

Валентин Володин

LTspice

**КОМПЬЮТЕРНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОННЫХ
СХЕМ**

Санкт-Петербург

«БХВ-Петербург»

2010

УДК 681.3.06
ББК 32.973.26-018.2
В68

Володин В. Я.

В68 LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 400 с.: ил. + Видеоуроки (на DVD) — (Электроника)
ISBN 978-5-9775-0543-7

Руководство для эффективного освоения бесплатного SPICE-симулятора LTspice,, предназначенного для компьютерного моделирования электронных схем, является наиболее полным описанием программы, пользующейся заслуженной популярностью как среди любителей, так и среди профессионалов. Содержит рекомендации, позволяющие быстро начать работать с симулятором, и в то же время включает полное описание интерфейса, библиотеки схемных элементов и директив моделирования. Рассматриваются процесс настройки схемных элементов, связь текстового описания схемных элементов с графическим интерфейсом программы, редактор схем,, редактор символов и плоттера. Подробно описаны вопросы создания и тестирования нелинейных индуктивностей и трансформаторов, вызывающие наибольшие затруднения у начинающих. Большое внимание уделено процессу адаптации сторонних моделей, а также созданию собственных моделей схемных компонентов. Приводится методика моделирования электромагнитных компонентов с разветвленным сердечником. Изложение сопровождается большим количеством практических примеров и иллюстраций, облегчающих усвоение сложного материала. Прилагаемый DVD содержит видеоуроки для освоения симулятора, примеры из книги и авторскую библиотеку моделей популярных ШИМ-контроллеров.

*Для разработчиков электронных устройств, а также студентов
и преподавателей технических университетов*

УДК 681.3.06
ББК 32.973.26-018.2

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Алексей Семенов</i>
Компьютерная верстка	<i>Натальи Смирновой</i>
Корректор	<i>Наталья Першакова</i>
Дизайн обложки	<i>Елены Беляевой</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 28.02.10.
Формат 70×100¹/₁₆. Печать офсетная. Усл. печ. л. 32,25.
Тираж 1200 экз. Заказ №
"БХВ-Петербург", 190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию № 77.99.60.953.Д.005770.05.09 от 26.05.2009 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ГУП "Типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

Оглавление

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В LTSPICE	1
1.1. Коротко о SPICE.....	2
1.2. Общая структура и соглашения файла списка соединений (netlist)	3
ГЛАВА 2. НАЧАЛО РАБОТЫ	9
2.1. Установка и запуск программы LTspice.....	9
2.2. Быстро осваиваем LTspice	11
ГЛАВА 3. СХЕМНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИМУЛЯТОРА LTSPICE	47
3.1. A — специальные функции	47
3.1.1. Элементы INV, BUF, AND, OR и XOR	48
3.1.2. Элементы DIFFSCHMITT, DIFFSCHMTBUF, DIFFSCHMTINV, SCHMITT, SCHMTBUF и SCHMTINV	51
3.1.3. Элемент VARISTOR.....	52
3.1.4. Элементы MODULATE и MODULATE2	54
3.2. B — функциональные источники напряжения или тока	55
3.3. C — конденсатор	69
3.4. D — диод	74
3.5. E — источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН).....	81
3.5.1. Первый тип ИНУН.....	81
3.5.2. Второй тип ИНУН	81
3.5.3. Третий тип ИНУН.....	82
3.5.4. Четвертый тип ИНУН.....	83
3.5.5. Пятый тип ИНУН.....	83
3.6. F — источник тока, управляемый током (ИТУТ).....	80
3.6.1. Первый тип ИТУТ	80
3.6.2. Второй тип ИТУТ	80
3.6.3. Третий тип ИТУТ.....	81
3.7. G — источник тока, управляемый напряжением (ИТУН).....	82
3.7.1. Первый тип ИТУН.....	83
3.7.2. Второй тип ИТУН.....	83
3.7.3. Третий тип ИТУН.....	84

3.7.4. Четвертый тип ИТУН	84
3.7.5. Пятый тип ИТУН	85
3.8. Н — источник напряжения, управляемый током (ИНУТ)	86
3.8.1. Первый тип ИНУТ	87
3.8.2. Второй тип ИНУТ	87
3.8.3. Третий тип ИНУТ	87
3.9. I — источник тока	89
3.9.1. Источник импульсного тока	91
3.9.2. Источник синусоидального тока	93
3.9.3. Источник экспоненциального тока	95
3.9.4. Одночастотный FM источник тока	96
3.9.5. Источник тока, зависимый от приложенного напряжения	97
3.9.6. Источник тока, программируемый пользователем	97
3.9.7. WAV-файл как источник токового сигнала	98
3.10. J — полевой транзистор с управляющим p-n-переходом	98
3.11. K — коэффициент связи	102
3.12. L — индуктивность	106
3.12.1. Первый способ задания нелинейной индуктивности	109
3.12.2. Второй способ задания нелинейной индуктивности	112
3.13. M — MOSFET. Полевые транзисторы с изолированным затвором	120
3.14. O — линия передачи с потерями	131
3.15. Q — BJT (биполярный транзистор)	134
3.16. R — резистор	150
3.17. S — ключ, управляемый напряжением	151
3.18. T — линия передачи без потерь	154
3.19. U — однородная RC-линия	156
3.20. V — источник напряжения	159
3.20.1. Источник импульсного напряжения	162
3.20.2. Источник синусоидального напряжения	163
3.20.3. Источник экспоненциального напряжения	165
3.20.4. Источник FM напряжения	166
3.20.5. Источник напряжения, программируемый пользователем	167
3.20.6. WAV-файл как источник сигнала напряжения	168
3.21. W — ключ, управляемый током	168
3.22. X — подсхема	170
3.23. Z — MESFET-транзистор	174

Глава 4. ДИРЕКТИВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ LTSPICE.....179

4.1. AC — анализ частотных характеристик для малого сигнала	180
4.2. BACKANNO — связать имена выводов с токами	185

4.3. <i>DC</i> — анализ по постоянному току	185
4.4. <i>END</i> — конец задания	189
4.5. <i>ENDS</i> — конец описания подсхемы	190
4.6. <i>FOUR</i> — выполнить анализ Фурье	190
4.7. <i>FUNC</i> — функция, определяемая пользователем	191
4.8. <i>FERRET</i> — загрузить файл из Интернета	192
4.9. <i>GLOBAL</i> — определить глобальные узлы	193
4.10. <i>IC</i> — задание начальных условий	193
4.11. <i>INCLUDE</i> — включить другой файл	195
4.12. <i>LIB</i> — подключить библиотеку	195
4.12.1. Зашифрованные библиотеки	196
4.13. <i>LOADBIAS</i> — загрузить из файла состояние схемы	197
4.14. <i>MEASURE</i> — измерить при определенных пользователем условиях	197
4.14.1. Первый тип директивы <i>MEASURE</i>	198
4.14.2. Второй тип директивы <i>MEASURE</i>	200
4.15. <i>MODEL</i> — описание модели схемного элемента	202
4.16. <i>NET</i> — вычислить параметры четырехполюсника	203
4.17. <i>NODESET</i> — начальная инициализация узловых потенциалов	205
4.18. <i>NOISE</i> — выполнить анализ шума	206
4.19. <i>OP</i> — найти рабочую точку по постоянному току	210
4.20. <i>OPTIONS</i> — установить параметры моделирования	211
4.21. <i>PARAM</i> — параметры, определяемые пользователем	216
4.22. <i>SAVE</i> — ограничение количества сохраненных данных	220
4.23. <i>SAVEBIAS</i> — сохранить рабочую точку на диск	222
4.24. <i>STEP</i> — вариация параметров	224
4.25. <i>SUBCKT</i> — определение подсхемы	227
4.26. <i>TEMP</i> — вариация температуры	228
4.27. <i>TF</i> — найти передаточную функцию по постоянному току	228
4.28. <i>TRAN</i> — выполнить анализ переходного процесса	231
4.29. <i>WAVE</i> — вывести сигнал в WAV-файл	235

ГЛАВА 5. РЕДАКТОР СХЕМ

237

5.1. Окно редактора схем	238
5.1.1. Панель команд редактора схем	238
5.1.2. Панель инструментов редактора схем	248
5.1.3. Панель состояния редактора схем	251
5.2. Размещение компонентов в окне редактора схем	252
5.2.1. Редактирование параметров компонента	253
5.2.2. Редактирование видимых атрибутов компонента	255
5.2.3. Редактирование всех атрибутов компонента	255

5.3. Соединение компонентов и наименование цепей	257
5.4. Меню <i>Control Panel</i>	259
5.4.1. Вкладка <i>Compression</i>	260
5.4.2. Вкладка <i>Save Default</i>	261
5.4.3. Вкладка <i>SPICE</i>	263
5.4.4. Вкладка <i>Drafting Options</i>	265
5.4.5. Вкладка <i>Netlist Options</i> — опции списка соединений	268
5.4.6. Вкладка <i>Waveforms</i>	269
5.4.7. Вкладка <i>Operation</i>	271
5.4.8. Вкладка <i>Hacks</i>	273
5.4.9. Вкладка <i>Internet</i>	274
5.5. Окно <i>Color Preferences</i>	275
5.6. Команда <i>Export Netlist</i>	276

ГЛАВА 6. ПЛОТТЕР.....279

6.1. Окно плоттера	279
6.2. Выбор данных	286
6.2.1. Прямое зондирование схемы	286
6.2.2. Выбор напряжений и токов из окна <i>Select Visible Waveform</i>	290
6.2.3. Добавление напряжений и токов из окна <i>Add Traces to plot</i>	291
6.3. Настройка диаграмм и измерения в окне плоттера	292
6.4. Изменение масштаба изображения	294
6.5. Обработка данных	294
6.6. Функции, определяемые пользователем	301
6.7. Управление осями	302
6.8. Подокна плоттера	305

ГЛАВА 7. ПОПОЛНЕНИЕ БИБЛИОТЕКИ МОДЕЛЕЙ307

7.1. Пополнение библиотеки схемными компонентами, имеющими стандартную модель	308
7.2. Пополнение библиотеки схемными компонентами, имеющими модель в виде подсхемы	309
7.3. Создание модели схемного компонента с использованием иерархической схемы	317
7.3.1. Иерархические схемы	318
7.3.2. Создание модели TL494 в виде иерархической схемы	318
7.4. Редактор символов	332
7.4.1. Окно редактора символов	333
7.4.2. Панель команд редактора символов	333

7.4.3. Панель инструментов редактора символов	335
7.4.4. Создание изображения символа	336
7.4.5. Добавление выводов	337
7.4.6. Добавление атрибутов	340
7.4.7. Видимость атрибутов	343
7.5. Проверка схемного компонента, созданного в виде иерархической схемы	345
7.6. Создание модели схемного компонента с использованием подсхемы	349
7.6.1. Преобразование иерархической схемы в библиотечную подсхему	349
7.6.2. Редактирование символа схемного компонента	352
7.6.3. Проверка схемного компонента, созданного в виде подсхемы	352

ПРИЛОЖЕНИЯ..... 355

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ПОМОЩИ LTSPICE357

П1.1. Принцип подобия электрических и магнитных цепей	358
П1.2. Дуальность физических цепей.....	361
П1.2.1. Модель неразветвленной магнитной цепи	362
П1.2.2. Моделирование разветвленной магнитной цепи	365
П1.2.3. Моделирование сложной магнитной цепи	368
П1.2.4. Выводы.....	369
П1.3. Адаптация модели для магнитных цепей, работающих с частичным или полным подмагничиванием.....	369
П1.4. Создание модели интегрированного магнитного компонента.....	373

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ПО LTSPICE.....379

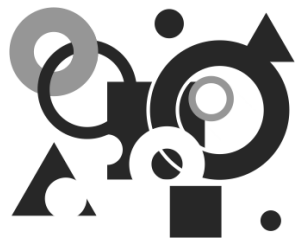
П2.1. Параметры командной строки программы LTspice.....	379
П2.2. Перечень схемных элементов симулятора LTspice	380

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИИ, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ НА КОМПАКТ-ДИСКЕ, ПРИЛАГАЕМОМ К КНИГЕ384

П3.1. Каталог Lessons	384
П3.2 Каталог Models.....	384

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....385

ГЛАВА 1



Введение в LTspice

Посещая различные любительские и профессиональные форумы электронщиков, иногда приходится слышать самоуверенные заявления некоторых их участников, что де они никогда не занимаются макетированием, а свои новые разработки делают сразу в чистовом исполнении. Скорей всего в подобных заявлениях немало бахвальства, но есть и доля истины. В действительности, корректное использование различных компьютерных программ моделирования позволяет в короткие сроки создавать работоспособные устройства, практически не прибегая к макетированию или сведя его объем к минимуму.

Компьютерное моделирование (симуляция) по сравнению с макетированием имеет ряд неоспоримых преимуществ, таких как легкость вариации параметров схемы, а также гораздо больше возможностей по изучению процессов, протекающих в моделируемом устройстве. Моделирование позволяет уточнять и оптимизировать результаты предварительных расчетов, а порой экспериментально подбирать параметры компонентов и режимы работы схемы. Все вышеперечисленные и не перечисленные соображения делают моделирование кровно необходимым этапом конструирования электронной аппаратуры.

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 дает им определенные преимущества при моделировании конкретного типа электронных устройств.

1.1. Коротко о SPICE

Сейчас 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 (Spectrum Software), Circuit Maker (The Virtual Electronics Lab), Dr. Spice, ViewSpice (Deutsch Research) и др. 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 IV (сокращенно LTspice) от корпорации Linear Technology (<http://www.linear.com>). Программа может работать под управлением ОС Windows 98, 2000, NT 4.0, ME или XP. Кроме этого, LTspice тестировался под Linux RedHat 8.0 с WINE версии 20030219.

LTspice был первоначально основан на движке SPICE 3F4/5, являющемся свободно доступной версией симулятора SPICE. С момента своего создания LTspice подвергался постоянным изменениям в порядке его улучшения, устранения ошибок и расширения возможностей. Современная версия LTspice представляет из себя превосходный симулятор, позволяющий моделировать аналоговые, цифровые, а также смешанные аналого-цифровые схемы. Но настоящим "коньком" программы LTspice являются импульсные источники питания. При этом LTspice демонстрирует приличную скорость моделирования и прекрасную совместимость с другими стандартами SPICE, что позволяет непосредственно использовать или легко адаптировать к нему оригинальные SPICE модели различных производителей.

Программа LTspice отличается очень понятным и дружелюбным интерфейсом, позволяющим даже новичку очень быстро научиться работать с ней. Новые схемы могут разрабатываться с помощью встроенного редактора схем. Директивы и параметры симулятора помещаются прямо на схеме с использованием стандартного SPICE синтаксиса. Диаграммы напряжений и токов в узлах и ветвях схемы могут быть получены простым щелчком левой кнопки мышки по соответствующей точке схемы.

LTspice имеет отличный (правда англоязычный) встроенный Help (<http://ltspice.linear.com/software/scad3.pdf>), который является прекрасным описанием этой программы и хорошим руководством для работы с ней. В Интернете существует достаточно ресурсов, где обсуждается и поддерживается эта прекрасная программа (<http://groups.yahoo.com/group/LTspice>, <http://valvol.flyboard.ru/forum4.html>, <http://www.intactaudio.com/forum/viewforum.php?f=15>).

1.2. Общая структура и соглашения файла списка соединений (netlist)

Как и все SPICE симуляторы, LTspice работает с текстовым файлом списка соединений (netlist). Список соединений содержит перечень схемных элементов, узлов, с которыми эти элементы связаны, определения моделей и различные SPICE директивы. Чтобы получить список соединений схемы, необходимо нарисовать ее в редакторе схем программы SwCAD. Имя файла схемы имеет расширение asc. Перед запуском процесса моделирования схемы список соединений извлекается из схемной информации и помещается в файл с тем же именем, что и схема, но имеющий расширение net. LTspice, в свою очередь, читает этот файл. При необходимости список соединений может быть создан вручную в любом текстовом редакторе. Вне зависимости от того как были созданы списки соединений, они могут открываться и редактироваться при помощи текстового редактора. Файлы с расширениями net, cir или sr распознаются LTspice как списки соединений.

Рассмотрим структуру тестового файла списка соединений (netlist).

Первая строка списка игнорируется, т. к. предполагается, что это заглавие файла. В последнюю строку обычно вписывается директива `.end`, которая, впрочем, может быть опущена. Любые строки после строки `.end` игнорируются.

Порядок строк между начальными комментариями и концом списка связей особого значения не имеет. Единственным исключением является директива описания функции `.func`, которая должна быть помещена раньше ссылки на нее. Строки могут быть комментариями, описаниями схемных элементов или директивами моделирования. Любая строка, которая начинается с символа `"**"`, считается комментарием и игнорируется симулятором. Конец любой

строки, после символа точки с запятой (;) также воспринимается как комментарии.

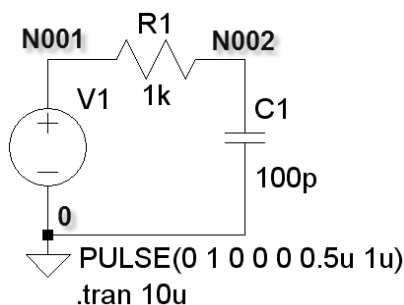


Рис. 1.1. Схема RC-цепочки

Рассмотрим пример текстового описания схемы, изображенной на рис. 1.1:

* C:\Program Files\LTC\SwCADIII\Draft22.asc

* Схема ниже представляет RC цепочку, запитанную от генератора

* прямоугольных импульсов частотой 1 МГц

V1 N001 0 PULSE(0 1 0 0 0 0.5u 1u) ; Генератор прямоугольных импульсов

R1 N001 N002 1k ; Резистор 1 кОм

C1 N002 0 100p ; Конденсатор 100 пФ

.tran 10u ;Анализировать переходной процесс длительностью 10мкс

.backanno

.end

В первой строке примера указано имя файла схемы. Во второй и третьей строках — комментарии. Строка, начинающаяся с v1, объявляет генератор прямоугольных импульсов частотой 1 МГц, включенный между узлами n001 и 0. Строка, начинающаяся с r1, объявляет резистор 1 кОм, включенный между узлами n001 и n002. Строка, начинающаяся с c1, объявляет конденсатор емкостью 100 пФ, включенный между узлами n002 и 0. Далее следует директива .tran, предписывающая симулятору анализировать переходной процесс длительностью 10 мкс.

Любая строка, кроме первой строки и строк комментариев, не начинающаяся с символа точки (.), считается описанием элемента. Имя элемента состоит из последовательности букв латинского алфавита и цифр. Первый символ элемента определяет его тип (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Первые символы, определяющие тип элемента

Первый символ	Тип элемента или строки
A	Специальный символ
B	Поведенческий источник напряжения или тока
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	Коэффициент связи между индуктивностями
L	Индуктивность
M	Полевой МОП-транзистор (MOSFET)
O	Линия передачи с потерями
Q	Биполярный транзистор (BJT)
R	Резистор
S	Ключ, управляемый напряжением
T	Линия передачи без потерь
U	Распределенная RC-линия
V	Независимый источник напряжения
W	Ключ, управляемый током
X	Вызов подсхемы
Z	Полевой транзистор с затвором на основе барьера Шотки (MESFET)

Числовые значения параметров элементов могут выражаться в экспоненциальной форме, как например $1e12$, или с использованием суффиксов, соответствующих определенным масштабным коэффициентам. Например, 1000.0 можно записать как $1e3$ или $1K$. В табл. 1.2 приведены масштабные коэффициенты и соответствующие им суффиксы.

Таблица 1.2. Суффиксы и масштабные коэффициенты

Суффикс	Экспоненциальная форма записи	Масштабный коэффициент	Наименование
A или a	$1e-18$	10^{-18}	Атто
F или f	$1e-15$	10^{-15}	Фемто
P или p	$1e-12$	10^{-12}	Пико
N или n	$1e-9$	10^{-9}	Нано
U, u или μ	$1e-6$	10^{-6}	Микро
M или m	$1e-3$	10^{-3}	Милли
Mil	$25.4e-6$	$25.4 \cdot 10^{-6}$	Мил (0.001 дюйма)
K или k	$1e3$	10^3	Кило
MEG или meg	$1e6$	10^6	Мега
G или g	$1e9$	10^9	Гига
T или t	$1e12$	10^{12}	Тера

Суффиксы могут писаться в любом регистре, т. к. LTspice не различает прописных и строчных букв. Неузнанные символы, следующие за числом или множителем, игнорируются. Следовательно, записи "10", "10V", "10Volts" и "10Hz" будут восприняты как число 10, а записи "M", "MA", "MSec" и "MMM" будут восприняты как масштабный коэффициент 0.001.

ПРИМЕЧАНИЕ

В стандарте SPICE несколько непривычно выглядит суффикс MEG, соответствующий масштабному коэффициенту 10^6 , что может привести к путанице и непредсказуемому результату. Например, если мегаомный резистор обозначить как "1M", то в результате получим резистор величиной 0.001 Ом.

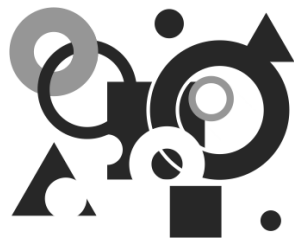
LTspice может поддерживать нотацию, принятую для обозначения отечественных резисторов. Например, номинал, записанный "6К34", будет воспринят как "6.34К". Это допустимо для любого множителя, указанного выше. Эту возможность можно выключить, если вызвать панель настройки **Tools** (Инструменты) | **Control Panel** (Панель управления) | **SPICE** и снять галочку напротив строки **Accept 3K4 as 3.4K**.

Имена узлов могут быть произвольной символьной строкой. Глобальным общим узлом (землей) является узел "0", хотя "GND" является его специальным синонимом. Следует обратить внимание, что поскольку узлы обозначаются символьной строкой, то "0" и "00" — отличные символы. Кроме символа глобальной "земли" в LTspice предусмотрен специальный графический символ для узла "COM". Однако этот узел не является глобальным и служит лишь для обозначения общего узла, не связанного с землей.

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

Описание элемента, в общем случае, состоит из имени элемента, номеров узлов, имени модели и числовых данных. Имя элемента и номера узлов являются обязательными атрибутами любого элемента. Что касается модели и числовых данных, то, в зависимости от типа элемента, они могут являться обязательными или опциональными (необязательными). Далее по тексту поля данных, обязательные для заполнения, будут выделяться угловыми скобками. Квадратными скобками будут выделяться поля данных, в которые можно вносить опциональные данные.

ГЛАВА 2




Начало работы

2.1. 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 жестком диске было свободное пространство размером не менее 200 Мбайт, а размер оперативной памяти был более 128 Мбайт.

Установочный файл LTspice IV можно бесплатно скачать с сайта корпорации Linear Technology (<http://www.linear.com/designtools/softwareRegistration.jsp>). 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.

После установки программы на рабочем столе появится иконка , а в верхней части меню **Пуск** появится строчка **LTspice IV** (рис. 2.1). Программу можно запустить как с помощью иконки на рабочем столе, так и через меню **Пуск**. В результате откроется стартовое окно программы (рис. 2.2), в котором имеются строка заголовка, панель команд, панель инструментов, рабочее поле и строка 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.

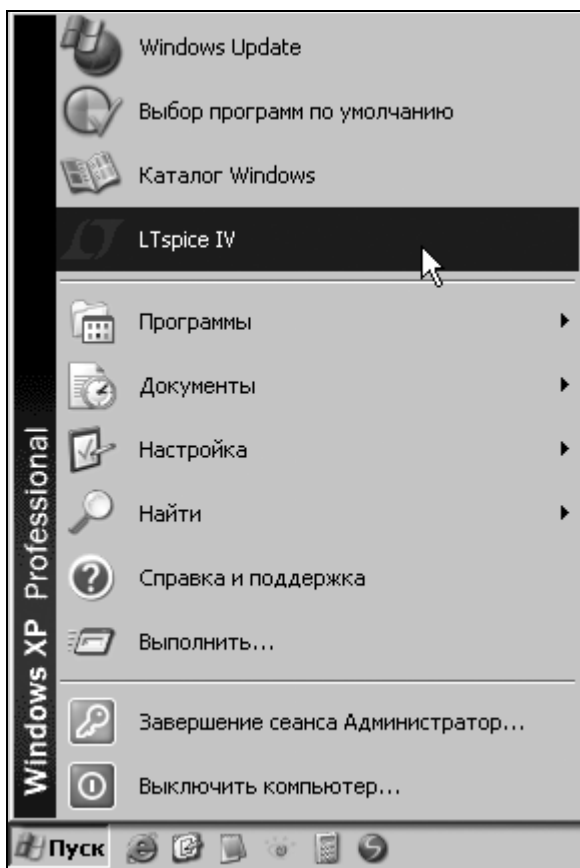


Рис. 2.1. Меню запуска программы LTspice в классическом представлении меню **Пуск** Windows XP

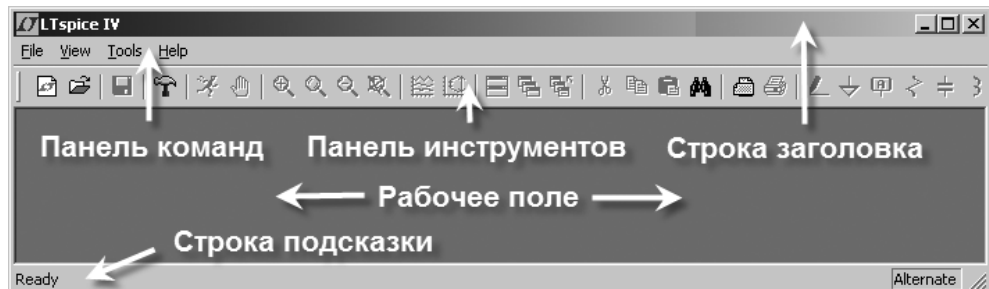


Рис. 2.2. Стартовое окно программы LtSpice

В рабочем поле располагаются подокна рабочих приложений, которыми являются редактор схем, плоттер, редактор символов и окно текстовых сообщений. В строке подсказки отображаются текущее состояние программы и актуальные настройки симулятора. В рассматриваемый момент там отображается надпись **Ready**, которая говорит, что программа загружена и ждет дальнейших действий пользователя.

2.2. 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 `cir` 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 `cir`.

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 своем составе редактор схем.

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

Чтобы преждевременно не забивать себе голову ненужной информацией о внутреннем функционировании программы LTspice, перейдем 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 щелкнуть левой кнопкой мышки по иконке  расположенной на панели инструментов, или выполнить команду **File(Файл) | New Schematic (Новая схема)**. Чтобы редактировать ранее созданную схему, следует щелкнуть 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 создается новая схема, то LTspice сам присваивает ей имя `Draft<порядковый номер>.asc`. Например, в данном случае схеме присвоено имя `Draft1.asc` (рис. 2.3). 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)**.

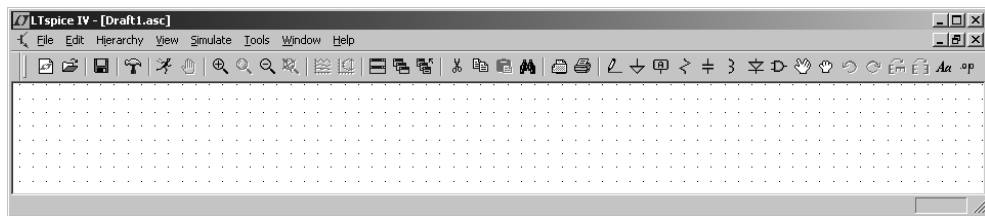







Рис. 2.3. Окно схемного редактора LTspice

Немного забегаая вперед, отметим, что в правой части строки подсказки отображается алгоритм работы вычислителя SPICE симулятора. Пользователю доступны два алгоритма работы вычислителя, это `Normal` и `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 щелкнуть 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. 2.4).

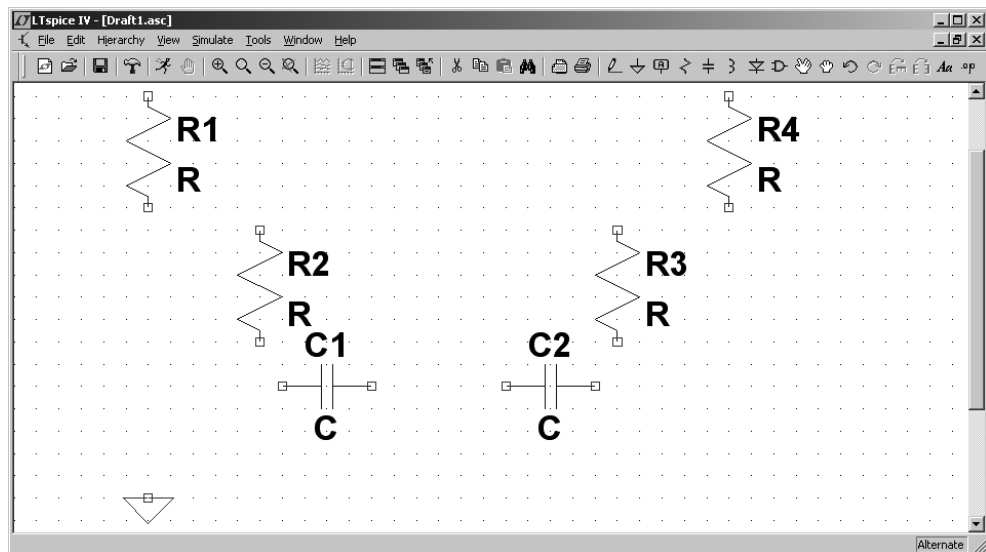



Рис. 2.4. Размещение компонентов в окне редактора схем LTspice

Для выбора остальных компонентов необходимо выполнить команду **Edit** (Редактировать) | **Component** (Компонент), которая вызывает диалоговое окно **Select Component Symbol** (рис. 2.5). Аналогичное действие произ-

водит нажатие функциональной клавиши <F2>, а также щелчок левой кнопкой мышки по иконке , расположенной на панели инструментов. Выбрав требуемый компонент, нужно щелкнуть левой кнопкой мышки по кнопке **OK**, после чего компонент переносится на рабочее поле в окне редактора схем.

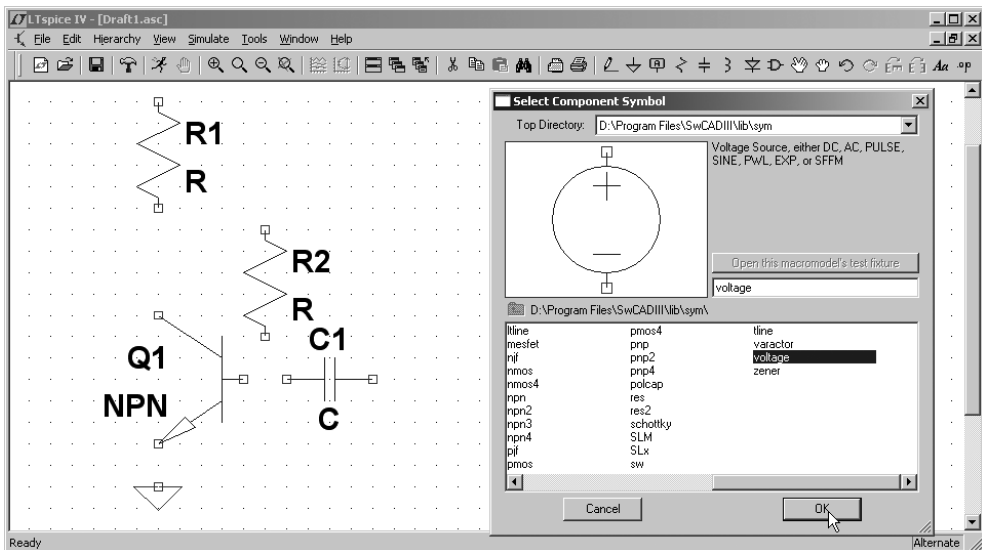






Рис. 2.5. Выбор компонентов из диалогового окна **Select Component Symbol**

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);

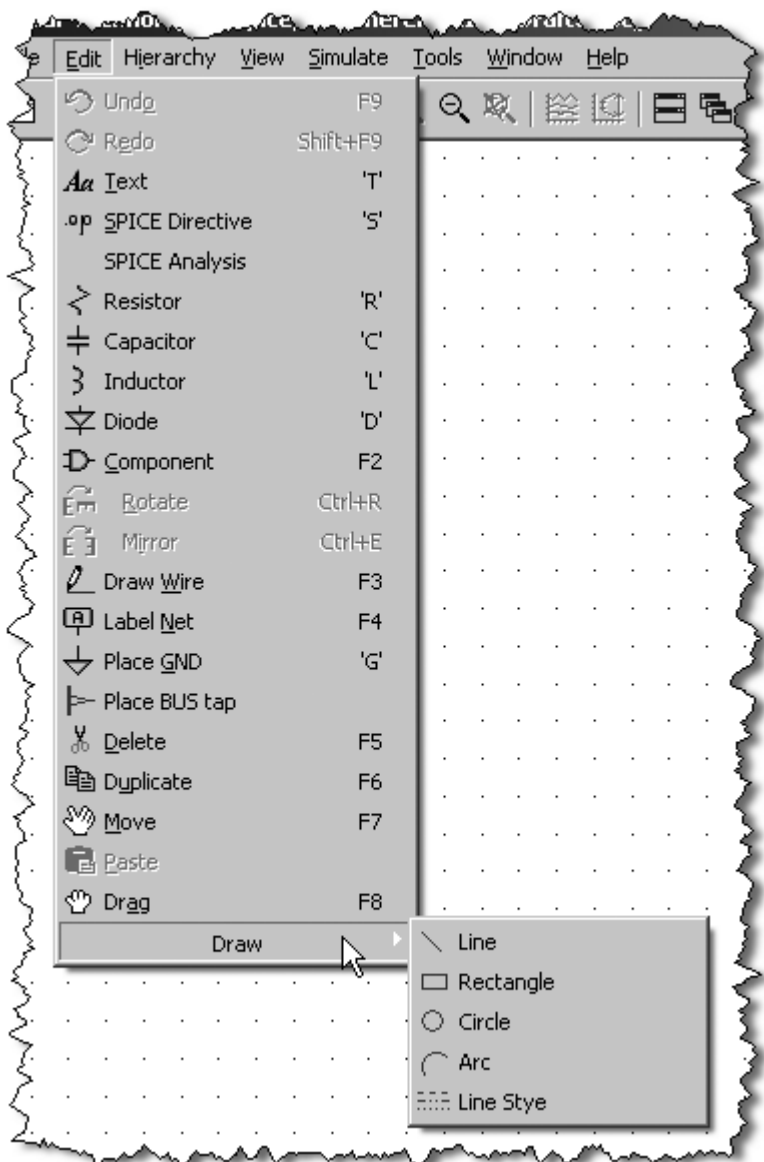







Рис. 2.6. Вид меню **Edit** на панели команд

-  — найти компонент в большой схеме. Найденный компонент подсвечивается желтым 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. 2.6).

После размещения всех компонентов получим картинку, изображенную на рис. 2.7.

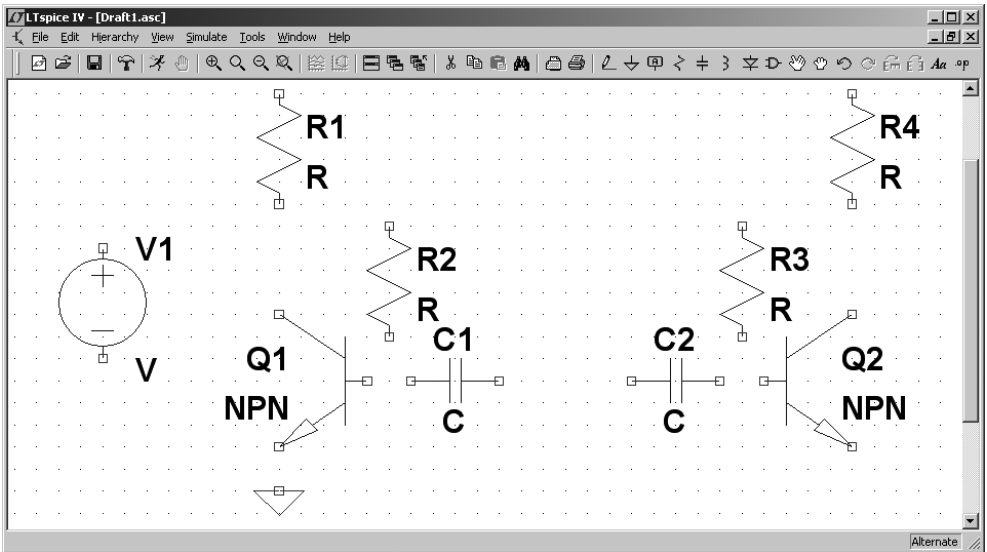




Рис. 2.7. Размещение компонентов в окне редактора схем LTspice

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 ком-

понентом "земля", недопустимы. Данное требование поначалу 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 (см. рис. 2.6).

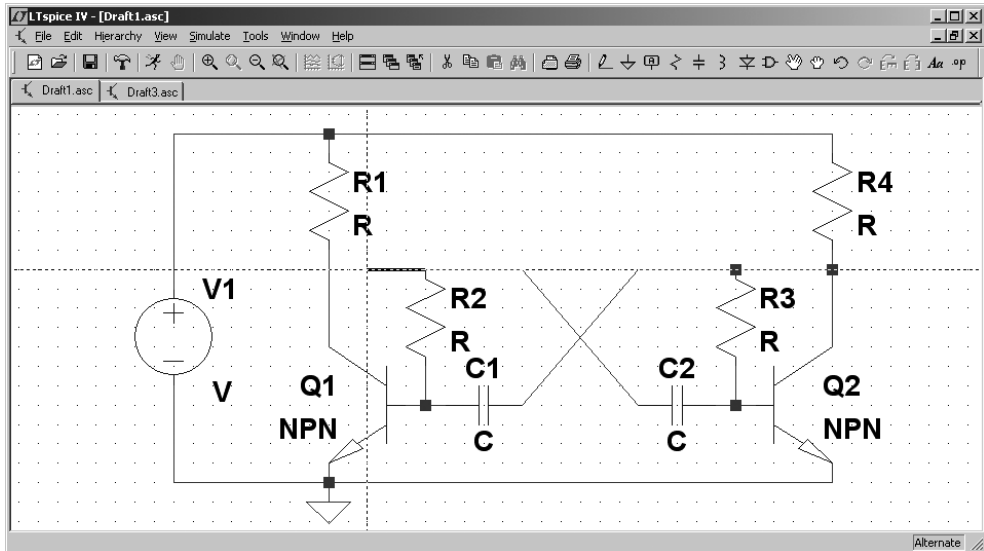


Рис. 2.8. Соединение компонентов

Теперь, когда схема нарисована (рис. 2.8), необходимо определить числовые параметры и типы компонентов. Для этого подводим курсор к редактируемому компоненту. При совмещении курсора с позицией компонента курсор меняет свое начертание и из крестика превращается в указательный палец



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

Для резистора (рис. 2.9) 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.

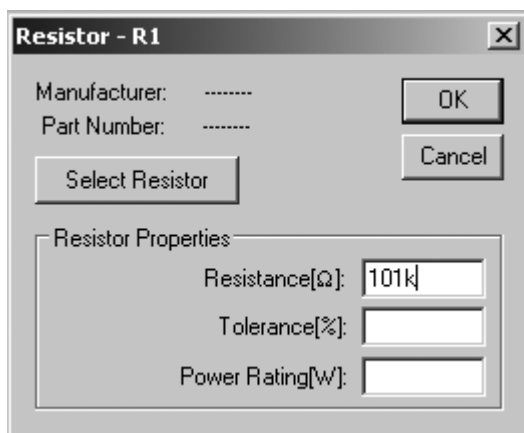


Рис. 2.9. Меню настройки резистора

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.

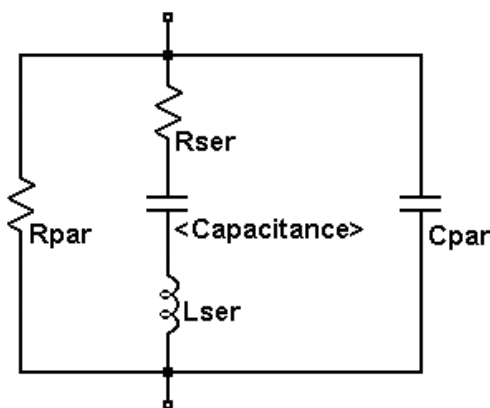


Рис. 2.10. Эквивалентная схема конденсатора

В отличие от модели резистора, модель конденсатора в LTspice имеет достаточно сложную структуру (рис. 2.10). Кроме емкости (Capacitance), модель учитывает массу паразитных параметров, таких как сопротивление потерь между выводами конденсатора **Rpar** (Parallel Resistance), последовательное сопротивление **Rser** (Series Resistance), последовательная индуктивность

Lser (Series Inductance) и параллельная емкость **Cpar** (Parallel Capacitance). Настроить основные и паразитные параметры модели можно в окне настройки (рис. 2.11), которое вызывается щелчком правой кнопки мышки по конденсатору C1 (или C2). Здесь емкость измеряется в фарадах, индуктивность в генри, а сопротивление в омах. В LTspice имеется заранее подготовленная библиотека моделей конденсаторов, куда можно попасть, щелкнув левой кнопкой мышки по кнопке **Select Capacitor** (Выбор конденсатора).

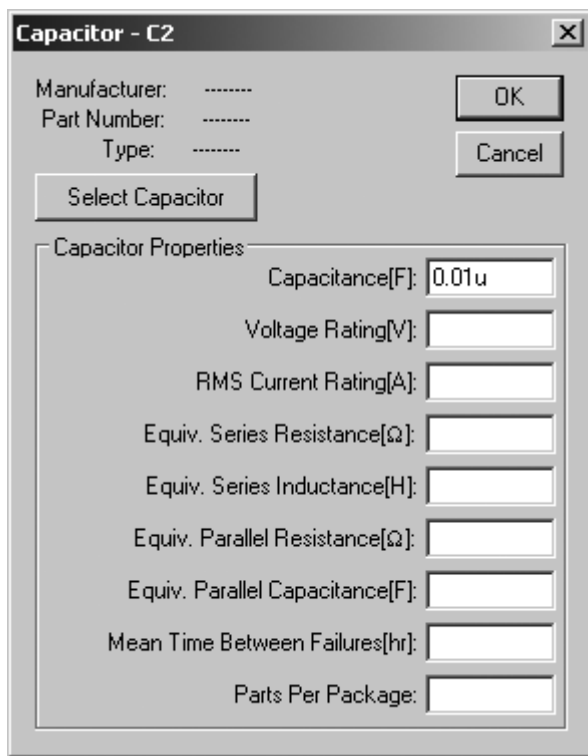


Рис. 2.11. Меню настройки конденсатора

Числовые значения параметров компонентов могут масштабироваться при помощи суффиксов. Масштабные коэффициенты указаны в табл. 1.1. Также допустима экспоненциальная форма записи.

В табл. 2.1 приведено соответствие между обозначениями единиц измерения электрических величин, принятых у нас (ГОСТ 8.417-2002), и используемых в LTspice.

Таблица 2.1. Соответствие обозначений единиц измерения электрических величин

Наименование величины	Единица измерения	Обозначение единицы измерения	
		ГОСТ 8.417-2002	LTspice
Электрическое напряжение	вольт	V	V
Сила электрического тока	ампер	A	A
Энергия	джоуль	Дж	J
Мощность	ватт	Вт	W
Частота	герц	Гц	Hz
Магнитная индукция	тесла	Тл	T
Электрическая емкость	фарад	Ф	F
Электрическое сопротивление	ом	Ом	Ω
Индуктивность	генри	Гн	H
Время	секунда	с	s

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.

Для транзисторов, щелкнув левой кнопкой мышки по кнопке **Pick New Transistor** (Выбрать новый транзистор), показанной на рис. 2.12, 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. 2.13). В строке **DC value** пропишем требуемое

значение напряжения и закроем окно **Voltage Source**, щелкнув левой кнопкой мышки по кнопке **OK**.

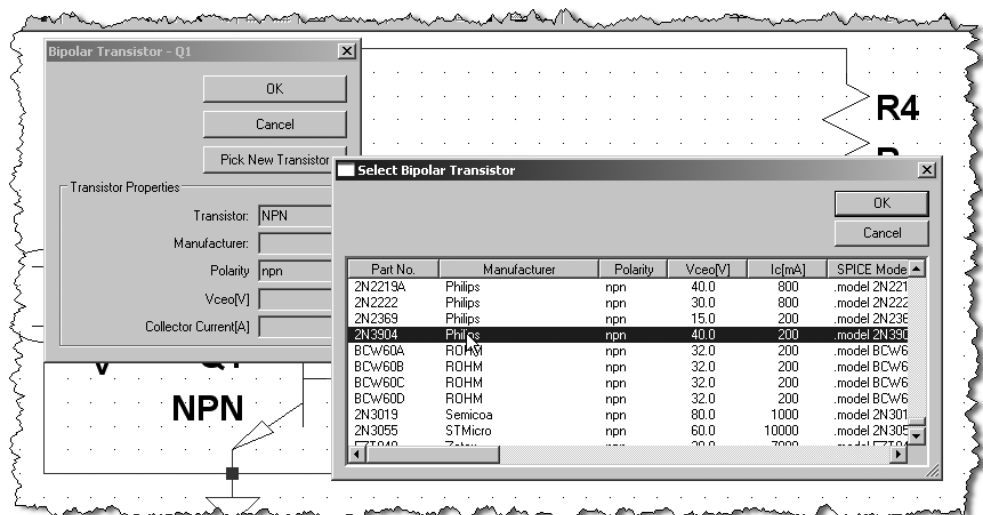


Рис. 2.12. Выбор модели биполярного транзистора из библиотеки LTspice

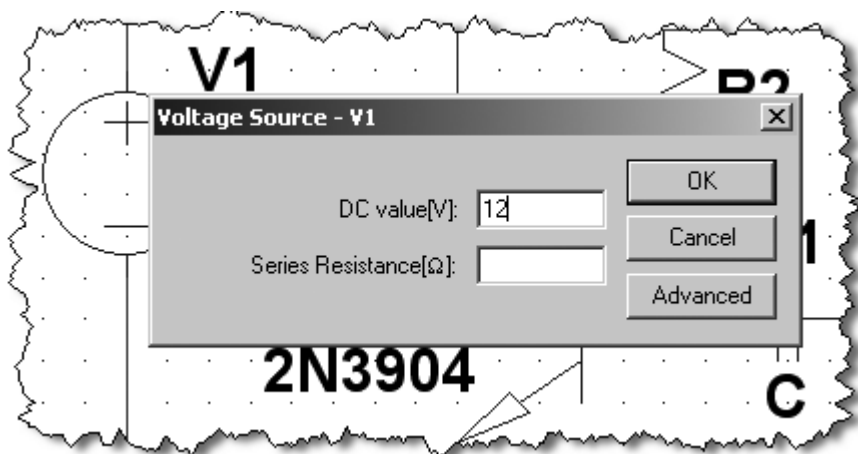


Рис. 2.13. Меню настройки источника постоянного напряжения

Схема нарисована, и в ней определены все компоненты (рис. 2.14).

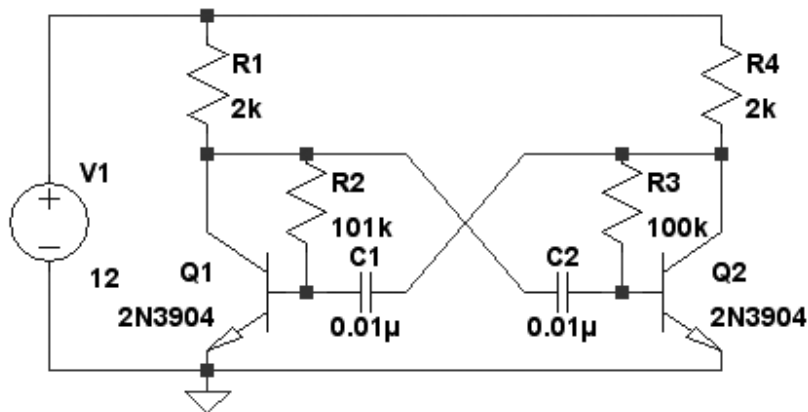



Рис. 2.14. Результирующая схема мультивибратора

Теперь можно приступить к имитационному моделированию работы мультивибратора. Программа LTSpice позволяет разнообразные исследования электронных схем.

- **Transient** — выполняется анализ переходных процессов. Исследуется поведение схемы после подачи питания.
- **AC Analysis** — расчет частотных характеристик.
- **DC sweep** — выполняется анализ режима по постоянному току при изменении постоянного напряжения или тока.
- **Noise** — расчет уровня внутреннего шума.
- **DC Transfer** — определяется переходная функция по постоянному току.
- **DC op pnt** — определяется режим схемы по постоянному току (рабочая точка).

В данном случае нас интересует поведение схемы мультивибратора после подачи питания.

Для проведения анализа переходных процессов воспользуемся командой **Simulate** (Моделирование) | **Run** (рис. 2.15) или щелчком 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. 2.16). На этой вкладке, как минимум, нужно определить время остановки анализа переходного процесса (**Stop Time**).

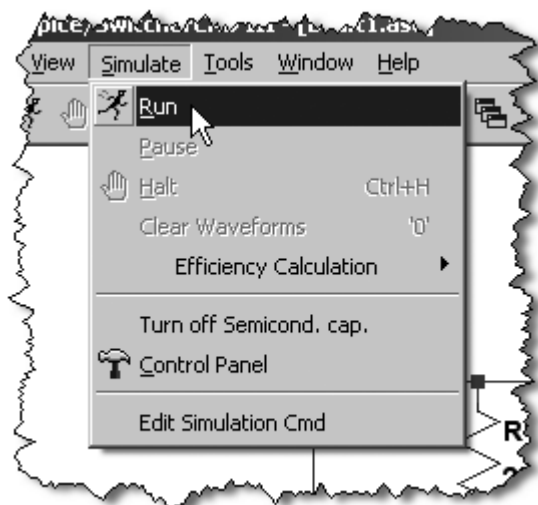


Рис. 2.15. Запуск процесса моделирования (симуляции)

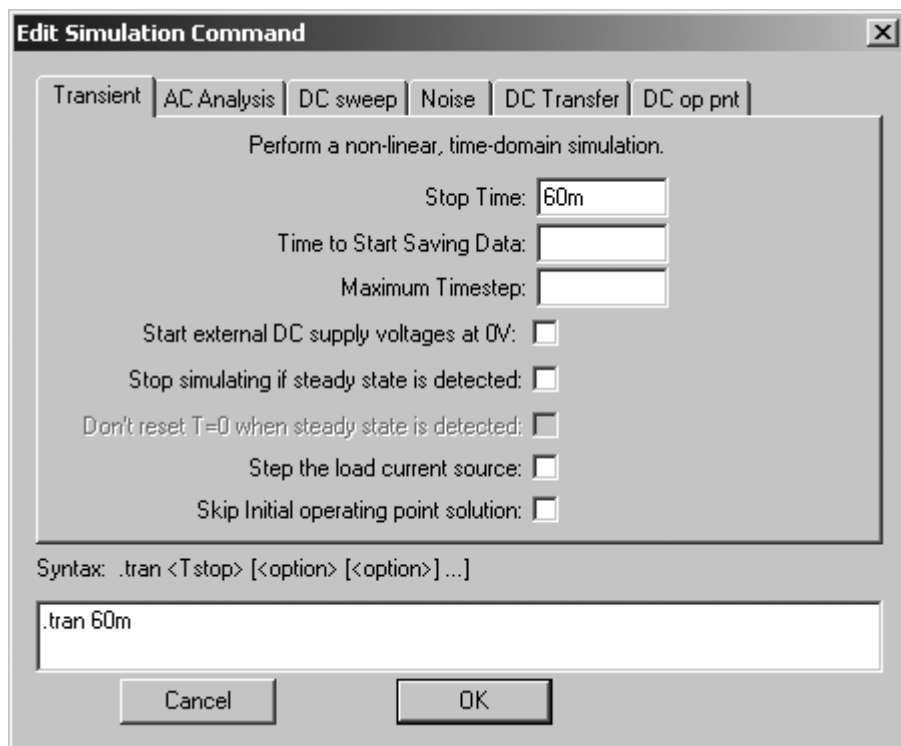


Рис. 2.16. Окно команд моделирования

Это необходимо сделать только при первом запуске моделирования. Все последующие запуски производятся согласно установленным значениям. При необходимости редактирования окно **Edit Simulation Command** можно вызывать командой **Simulate** (Моделирование) | **Edit Simulation Cmd** (Редактирование команды моделирования) или щелкнув 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 время начала записи результатов моделирования (**Time to Start Saving Data**) и максимальный шаг интегрирования (**Maximum Timestep**). Если шаг интегрирования не указан, то программа сама выбирает для него максимально возможное значение.

В окне **Edit Simulation Command** присутствуют дополнительно опции, позволяющие более тонкую настройку процесса моделирования, но нас они пока не интересуют.

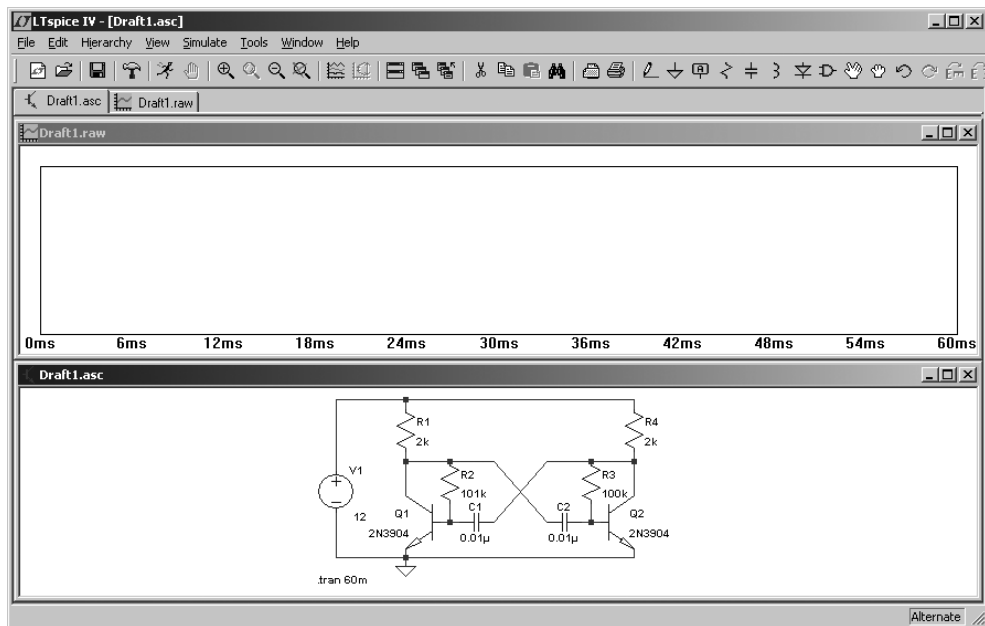


Рис. 2.17. Вид окна программы LTSpice после завершения моделирования

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,