторском праве, добавленная вами, должна начинаться символом «*».

Итак, приведем пример зашифрованного файла, созданный LTspice:

```
* LTspice Encrypted File
*
* This encrypted file has been supplied by a 3rd
* party vendor that does not wish to publicize
* the technology used to implement this library.
*
* Permission is granted to use this file for
* simulations but not to reverse engineer its
* contents.
*
* Begin:
50 3E 46 0F FA 6E 67 FF B8 4D D9 62 14 32 60 24
36 71 35 0B 66 4F AD 52 B8 F5 9E 22 9F C0 18 8B
FB FE 1D...
```

Можете изменить файл следующим образом:

```
* LTspice Encrypted File
*
* This encrypted file has been supplied by a 3rd
* party vendor that does not wish to publicize
* the technology used to implement this library.
*
* Permission is granted to use this file for
* simulations but not to reverse engineer its
* contents.
*
* Copyright © 2005 Acme SPICE Modeling
* For additional information, see
* www.acmespicemodels.com
*
* Begin:
50 3E 46 0F FA 6E 67 FF B8 4D D9 62 14 32 60 24
36 71 35 0B 66 4F AD 52 B8 F5 9E 22 9F C0 18 8B
FB FE 1D...
```

.LOADBIAS — загрузка предварительно выполненного расчета по постоянному току

Синтаксис:

```
.loadbias <имя файла>
```

Команда **.LOADBIAS** — дополнение к команде **.SAVEBIAS**. Сначала выполните моделирование по команде **.SAVEBIAS**. Затем измените команду **.SAVEBIAS** на команду **.LOADBIAS**.

.MEASURE — измерение заданных пользователем электрических величин

Есть два различных варианта директив **.MEASURE**. В первом случае обращаются к точке на оси абсцисс (независимая переменная, откладываемая по горизонтальной оси, ось времени для **.TRAN**-анализа), во втором случае обращаются к диапазону по оси абсцисс. Первый вариант используется, чтобы найти значение данных или выражения в заданной точке на оси абсцисс, или когда выполняется необходимое условие. Используется следующий синтаксис:

```
.meas[sure] [ACIDCIOPITRANITFINOISE] <имя результата>
[<FINDIDERIVIPARAM> <выражение>] [WHEN <выражение>]
[AT=<значение>] [TD = <значение1>] [<RISE|FALL|CROSS> =
<отсчет1>] [LAST]
```

Здесь [ACIDCIOPITRANITFINOISE] — вид анализа, к которому применяется директива; FIND (найти); DERIV (производная); PARAM (использование результатов предшествующих измерений); WHEN (условие); AT (координата точки измерения на оси абсцисс); TD (задержка в единицах измерения по оси абсцисс относительно момента выполнения условия); RISE (увеличение); FALL (уменьшение); CROSS (пересечение); LAST (последний случай).

В первой позиции можно указать вид анализа, к которому применяется директива **.MEAS**. Это позволяет использовать соответствующие директивы **.MEAS** только в определенных видах анализа. Обязательно следует присваивать имя результату, который может быть использован в качестве параметра в других директивах **.MEAS**. Далее — примеры директивы **.MEAS** с обращением к одной точке на оси абсцисс:

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

Результат — значение $V(out)$ для $t = 5$ мс, именованный как **res1**.

```
.MEAS TRAN res2 FIND V(out)*I(Vout) WHEN V(x)=3*V(y)
```

Результат — значение выражения $V(out)*I(Vout)$, когда условие $V(x)=3*V(y)$ встречается в первый раз. Он будет именован как **res2**.

```
.MEAS TRAN res3 FIND V(out) WHEN V(x)=3*V(y) cross=3
```

Результат — значение $V(out)$, когда условие $V(x)=3*V(y)$ встречается в третий раз. Он будет именован как **res3**.

```
.MEAS TRAN res4 FIND V(out) WHEN V(x)=3*V(y) rise=last
```

Результат — значение $V(out)$, для которого условие $V(x)=3*V(y)$ встречается в последний раз, либо когда $V(x)$ максимально близко к $3*V(y)$. Он будет именован как **res4**.

```
.MEAS TRAN res5 FIND V(out) WHEN V(x)=3*V(y) cross=3 TD=1m
```

Результат — значение $V(out)$ через 1 мс после того, как условие $V(x)=3*V(y)$ встречается в третий раз. Он будет именован как **res5**.

```
.MEAS TRAN res6 PARAM 3*res1/res2
```

Результат — значение $3*res1/res2$. Такая форма используется, чтобы определить значение выражения, составленного из результатов других **.MEAS**-утверждений. Не предполагается, что в оцениваемом выражении присутствуют непосредственные результаты моделирования, например, $V(3)$, если только это не данные из последней точки моделирования. Результат именован как **res6**.

В приведенных примерах обращения к одной точке на оси абсцисс результат соответствует данным ординаты (зависимые переменные). Если информация об ординате не требуется, результатом **.MEAS**-утверждения будет точка на оси абсцисс, в которой выполняется условие измерений:

```
.MEAS TRAN res6 WHEN V(x)=3*V(y)
```

Результат — это момент времени, когда условие $V(x)=3*V(y)$ встречается впервые. Он именован как **res6**.

Второй вариант директивы **.MEAS** обращается к диапазону по абсциссе. Используется следующий синтаксис:

```
.meas [ACIDCIOPITRANITFINOISE] <имя результата>
[<AVG|MAX|MIN|PP|RMS|INTEG> <выражение>] [TRIG <lhs1>
[[VAL] = <rhs1>] [TD = <значение1>] [<RISE|FALL|CROSS> =
<отсчет1>] [TARG <lhs2> [[VAL] = <rhs2>] [TD = <значение2>]
[<RISE|FALL|CROSS> = <отсчет2>]
```

Диапазон по абсциссе ограничен точками, определенными как «TRIG» и «TARG». По умолчанию точка TRIG устанавливает начало моделирования и может быть опущена. Точно так же точка TARG по умолчанию соответствует данным в конце моделирования. Если все три из TRIG, TARG и WHEN точки опущены, то утверждение **.MEAS** действует на весь диапазон данных. Типы измерений,

Таблица 9. Вычислительные операции, выполняемые по диапазону данных

Ключевое слово	Выполняемая по диапазону операция
AVG	Вычисление среднего значения <выражение>
MAX	Нахождение максимального значения <выражение>
MIN	Нахождение минимального значения <выражение>
PP	Нахождение размаха от пика до пика <выражение>
RMS	Вычисление среднеквадратичного значения <выражение>
INTEG	Интегрирование <выражение>

которые могут быть выполнены в интервале, перечислены в таблице 9.

Если никакое измерение не задано, результат директивы **.MEAS** — расстояние по абсциссе между точками TRIG и TARG. Далее — пример директивы **.MEAS** по диапазону:

```
.MEAS TRAN res7 AVG V(NS01) TRIG V(NS05) VAL=1.5 TD=1.1u
FALL=1 TARG V(NS03) VAL=1.5 TD=1.1u FALL=1
```

Результат — среднее значение напряжения $V(NS01)$ на отрезке времени от 1-го уменьшения $V(NS05)$ до 1,5 В с задержкой 1,1 мкс и до 1-го уменьшения $V(NS03)$ до 1,5 В с задержкой 1,1 мкс. Результат именован как **res7**.

Для **.AC**-анализа условные выражения в комплексных данных упрощаются до вещественной части с преобразованием в выражение для амплитуды. Например:

```
.MEAS AC res8 when V(out)=1/sqrt(2)
```

Результат **res8** — частота, на которой величина $V(out)$ равна 0.7071067811865475.

Кроме того, результат директивы **.MEAS** может использоваться в другой директиве **.MEAS**. В следующем примере рассчитана полоса пропускания на уровне 3 дБ:

```
.MEAS AC tmp max mag(V(out)); найдем амплитуду и запомним как tmp
.MEAS AC BW trig mag(V(out))=tmp/sqrt(2) rise=1 targ
mag(V(out))=tmp/sqrt(2) fall=last
```

Результат — разность частот между двумя точками, лежащими на 3 дБ ниже максимального значения сигнала. Отметим, что данные, получаемые в **.AC**-анализе, комплексные, и таковы же результаты по директиве **.MEASURE**. Тем не менее, равенство оперирует только с реальной частью комплексного числа, то есть выражение $\text{mag}(V(out))=\text{tmp}/\sqrt{2}$ эквивалентно $\text{Re}(\text{mag}(V(out)))=\text{Re}(\text{tmp}/\sqrt{2})$.

Операции AVG, RMS и INTEG в **.NOISE**-анализе несколько иные, чем в анализах других типов, так как **.NOISE** связан с квадратом частоты. Таким образом, и AVG, и RMS дают среднеквадратичное напряжение шумов, а INTEG дает интегрированный полный шум. Следовательно, если вы добавляете SPICE-директивы:

```
.MEAS NOISE out_totn INTEG V(onoise)
.MEAS NOISE in_totn INTEG V(inoise)
```

к .NOISE-анализу, в .log-файле будут напечатаны значения полных интегрированных среднеквадратичных шумов, приведенных к выходу и входу.

Директива .MEAS выполняется после окончания моделирования. Это позволяет записывать сценарии директив .MEAS и выполнять их над набором данных. Для этого сделайте окно графиков активным и выполните команду меню **File>Execute .MEAS Script**. Другое последствие .MEAS-директив, выполняемых после моделирования, — то, что точность вычислений ограничена точностью данных графика после сжатия. Можно изменить параметры настройки сжатия для получения более точных результатов по .MEAS-директиве.

Не следует задавать условие в виде равенства, типа «when <cond1> = <cond2>». Это объясняется тем, что равенство чисел в форме с плавающей запятой никогда не должно требоваться из-за конечной точности, используемой при хранении чисел.

Пример использования директивы .MEASURE приведен в файле ...LTC\SwCADIII\examples\Educational\MeasureBW.asc.

.MODEL — определение SPICE-модели

Директива определяет модель для диода, транзистора, ключа, линии передачи с потерями или однородной RC-линии.

Некоторые элементы схемы, например, транзисторы, имеют много параметров. Вместо того чтобы определять каждый параметр для каждого транзистора, транзисторы объединены именем модели и имеют общие параметры. Транзисторы одной модели могут иметь различные размеры, и электрическое поведение масштабируется в соответствии с размером.

Синтаксис:

```
.model <имя модели> <имя типа модели> [(<список параметров>)]
```

Например:

```
.model DIODE D (Is=1E-10)
```

Таблица 10. Имена типов моделей компонентов

Имя типа модели	Тип компонента
CSW	Ключ, управляемый током
D	Диод
LTRA	Линия передачи с потерями
NJF	Полевой транзистор с каналом <i>л</i> -типа
NMF	MESFET с каналом <i>л</i> -типа
NMOS	МОП-транзистор с каналом <i>л</i> -типа
NPN	Биполярный <i>р-р-л</i> -транзистор
PJF	Полевой транзистор с каналом <i>р</i> -типа
PMF	MESFET с каналом <i>р</i> -типа
PMOS	МОП-транзистор с каналом <i>р</i> -типа
PNP	Биполярный <i>р-р-р</i> -транзистор
SW	Ключ, управляемый напряжением
URC	Однородная RC-линия с распределенными параметрами
VDMOS	Мощный вертикальный МОП-транзистор по технологии двойной диффузии

Имя модели должно быть уникальным. Таким образом, два различных типа элементов схемы, типа диода и транзистора, не могут иметь одного имени модели. Список параметров зависит от ее типа. В таблице 10 приведен перечень типов моделей.

.NET — расчет параметров цепей в .AC-анализе

Эта директива используется при .AC-анализе в режиме малого сигнала, чтобы вычислить входной и выходной адмиттанс, импеданс, *Y*-, *Z*-, *H*- и *S*-параметры четырехполюсника. Эту методику можно также использовать для вычисления входного адмиттанса и импеданса двухполюсника. Директива должна использоваться с директивой .AC, определяющей девиацию частоты при анализе цепи.

Синтаксис:

```
.net [V(out[,ref])|I(Rout)] <Vin|lin> [Rin=<значение>] [Rout=<значение>]
```

Входной порт цепи определяется либо независимым источником напряжения, <Vin>, либо независимым источником тока, <Iin>. Соответственно, выходной порт определяется либо как узел, V(out), либо как резистор, I(Rout). К портам подключаются резисторы Rin и Rout. Если не указано определенно, подключаемые импедансы по умолчанию 1 Ом, кроме случаев источника напряжения с определенным Rser или выходного порта, определенного как резистор. В этих двух случаях подключаемые резисторы по умолчанию являются импедансами устройства. Импедансы подключаемых по директиве .NET устройств действительны только для вычислений по этой директиве, но не для узловых напряжений и токов обычного .AC-анализа. То есть директива .NET не навязывает подключаемые к цепи импедансы при расчете напряжений и токов в процессе .AC-анализа.

Файл примера — ...LTC\SwCADIII\examples\Educational\S-param. Рекомендуется использовать источник напряжения, V4, с установкой требуемого импеданса источника Rser, и резистор, Rout, подключенный к выходу, с простой формой записи директивы .net I(Rout) V4. При этом нет необходимости задавать значения Rin или Rout в директиве .NET, достаточно задать характеристики устройств, подключенных к входу и выходу.

Доступ к графикам зависимостей малосигнальных параметров по команде **Plot Settings>Visible Traces** или **View>Add Trace**.

.NODESET — задание начального режима по постоянному току

Директива .NODESET устанавливает начальные значения узловых потенциалов в рабочей точке по постоянному току. Если схема имеет множество возможных состояний по постоянному току, например, триггер, процесс итерации решения по постоянному току может никогда не сойтись. Директиву

.NODESET можно использовать, чтобы установить схему в то или иное состояние. В основном, после того как выполнен проход решения с напряжением, определенным в директиве .NODESET, ограничение удаляется в последующих итерациях.

Синтаксис:

```
.nodeset V(узел1)=<напряжение> [V(узел2)=<напряжение [...]>]
```

.NOISE — расчет спектральной плотности шумов

Синтаксис:

```
.noise V(<узел1>[,<узел2>]) <имя источника> <oct, dec, lin> <количество точек> <начальная частота> <конечная частота>
```

Это — анализ в частотной области, в котором вычисляются джонсоновский тепловой шум, дробовый и фликкер-шумы. Выходные данные — значения квадратного корня из спектральной плотности шумов.

V(<узел1>[,<узел2>]) — участок цепи, для которого вычисляется полный выходной шум. Это может быть выражено как V(n1, n2), чтобы представить напряжение между двумя узлами. <Имя источника> — имя независимого источника напряжения или тока, к входу которого пересчитывается шум. Это фиктивный не шумящий источник сигнала. Параметры <oct, dec, lin>, <количество точек>, <начальная частота> и <конечная частота> определяют интересующий частотный диапазон и разрешение таким же образом, как и при использовании в директиве .AC. Параметры анализа вводятся с помощью диалогового окна (рис. 33), вызываемого по команде меню **Edit>Spice Analysis**, с выбором пункта **Noise**.

График выходных данных V(onoise) — спектральная плотность шумового напряжения в узле (узлах), определенных как выход в вышеупомянутом синтаксисе. Если источник входного сигнала — источник напряжения, то график V(inoise) — приведенная к входу плотность напряжения шумов. Если источник входного сигнала — источник тока, то график inoise — шум, приведенный к току источника входного сигнала. Может быть

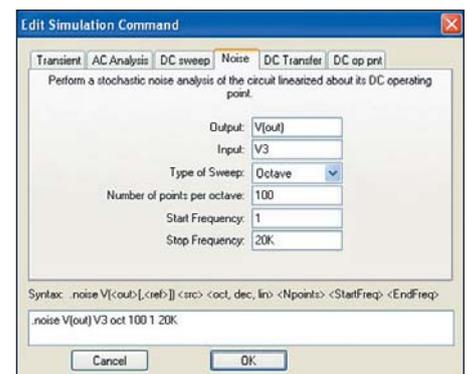


Рис. 33. Задание параметров .NOISE-анализа

Таблица 11. Параметры моделирования

Параметр	Тип данных	Значение по умолчанию	Наименование
ABSTOL	число	1 nA	Абсолютная погрешность расчета токов
BAURATE	число	нет	Используется при просмотре графиков. Задаёт режим сглаживания битовых переходов
CHGTOL	число	10 фК	Абсолютная погрешность расчета заряда
CSHUNT	число	0	Дополнительная емкость, добавляемая к каждому узлу относительно «земли»
CSHUNTINTERN	число	cshunt	Дополнительная емкость, добавляемая к каждому внутреннему узлу устройства относительно «земли»
DEFAD	число	0	Площадь стока МОП-транзистора по умолчанию
DEFAS	число	0	Площадь истока МОП-транзистора по умолчанию
DEFL	число	100 мкм	Длина канала МОП-транзистора по умолчанию
DEFW	число	100 мкм	Ширина канала МОП-транзистора по умолчанию
DELAY	число	0	Используется при просмотре графиков. Перемещает позиции битов в графике
FASTACCESS	флаг	false	Преобразование в формат файла fastaccess в конце моделирования
FLSGLOADS	флаг	false	Включение внешних источников тока в режим нагрузки
GMIN	число	1.00E-12	Проводимость, добавленная к каждому p-n-переходу для облегчения преобразований
GMINSTEPS	число	25	Устанавливается в нуль, чтобы предотвратить перебор параметра при начальном решении по постоянному току
GSHUNT	число	0	Дополнительная проводимость, добавляемая к каждому узлу относительно «земли»
ITL1	число	100	Максимальное количество итераций в расчете по постоянному току
ITL2	число	50	Максимальное количество итераций при расчете передаточной функции по постоянному току
ITL4	число	10	Максимальное количество итераций при переходе к следующему моменту времени при анализе переходного процесса
ITL6	число	25	Устанавливается в нуль, чтобы предотвратить ступенчатое изменение параметра источника при начальном решении по постоянному току
MAXCLOCKS	число	бескон.	Максимальное сохраняемое количество тактов
MAXSTEP	число	бескон.	Максимальный шаг при анализе переходного процесса
MEASCPLXfmt	слово	bode	Формат комплексных чисел для результатов директивы .MEASURE. Один из возможных: "polar", "cartesian" или "bode"
MEASDGT	число	6	Разрядность выходных данных для директивы .MEASURE.
METHOD	слово	trap	Выбор метода численного интегрирования
MINCLOCKS	число	10	Минимальное сохраняемое количество тактов
MINDELTA GMIN	число	1.00E-04	Установка ограничения для завершения подбора gmin
NOMARCH	флаг	false	Отключение вывода графиков в процессе моделирования
NOOPITER	флаг	false	Переход к непосредственному управлению шагом gmin
NUMDGT	число	6	Исторически "numdgt" использовался для установки разрядности выходных данных. В LTspice, если "numdgt" больше 6, для зависимых переменных данных используется двойная точность
PIVREL	число	1.00E-03	Относительная величина элемента строки матрицы, необходимая для его выделения в качестве ведущего элемента
PIVTOL	число	1.00E-13	Абсолютная величина элемента строки матрицы, необходимая для его выделения в качестве ведущего элемента
PLOTABSTOL	число	1 nA	Установка абсолютной погрешности по току при сжатии графиков
PLOTRELTOL	число	0,0025	Установка относительной погрешности при сжатии графиков
PLOTVNTOL	число	10 мкВ	Установка абсолютной погрешности по напряжению при сжатии графиков
PLOTWINSIZE	число	300	Количество точек данных в одном окне после сжатия. Устанавливается в нуль, чтобы отменить сжатие
RELTOL	число	0,001	Относительная погрешность при расчете напряжений и токов
SRCSTEPMETHOD	число	0	Алгоритм ступенчатого изменения параметра источника
SRCSTEPS	число	25	Альтернативное имя для itl6
SSTOL	число	0,001	Относительная погрешность детектирования установленного режима
STARTLOCKS	число	5	Количество тактов ожидания перед поиском установленного режима
TEMP	число	27 °C	По умолчанию температура элементов схемы, для которых не задано определенное значение температуры
TNOM	число	27 °C	Номинальное значение температуры
TOPOLOGYCHECK	число	1	Устанавливается в нуль, чтобы отменить проверку плавающих узлов, контуров источников напряжения и топологии витков трансформаторов
TRTOL	число	1	Установка погрешности анализа переходного процесса. Этот параметр — коэффициент, определяющий фактическую ошибку округления
TRYTOCOMPACT	число	1	Представление в компактной форме информации о токах и напряжениях в длинных линиях с потерями
VNTOL	число	1 мкВ	Абсолютная погрешность при расчете напряжений

отображен шумовой вклад каждого компонента. Эти вклады пересчитываются к выходу. Можно пересчитать их к входу, поделив данные графика на усиление.

В окне графиков можно суммировать шумы в полосе пропускания, нажав на имя соответствующего графика правой кнопкой мыши при нажатой клавише Ctrl.

Пример использования директивы .NOISE приведен в файле ...LTC\SwCADIII\examples\Educational\noise.asc.

.OP — определение режима по постоянному току в рабочей точке

Выполняется решение для постоянного тока с отключенными емкостями и коротко замкнутыми индуктивностями. Обычно

решение для постоянного тока выполняется как часть другого анализа, чтобы найти рабочую точку схемы. Используйте директиву .OP, если нужно только найти рабочую точку. Результаты появятся в диалоговом окне. Решение по постоянному току появится в управляющей строке, если указать на узел или цепь с током после .OP-моделирования.

В файле ...LTC\SwCADIII\examples\Educational\DcopPnt.asc приведен пример использования директивы .OP.

.OPTIONS — установка параметров моделирования

Все доступные параметры моделирования приведены в таблице 11.

.PARAM — параметры, определяемые пользователем

Директива .PARAM позволяет создавать определяемые пользователем переменные. Она обеспечивает понятную ассоциативную связь имени с параметризованной макромоделью, чтобы абстрактные схемы можно было сохранить в библиотеках.

Директива .PARAM может быть включена в описание макромодели, чтобы ограничить действие значения параметра этой макромоделью и макромоделями, включенными в эту макромодель.

Для подстановки параметра в оцениваемое выражение заключите выражение в фигурные скобки. Вложенное выражение будет заменено величиной с плавающей точкой.

Далее приведен пример использования как собственно директивы .PARAM, так и непосредственного ввода параметров в строке вызываемой макромодели:

```
*
* This is the circuit definition
.params x=y z=1k*tan(pi/4+1)
X1 a b 0 divider top=x bot=z
V1 a 0 pulse(0 1 0.5µ .5µ 0 1µ)
* this is the definition of the subcircuit
.subckt divider n1 n2 n3
r1 n1 n2 {top}
r2 n2 n3 {bot}
.ends
*
.tran 3µ
.end
```

Доступные математические функции и операции собраны в таблицах 12, 13.

В файле ...LTC\SwCADIII\examples\Educational\Cohn.asc приведен пример использования директивы .PARAM.

.SAVE — ограничение количества сохраняемых данных

В процессе некоторых видов анализа, особенно при моделировании во временной области, может быть сгенерирован большой объем данных. Объем выходных данных может быть ограничен при использовании директивы .SAVE, чтобы сохранить только определенные интересующие узловые напряжения и токи в устройстве.

Синтаксис:

```
.save V(out) [V(in) [I(L1) [I(S2)]]] [dialogbox]
```

Директива .save I(Q2) сохраняет токи базы, коллектора и эмиттера биполярного транзистора Q2. Чтобы сохранить ток через один вывод транзистора, следует указать Ic(Q2).

Чтобы сохранить данные графиков, соответствующих образцу, можно использовать символы группировки «*» и «?». Например, «.save V(*) Id(*)» позволит сохранить каждое значение напряжения и каждое значение тока.

Если присутствует ключевое слово dialogbox, то появляется диалоговое окно со списком всех доступных по умолчанию узловых напряжений и токов, позволяющее пользова-

Таблица 12. Математические функции

Функция	Определение
ABS(x)	Абсолютное значение x
ACOS(x)	Действительная часть $\arccos(x)$, например, $\arccos(-5)$ возвращает 3.14159, а не 3.14159+2.29243i
ARCOS(x)	Синоним для $\arccos(x)$
ACOSH(x)	Действительная часть $\operatorname{acosh}(x)$, например, $\operatorname{acosh}(5)$ возвращает 0, а не 1.0472i
ASIN(x)	Действительная часть арксинуса x, например, $\arcsin(-5)$ возвращает -1.57080, а не -1.57080+2.29243i
ARCSIN(x)	Синоним для $\arcsin(x)$
ASINH(x)	Гиперболический арксинус
ATAN(x)	Арктангенс x
ARCTAN(x)	Синоним для $\operatorname{atan}(x)$
ATAN2(y, x)	Арктангенс (x/y)
ATANH(x)	Гиперболический арктангенс
BUF(x)	$\operatorname{buf}(x)=1$, если $x>0$; $\operatorname{buf}(x)=0$, если $x\leq 0$,5
CBRT(x)	Кубический корень из x
CEIL(x)	Целое число, равное или большее x
COS(x)	Косинус x
COSH(x)	Гиперболический косинус x
DDT(x)	Первая производная dx/dt
DELAY(x,y)	Задержка сигнала на время y
EXP(x)	Экспоненциальная функция x
FABS(x)	То же самое, что и $\operatorname{abs}(x)$
FLAT(x)	Случайное число между -x и x с нормальным распределением
FLOOR(x)	Целое число, равное или меньше x
GAUSS(x)	Случайное число с распределением Гаусса с сигмой x
HUPOT(x,y)	$\sqrt{x^2+y^2}$
IDT(x)	Интеграл $\int x(t)$
IF(x, y, z)	y, если x истинно, иначе z
INT(x)	Округление x до целого числа
INV(x)	$\operatorname{inv}(x)=0$, если $x>0$,5; $\operatorname{inv}(x)=1$, если $x\leq 0$,5
LIMIT(x,y,z)	x, если $y<x<z$; y, если $x=y$; z, если $x>y$
LN(x)	Натуральный логарифм x
LOG(x)	Альтернатива $\ln(x)$
LOG10(x)	Десятичный логарифм x
MAX(x,y)	Максимальное из x или y
MC(x,y)	Случайное число между $x*(1+y)$ и $x*(1-y)$ с нормальным распределением
MIN(x,y)	Минимальное из x или y
POW(x, y)	Действительная часть x^y , например, $\operatorname{pow}(-0.5, 1.5)$ возвращает 0, а не 0,353553i
PWR(x, y)	$\operatorname{abs}(x)^y$
PWRS(x, y)	$\operatorname{sgn}(x)*\operatorname{abs}(x)^y$
RAND(x)	Случайные числа между 0 и 1 в зависимости от значения x
RANDOM(x)	Функция, подобная $\operatorname{rand}(x)$, но с более плавными переходами между значениями
ROUND(x)	Ближайшее целое число к x
SGN(x)	Знак x
SIN(x)	Синус x
SINH(x)	Гиперболический синус x
SQRT(x)	Действительная часть квадратного корня x, например, $\operatorname{sqrt}(-1)$ возвращает 0, не 0,707107i
TABLE(x,a,b,c,d,...)	Табличная зависимость функции от x. Координаты точек (x, y) в виде таблицы, в промежутках между точками линейная аппроксимация
TAN(x)	Тангенс x
TANH(x)	Гиперболический тангенс x
U(x)	Ступенчатая функция: $u(x)=1$, если $x>0$; $u(x)=0$, если $x\leq 0$
URAMP(x)	Функция ограничения: $\operatorname{igamp}(x)=x$, если $x>0$; $\operatorname{igamp}(x)=0$, если $x\leq 0$
WHITE(x)	Случайные числа между -0,5 и 0,5 с плавными переходами между значениями, даже более плавными, чем в $\operatorname{gandom}()$

тею составить список сохраняемых данных. Если список соединений был сгенерирован из схемы, то, указав на выбранные ранее узлы и устройства и нажав кнопку мыши, можно отобразить графики в окне.

Если указать для сохранения только один график, то после запуска процесса моделирования он будет отображаться в окне графиков по ходу процесса, если только не дезактивирована ячейка **Marching Waveforms** в окне **Operation** панели управления.

Таблица 13. Математические операции

Символ операции	Назначение
&	Преобразование, эквивалентное логическому И (AND)
	Преобразование, эквивалентное логическому ИЛИ (OR)
^	Преобразование, эквивалентное логическому исключающему ИЛИ (XOR)
>	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева больше выражения справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
<	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева меньше выражения справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
>=	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева больше или равно выражению справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
<=	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева меньше или равно выражению справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
+	Сложение с плавающей точкой
-	Вычитание с плавающей точкой
*	Умножение с плавающей точкой
/	Деление с плавающей точкой
**	Возведение в степень, возвращается только действительная часть, например, $-2^{**}1,5$ возвращает 0, а не 2,82843i
!	Преобразование, эквивалентное логической инверсии
@	Оператор выбора шага

.SAVEBIAS — сохранение рабочей точки на диске

Синтаксис:

```
.savebias <имя файла> [internal] [temp=<значение>] [time=< значение >] [repeat] [step=< значение >] [DC1=< значение >] [DC2=< значение >] [DC3=< значение >]
```

Это команда записи на диск текстового файла, который при последующем моделировании загружается командой **.LOADBIAS**. Для схемы, имеющей сложный расчет режима по постоянному току в рабочей точке, можно сохранить решение на диске, чтобы сэкономить время на расчете режима по постоянному току при последующих анализах.

Ключевое слово **INTERNAL** добавляется, чтобы указать, что внутренние узловые потенциалы некоторых устройств также должны быть сохранены с сохранением более полного решения по постоянному току.

Чтобы сохранить определенную рабочую точку по постоянному току при расчете переходных процессов **.TRAN**, необходимо указать момент времени. Первое решение для момента времени, следующего за указанным, будет сохранено. Модификатор **REPEAT** заставляет записывать решение по постоянному току через каждый период после указанного момента времени. В файл записывается только последнее решение по постоянному току. Можно указать **DC1**, **DC2** и **DC3**, чтобы извлечь единственную рабочую точку из **.DC**-анализа с вариацией параметров.

По директиве **.SAVEBIAS** записывается текстовый файл в формате директивы **.NODESET**. Отметим, что директивы **.NODESET** — только рекомендации для решения. Таким образом, вычислитель начнет повторять решение с узловыми напряжениями, заданными в директиве **.NODESET**, но продолжит повторять вычисления, пока не будет найдено правильное решение. Если нужно повторно запустить **.TRAN**-решение из рабочей точки по постоянному току, можно изменить файл **.NODESET** на **.IC**, чтобы принудить вычислитель начать решение с этой рабочей точки по постоянному току.

Поскольку суммарное состояние всех реактивных элементов схемы не сохраняется в **.SAVEBIAS** файле, успешное решение в этой технике достижимо не всегда.

.STEP — ступенчатое изменение параметра

Эта команда заставляет неоднократно выполнять анализ, ступенчато изменяя температуру, параметр модели, глобальный параметр или параметр независимого источника. Ступени могут быть линейными, логарифмическими или определенными как список значений.

Например:

```
.step oct v1 1 20 5
```

Ступенчатое изменение напряжения независимого источника напряжения **V1** от 1 до 20 В с логарифмическим изменением ступеней с 5 точками на октаву.

Например:

```
.step I1 10u 100u 10u
```

Изменение тока независимого источника тока **I1** от 10 до 100 мкА с шагом 10 мкА.

Например:

```
.step param RLOAD LIST 5 10 15
```

Трехкратное выполнение моделирования с глобальным параметром **Rload**, равным 5, 10 и 15.

Например:

```
.step NPN 2N2222(VAF) 50 100 25
```

Ступенчатое изменение параметра **VAF** модели **NPN** от 50 до 100 с шагом 25.

Например:

```
.step temp -55 125 10
```

Изменение температуры от -55 до 125 °С с шагом 10 °С.

Вариации шага могут быть вложениями глубиной до трех уровней.

Например:

```
.step I1 10u 100u 10u temp list 25 100
```

Изменение тока независимого источника тока **I1** от 10 до 100 мкА с шагом 10 мкА при двух значениях температуры: 25 и 100 °С.

.SUBCKT — описание макромодели

Для упрощения описания повторяющиеся схемы могут быть оформлены в виде макромодели со своим описанием и использо-

ваться в одной схеме многократно. Прежде чем начнется моделирование, список соединений схемы будет расширен с заменой каждого обращения к макромодели элементами схемы из описания макромодели. Нет никаких ограничений по размеру или сложности макромоделей.

Описание макромодели должно заканчиваться директивой `.ENDS`. Для удобства работы с текстовым файлом в дальнейшем целесообразно строку дополнить именем макромодели.

Пример использования макромодели:

```
*
* Описание схемы
X1 a b 0 divider
V1 a 0 pulse(0 1 0 .5µ .5µ 0 1µ)

* Описание макромодели
.subckt divider n1 n2 n3
r1 n1 n2 1k
r2 n2 n3 1k
.ends
.tran 3µ
.end
```

Расширение после запуска моделирования:

```
* Расширение X1 до набора из двух резисторов
r:1:1 a b 1k
r:1:2 b 0 1k
*
v1 a 0 pulse(0 1 0 .5µ .5µ 0 1µ)
.tran 3µ
.end
```

Отметим, что для элементов схемы, образованных расширением макромодели, созданы уникальные имена, основанные на имени макромодели и именах элементов описания макромодели.

.TEMP — температурный анализ

Это устаревшая форма для команды ступенчатого изменения температуры. Все виды анализа выполняются для каждой указанной температуры.

Синтаксис:

```
.TEMP <температура1> <температура2> ...
```

Что эквивалентно:

```
.STEP TEMP LIST <температура1> <температура2> ...
```

.TF — определение малосигнальной передаточной функции по постоянному току

В этом режиме определяется малосигнальная передаточная функция по постоянному току для узлового напряжения или тока ветви при малых изменениях параметра независимого источника. Параметры моделирования можно задать через диалоговое окно, показанное на рис. 34.

Синтаксис:

```
.TF V(<узел>[, <опорный узел>]) <независимый источник>
.TF I(<источник напряжения>) <независимый источник>
```

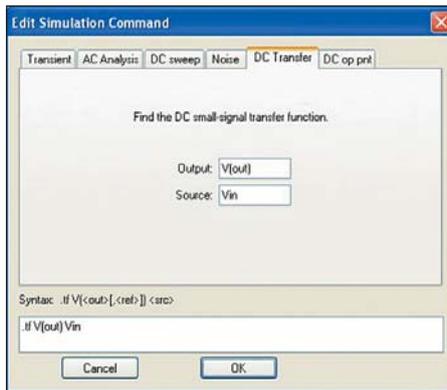


Рис. 34. Задание параметров .TF-анализа

Например:

```
.TF V(out) Vin
.TF V(5,3) Vin
.TF I(Vload) Vin
```

.TRAN — анализ переходных процессов

По этой директиве выполняется анализ переходного процесса. Это наиболее информативное моделирование схемы. В процессе анализа вычисляется, что происходит в схеме после подачи питания. В качестве испытательных сигналов часто применяются независимые источники.

Синтаксис:

```
.TRAN <Tstep> <Tstop> [Tstart [dTmax]] [modifiers]
.TRAN <Tstop> [modifiers]
.TRAN <шаг вывода данных> <конечное время> [начальный момент времени вывода данных [максимальный шаг]] [модификаторы]
.TRAN <конечное время> [модификаторы]
```

Первая запись представляет собой традиционную форму для SPICE команды `.TRAN`. `Tstep` — шаг вывода графиков. `LTspice` использует сжатие графиков, так что этот параметр не имеет большого значения и может быть опущен или установлен в ноль. `Tstop` — продолжительность моделирования. Анализ переходного процесса всегда начинается с момента времени, равного нулю. Однако, если определено `Tstart`, данные для графика между нулем и `Tstart` не сохраняются. Это — средство управления размером файлов графиков, позволяющее иг-

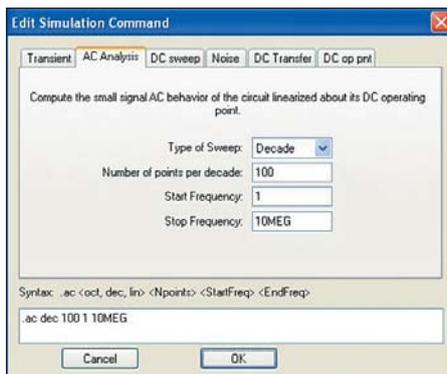


Рис. 35. Задание параметров .TRAN-анализа

норировать переходные процессы при включении. Последний параметр `dTmax` является максимальным шагом интегрирования. Если заданы `Tstart` или `dTmax`, то должен быть задан и `Tstep`. Параметры моделирования легко задаются с использованием диалогового окна, изображенного на рис. 35.

В строку `.TRAN` могут быть помещены несколько модификаторов из перечисленных далее.

UIC

Использование начальных условий. Обычно расчет рабочей точки по постоянному току выполняется перед началом анализа переходного процесса. Директива подавляет эту инициализацию. Начальные условия для некоторых элементов схемы могут быть определены случайным образом. `UIC` — не особенно рекомендуемая возможность `SPICE`. Пропуск расчета рабочей точки по постоянному току пункта ведет к нереализуемому физически начальному условию. Рассмотрим, например, подключение емкости к источнику напряжения. Узловое напряжение равно нулю, если не задано иное. Тогда в первый момент бесконечный ток обязан заряжать конденсатор. Симулятор не может найти достаточно короткий шаг времени и выдает сообщение **time step too small convergence fail**.

STARTUP

Модификатор подобен оригинальному `SPICE UIC`. Он означает, что независимые источники должны отключаться на первые 20 мс моделирования. Однако анализ рабочей точки по постоянному току выполнен с использованием ограничений, заданных директивой `.IC`.

STEADY

Останавливает моделирование по достижению установившегося режима. Это требуется для создания отчета о расчете эффективности. Обнаружение установившегося режима записано в макромоделах ВИП. Обычное решение — обнаружение нулевого значения в выходном токе усилителя ошибки, усредненном по периоду тактовой частоты. Алгоритм предполагает анализ выходного сигнала усилителя ошибки. Доля импульсного тока, считающаяся нулевым током, задается параметром `SSTOL`.

Автоматическое обнаружение установившегося режима может быть неудачным вследствие неоптимального критерия его детектирования. Можно в интерактивном режиме определить установившийся режим следующим образом: как только моделирование начинается, выполните команду меню **Simulate>Efficiency Calculation>Mark Start**. При выполнении этой команды в первый раз вы указываете `LTspice`, что собираетесь вручную определять пределы интегрирования. После того как схема достигла установившегося режима, выполните эту команду снова. Это очистит историю и перезапустит расчет

потерь. Затем, по меньшей мере через 10 тактовых импульсов выполните команду `Simulate>Efficiency Calculation>Mark End`. Каждый раз при выполнении команды `Simulate>Efficiency Calculation>Mark Start` повторно начинается расчет потерь и очищается история графиков. Это хороший метод воспрепятствовать чрезмерному увеличению файла и замедлению рисования. Рекомендуется периодически выполнять `Simulate>Efficiency Calculation>Mark Start` всякий раз, когда ясно, что накоплено существенное количество данных, которые нецелесообразно включать в расчет потерь.

Используйте директиву `.IC` для определения узловых напряжений и токов через катушки индуктивности, чтобы уменьшить длительность анализа переходного процесса, предшествующего установившемуся режиму.

NODISCARD

Не удалять часть моделирования переходного процесса, прежде чем будет достигнут установившийся режим.

STEP

Расчет отклика схемы на ступенчатое воздействие. Эта функция работает с использованием в качестве нагрузки источника тока со ступенчатым изменением тока. Процедура включает в себя следующие этапы:

1. Определяется установившийся режим и очищается история, если не используется `NODISCARD`.

2. Нагрузка ступенчато изменяется к следующему значению из списка со скоростью 20 А/мкс.
3. Определяется установившийся режим.
4. Нагрузка ступенчато изменяется к следующему значению из списка или отключается, если его нет.

В сложной схеме автоматически изменение тока нагрузки можно и не обнаружить. В подобном случае лучше использовать команду `.TRAN` для запуска моделирования переходного процесса и наблюдать начало и конец периода желаемого отклика на скачок нагрузки. Используйте команду `PWL`, чтобы программировать выходной ток нагрузки и переключать его на различные уровни в желаемые моменты времени. Например:

```
PWL(0 0.5 1m 0.5 1.01m 0.1 3m 0.1 3.01m 0.5)
Ток нагрузки начинается с 0,5 А в момент времени 0,
пребывает равным 0,5 А в течение 1 мс,
переключается на 0,1 А в момент времени 1,01 мс,
пребывает равным 0,1 А до 3 мс,
переключается на 0,5А в 3,01 мс и остается равным 0,5 А.
```

`PWL` может иметь почти неограниченную последовательность пар (время, значение).

.WAVE —

запись выбранных узлов в .wav-файл

`LTspice` может записывать звуковые файлы `.wav`. Эти файлы можно слушать или использовать в качестве входных для другого моделирования.

Синтаксис:

```
.wave <имя файла .wav> <Nbits> <SampleRate> V(out) [V(out2) ...]
```

Например:

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

Здесь `<имя файла .wav>` — полный путь к `.wav`-файлу или относительный путь, определяемый из каталога, содержащего симулируемую схему или список соединений. `<Nbits>` — число битов в выборке. Допустимый диапазон — от 1 до 32 битов. `<SampleRate>` — количество выборок в секунду. Допустимый диапазон — от 1 до 4 294 967 295 выборок в секунду. Далее в синтаксисе — перечисление узловых напряжений, значения которых нужно сохранить. Каждый узел будет независимым каналом в `.wav`-файле. Число каналов может быть от одного до 65 535. Можно записать ток в устройстве, например, `Ib(Q1)`, или узловое напряжение. `.wav`-аналог цифрового преобразователя имеет полномасштабный диапазон от -1 до $+1$ вольт или ампера.

В файле `... \LTC\SwCADIII\examples\Educational\wavein.asc` приведен пример использования директивы `.WAVE`.

В следующей статье — примеры моделирования схем с использованием программы. ■

Продолжение. Начало в № 11 `2008

Программа схемотехнического моделирования SwitcherCAD III

Михаил ПУШКАРЕВ

В этой части статьи рассматриваются примеры работы в симуляторе и возможные настройки программы.

Примеры работы в LTspice/SwitcherCAD III

В папке **My_Examples**, хранящейся по адресу http://www.kit-e.ru/assets/My_Examples.zip, содержатся файлы для демонстрации возможностей LTspice/SwitcherCAD III.

Папка **My_Project** включает в себя файлы:

- **TL431.asc** — схема макромодели TL431;
- **TL431_test_pulse.asc** — схема тестирования TL431 в режиме компаратора;
- **TL431_test_freq.asc** — схема тестирования TL431 в режиме усилителя переменного тока;
- **TL431_test_temp.asc** — схема для температурного анализа TL431;
- **Regulator_dc.asc** — схема стабилизатора напряжения для анализа на постоянном токе;
- **Regulator_tr.asc** — схема стабилизатора напряжения для расчета передаточной функции на постоянном токе;
- **Regulator_ac.asc** — схема стабилизатора напряжения для анализа устойчивости;
- **Regulator_ac1.asc** — то же самое, но для построения годографа Найквиста;
- **Regulator_tran.asc** — схема стабилизатора напряжения для анализа качества регулирования.

Файл **My_Lib.lib** содержит описание макромодели микросхемы TL431.

В папке **My_Sym** описания символов компонента TL431:

- **TL431.asy** — символ с атрибутом «тип компонента» Cell;
- **TL431_test.asy** — символ с атрибутом «тип компонента» Block.

Чтобы воспользоваться предлагаемыми примерами, необходимо поместить файл **My_Lib.lib** в папку **sub**, папку **My_Sym** в папку **sum**, а папку **My_Project** в папку **SwCADIII** установленной программы.

Модель микросхемы TL431

Файл **TL431.asc** — это схема макромодели регулируемого стабилизатора TL431, созданная на основе принципиальной схемы, представленной в [2]. Эта модель, в отличие от известных SPICE-моделей микросхемы TL431, обеспечивает удовлетворительные результаты моделирования во всех вариантах приме-

нения, предлагаемых производителем микросхемы. Приведем текст модели, содержащийся в файле **My_Lib.lib**:

```
.subckt TL431 A C R
*TL431 Reference
*Model for LTSpiceSwCADIII, Orcad, Micro-Cap
* Designed by M.Pushkarev, Ulijanovsk, Russia, 10/07/2008
Q1 N011 N011 A QN
Q2 C R N005 QN
Q3 N003 N003 R QN
Q4 N012 N011 N014 QN 2
Q5 N004 N004 N001 QP
Q6 N004 N005 N008 QN
Q7 N010 N012 A QN
Q8 N003 N004 N002 QP
Q9 N003 N013 A QN
Q10 C N003 N006 QN
Q11 C N007 A QN 3
R1 N009 N011 2.4k TC=2E-3, -2E-5
R2 N005 N009 3.28k TC=2E-3, -2E-5
R3 N009 N012 7.2k TC=2E-3, -2E-5
R4 N014 A 800 TC=1.8E-3
R5 C N001 800 TC=1.8E-3
R6 N008 N010 4k TC=2E-3, -2E-5
R7 N013 N011 1k
R8 C N002 800 TC=1.8E-3
R9 N007 N006 150
R10 N007 A 10k
D1 A N003 QD
D2 A C QD
C1 N010 N012 20p
C2 C N003 20p
.model QD D (is=10e-15)
.model QN NPN(is=5e-15 BF=120 Cje=.5p Cjc=.5p Rb=500)
.model QP LPNP(is=5e-15 BF=50Cje=.3p Cjc=1.5p Rb=250)
.backanno
.ends TL431
```

Описание макромодели начинается строкой, включающей в себя директиву **.SUBCKT**, имя макромодели и имена выводов, расположенных в порядке, аналогичном порядку размещения их в символе компонента. Следующие три строки — комментарий, не оказывающий влияния на моделирование. Далее несколько строк, определяющих подключение транзисторов Q1–Q11. Транзисторы записаны подряд и в порядке возрастания позиционных обозначений исключительно только для удобства чтения файла. Порядок следования элементов схемы макромодели на анализ влияния не оказывает. Для транзисторов Q4 и Q11 показано количество параллельно включенных структур, 2 и 3 соответственно. Для большинства резисторов наряду с номинальным значением сопротивления указаны температурные коэффициенты сопротивления, которыми в основном определяется температурная зависимость опорного напряжения. Модели диода и транзисторов из множества параме-

тров содержат только существенно необходимые. Описание заканчивается строками с директивами **.BACKANNO** и **.ENDS**.

В папке **My_Sym** есть два файла — **TL431_test.asy** и **TL431.asy** — с описаниями символов TL431_test и TL431. Символ TL431_test, имеющий атрибут **Symbol Type** — **Block**, использован в проектах **TL431_test_pulse.asc** и **TL431_test_freq.asc**, позволяющих продемонстрировать иерархические проекты с тестированием микросхемы TL431, включенной в качестве компаратора и в качестве усилителя.

Первый из проектов с результатами анализа показан на рис. 17 (см. Кит № 11 `2008, стр. 136). В левом верхнем углу рисунка — схема тестирования регулируемого стабилизатора в режиме компаратора TL431_test_pulse.asc. В правом нижнем углу собственно схема микросхемы TL431 — TL431_test.asc. В правом верхнем углу — результаты моделирования, где показаны графики входного напряжения V(in) и тока коллектора транзистора Q11 микросхемы Ic(x1:Q11).

Анализ температурного дрейфа модели микросхемы TL431

Файл **TL431_test_temp.asc** после открытия демонстрирует схему проверки поведения компонента TL431 при изменении температуры. В этом проекте используется символ TL431.asy, не допускающий редактирования в составе схемы. Схема и результат моделирования изображены на рис. 36.

Анализ схемы стабилизатора напряжения на постоянном токе

Файл **Regulator_dc.asc** — несложная схема стабилизатора напряжения с выходным напряжением 12 В и током нагрузки до 300 мА. Допустимый диапазон изменения входного напряжения — 13–30 В. Схема и результат моделирования изображены на рис. 37.

Схема стабилизатора включает в себя транзисторы, модели которых отсутствуют в библиотеке standard.bjt. Один из возможных способов использования сторонних библиотек, который и применен в данном примере, поместить модели компонентов на листе схемы. Достоинство такого решения: проект запускается на любом компьютере, вне зависимо-

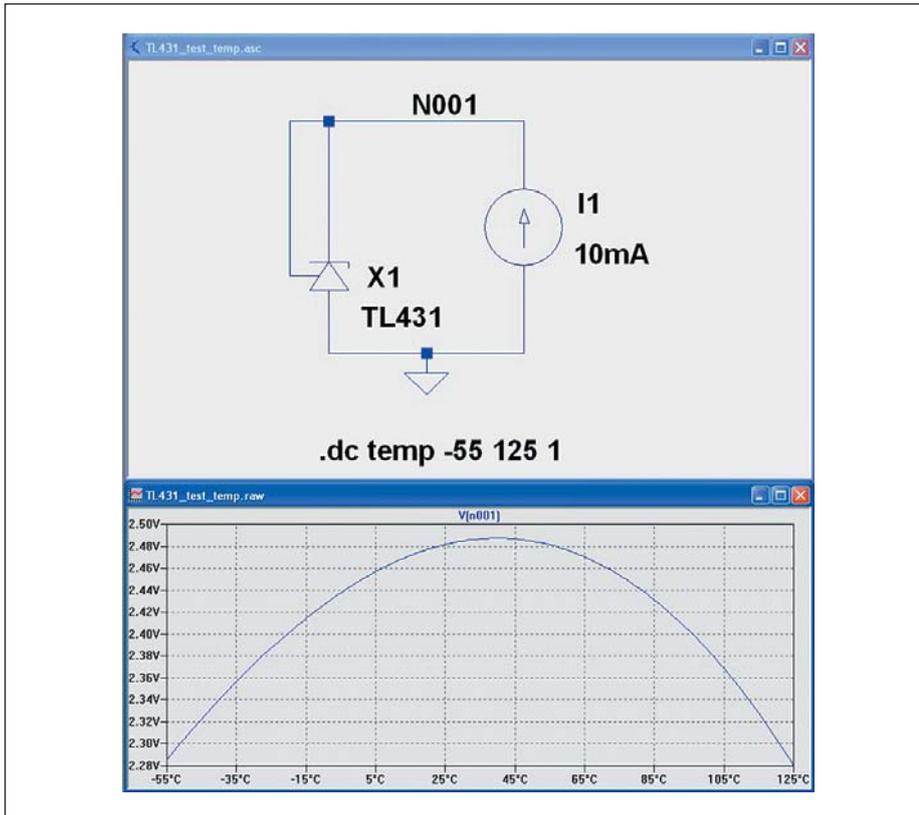


Рис. 36. Анализ температурного дрейфа модели микросхемы TL431

сти от места установки программы и наличия соответствующих библиотек.

На листе схемы помещены четыре директивы моделирования:

```
.dc Vin 15 30 1
.step param I list 100m 200m
.meas V(in) trig V(out)=12.022 targ V(out)=12.0225
.save V(out)
```

Они предусматривают анализ поведения схемы на постоянном токе при изменении входного напряжения в диапазоне 15–30 В с шагом 1 В и двух значениях тока нагрузки (100 и 200 мА), с измерением входного напряжения при двух значениях выходного напряжения (12,022 и 12,0225 В) и выводом графика выходного напряжения V(out) непосредственно в процессе моделирования.

В окне графиков подключены два курсора: первый курсор к синему графику, соответствующему току нагрузки 100 мА, второй — к красному графику, соответствующему току нагрузки 200 мА. По данным таблички **Cursor Step Information** видно, что курсор 2 подключен к графику, соответствующему ступени тока 200 мА, и полученному за второй проход моделирования из двух проходов. В диалоговом окне показаны координаты и разности координат курсоров. На рис. 38 приведен фрагмент .log-файла,

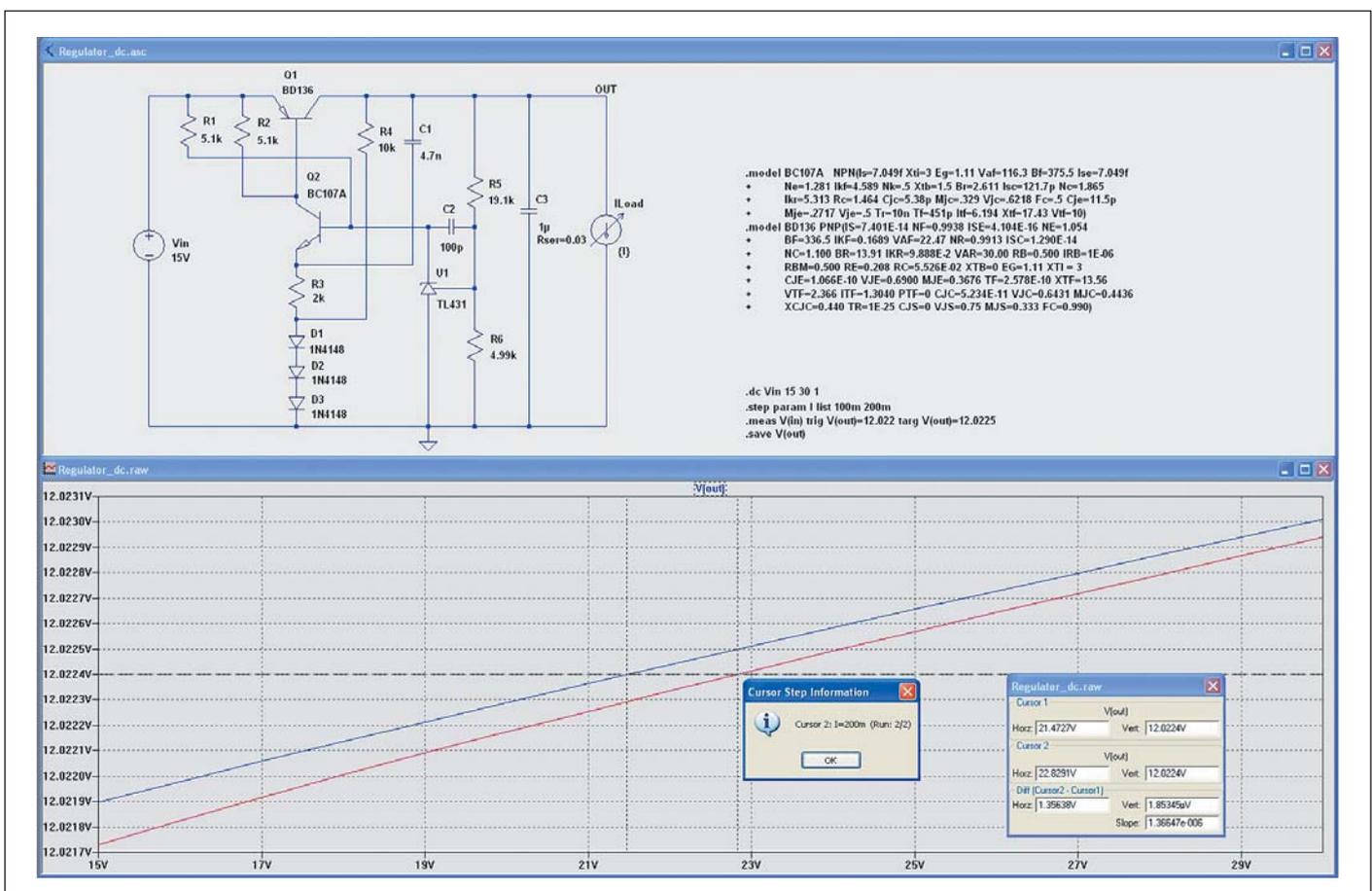


Рис. 37. Анализ схемы стабилизатора напряжения на постоянном токе

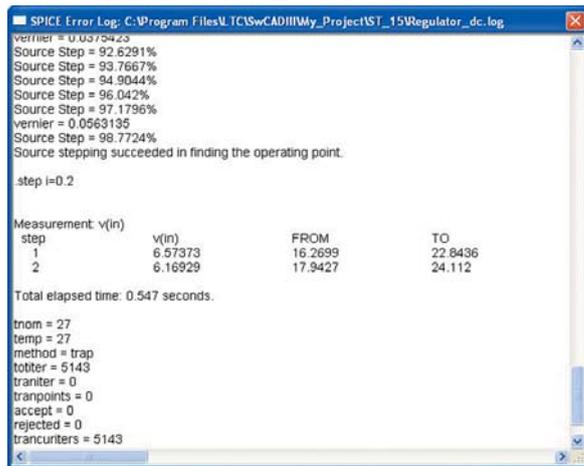


Рис. 38. Фрагмент .log-файла

открытого по команде **View>SPICE Error Log**, с результатами измерений по директиве **.MEAS**.

На рис. 39 показан результат моделирования передаточной характеристики стабилизатора по постоянному току (файл проекта **Regulator_tr.asc**) по директиве:

```
.tr V(out) Vin.
```

Отчет представляет результаты вычислений коэффициента передачи, входного и выходного сопротивлений.

Анализ устойчивости стабилизатора напряжения

Файл **Regulator_ac.asc** — это схема стабилизатора напряжения, подготовленная для АС-анализа с целью проверки устойчивости. Методика такого анализа изложена в [3, 4]. Схема и результат моделирования показаны

на рис. 40. Роль источника возмущения в цепи отрицательной обратной связи играет независимый источник напряжения V_{test} . Директивами моделирования

```
.ac dec 100 1 10MEG
.step param C list 1p 4.7n
```

задан анализ с логарифмическим декадным изменением частоты и со 100 отображаемыми точками в каждой декаде в полосе частот от 1 Гц до 10 МГц, при двух значениях корректирующей емкости $C1$: 1 пФ и 4,7 нФ.

Директива

```
.options gmin=1E-9
```

обеспечивает нормальное завершение процесса моделирования. При значении $gmin = 1E-12$, установленном по умолчанию, попытка анализа схемы при $C1 = 1$ пФ заканчивается со-

общением об ошибке **Analysis Failed: Iteration Limit reached**.

В окне графиков изображен график $-V(out)/V(test)$. Результаты моделирования представляют собой логарифмические амплитудно-частотную (ЛАЧХ) и фазочастотную (ЛФЧХ) характеристики разомкнутой системы. Знак « \rightarrow » приводит график ЛФЧХ к виду, принятому при анализе систем автоматического регулирования [5]. Запас по фазе составляет около -22° и 41° для значений корректирующей емкости 1 пФ и 4,7 нФ соответственно. При значении корректирующей емкости, равном 1 пФ, схема неустойчива. На практике для гарантии устойчивости рекомендуется иметь запас по фазе не менее 30° . На рис. 41 представлен результат моделирования этой схемы (файл проекта **Regulator_ac1.asc**) в диапазоне частот 10 кГц – 10 МГц в виде годографа Найквиста. Характеристика, соответствующая значению корректирующей емкости 1 пФ, охватывает точку с координатами $(-1, j0)$, что свидетельствует о неустойчивости схемы.

Анализ переходного процесса в стабилизаторе напряжения

Качество регулирования в стабилизаторе напряжения можно оценить по реакции на скачок тока нагрузки. Файл **Regulator_tran.asc** — это проект для анализа стабилизатора напряжения при скачкообразном изменении тока нагрузки от 0 до 300 мА и обратно. Директивами моделирования

```
.tran 0.8m
.step param C list 1n 4.7n
```

задан анализ переходного процесса на временном отрезке 0–1,5 мс при двух значениях корректирующей емкости: 1 и 4,7 нФ.

Судя по графикам на рис. 42, величина корректирующей емкости сказывается не толь-

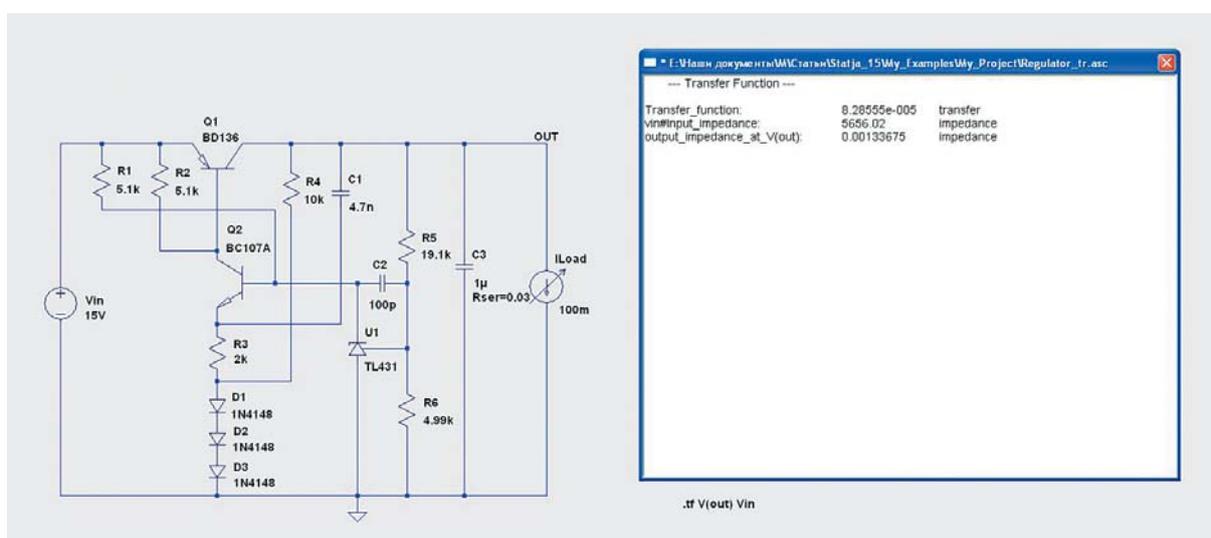


Рис. 39. Параметры передаточной характеристики по постоянному току

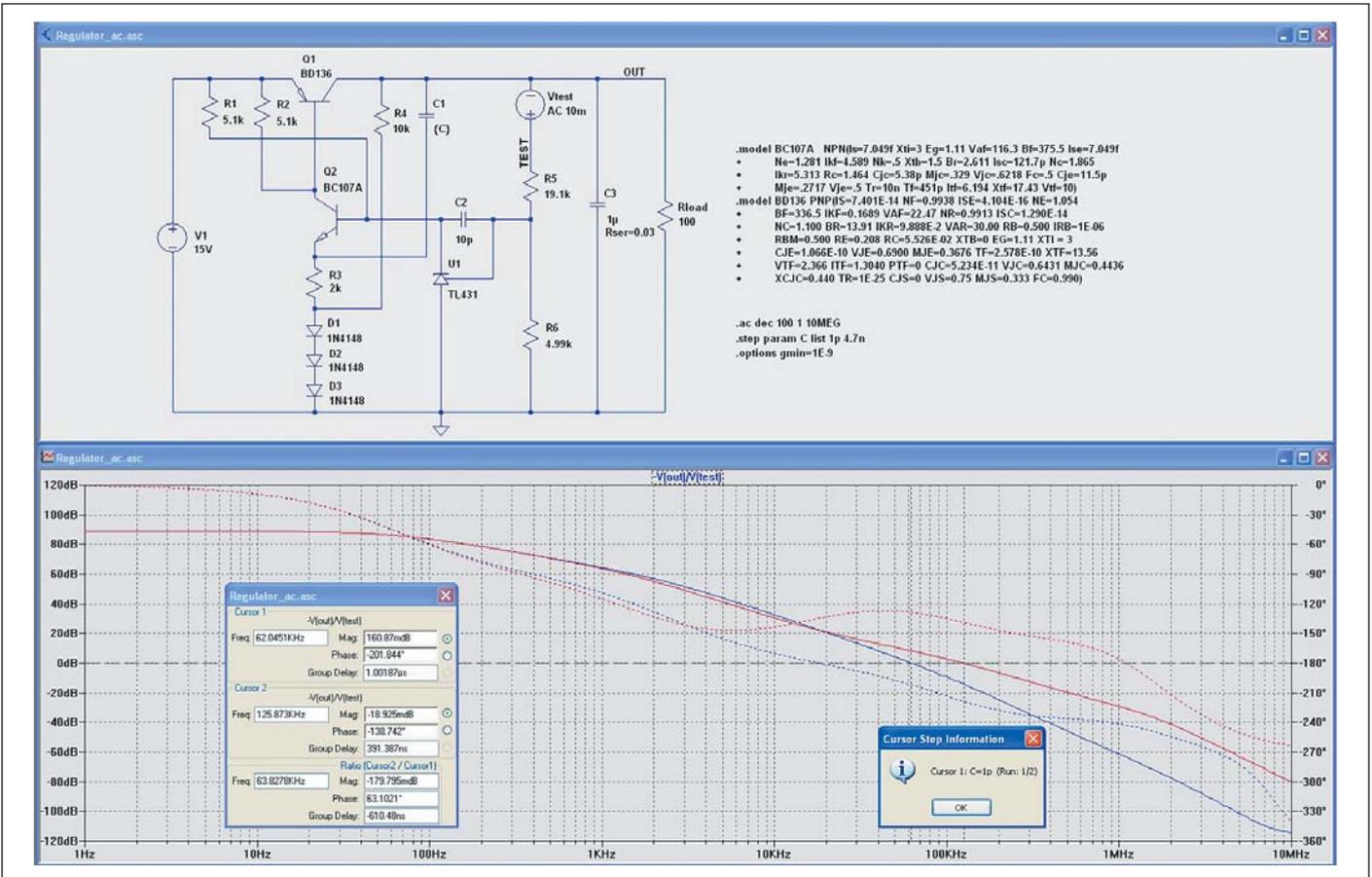


Рис. 40. Анализ устойчивости по ЛАЧХ и ЛФЧХ

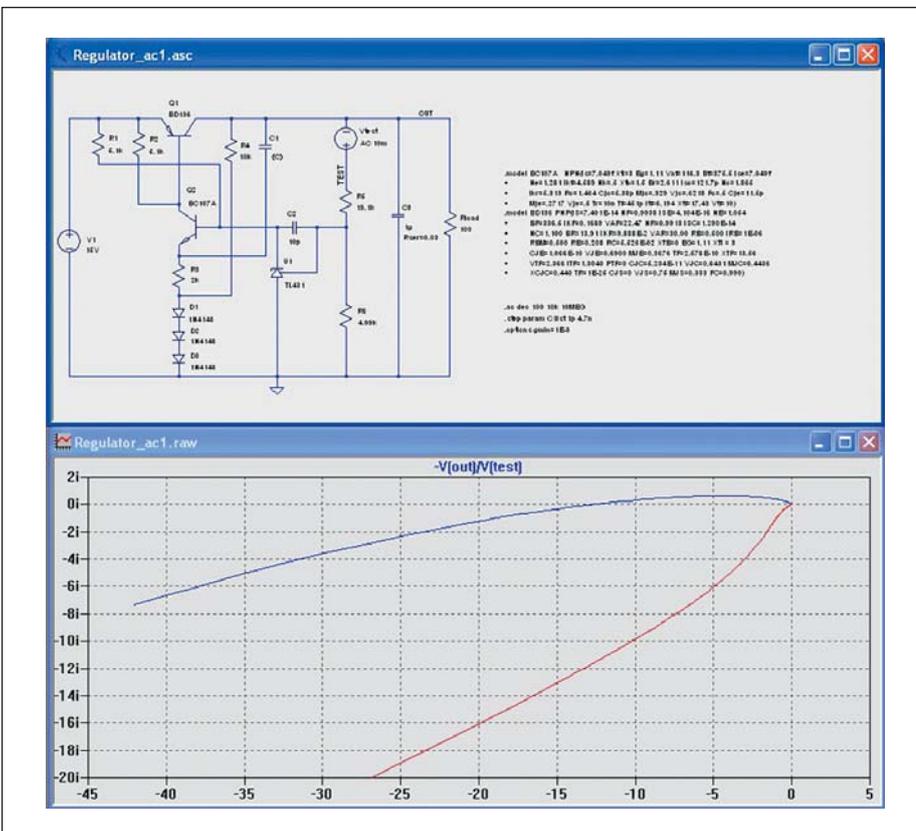


Рис. 41. Анализ устойчивости по годографу Найквиста

ко на устойчивости схемы, но и на реакции на скачок нагрузки. Увеличение корректирующей емкости ведет к росту амплитуды выбросов, увеличивает время переходного процесса и его колебательность, что ухудшает качество регулирования.

Панель настройки

Вызов панели настройки

Чтобы вызвать панель настройки, используется команда меню **Tools>Control Panel**, в которой конфигурируются режимы работы LTspice/SwitcherCAD III.

Сжатие (Compression)

LTspice сжимает .raw-файлы данных в процессе их генерации. Сжатый файл может быть в 50 раз меньше, чем несжатый. Сжатие выполняется с потерями. Окно панели настройки (рис. 43) позволяет управлять потерями при сжатии:

- ASCII файлы данных (**ASCII data files**).
- Сжатие только при анализе переходных процессов (**Only compress transient analyses**).
- Включение сжатия первого порядка (**Enable 1st Order Compression**).
- Включение сжатия второго порядка (**Enable 2nd Order Compression**).
- Удалив метки в обеих ячейках, можно полностью отключить сжатие данных.

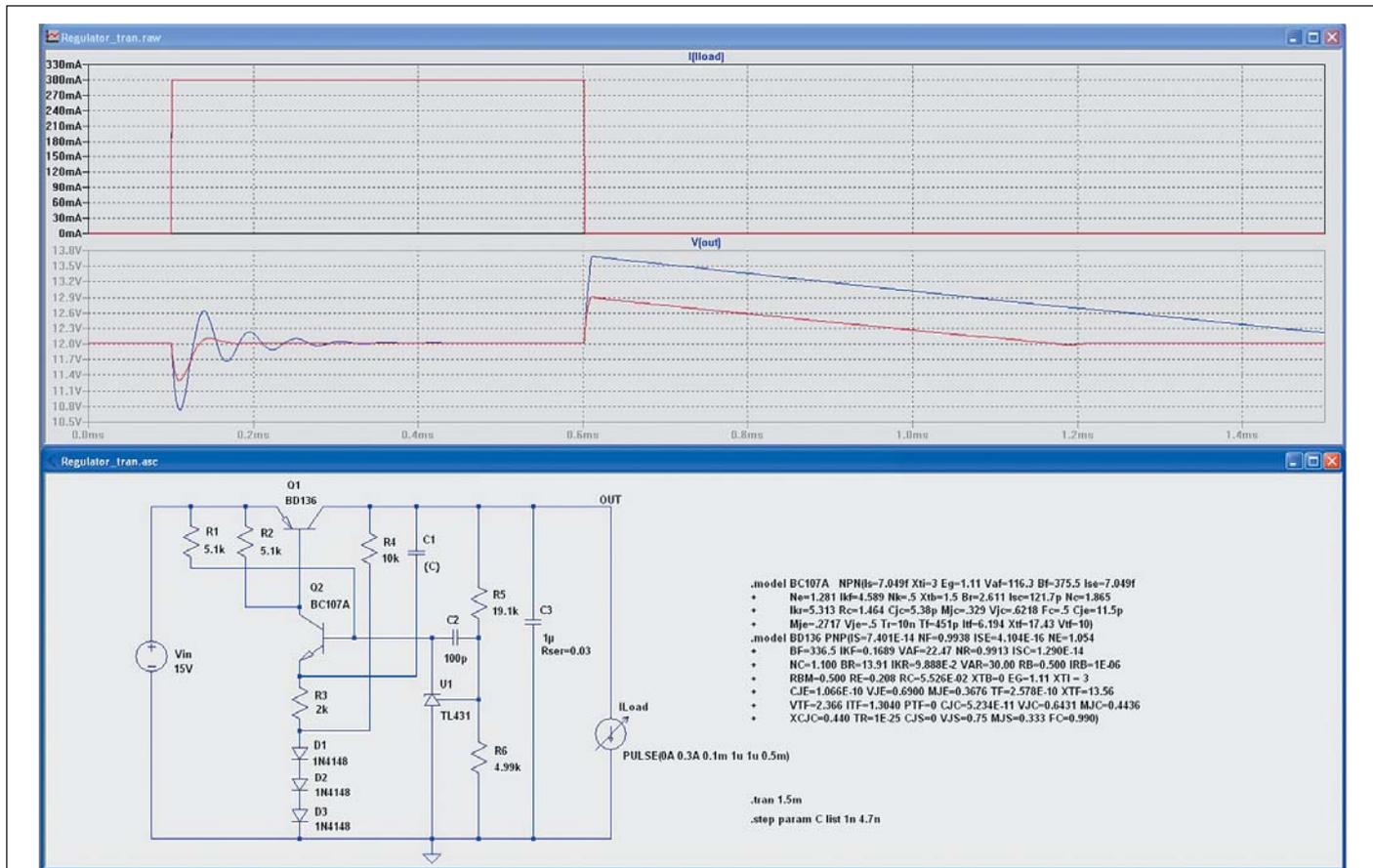


Рис. 42. Анализ переходного процесса

- Размер окна (**Window Size (No. of Points)**): максимальное количество точек, которые будут сжаты до двух граничных точек.
- Относительная погрешность (**Relative Tolerance**): относительная погрешность, допустимая между сжатыми и несжатыми данными.
- Абсолютная погрешность по напряжению, В (**Absolute Voltage tolerance[V]**): погрешность по напряжению, обеспечиваемая алгоритмом сжатия.

- Абсолютная погрешность по току, А (**Absolute Current tolerance[A]**): погрешность по току, обеспечиваемая алгоритмом сжатия. Эти параметры настройки сжатия не запоминаются. При перезагрузке программы будут применены установки по умолчанию. Они доступны на панели управления в диагностических целях. Погрешность и размер окна могут быть определены установкой параметров PROTELTOL, PLOTVNTOL, PLOTABSTOL и PLOTWINSIZE в .OPTION-директивах, размещаемых как SPICE-директивы на схеме.

лей. Для макромоделей, описываемых бинарными файлами, правило не действует.

- Открытие демонстрационных схем (**Open Demo circuits as regular schematics**): с использованием команды File>Open открываются демонстрационные схемы .\SwCADIII\lib\app*.app. Видимы все SPICE-команды. Схема может быть отредактирована и сохранена в новом файле. Команды с двойными точками «...» показывают возможные режимы анализа. Исполняются после редактирования SPICE-директив команды с одной точкой.

Примечание. Каталога .\SwCADIII\lib\app в текущей версии программы нет, возможно, он присутствовал в первых версиях программы.

- Не давать предупреждения при использовании предварительных моделей (**Don't warn when using preliminary models**): отключение предупреждающего сообщения для всех предварительных моделей.
- Автоматическое удаление .raw-файлов (**Automatically delete .raw files**): файлы данных графиков автоматически удаляются после закрытия моделируемой схемы. Это существенно уменьшает объем дискового пространства, используемого LTspice, но требует повторного запуска моделирования в следующем сеансе моделирования данной схемы.



Рис. 43. Окно настройки Compression

Операция (Operation)

Окно **Operation** изображено на рис. 44. Параметры настройки, отмеченные звездочкой [*], сохраняются при перезапусках программы:

- Размещение окон по умолчанию (**Default Window Tile Pattern**): размещение окон в многооконном режиме по умолчанию можно сделать вертикальным.
- Вывод графиков (**Marching Waveforms**): если ячейка помечена, обеспечивается отображение графиков непосредственно в процессе анализа по мере готовности результатов.
- Генерация расширенного листинга (**Generate Expanded Listing**): в файл SPICE Error Log добавляется расширенный список соединений, включающий в себя список соединений использованных в схеме макромодели-



Рис. 44. Окно настройки Operation

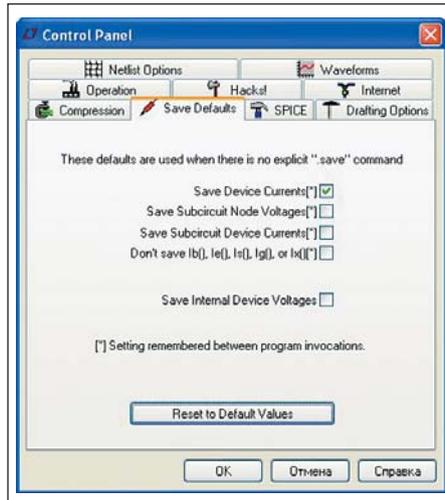


Рис. 45. Окно настройки Save Defaults

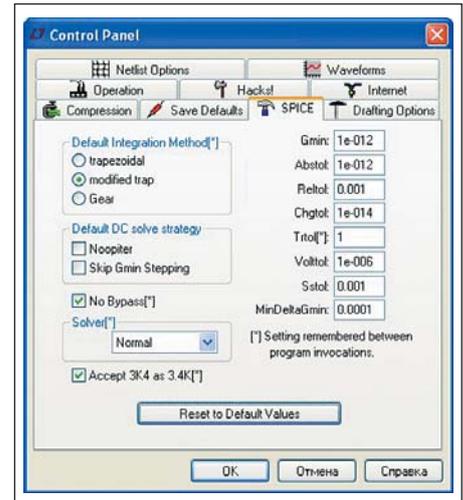


Рис. 46. Окно настройки SPICE

- Автоматическое удаление .net-файлов (**Automatically delete .net files**): после закрытия моделируемой схемы автоматически удаляются .net-файлы со списком соединений. Это небольшие временные файлы, их удаление делает папку с результатами анализа более аккуратной. Они определяют электрические связи в схеме для симулятора LTspice. Некоторые пользователи предпочитают не удалять эти файлы, используя их в дальнейшей работе.
- Автоматическое удаление .log-файлов (**Automatically delete .log files**): после закрытия моделируемой схемы автоматически удаляются .log-файлы. Эти файлы содержат различные статистические данные процесса моделирования, типа времени, затраченного на моделирование, предупреждения и сообщения об ошибках, параметры шага, используемого в .STEP/.TEMP/.DC анализах.
- Папка для временных файлов (**Directory for Temporary Files**): в ячейке показан путь к папке для временного хранения графиков и файлов обновления.

Сохранение по умолчанию (Save Defaults)

Эти настройки используются, когда не указывается, состояние каких конкретных узлов должно быть сохранено при моделировании. Используются настройки **Save Device Currents**, **Save Subcircuit Node Voltages** и **Save Subcircuit Device Currents**. Настройка **Save Internal Device Voltages** используется только для внутрифирменного развития программы. Окно **Save Defaults** изображено на рис. 45:

- Сохранить токи устройств (**Save Device Currents**): пометьте, чтобы отобразить токи приборов и через порты. Это потребуются для отображения графиков рассеиваемой мощности.
- Сохранить узловые потенциалы макромодели (**Save Subcircuit Node Voltages**): пометьте, чтобы отобразить напряжения в иерархических проектах.

- Сохранить токи в приборах макромодели (**Save Subcircuit Device Currents**): пометьте, чтобы отобразить токи в иерархических проектах.
- Не сохранять Ib(), Ie(), Is(), Ig() (**Don't save Ib(), Ie(), Is(), Ig()**): при этом сохраняются только токи коллектора (стока) транзисторов для сокращения размера выходного .data-файла. Полезно в проектах интегральных схем, но означает отсутствие множества данных, необходимых для расчета мощности, рассеиваемой транзисторами.

Окно настройки SPICE

Это окно (рис. 46) позволяет изменять настройки по умолчанию для LTspice. Эти настройки могут быть отменены для конкретного проекта при задании в нем режимов. Обычно эти настройки оставляются такими, как есть. При частом обновлении программы можно нажать **Reset to Default Values**, чтобы перезагрузиться к текущим рекомендованным настройкам.

Есть один параметр, который рекомендуется изменять: **TRTOL**. В коммерческих SPICE-программах он по умолчанию равен 7. В LTspice параметр по умолчанию равен 1, для того, чтобы при моделировании с использованием макромодели ИИП уменьшить вероятность появления артефактов в графиках. **TRTOL** в большей степени затрагивает стратегию timestep, чем непосредственно влияет на точность моделирования. Для моделирования на уровне транзисторов значение больше 1 — обычно лучшее решение. Можно заметить, что скорость удваивается, если увеличивать **TRTOL**, что неблагоприятно воздействует на точность моделирования. Установленное значение **TRTOL** сохраняется при перезапуске программы. Большинство традиционных SPICE-параметров, определяющих точность, (**GMIN**, **ABSTOL**, **RELTOL**, **CHGTOL**, **VNTOL**) не сохраняется при перезапуске программы. Если желательно использовать настройки, отличные от установлен-

ных по умолчанию, необходимо написать директиву **.OPTION**, задающую необходимые значения, и поместить ее в схему, либо записать настройки в файле **.INC**.

Важно и то, какое вычислительное ядро использовано. LTspice содержит две полные версии SPICE. Одна называется нормальной, другая — альтернативной. Альтернативное вычислительное ядро применяет отличающуюся свертку разреженной матрицы с уменьшенной ошибкой округления. Как правило, скорость моделирования с альтернативным вычислительным ядром в два раза ниже, но в тысячу раз лучше точность. Это полезно иметь для диагностики. Если нет директивы **.OPTION**, однозначно указывающей на используемое ядро, следует сделать выбор прежде, чем будет считан список соединений, поскольку два ядра используют различные анализаторы.

Пометив ячейку «**Accept 3K4 as 3.4K**», можно заставить LTspice понимать число, написанное в виде **4K99**, как **4.99K**. Обычная практика SPICE этого не позволяет, но это доступно в LTspice по запросу.

Варианты списка соединений (Netlist Options)

Окно **Netlist Options** показано на рис. 47:

- Преобразование «**μ**» в «**u**» (**Convert 'μ' to 'u'**): везде «**μ**» заменяется на «**u**». Используется, если установленная MS Windows не может показать греческую **μ** (как, например, некоторые китайские выпуски Windows по умолчанию не имеют шрифтов), а также для генерации списка соединений для SPICE-симуляторов, которые не понимают «**μ**» как метрический множитель **1e-6**.
- Изменение порядка записи компонентов (**Reverse comp. Order**): обычно элементы схемы перечисляются в списке соединений в порядке, в котором они были добавлены в схему. Активизация этой ячейки меняет порядок записи на обратный.
- Приборы по умолчанию (**Default Devices**): всякий раз, когда, к примеру, в схеме LTspice

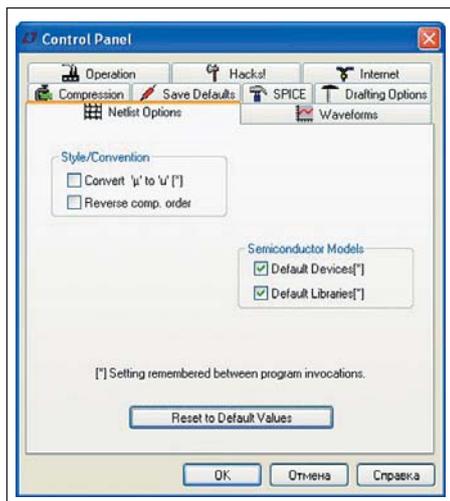


Рис. 47. Окно настройки Netlist Options



Рис. 48. Окно настройки Drafting Options



Рис. 49. Окно настройки Internet Options

применяется диод, по умолчанию в список цепей добавляется строка модели “.model D D”, чтобы подавить сообщения об использовании модели по умолчанию. Непомеченная ячейка подавляет включение аналогичных строк моделей биполярных, МОП и полевых транзисторов.

- Библиотеки по умолчанию (**Default Libraries**): всякий раз, когда, к примеру, в схеме LTspice применяется диод, по умолчанию директивой .lib в моделирование включается библиотека standard.dio. Непомеченная ячейка подавляет включение этой библиотеки, а также аналогичных ссылок на библиотеки биполярных, МОП и полевых транзисторов.
- Проблемы конвергенции (**Convergence Aids**): используется только для развития программы.

Компилятор (Hacks)

Это окно использовалось для развития программы, но в настоящее время практически устарело.

Обычно можно оставить имеющиеся настройки. При частом обновлении программы желательно нажать Reset to Default Values для перезагрузки с текущими рекомендованными настройками.

Режимы рисования (Drafting Options)

Окно **Drafting Options** изображено на рис. 48:

- Разрешение замыкать выводы компонентов (**Allow direct component pin shorts**): обычно можно тянуть связь прямо через компонент, отрезок связи, закорачивающий выводы компонента, будет удален. Если пометить ячейку, то этот отрезок не будет автоматически удален.
- Автоматический скроллинг при просмотре (**Automatically scroll the view**): активация этой ячейки позволяет при просмотре изменять масштаб схемы, используя колесо прокрутки мыши.
- Разрешение показывать точки привязки текста (**Mark text justification anchor points**):

отображается маленькая окружность, ука-зывающая точку привязки блока текста.

- Маркировка неподключенных выводов (**Mark unconnected pins**): рисуется маленький квадрат на каждом неподключенном выводе для указания на отсутствие связи.
- Отображение на схеме точек сетки (**Show schematic grid points**): делает видимой сетку.
- Ортогональная разводка связей (**Orthogonal snap wires**): обеспечивает рисование сегментов электрических связей только по вертикали или по горизонтали. Если ячейка деактивирована, связь может быть нарисована под любым углом между узлами сетки. Нажатая клавиша Ctrl на время отменяет эту установку.
- Ортогональный режим перемещения (**Ortho drag mode**): при выполнении команды Drag компонент перемещается только вдоль линии связи, в которую он включен.
- Добавление изломов в линии связи (**Cut angled wires during drags**): при выполнении команды Drag неортогональная связь преобразуется в два сегмента, если нажать на середину линии связи.
- Глубина отката (**Undo history size**): установка размера буфера команд undo/redo.
- Рисование толстыми линиями (**Draft with thick lines**): увеличивает толщину всех линий. Полезно для подготовки изображений для публикации.
- Отображение штампа (**Show Title Block**): режим для внутреннего использования.

Работа в Интернете (Internet Options)

Это окно панели настроек (рис. 49) используется для обновления через Интернет. LTspice часто обновляется с новыми возможностями и моделями. Для обновления до текущей версии используется команда меню **Tools>Sync Release**. Если в течение пары месяцев не производилось обновление, LTspice начинает спрашивать, не желаете ли вы проверить обновления. LTspice никогда не получит доступ к сети, не спрашивая разрешения.

LTspice не содержит никаких закладок для передачи данных любого типа при получении файлов, нуждающихся в обновлении.

- Не делать кэш-файлов (**Don't cache files**): при обновлении не делать кэш исполняемых файлов.
- Не проверять контрольные суммы (**Don't verify checksums**): по соображениям безопасности LTspice использует собственный конфиденциальный 128-битовый алгоритм контрольной суммы для подтверждения подлинности файлов, получаемых из сети для обновления. Эта аутентификация может не состояться в случае, если в алгоритме есть ошибка. Однако ни о каких проблемах с этим никогда не сообщалось, так что не рекомендуется пренебрегать этой основой безопасности. Для доступа в Интернет LTspice использует только обращение к операционной системе высокого уровня. Нет необходимости в изменении параметров настройки, кроме редких случаев, когда требуется определить прокси-сервер и пароль, поскольку не LTspice управляет доступом в Интернет, а ваш компьютер и операционная система. Параметры настройки этого окна не сохраняются при перезапуске программы. Далее будут рассмотрены описания моделей компонентов. ■

Литература

1. <http://ltspice.linear.com/software/scad3.pdf>
2. TL431.pdf. TL431, TL431A, TL431B, TL432, TL432A, TL431B. Adjustable Precision Shunt Regulators. Data Sheet. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf>
3. Tian M., Visvanathan V., Hantgan J., Kundert K. Striving for Small-Signal Stability. IEEE Circuits and Devices Magazine, vol. 17, no. 1, January 2001.
4. Cheng D. Uncovering the Mystery of Sensor Circuits' Stability. Allegro Microsystems, Inc.
5. Макаров И. М., Менский Б. М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). М.: Машиностроение, 1977.

Продолжение. Начало в № 11 `2008

Программа схемотехнического моделирования SwitcherCAD III

Михаил ПУШКАРЕВ

В данной части статьи дается описание моделей компонентов на языке LTspice.

Модели компонентов

Компоненты

со специальными функциями

Имена символов: AND (И с комплементарными выходами), BUF (буфер с комплементарными выходами), BUF1 (буфер), DFLOP (D-триггер), DIFFSCHMITT (триггер Шмитта с комплементарными выходами и дифференциальными входами), DIFFSCHMTBUF (триггер Шмитта с буфером и дифференциальными входами), DIFFSCHMTINV (инвертирующий триггер Шмитта с дифференциальными входами), INV (инвертор), OR (ИЛИ с комплементарными выходами), PHIDET (фазо-частотный детектор), SCHMITT (триггер Шмитта с комплементарными выходами), SCHMTBUF (триггер Шмитта с буфером), SCHMTINV (инвертирующий триггер Шмитта), SRFLOP (RS-триггер), XOR (исключающее ИЛИ), MODULATE и MODULATE2 (модуляторы), SAMPLE (устройство выборки-хранения) и VARISTOR (варистор).

Синтаксис: Annn n001 n002 n003 n004 n005 n006 n007 n008 <имя модели> [конкретные параметры].

Примечание. Здесь и далее в угловые скобки заключены обязательные параметры, а в квадратные скобки — необязательные параметры.

Это устройства со специальными функциями и смешанным режимом моделирования разработки Linear Technology Corporation's.

INV, BUF, AND, OR и XOR — распространенные логические элементы с идеализированным поведением. Все элементы имеют по восемь выводов. Им не нужны внешние источники питания. Ток вытекает или втекает через комплементарные выходы, выводы 6 и 7 и общий для устройства вывод 8. Выводы с 1 по 5 — входы. Неиспользуемые входы и выходы должны быть подключены к выводу 8, это условие выполняется автоматически, если оставить вывод неподключенным. Компилятор цифровых устройств таким образом определяет, что вывод не использован, и исключает его из моделирования. Это лучше потенциально возможной ситуации, когда вход элемента AND заземлен или подключен к точке с нулевым потенциалом. Если «земля» для элементов общая, заземление входа не будет логической ошиб-

кой, но он не исключается из моделирования. Резонность подобного использования элементов в том, что они работают как 2-, 3-, 4- и 5-входные устройства с прямым, инвертирующим или комплементарным выходом, и при этом не тратится время на моделирование неиспользуемых портов. Таким образом, устройство AND заменяет 12 различных типов элементов AND. Характеристики устанавливаются параметрами, перечисленными в таблице 14.

Таблица 14. Параметры моделей цифровых устройств

Имя параметра	Параметр	Значение по умолчанию
Vhigh	Высокий логический уровень	1 В
Vlow	Низкий логический уровень	0 В
Ref	Входное напряжение переключения	(Vhigh+Vlow)/2
Trise	Время нарастания	0
Tfall	Время спада	Trise
Tau	Выходная постоянная времени	0
Td	Задержка распространения	0
Cout	Выходная емкость	0
Rout	Выходное сопротивление	1 Ом
Rhigh	Импеданс высокого логического уровня	Rout
Rlow	Импеданс низкого логического уровня	Rout

Не все параметры могут быть определены одновременно, например, выход может характеризоваться либо временем нарастания, либо постоянной времени, но не обоими параметрами сразу.

Исключающее ИЛИ (XOR) имеет нестандартное поведение при использовании более двух входов.

Пороговые точки триггеров Шмитта определены параметрами **Vt** и **Vh**. Нижняя пороговая точка — это **Vt - Vh**, верхняя пороговая точка — это **Vt + Vh**.

По умолчанию цифровые компоненты не дают никакой информации о шаге моделирования для управления моделированием. То есть они не дают предупреждений о предстоящем изменении текущего состояния. Для изменения максимального шага моделирования, установленного уставками симулятора, можно задать значение встроенного параметра **tripdt**.

Примечание. Библиотека цифровых устройств не содержит ни одной модели конкретной цифровой микросхемы.

Устройство MODULATE является генератором, управляемым напряжением. Пример схемы — в файле .\examples\Educational\PLL.asc. Текущая частота генерации устанавливается напряжением на входе FM. Преобразование напряжения в частоту линейное и устанавливается двумя встроенными параметрами, **mark** и **space**. **Mark** — частота при напряжении на входе FM, равном 1 В, а **space** — частота, для которой напряжение на входе FM равно 0 В. Амплитуда устанавливается напряжением на входе AM и по умолчанию равна 1 В, если этот вход не использован (подключен к общему выводу MODULATE).

VARISTOR — это управляемый напряжением варистор. Напряжение ограничения устанавливается напряжением между выводами 1 и 2. Сопротивление в режиме ограничения определяется встроенным параметром **rclamp**. Пример схемы — в файле .\examples\Educational\varistor.asc.

Пример схемы с устройством выборки-хранения SAMPLE содержится в файле .\examples\Educational\SampleAndHold.asc.

В LTspice список цепей с этими устройствами создается специальным образом. Все неподключенные выводы автоматически подключаются к выводу 8. Если вывод 8 не подключен, то и он подключается к узлу 0.

Источники сигнала с произвольным поведением

Имена символов: BV, VI.

Синтаксис модели источника напряжения с произвольным поведением: Bnnn <+узел> <-узел> V=<выражение> [ic=<значение>] [tripdv=<значение>] [tripdt=<значение>] [laplace=<выражение>] [window=<время>] [nfft=<число>] [mtol=<число>].

Синтаксис модели источника тока с произвольным поведением: Bnnn <+узел> <-узел> I=<выражение> [ic=<значение>] [tripdv=<значение>] [tripdt=<значение>] [Rpar=<значение>] [laplace=<выражение>] [window=<время>] [nfft=<число>] [mtol=<число>].

Выражения могут содержать следующее:

- Узловой потенциал, например V(n001).
- Разность узловых потенциалов, например V(n001, n002).

Таблица 15. Математические функции в источниках с произвольным поведением

Функция	Определение
ABS(x)	Абсолютное значение x
ABSDelay(x,t[imax])	Задержка сигнала x на время t. Как вариант, уведомление о максимальной задержке tmax
ACOS(x)	Действительная часть аркосинуса от x
ARCOS(x)	Синоним для acos(x)
ACOSH(x)	Действительная часть гиперболического аркосинуса от x
ASIN(x)	Действительная часть арксинуса от x
ARCSIN(x)	Синоним для asin(x)
ASINH(x)	Гиперболический синус x
ATAN(x)	Арктангенс x
ARCTAN(x)	Синоним для atan(x)
ATAN2(y, x)	Арктангенс y/x
ATANH(x)	Гиперболический тангенс x
BUF(x)	buf(x) = 1, если x > 0,5; buf(x) = 0, если x ≤ 0,5
CEIL(x)	Целое число, равное или большее x
COS(x)	Косинус x
COSH(x)	Гиперболический косинус x
DDT(x)	Производная dx/dt
DELAY(x,t[imax])	То же, что и ABSDELAY(x,t[imax])
D(x)	Производная dx/dt
EXP(x)	Экспонента числа x
FLOOR(x)	Целое число, равное или меньшее x
HUPOT(x,y)	sqrt(x**2 + y**2)
IDT(x[,ic[,a]])	Интегрирование x, при необходимости с начальными условием ic, со сбросом интегратора по достижении сигналом значения a.
IDTMOD(x[,ic[,m[,o]])]	Интегрирование x, при необходимости с начальными условием ic, со сбросом интегратора по достижении сигналом по модулю значения m, со сдвигом сигнала на значение o.
IF(x, y, z)	y, если x истинно, иначе z
INT(x)	Округление x до целого числа
INV(x)	inv(x) = 0, если x > 0,5; inv(x) = 1, если x ≤ 0,5
LIMIT(x,y,z)	x, если y < x < z; y, если x < y; z, если x > y
LN(x)	Натуральный логарифм x
LOG(x)	Альтернативный синтаксис для ln(x)
LOG10(x)	Десятичный логарифм x
MAX(x,y)	Максимальное из x или y
MIN(x,y)	Минимальное из x или y
POW(x, y)	Действительная часть от x**y
PWR(x, y)	abs(x)**y
PWRS(x, y)	sgn(x)*abs(x)**y
RAND(x)	Случайные числа между 0 и 1 в зависимости от значения x
RANDOM(x)	Функция, подобная rand(x), но с плавными переходами между значениями
ROUND(x)	Ближайшее целое к x
SDT(x[,ic[,a]])	Альтернативная форма для IDT(x[,ic[,a]])
SIN(x)	Синус x
SINH(x)	Гиперболический синус x
SQRT(x)	Квадратный корень из x
TABLE(x,a,b,c,d,...)	Табличная зависимость функции от x. Координаты точек (x, y) в виде таблицы, в промежутках между точками линейная аппроксимация
TAN(x)	Тангенс x
TANH(x)	Гиперболический тангенс x
U(x)	Ступенчатая функция: u(x) = 1, если x > 0; u(x) = 0, если x ≤ 0
URAMP(x)	Функция ограничения: uramp(x) = x, если x > 0; uramp(x) = 0, если x ≤ 0
WHITE(x)	Случайные числа между -0,5 и 0,5 с плавными переходами между значениями, даже более плавными, чем в random()
!(x)	Альтернативная форма для INV(x)
~(x)	Альтернативная форма для INV(x)

- Токи через элементы схемы, например, I(S1) — ток через ключ S1, или Ib(Q1) — ток базы транзистора Q1. Считается, что ток через элемент схемы изменяется квазистатически, то есть нет немедленной обратной связи между током через управляющее устройство и выходным сигналом источника. Аналогично, любой компонент переменного тока, текущего через устройство, при .AC-анализе принимается равным нулю.
- Ключевое слово **time**, означающее текущее время при моделировании.

Таблица 16. Математические операции для источников с произвольным поведением

Символ операции	Назначение
&	Преобразование, эквивалентное логическому И (AND)
	Преобразование, эквивалентное логическому ИЛИ (OR)
^	Преобразование, эквивалентное логическому исключающему ИЛИ (XOR)
>	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева больше выражения справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
<	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева меньше выражения справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
>=	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева больше или равно выражению справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
<=	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева меньше или равно выражению справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
+	Сложение с плавающей точкой
-	Вычитание с плавающей точкой
*	Умножение с плавающей точкой
/	Деление с плавающей точкой
**	Возведение первого числа в степень второго. Возвращается только действительная часть, например, -1**1.5 дает ноль, а не i
!	Преобразование, эквивалентное логическому инверсии

- Ключевое слово **pi**, означающее 3.14159265358979323846.
- Функции, перечисленные в таблице 15.
- Математические операции, перечисленные в таблице 16.

Параметр **ic** устанавливает начальные условия, напряжение или ток источника в момент начала моделирования.

Параметры **tripdv** и **tripdt** управляют шагом моделирования. Если скорость изменения напряжения источника больше, чем **tripdv/tripdt** [В/с], то шаг моделирования timestep отвергается.

Для источника тока параметром **Rpar** задается подключенное параллельно сопротивление.

Истина численно эквивалентна 1, а ложь — 0. В булевом преобразовании величина, ббльшая 0,5, преобразуется в 1, в противном случае величина преобразуется в 0.

В LTspice символ ^ используется в логической операции исключающее ИЛИ (XOR), а символ ** — для возведения в степень. Также в LTspice различаются возведение в степень, x**y и функция **pwr(x,y)**. При возведении в степень отрицательного числа LTspice возвращает действительную часть результата возведения в степень. Например, -2**1.5 оценивается нулем, который является действительной частью правильного ответа 2.82842712474619i. При импорте модели третьей стороны, предназначенной для другого симулятора, возможно, придется изменить синтаксис, например, x^u на x**y или даже **pwr(x,y)**.

Если определен дополнительный атрибут LAPLACE, источник с произвольным поведением будет описываться с использованием преобразования Лапласа. Преобразование Лапласа обязательно должно быть функцией от s. Логический оператор XOR, ^, когда он использован в выражении Лапласа, понимается как возведение в степень, **. При расчете частотных характеристик в .AC-анализе переменная s заменяется на **sqrt(-1)*2*pi*f**. Выходной ток (напряжение) сигнала отыски-

вается путем свертки импульсной характеристики с входным током (напряжением). В LTspice реакция на импульсное воздействие представляет собой набор результатов БПФ в дискретных точках частотной области. В процессе преобразования возможны такие специфические проявления БПФ, как прорезывание спектра, и выбросы, присущие дискретному БПФ. В LTspice используется собственный алгоритм, дающий точное аналитическое выражение в частотной области, выбирающий точки и интервал таким образом, что артефакты практически отсутствуют. LTspice должен определить подходящие частотный диапазон и разрешение. Рекомендуется сначала позволить программе сделать приближенный расчет. Длина интервала и количество использованных в FFT точек данных будут приведены в .log-файле. В дальнейшем можно подстроить выбранный алгоритм, устанавливая параметр **nfft** и длину интервала. Величина, обратная длине временного интервала, является частотным разрешением. Значение времени **nfft** определяет максимальную рассматриваемую частоту.

Конденсатор

Имя компонента: CAP, POLCAP. Синтаксис: Cnpp <+узел> <-узел> <емкость> [ic=<начальное напряжение>] [Rser=<значение>] [Lser=<значение>] [Rpar=<значение>] [Cpar=<значение>] [m=<значение>] [RLshunt=<значение>] [tc=<температурный коэффициент емкости>] [temp=<температура>].

При необходимости можно задать эквивалентное последовательное сопротивление, последовательную индуктивность, параллельное сопротивление и параллельную шунтирующую емкость. Эквивалентная схема конденсатора показана на рис. 50.

Параметры модели конденсатора приведены в таблице 17.

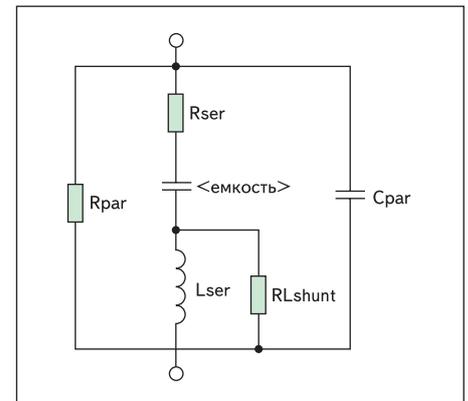


Рис. 50. Эквивалентная схема конденсатора

Для вычислений лучше включить паразитные Rpar, Rser, RLshunt, Cpar и Lser в состав конденсатора, чем изображать их в явном виде. В LTspice используется собственная технология для имитации физического конденсатора моделью без внутренних узлов. Это

Таблица 17. Параметры модели конденсатора

Обозначение	Параметр
Rser	Эквивалентное последовательное сопротивление
Lser	Эквивалентная последовательная индуктивность
Rpar	Эквивалентное параллельное сопротивление
Cpar	Эквивалентная параллельная емкость
RLshunt	Шунтирующий резистор, параллельный Lser
m	Количество включенных параллельно устройств
tc	Температурный коэффициент емкости
temp	Температура компонента (в соответствующей директиве .MODEL)
ic	Начальное напряжение (используется, если только модификатор UIC включен в .TRAN-анализ)

делает имитационную матрицу меньше, быстрее решаемой, с меньшей вероятностью, что она окажется сингулярной при малом временном шаге.

Похожую эквивалентную схему имеет и макромоделль пьезоэлектрического резонатора.

Можно моделировать и нелинейный конденсатор, при этом вместо указания емкости записывается выражение для заряда.

LTspice компилирует это выражение, дифференцирует его в символьном виде относительно всех переменных с нахождением частных производных, соответствующих емкостям.

Синтаксис: Cnnp <+узел> <-узел> Q=<выражение> [ic=<значение>] [m=<значение>].

Специальная переменная x обозначает напряжение на устройстве. Таким образом, постоянная емкость 100 пФ может быть записана как: Cnnp <+узел> <-узел> Q=100p*x.

Емкость со ступенчатым изменением величины от 100 до 300 пФ, когда напряжение становится равным нулю, описывается как: Cnnp <+узел> <-узел> Q=x*if(x<0,100p,300p).

Емкость, управляемая напряжением в узле N01 и имеющая значение 1000 пФ при напряжении 1 В, описывается как: Cnnp <+узел> <-узел> Q=1000p*x*V(N01).

Диод

Имя компонента: DIODE, ZENER, SCHOTTKY, VARACTOR. Синтаксис: Dnnp <анод> <катод> <имя модели> [off] [m=<значение>] [n=<значение>] [temp=<значение>].

Например:

```
D1 SW OUT MyIdealDiode
.model MyIdealDiode D(Ron=.1 Roff=1Meg Vfwd=.4)
```

```
D2 SW OUT dio2
.model dio2 D(Is=1e-10)
```

Ключевое слово **off** исключает диод из схемы при первой итерации расчета по постоянному току. Параметр **m** устанавливает количество параллельно включенных устройств, а параметр **n** — количество последовательно включенных устройств. Эти параметры имеют аналогичное значение и в моделях некоторых других компонентов.

Характеристики диода задаются в строке .MODEL. Есть два способа описания модели диода. Один представлен линейной моделью

Таблица 19. Параметры модели диода

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию	Пример
Af	Показатель степени в формуле для фликкер-шума	—	1	1
BV	Обратное пробивное напряжение	В	?	40
Cjo	Барьерная емкость при нулевом смещении	пФ	0	2
Eg	Ширина запрещенной зоны	эВ	1,11	1,11 Si 0,67 Ge
Fc	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода	—	0,5	
Ibv	Ток при пробивном напряжении	А	1×10^{-10}	
Ikf	Максимальный ток при высоком уровне инжекции	А	∞	
Is	Ток насыщения	А	1×10^{-14}	1×10^{-7}
Isr	Параметр тока рекомбинации	А	0	
Kf	Коэффициент фликкер-шума	—	0	
M	Коэффициент лавинного умножения	—	0,5	0,5
N	Коэффициент инжекции	—	1	1
Nr	Коэффициент эмиссии для тока Isr	—	2	
Rs	Объемное сопротивление	Ом	0	10
Tikf	Линейный температурный коэффициент для Ikf	1/°C	0	
Tnom	Температура	°C	27	50
Trs1	Линейный температурный коэффициент для Rs	1/°C	0	
Trs2	Квадратичный температурный коэффициент для Rs	1/°C ²	0	
Tt	Время переноса заряда	нс	0	2
Vj	Контактная разность потенциалов	В	1	0,6
Xti	Температурный коэффициент тока насыщения	—	3	3

Таблица 18. Параметры идеализированной модели диода

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию
Epsilon	Протяженность квадратичного участка характеристики	В	0
Ilimit	Ограничение тока в прямом включении	А	∞
Revepsilon	Протяженность квадратичного участка характеристики в обратном включении	В	0
Revlimit	Ограничение тока в обратном включении	А	∞
Roff	Сопротивление в запертом состоянии	Ом	1/Gmin
Ron	Сопротивление в прямом включении	Ом	1
Rrev	Обратное сопротивление	Ом	Ron
Vfwd	Прямое пороговое напряжение до начала проводимости	В	0
Vrev	Обратное пробивное напряжение	В	∞

простого для расчетов идеализированного диода. Модель имеет три линейных участка электропроводности: прямое включение, обратное включение и пробой при обратном включении. Характеристика на участках прямой проводимости и обратного пробоя может определяться нелинейно с ограничением токов через **Ilimit** (**revIlimit**). Переход к ограничению тока на участке прямой проводимости формируется с использованием функции **tanh()**. Стоит отметить, что поведение модели с использованием параметров **Ilimit**, **revIlimit** не соответствует привычному поведению полупроводникового диода. Параметры **epsilon** и **revepsilon** определяют плавность переключения между запертым и проводящим состояниями. Участок характеристики между проводящим и запертым состояниями описывается квадратичной функцией таким образом, что вольт-амперная характеристика диода сохраняется непрерывной и гладкой. В проводящем состоянии переход обеспечивается при напряжении, определяемом значением **epsilon**, а переход меж-

Таблица 20. Предельно допустимые параметры модели диода

Обозначение	Параметр	Единица измерения
Vpk	Максимальное значение напряжения	В
Ipk	Максимальное значение тока	А
Iave	Среднее значение тока	А
Irms	Среднеквадратичное значение тока	А
diss	Максимальное значение рассеиваемой мощности	Вт

ду непроводящим состоянием и пробоем при обратном напряжении определяется **revepsilon**.

Идеализированная модель используется, если любое из **Ron**, **Roff**, **Vfwd**, **Vrev** или **Rrev** определено в модели.

Параметры идеализированной модели диода приведены в таблице 18.

Другая модель является стандартной SPICE-моделью полупроводникового диода, но расширенной так, чтобы более подробно описывать поведение при пробое и токи рекомбинации. Множитель **Area** определяет количество аналогичных параллельно включенных устройств. В таблице 19 приведены параметры модели для этого диода.

Можно задать для модели предельные значения напряжения, тока и мощности. Эти параметры, перечисленные в таблице 20, не влияют на электрическое поведение модели и не масштабируются множителем **Area**. Они позволяют LTspice проверить использование диода в номинальных режимах.

Источник напряжения, управляемый напряжением

Имя компонента: E, E2. Есть три типа источников напряжения, управляемых напряжением.

Синтаксис: Exxx <+узел> <-узел> <управляющий узел> <-управляющий узел> <коэффициент передачи>. Это источник с линейной зависимостью выходного напряжения, имеющий постоянный коэффициент

передачи. Он воспроизводит выходное напряжение между узлами <+узел> <-узел>, зависящее от входного напряжения между узлами <+управляющий узел> <-управляющий узел>.

Синтаксис: Exxx <+узел> <-узел> <+управляющий узел> <-управляющий узел> table=(<пара значений>, <пара значений>, ...). Используется табличная форма задания коэффициента передачи в виде списка пар значений. Второе число в паре равно выходному напряжению, когда управляющее напряжение равно первому числу этой пары. Выходное напряжение изменяется линейно, когда управляющее напряжение изменяется между заданными точками. Если управляющее напряжение выходит за пределы диапазона, заданного в таблице, выходное напряжение экстраполируется как постоянное напряжение в соответствующей крайней точки таблицы.

Синтаксис: Exxx <+узел> <-узел> <+управляющий узел> <-управляющий узел> Laplace=<функция(и)> [window=<временной интервал>] [nfft=<число>] [mtol=<число>]. Передаточная функция этого источника напряжения определяется преобразованием Лапласа.

Синтаксис: Exxx <+узел> <-узел> value={<выражение>}. Это альтернативный синтаксис для источника напряжения с произвольным поведением В.

Синтаксис: Exxx <+узел> <-узел> POLY(<N>) (+узел управляющего источника 1, -узел управляющего источника 1) (+узел управляющего источника 2, -узел управляющего источника 2) ... (+узел управляющего источника N, -узел управляющего источника N) <коэффициенты полинома...>. Это устаревшая форма моделирования произвольного поведения, описываемого полиномом. Используется для управления имеющимися поведенческими моделями Linear Technology.

Примечание. Лучше использовать источник тока G, шунтированный сопротивлением, для имитации источника E. Источник тока, управляемый напряжением, шунтированный сопротивлением, обчитывается быстрее и вызывает меньше проблем со сходимостью, чем источник напряжения, управляемый напряжением. Кроме того, ненулевое выходное полное сопротивление чаще встречается в практических схемах.

Источник тока, управляемый током

Имя компонента: F.

Синтаксис: Fxxx <+узел> <-узел> <имя управляющего источника напряжения> <коэффициент передачи>. Этот элемент цепи обеспечивает ток между узлами <+узел> <-узел>. Выходной ток равняется произведению коэффициента передачи на ток через независимый источник напряжения.

Синтаксис: Fxxx <+узел> <-узел> value={<выражение>}. Это альтернативный синтаксис для источника тока с произвольным поведением В.

Синтаксис: Fxxx <+узел> <-узел> POLY(<N>) <V1 V2... VN> <коэффициенты полинома...>. Это устаревшая форма моделирования произвольного поведения, описываемого полиномом. Используется для управления имеющимися поведенческими моделями Linear Technology.

Источник тока, управляемый напряжением

Имя компонента: G, G2. Есть три типа источников тока, управляемых напряжением.

Синтаксис: Gxxx <+узел> <-узел> <+управляющий узел> <-управляющий узел> <коэффициент передачи>. Линейный источник с постоянным коэффициентом передачи, выходной ток которого течет между узлами <+узел> <-узел> и зависит от входного напряжения между узлами <+управляющий узел> <-управляющий узел>.

Синтаксис: Gxxx <+узел> <-узел> <+управляющий узел> <-управляющий узел> table=(<пара значений>, <пара значений>, ...). Источник с табличной формой задания коэффициента передачи. Таблица представляет собой список пар значений. Второе число в паре равно выходному току, когда управляющее напряжение равно первому числу этой пары. Выходной ток изменяется линейно, когда управляющее напряжение изменяется между заданными точками. Если управляющее напряжение выходит за пределы диапазона, заданного в таблице, выходной ток экстраполируется как постоянный ток в соответствующей крайней точке таблицы.

Синтаксис: Gxxx <+узел> <-узел> <+управляющий узел> <-управляющий узел> Laplace=<функция(и)> [window=<временной интервал>] [nfft=<число>] [mtol=<число>].

Функция передачи этого элемента схемы определена преобразованием Лапласа.

Синтаксис: Gxxx <+узел> <-узел> value={<выражение>}. Это альтернативный синтаксис для источника тока с произвольным поведением В.

Синтаксис: Gxxx <+узел> <-узел> POLY(<N>) (<+узел управляющего источника 1, -узел управляющего источника 1) (+узел управляющего источника 2, -узел управляющего источника 2) ... (+узел управляющего источника N, -узел управляющего источника N) <коэффициенты полинома...>. Это устаревшая форма моделирования произвольного поведения, описываемого полиномом. Используется для управления имеющимися поведенческими моделями Linear Technology.

Источник напряжения, управляемый током

Имя компонента: H.

Синтаксис: Hxxx <+узел> <-узел> <имя управляющего источника напряжения> <коэффициент передачи>. Напряжение, приложенное между узлами <+узел> <-узел>, линейно зависит от тока через управляющий источник напряжения, умноженного на коэффициент передачи.

Синтаксис: Hxxx <+узел> <-узел> value={<выражение>}. Это альтернативный синтаксис для источника напряжения с произвольным поведением В.

Синтаксис: Hxxx <+узел> <-узел> POLY(<N>) <управляющий источник напряжения 1 управляющий источник напряжения 2 ... управляющий источник напряжения 3> <коэффициенты полинома...>. Это устаревшая форма моделирования произвольного поведения, описываемого полиномом. Используется для управления имеющимися поведенческими моделями Linear Technology.

Источник тока

Имя компонента: CURRENT.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> <ток> [AC=<амплитуда>] [load]. Это источник постоянного тока между узлами <+узел> <-узел>. Если источник используется как нагрузка, он должен быть потребителем, и в таком случае ток стремится к нулю, если напряжение между узлами <+узел> <-узел> стремится к нулю или имеет отрицательное значение. Цель этого варианта — в моделировании токовой нагрузки источника питания, который не дает ток, если выходное напряжение равно нулю. При этом применяется ключевое слово **load**.

Для анализа на переменном токе используется амплитудное значение переменного тока на анализируемой частоте.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> PULSE (Ioff Ion Tdelay Trise Tfall Ton Tperiod Ncycles). Это источник импульсного тока, параметры модели которого приведены в таблице 21.

Таблица 21. Параметры модели источника импульсного тока

Обозначение	Параметр	Размерность
Ioff	Начальное значение тока	А
Ion	Максимальное значение тока	А
Tdelay	Время задержки	с
Trise	Длительность переднего фронта	с
Tfall	Длительность заднего фронта	с
Ton	Длительность импульса	с
Tperiod	Период следования импульсов	с
Ncycles	Количество импульсов в серии (опускается для источника с непрерывной генерацией)	число

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> SINE (Ioffset Iamp Freq Td Theta Phi Ncycles). Так записывается источник синусоидального тока, параметры модели которого приведены в таблице 22.

Таблица 22. Параметры модели источника синусоидального тока

Обозначение	Параметр	Размерность
Ioffse	Постоянная составляющая тока	А
Iamp	Амплитуда переменной составляющей	А
Freq	Частота	Гц
Td	Время задержки	с
Theta	Коэффициент затухания	1/с
Phi	Фаза	°
Ncycles	Количество циклов (опускается для источника с непрерывной генерацией)	число

На этапах времени, которые меньше, чем Td, и после завершения Ncycles выходной ток описывается выражением:

$$I_{offset} + I_{amp} \times \sin(\pi \times \phi / 180).$$

Для $T_d < \text{time} < N_{cycles} / \text{Freq}$ ток равен:

$$I_{offset} + I_{amp} \times \exp(-(\text{time} - T_d) \times \Theta) \times \sin(2\pi \times \text{Freq}(\text{time} - T_d) + \pi \times \phi / 180).$$

Коэффициент затухания Theta — аналог постоянной времени затухания.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> EXP (I1 I2 Td1 Tau1 Td2 Tau2). Это источник экспоненциального тока с параметрами модели, приведенными в таблице 23.

Таблица 23. Параметры модели источника экспоненциального тока

Обозначение	Параметр	Размерность
I1	Начальное значение тока	А
I2	Максимальное значение тока	А
Td1	Начало переднего фронта	с
Tau1	Постоянная времени нарастания	с
Td2	Начало заднего фронта	с
Tau2	Постоянная времени нарастания	с

Для времени меньше Td1 ток равен I1. На участке времени Td1 < time < Td2 ток описывается выражением:

$$I1 + (I2 - I1) \times (1 - \exp(-(\text{time} - Td1) / \text{Tau1})).$$

Для времени больше Td2 ток описывается выражением:

$$I1 + (I2 - I1) \times (1 - \exp(-(\text{time} - Td1) / \text{Tau1})) \times (I1 - I2) \times (1 - \exp(-(\text{time} - Td2) / \text{Tau2})).$$

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> SFFM(Ioff Iamp Fcar MDI Fsig). Параметры модели источника синусоидального тока с частотной модуляцией приведены в таблице 24.

Таблица 24. Параметры модели источника синусоидального тока с частотной модуляцией

Обозначение	Параметр	Размерность
Ioff	Постоянная составляющая тока	А
Iamp	Амплитуда переменной составляющей	А
Fcar	Частота несущей	Гц
MDI	Индекс частотной модуляции	—
Fsig	Частота сигнала	Гц

Выходной сигнал описывается следующей функцией:

$$I_{off} + I_{amp} \times \sin((2\pi \times F_{car} \times \text{time}) + MDI \times \sin(2\pi \times F_{sig} \times \text{time})).$$

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> tbl=<напряжение,ток>, <напряжение,ток>, ...). Ток этого источника определяется как функция напряжения на выходных узлах в табличной

Таблица 25. Параметры модели полевого транзистора

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию	Пример
AF	Показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока через переход	—	1	
alpha	Коэффициент ионизации	1/B	0	
B	Параметр легирования	—	1	1,1
Beta	Крутизна	A/B2	1×10 ⁻⁴	1×10 ⁻³
BetaTce	Экспоненциальный температурный коэффициент крутизны	%/°C	0	
Cgd	Емкость перехода затвор—сток при нулевом смещении	пФ	0	1
Cgs	Емкость перехода затвор—исток при нулевом смещении	п	0	5
Fc	Коэффициент нелинейности емкостей переходов при прямом смещении	—	0,5	
gdsnoi	Коэффициент теплового шума канала	—	1	
Is	Ток насыщения p-n-перехода затвор—канал	А	1×10 ⁻¹⁴	1×10 ⁻¹⁴
Isr	Параметр тока рекомбинации перехода затвор—канал	А	0	
KF	Коэффициент, определяющий плотность фликкер-шума	—	0	
Lambda	Коэффициент модуляции длины канала	1/B	0	1×10 ⁻⁴
N	Коэффициент неидеальности перехода затвор—канал	—	1	
nlev	Выбор уравнения шумов	—	2	
Nr	Коэффициент эмиссии для тока Isr	—	2	
Pb	Контактная разность потенциалов p-n-перехода затвора	В	1	0,6
Rd	Объемное сопротивление области стока	Ом	0	100
Rs	Объемное сопротивление области истока	Ом	0	100
Tnom	Номинальная температура	°C	27	50
Vk	Напряжение ионизации перехода затвор—канал	В	0	
Vto	Пороговое напряжение	В	-2,0	-2,0
VtoTc	Температурный коэффициент порогового напряжения	В/°C	0	
Xti	Температурный коэффициент тока Is	—	3	

форме. Такая форма используется для моделирования особенностей нагрузки.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> <значение> step (<значение1>, [<значение2>], [<значение3>, ...]) [load]. Это специальная форма для источника тока. Ток определен как список токов, такая форма используется при ступенчатом изменении нагрузки при анализе переходного процесса. В этом способе моделирование проводится, пока для первого тока в списке, <значение1>, не будет достигнуто установившееся состояние. Тогда ток переключается к следующему значению в списке, <значение2>. Процесс повторяется, пока список не будет исчерпан. Если директивой .tran не определен шаг step, то используются оригинальные <значения>.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> R=<значение>. Это вообще-то не источник тока, а резистор. Такая форма используется, чтобы моделировать сопротивление нагрузки, когда нагрузка записана в списке соединений как источник тока.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> PWL(t1 i1 t2 i2 t3 i3...). Так описывается источник тока с кусочно-линейной функцией.

На отрезке времени меньше t1 ток равен i1. В течение времени между t1 и t2 ток изменяется линейно между i1 и i2. Допускается любое количество точек время-ток. Для времени, больше указанного в последней точке, ток равен последнему значению в списке.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> wavfile=<имя файла> [chan=<номер канала>]. Такая модель позволяет использовать файл .wav в качестве входного для LTspice. <Имя файла> — это либо полный, абсолютный путь к файлу .wav, либо относительный путь, определяемый каталогом, содержащим моделируемую схему или список соединений.

Двойные кавычки могут использоваться для определения пути. Файл .wav может содержать до 65 536 каналов, пронумерованных от 0 до 65 535. Следует определить используемый канал. По умолчанию используется первый канал под номером 0. Файл .wav интерпретируется как имеющий полную шкалу от -1 до 1 А.

Этот источник применяется только в .TRAN-анализе.

Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом (JFET)

Имя компонента: NJF, PJF.

Синтаксис: Jxxx <узел стока> <узел затвора> <узел истока> <имя модели> [коэффициент кратности area] [проводимость] [IC=<Vds,Vgs>] [temp=<температура>].

Примеры:

```
J1 0 in out MyJFETmodel
.model MyJFETmodel NJF(Lambda=.001)

J2 0 in out MyPJFETmodel
.model MyPJFETmodel PJF(Lambda=.001)
```

Для определения особенностей полевого транзистора с управляющим p-n-переходом используется директива .MODEL. Ключевые слова NJF и PJF в списке параметров модели определяют проводимость транзистора. Коэффициент кратности определяет количество идентичных устройств данной модели, включенных параллельно.

Модель JFET получена из модели Шихмана-Ходжеса, дополненной током рекомбинации затвора и реакцией на ионизирующие воздействия. Характеристики на постоянном токе определены параметрами VTO и BETA, которые связывают изменение тока стока с напряжением затвора;

LAMBDA, который определяет выходную проводимость, и Is, током насыщения двух переходов. Включены два омических сопротивления, Rd и Rs. Накопление заряда моделируется нелинейными емкостями обедненного слоя для обоих переходов, которые изменяются в степени -1/2 приложенного к переходу напряжения и определены параметрами Cgs, Cgd и PV. Добавлен параметр B. Параметры модели полевого транзистора приведены в таблице 25.

Взаимная индуктивность

Имя компонента: net, помещается в виде текста на схеме.

Синтаксис: Kxxx L1 L2 [L3...] <коэффициент связи>. L1 и L2 — обозначения катушек индуктивности в схеме. Коэффициент связи может находиться в пределах от -1 до 1.

Строка K1 L1 L2 L3 L4 1 эквивалентна шести строкам при одинаковом коэффициенте связи между каждой из пар обмоток:

- K1 L1 L2 1;
- K2 L2 L3 1;
- K3 L3 L4 1;
- K4 L1 L3 1;
- K5 L2 L4 1;
- K6 L1 L4 1.

Рекомендуется начинать моделирование с коэффициента связи, равного 1. Это устранит индуктивность рассеивания, которая может вызвать звон на очень высоких частотах, если отсутствует демпфирование, и замедлить моделирование. Однако коэффициент связи -1 или 1 может привести к проблемам с моделированием, если в директиве .tran присутствует модификатор uic.

Индуктивность

Имя компонента: IND, IND2.

Синтаксис: Lxxx <+узел> <-узел> <индуктивность> [ic=<начальный ток>] [Rser=<значение>] [Rpar=<значение>] [Cpar=<значение>] [m=<значение>] [tc1=<значение>] [tc2=<значение>] [temp=<значение>].

Можно задать эквивалентное последовательное сопротивление, последовательную индуктивность, параллельное сопротивление и параллельную шунтирующую емкость.

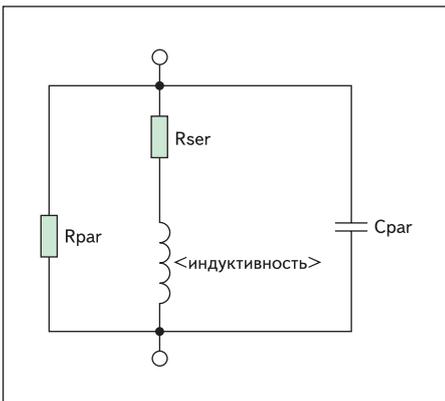


Рис. 51. Эквивалентная схема катушки индуктивности

Таблица 26. Параметры модели индуктивности

Обозначение	Параметр
Rser	Эквивалентное последовательное сопротивление
Rpar	Эквивалентное параллельное сопротивление
Cpar	Эквивалентная параллельная емкость
RLshunt	Шунтирующий резистор, параллельный Lser
m	Количество включенных параллельно устройств
ic	Начальный ток (используется, если только модификатор uic включен в .tran-анализ)
tc1	Линейный температурный коэффициент индуктивности
tc2	Квадратичный температурный коэффициент индуктивности
temp	Рабочая температура

На рис. 51 изображена эквивалентная схема индуктивности.

Параметры индуктивности приведены в таблице 26.

Предпочтительнее включить в состав катушки индуктивности паразитные Rpar, Rser и Cpar, чем специально предусматривать их. LTspice использует собственную технологию моделирования схемы для моделирования такой физической катушки индуктивности без внутренних узлов. Это делает матрицу моделирования меньше, ускоряет вычисления и уменьшает вероятность несходимости при малых шагах времени.

По умолчанию LTspice будет вычислять потери мощности в катушках индуктивности при расчете переходного процесса для ИИП. Эти потери обычно незначительны, и их расчет при желании может быть выключен. Отключите “Supply a min. inductor damping if no Rpar is given” на странице “Tools=>Control Panel=>Hacks!” Эта установка будет сохранена при перезапуске программы. По умолчанию также присутствуют последовательные сопротивления 1 мОм, не упомянутые в описании взаимной индуктивности. Наличие Rser позволяет SwitcherCAD III объединять индуктивности по эквивалентной схеме Нортона вместо эквивалентной схемы Тевенина, чтобы уменьшить размер матрицы линеаризованной схемы. Если нежелательно, чтобы такое минимальное сопротивление присутствовало в схеме, необходимо явно установить Rser = 0 для конкретной катушки индуктивности. При этом в процедуре анализа переходного процесса для катушки индуктивности будет использована более сложная эквивалентная схема Тевенина.

В LTSpice есть два варианта нелинейных индуктивностей. Каждый из них — это поведенческая индуктивность, описываемая выражением для потока. Ток через индуктивность в выражении записывается ключевым словом x. Пример записи в списке соединений:

```
*
L1 N001 0 Flux=1m*tanh(5*x)
I1 0 N001 PWL(0 0 1 1)
.tran 1
.end
```

В примере скорость изменения тока di/dt задана равной 1 А/с, поэтому значение ин-

Таблица 27. Параметры модели индуктивности с сердечником

Обозначение	Параметр	Единица измерения
Hc	Козрцитивная сила	Ампер-виток/м
Br	Остаточная индукция	Т
Bs	Индукция насыщения	Т
Lm	Средняя длина магнитной силовой линии	м
Lg	Ширина воздушного зазора	м
A	Площадь поперечного сечения	м²
N	Количество витков	—

дуктивности можно считать как напряжение в узле N001, естественно, заменив вольты на генри.

Другая нелинейная катушка индуктивности в LTspice базируется на гистерезисной модели магнитопровода, предложенной Джоном Чаном. Эта модель определяет петлю гистерезиса только тремя параметрами: Hc, Bs и Br. Параметры модели индуктивности с сердечником перечислены в таблице 27.

Верхняя и нижняя ветви основной петли гистерезиса описываются как:

$$B_{up}(H) = B_s \times \frac{H + H_c}{|H + H_c| + H_c \times \left(\frac{B_s}{B_r - 1}\right)} + \mu_0 \times H$$

и

$$B_{dn}(H) = B_s \times \frac{H + H_c}{|H - H_c| + H_c \times \left(\frac{B_s}{B_r - 1}\right)} + \mu_0 \times H.$$

График этой функции изображен на рис. 52.

Hc и Br — точки пересечения предельной петли гистерезиса с осями H и B. Bs — точка пересечения оси B с асимптотической прямой, приблизительно Bsai(H) = Bs + μ₀ × H, поскольку H стремится к бесконечности.

Начальная кривая намагничивания:

$$B_{mag}(H) = 0,5 \times [B_{up}(H) + B_{dn}(H)].$$

Абсолютная и дифференциальная магнитные проницаемости сердечника — функции H и предшествующих значений H. На рис. 53 изображена асимметричная частная петля гистерезиса типового феррита для силовых устройств.

Отметим, что напряженность магнитного поля H в воздушном зазоре не пропорциональна току в обмотке. LTspice определяет магнитные поля в магнитопроводе и зазоре в предположении равенства площадей поперечного сечения магнитопровода и короткого или равномерно распределенного зазора.

Следующий пример демонстрирует зависимость индуктивности L1, представляющей собой катушку на сердечнике с зазором, от протекающего тока:

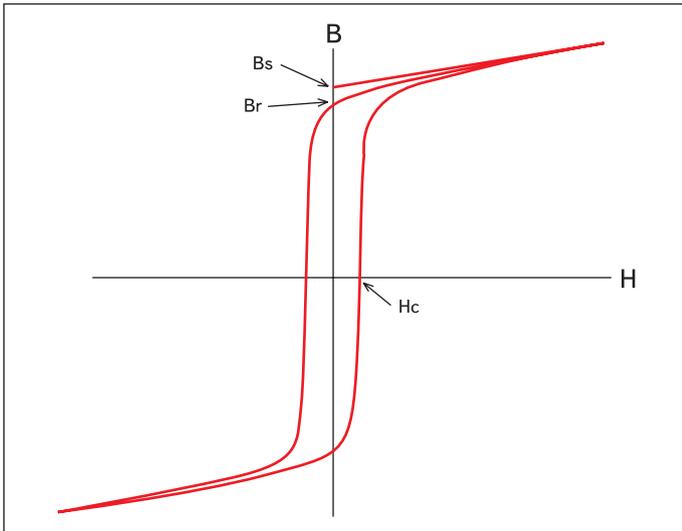


Рис. 52. Предельная петля гистерезиса магнитного сердечника

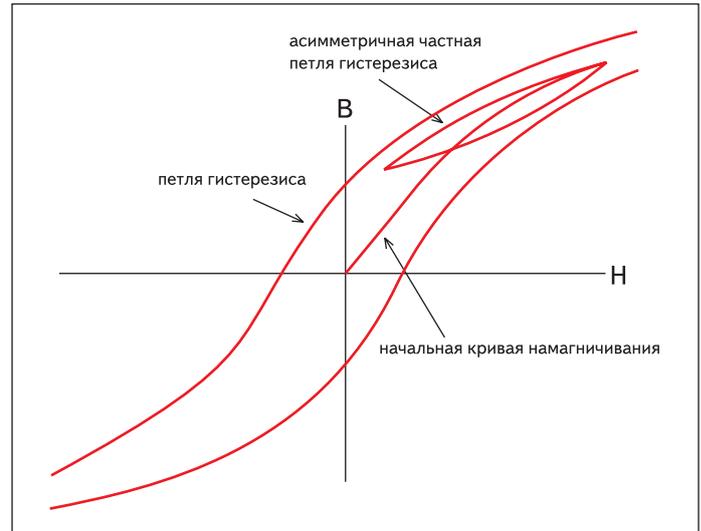


Рис. 53. Асимметричная частная петля гистерезиса феррита

```
*
N001 0 Hc=16. Bs=.44 Br=.10 A=0.0000251
+ Lm=0.0198 Lg=0.0006858 N=1000
I1 0 N001 PWL(0 0 1 1)
.tran .5
.options maxstep=10u
.end
```

Схема и результаты моделирования изображены на рис. 54. Как и в предыдущем примере, значения индуктивности эквива-

лентны значениям напряжения в узле (N001). Намагничивание сердечника идет по начальной кривой намагничивания, так что можно заметить, что сначала магнитная проницаемость увеличивается по сравнению с начальным значением, а затем с ростом тока уменьшается вплоть до насыщения сердечника. Поскольку воздушный зазор уменьшает влияние изменения магнитной проницаемости

на индуктивность катушки, чтобы заметить увеличение магнитной проницаемости, нужно увеличить масштаб изображения V(N001), что и сделано в окне графиков в правом верхнем углу рис. 54. Максимальное значение соответствует напряженности магнитного поля, равной коэрцитивной силе Hc.

Окончание следует

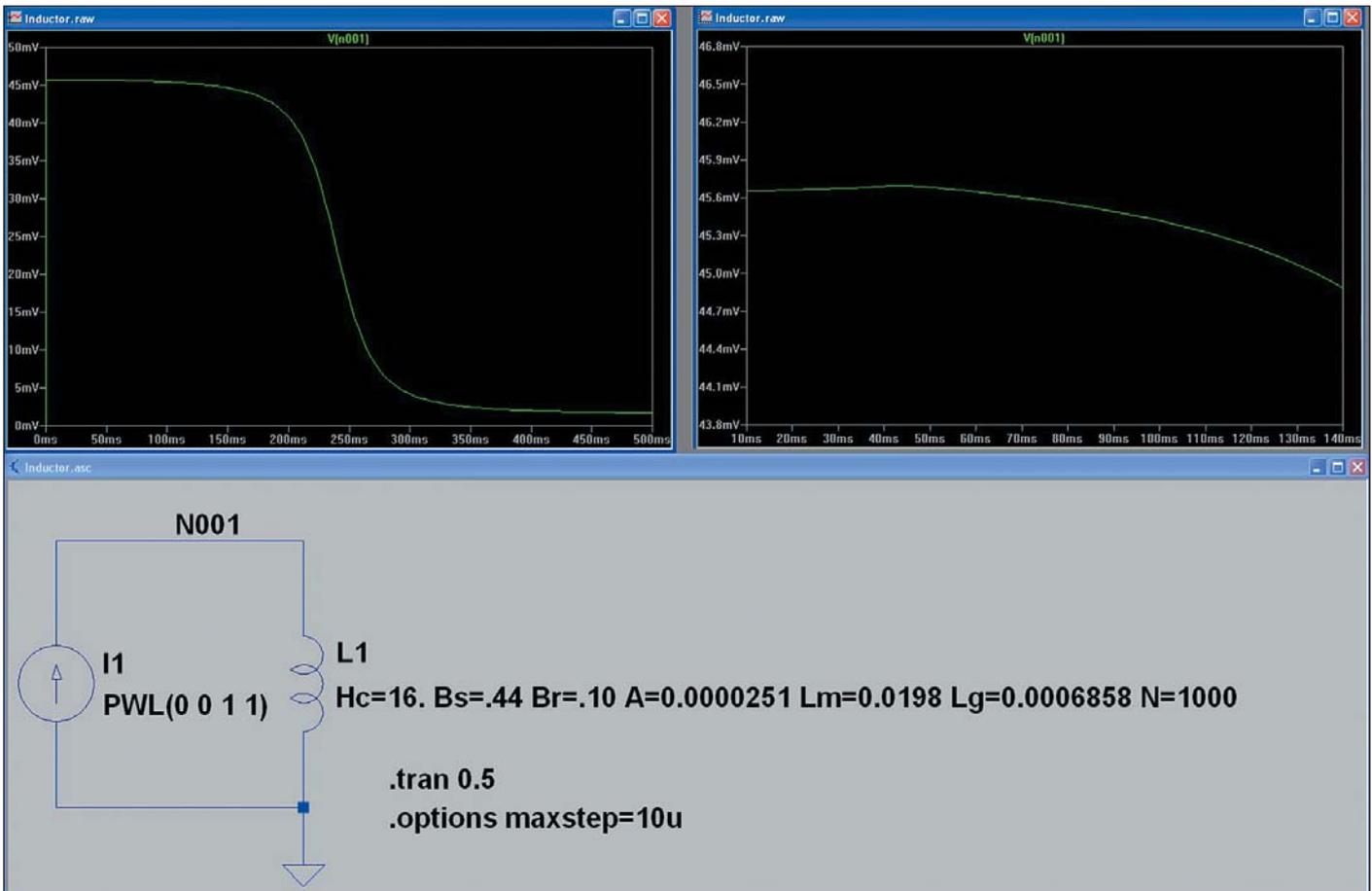


Рис. 54. Моделирование начальной кривой намагничивания