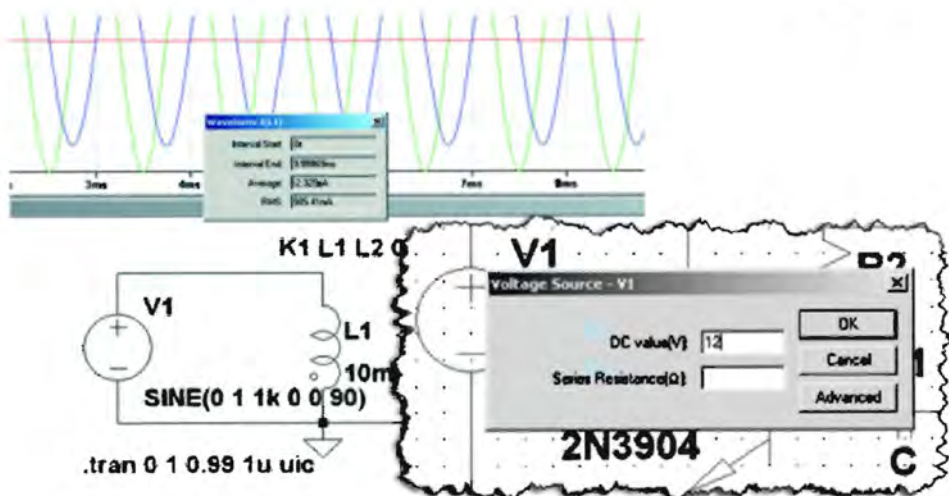


Электроника

Валентин Володин



LTspice

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ



+ ВИДЕОУРОКИ

Отложи паяльник,
возьми мышку!

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 Перишакова</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 70×100^{1/16}. 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

ISBN 978-5-9775-0543-7

© Володин В. Я., 2010
© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2010

Оглавление

- ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В LTSPICE.....1**
 - 1.1. Коротко о SPICE2
 - 1.2. Общая структура и соглашения файла списка соединений (netlist)3
- ГЛАВА 2. НАЧАЛО РАБОТЫ9**
 - 2.1. Установка и запуск программы LTspice9
 - 2.2. Быстро осваиваем LTspice11
- ГЛАВА 3. СХЕМНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИМУЛЯТОРА LTSPICE.....47**
 - 3.1. А — специальные функции47
 - 3.1.1. Элементы INV, BUF, AND, OR и XOR48
 - 3.1.2. Элементы DIFFSCHMITT, DIFFSCHMTBUF, DIFFSCHMTINV, SCHMITT, SCHMTBUF и SCHMTINV51
 - 3.1.3. Элемент VARISTOR.....52
 - 3.1.4. Элементы MODULATE и MODULATE254
 - 3.2. В — функциональные источники напряжения или тока55
 - 3.3. С — конденсатор69
 - 3.4. D — диод74
 - 3.5. Е — источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН).....81
 - 3.5.1. Первый тип ИНУН.....81
 - 3.5.2. Второй тип ИНУН81
 - 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 ИТУТ80
 - 3.6.2. Второй тип ИТУТ80
 - 3.6.3. Третий тип ИТУТ.....81
 - 3.7. G — источник тока, управляемый напряжением (ИТУН).....82
 - 3.7.1. Первый тип ИТУН83
 - 3.7.2. Второй тип ИТУН.....83
 - 3.7.3. Третий тип ИТУН84

| | |
|--|-----|
| 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

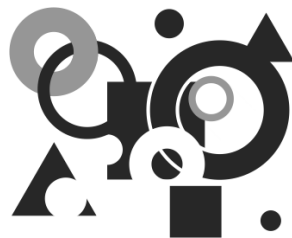
| | |
|---|-----|
| 4.1. AC — анализ частотных характеристик для малого сигнала | 180 |
| 4.2. BACKANNO — связать имена выводов с токами | 185 |

| | |
|---|------------|
| 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 МОДЕЛЕЙ | 307 |
| 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 LTSPICE | 357 |
| 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 книге | 384 |
| 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 `sp` 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.

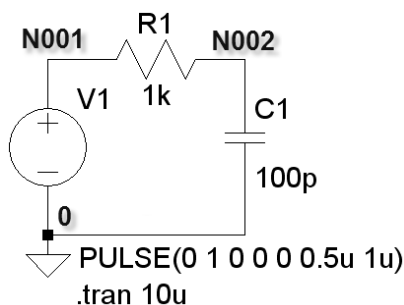


Рис. 1.1. Схема RC-цепочки

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 Шоттки (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.

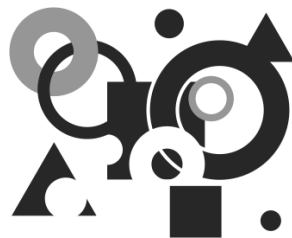
LTspice может поддерживать нотацию, принятую для обозначения отечественных резисторов. Например, номинал, записанный "6K34", будет воспринят как "6.34K". Это допустимо для любого множителя, указанного выше. Эту возможность можно выключить, если вызвать панель настройки **Tools** (Инструменты) | **Control 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.

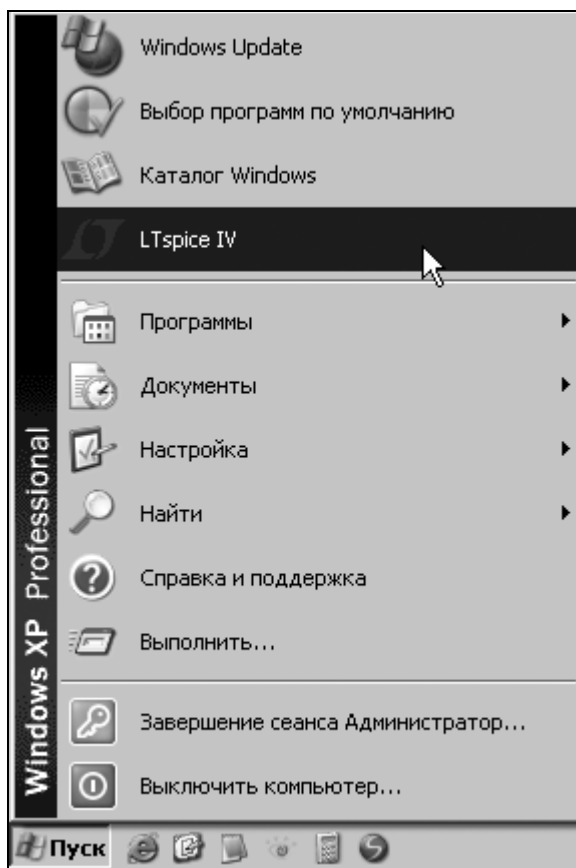


Рис. 2.1. Меню запуска программы LTspice в классическом представлении меню **Пуск** Windows XP

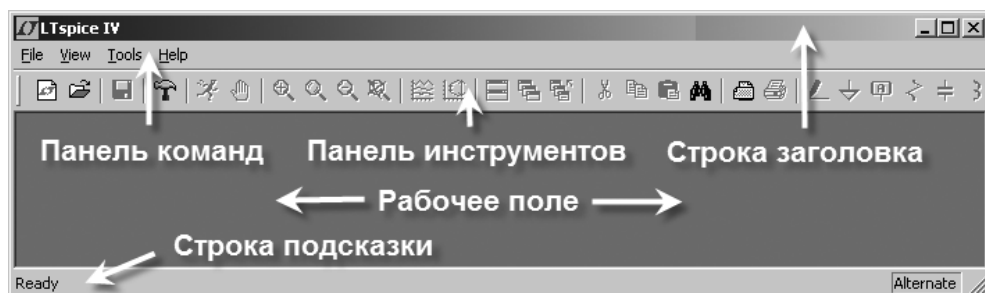


Рис. 2.2. Стартовое окно программы LtSpice

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)**.

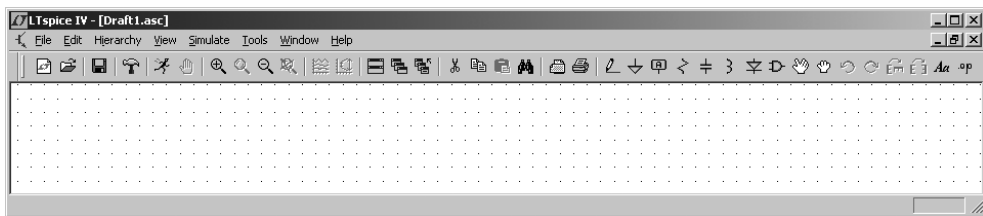







Рис. 2.3. Окно схемного редактора LTspice

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).

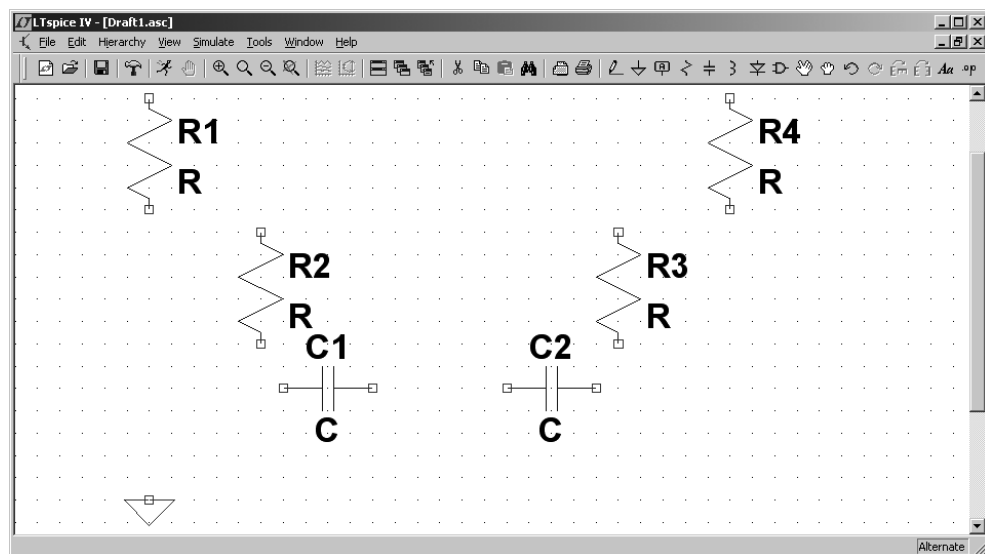



Рис. 2.4. Размещение компонентов в окне редактора схем LTspice

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 **ОК**, после чего компонент переносится на рабочее поле в окне редактора схем.

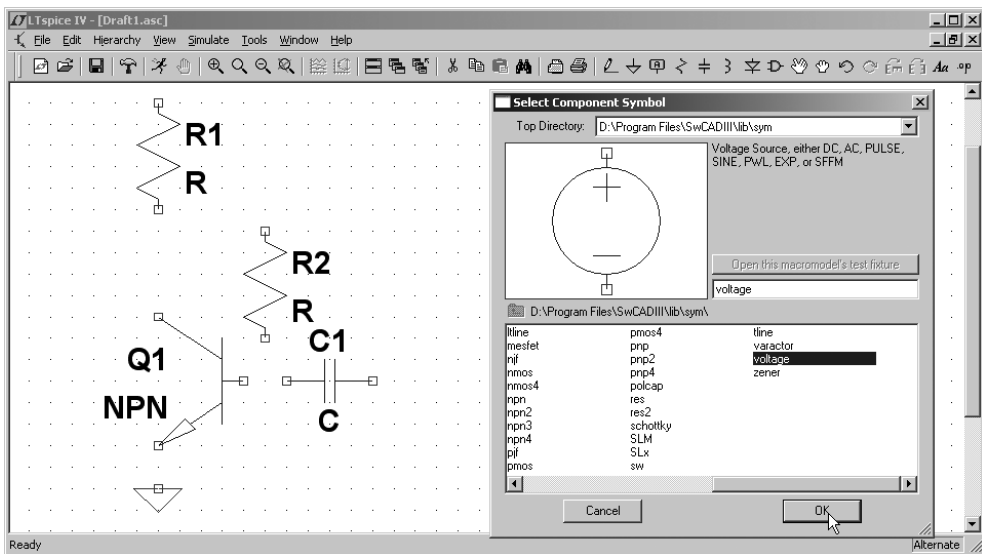




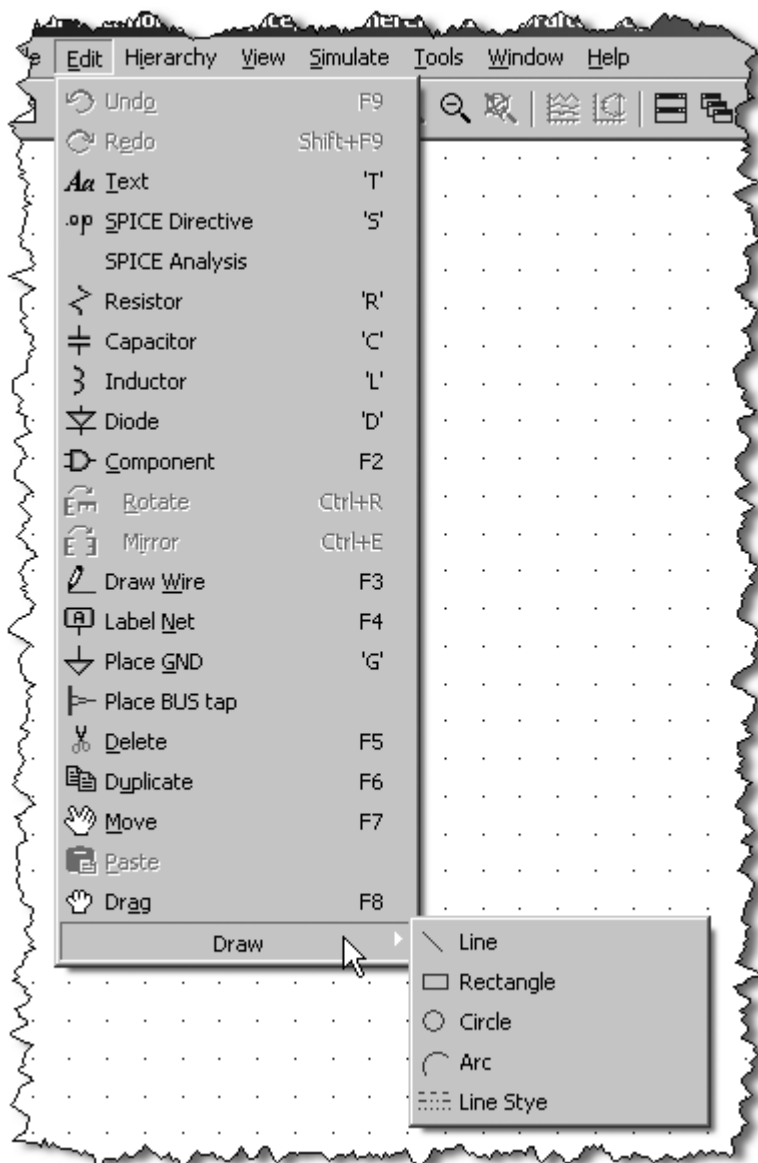



Рис. 2.5. Выбор компонентов из диалогового окна **Select Component Symbol**





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.

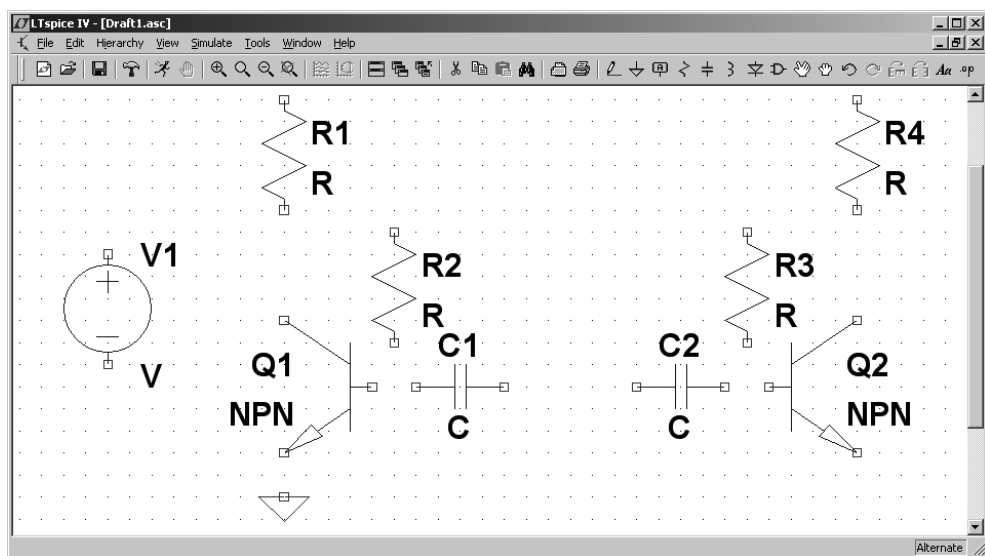




Рис. 2.7. Размещение компонентов
в окне редактора схем LTspice

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).

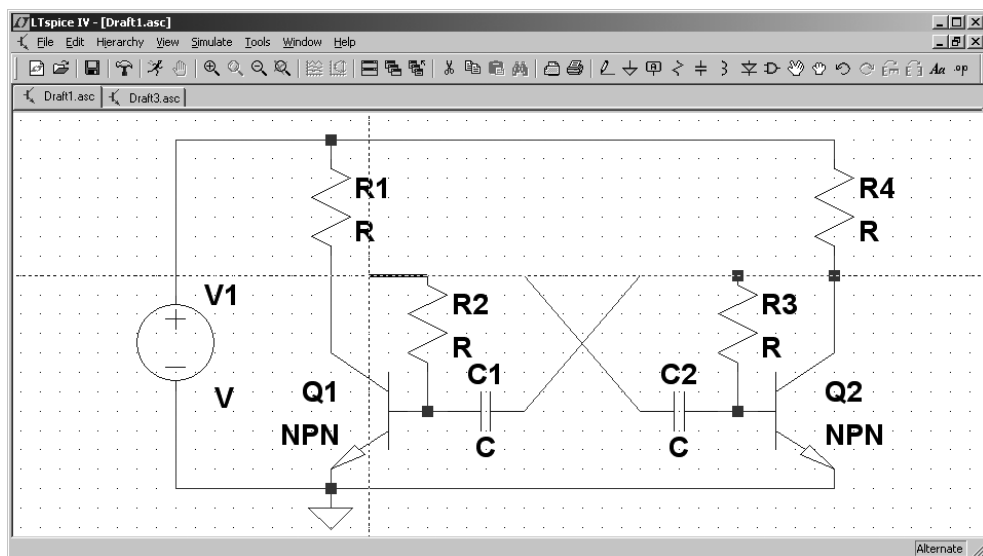


Рис. 2.8. Соединение компонентов

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.

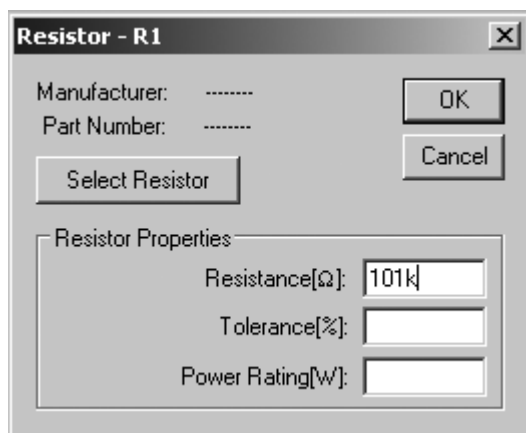


Рис. 2.9. Меню настройки резистора

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.

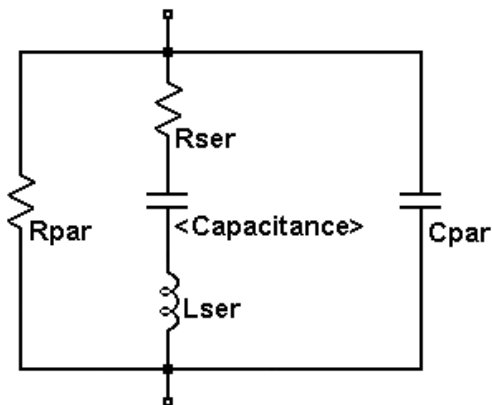


Рис. 2.10. Эквивалентная схема конденсатора

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).

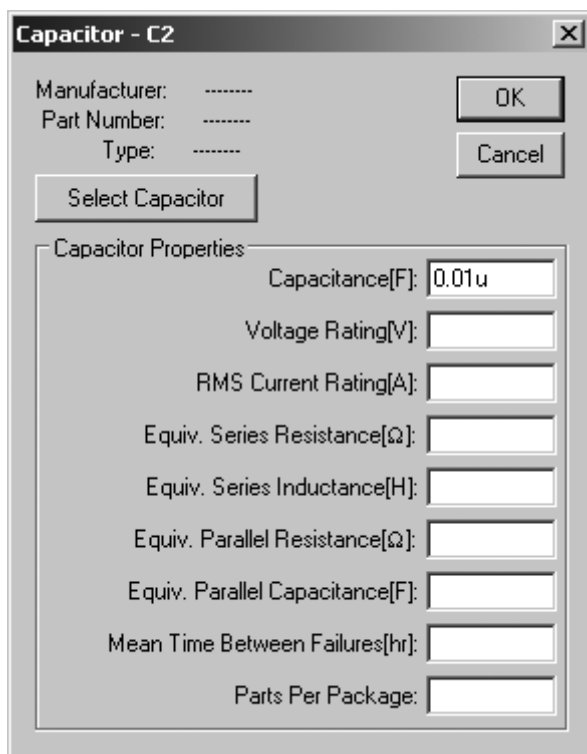


Рис. 2.11. Меню настройки конденсатора

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 | 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 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**.

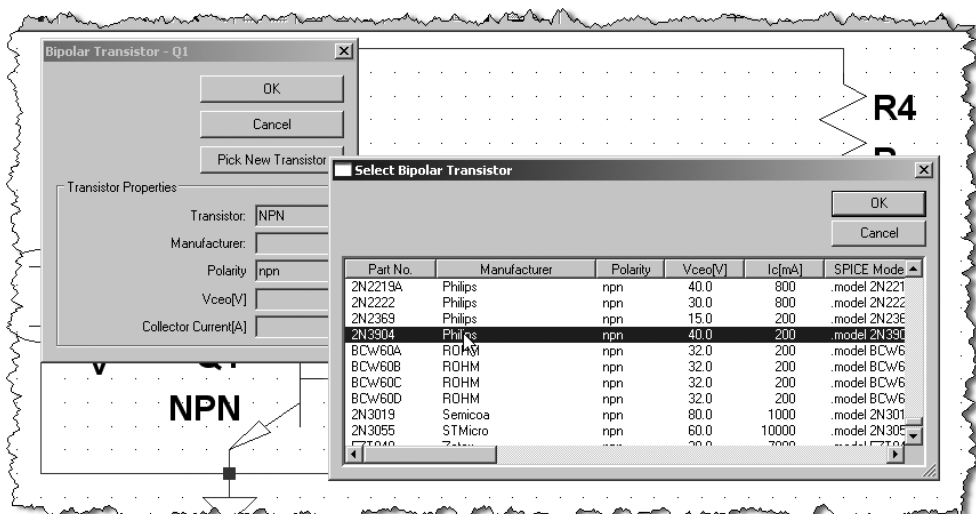


Рис. 2.12. Выбор модели биполярного транзистора из библиотеки LTspice

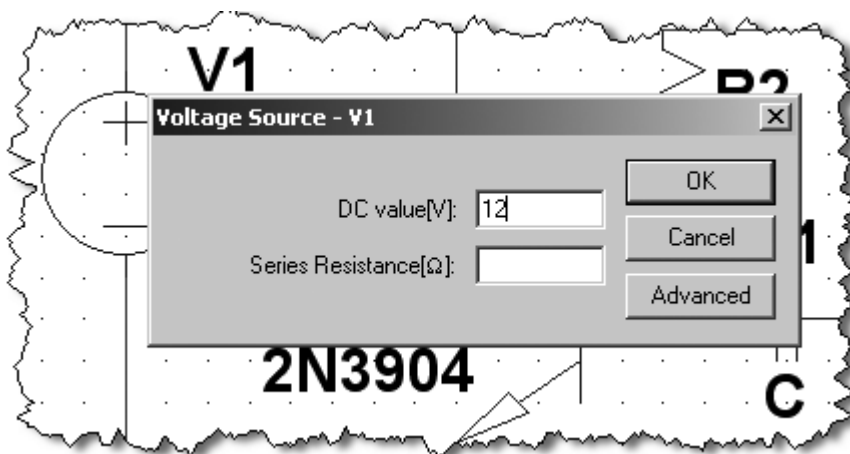


Рис. 2.13. Меню настройки источника постоянного напряжения

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

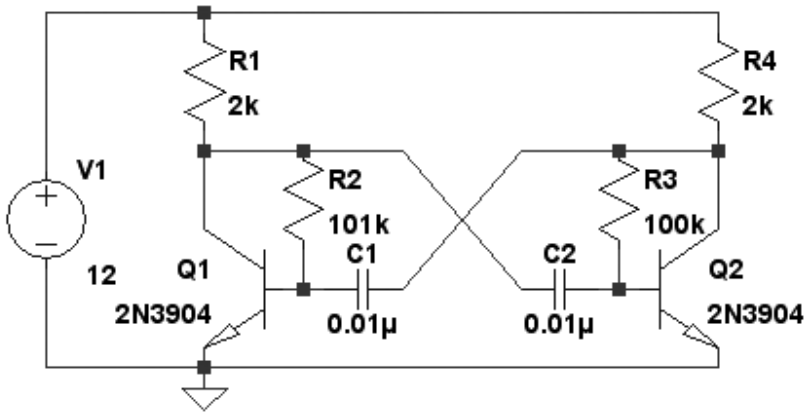



Рис. 2.14. Результирующая схема мультивибратора

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**).

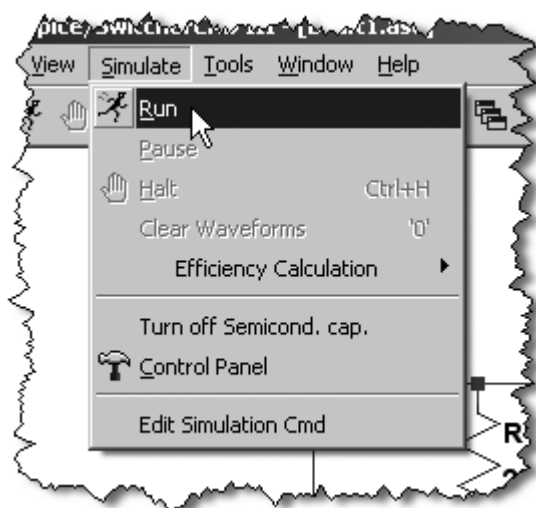


Рис. 2.15. Запуск процесса моделирования (симуляции)

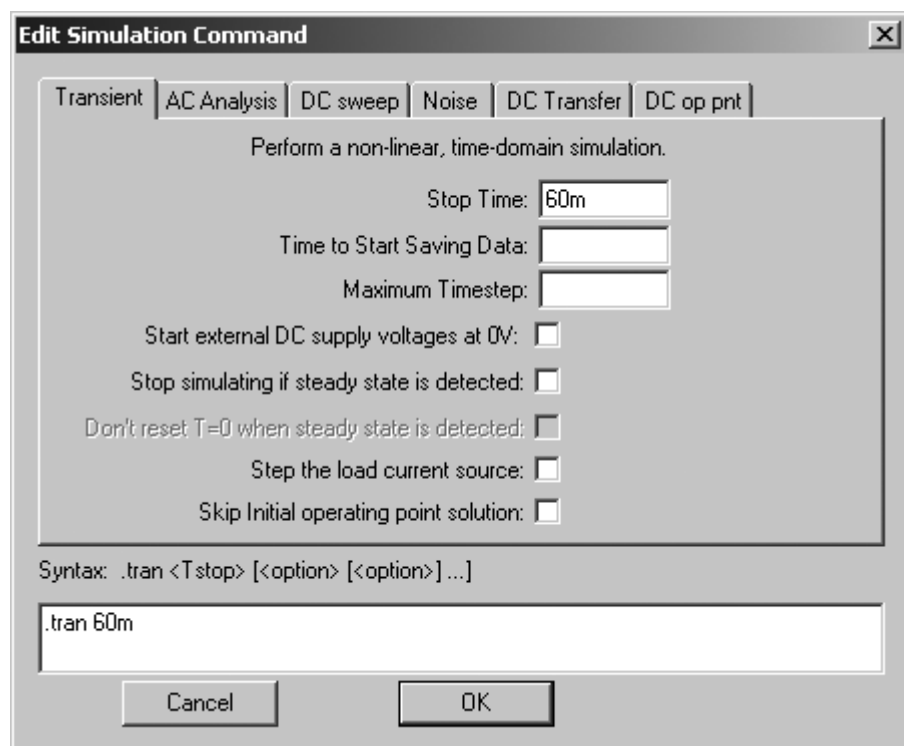


Рис. 2.16. Окно команд моделирования

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.

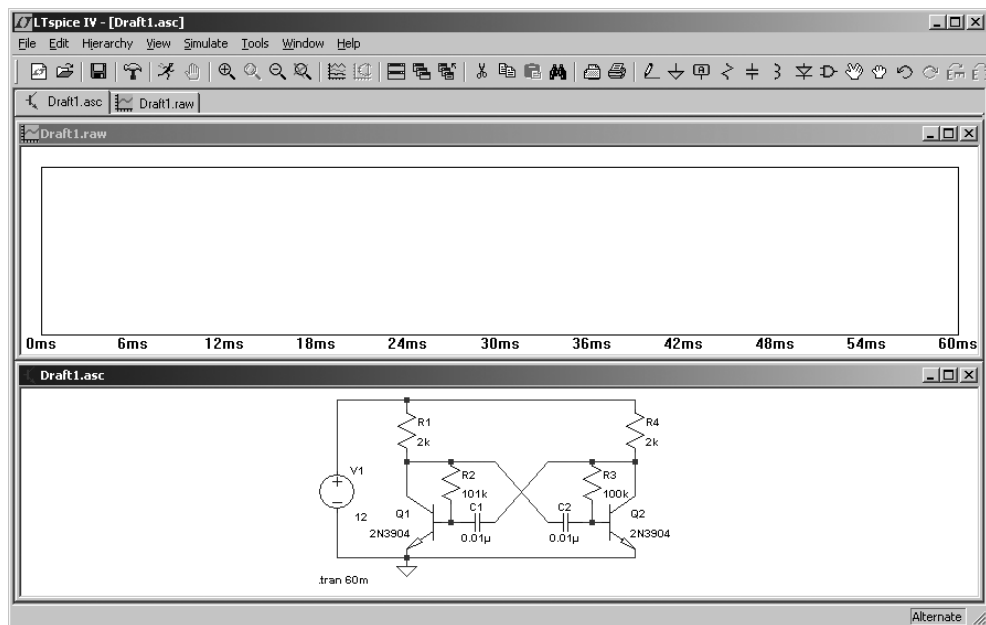



Рис. 2.17. Вид окна программы LTspice после завершения моделирования

Установим время остановки равным 60 мс. В строке **Syntax** появилась директива для симулятора — **.tran 60m**. После щелчка левой кнопкой мышки по кнопке **ОК** 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 сожмется, а на освободившееся место будет вставлено окно плоттера Draft1.raw, которое пока выглядит как пустой прямоугольник (рис. 2.17). 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 идет процесс моделирования. При этом в строке подсказки отображаются 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>+<H> или щелкнув 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).

Воспользуемся 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 щелкнуть левой кнопкой мышки для вывода диаграммы напряжения на плоттер — **Click to plot V(N002)**. После щелчка в окне плоттера будет построена соот-

ветствующая временная диаграмма напряжения узла N002, которой будет присвоено название в виде выражения V(N002).

Сама диаграмма и ее название окрашены в одинаковый цвет, который выбирается автоматически, но может быть изменен вручную в окне **Expression Editor** (редактирование выражения). Это окно можно вызвать, щелкнув правой кнопкой мышки по названию диаграммы.

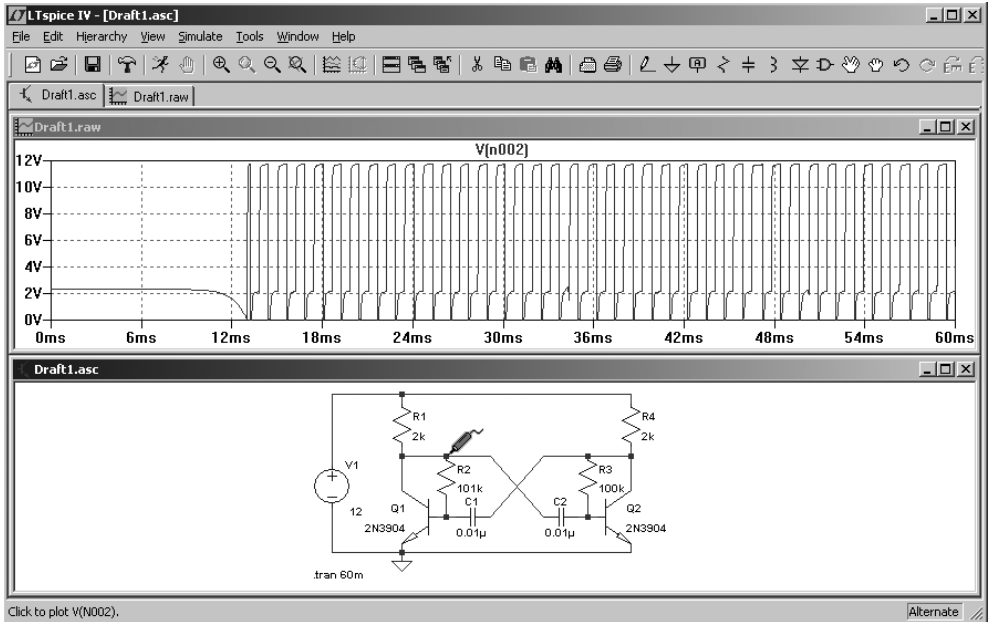


Рис. 2.18. Диаграмма напряжения на коллекторе транзистора Q1

В данном случае (рис. 2.18) 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 показывает напряжение на


выбранном узле относительно "земли" . Чтобы увидеть напряжение между узлами, следует щелкнуть 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 черный цвет. После этого отпускаем левую кнопку мыши. Для примера на

рис. 2.19 показана диаграмма напряжения между коллекторами транзисторов Q1 и Q2.

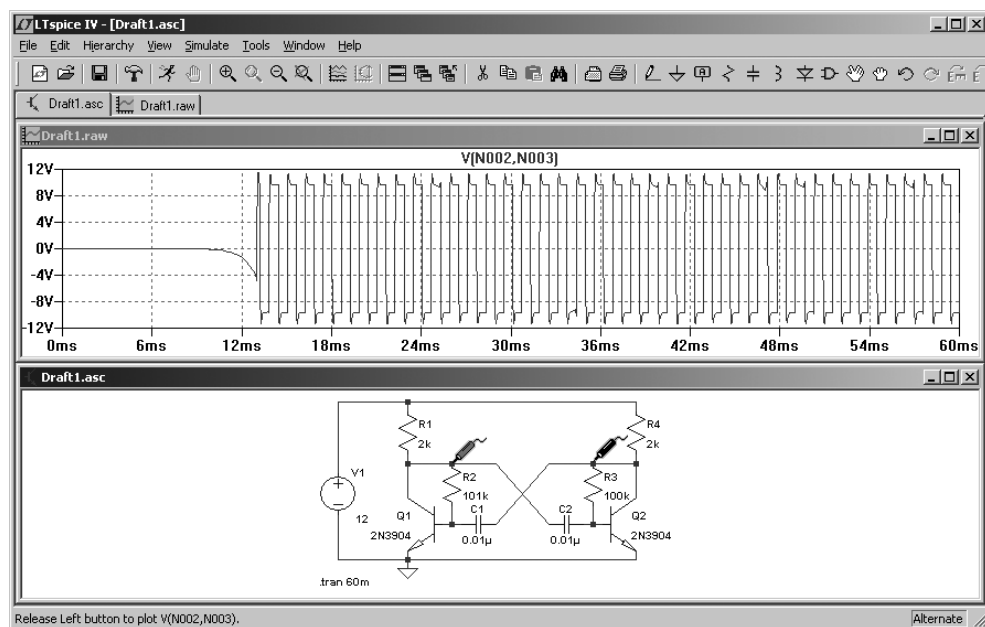




Рис. 2.19. Диаграмма напряжения между коллекторами транзисторов Q1 и Q2

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 . Причем красная стрелочка будет показывать условно положительное направление тока. Теперь, чтобы посмотреть диаграмму тока, достаточно щелкнуть левой кнопкой мышки. Для примера посмотрим ток в резисторе R1 (рис. 2.20).

Аналогично току можно посмотреть диаграмму мгновенной мощности, выделяемой на компоненте. Для этого нужно нажать клавишу <Alt> и, удерживая ее, щелкнуть левой кнопкой мышки по компоненту или по выводу ком-

понента. Теперь курсор будет похож не на токовые клещи, а на градусник . На рис. 2.21 показана диаграмма мгновенной мощности, выделяемой на транзисторе Q1.

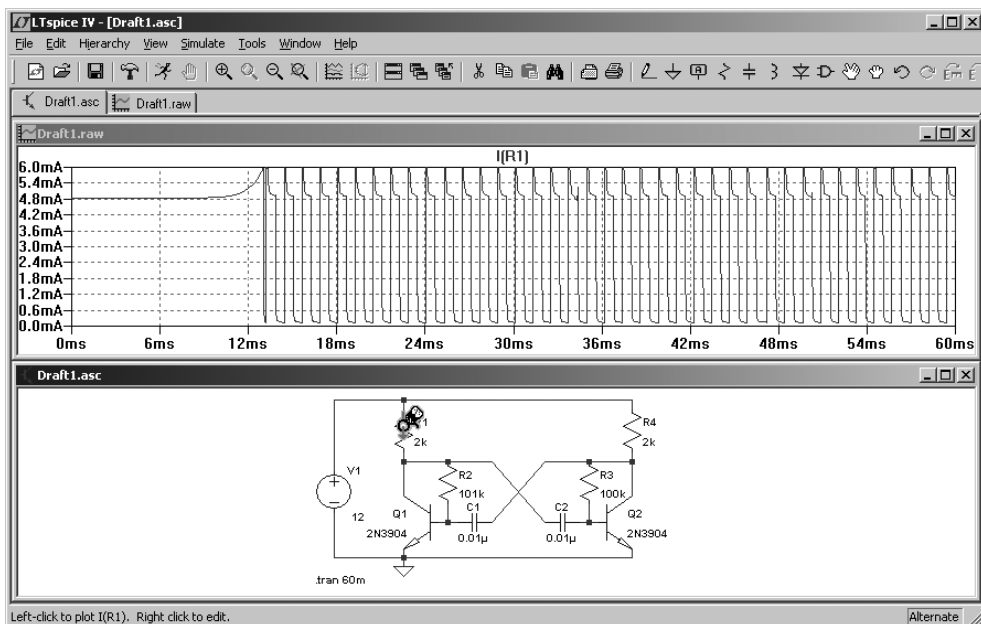


Рис. 2.20. Диаграмма тока в резисторе R1

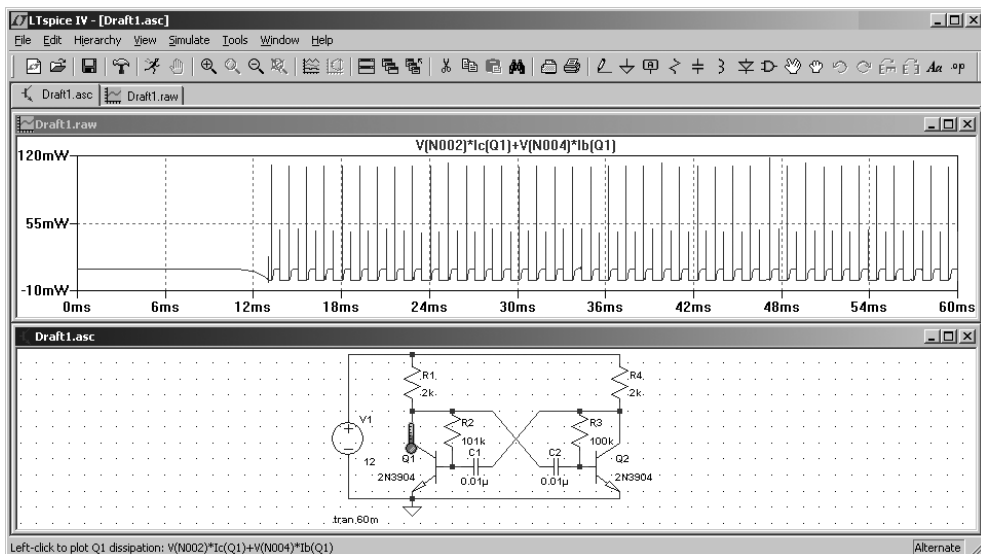


Рис. 2.21. Диаграмма мощности, выделяемой на транзисторе Q1

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 ее, щелкнуть левой кнопкой мышки по интересующему выражению. Для напряжений и токов рассчитываются среднее (Average) и действующее (RMS) значения (рис. 2.22). Для мощности (рис. 2.23) рассчитывается средняя (Average) мощность и энергия (Integral) за отображаемый период времени.

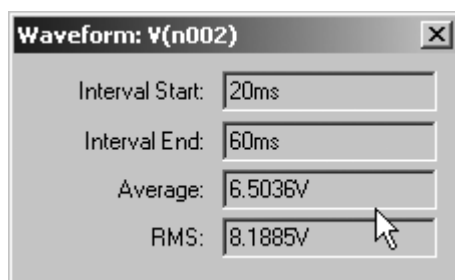


Рис. 2.22. Среднее и действующее значения параметра за отображаемый период времени

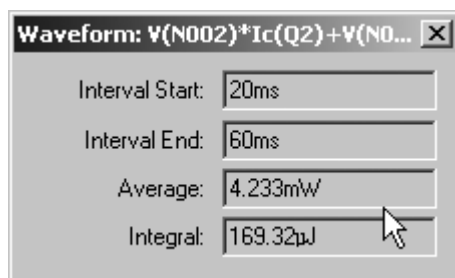


Рис. 2.23. Средняя мощность и энергия за отображаемый период времени

Для настройки временного интервала можно щелкнуть 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, щелкнув левой кнопкой мышки,

можно вызвать окно настройки горизонтальной оси — **Horizontal Axis** (рис. 2.24). В этом окне можно выставить левую (**Left**) и правую (**Right**) временные границы, а также цену деления (**tick**¹). Аналогичным образом можно настраивать верхнюю (**Top**) и нижнюю (**Bottom**) границы для вертикальной оси (рис. 2.25).

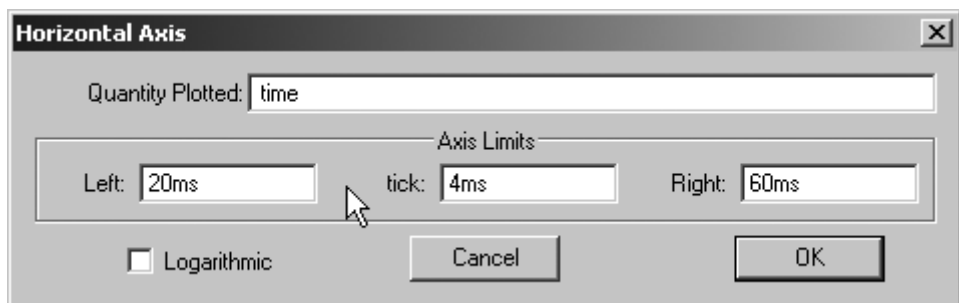


Рис. 2.24. Меню настройки горизонтальной оси плоттера

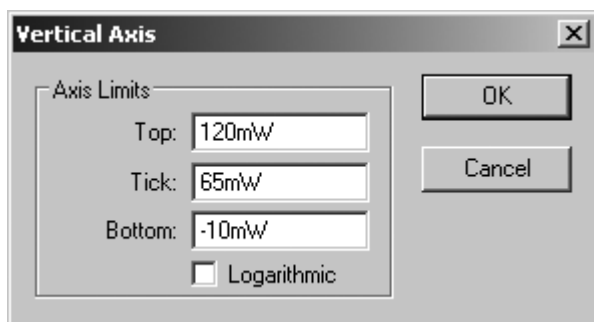


Рис. 2.25. Меню настройки вертикальной оси плоттера

В настройках горизонтальной оси, в отличие от оси вертикальной, есть дополнительная строка **Quantity Plotted** (Величина развертки). В эту строчку записывается базовая переменная величина, которая формирует горизонтальную развертку в окне плоттера. По умолчанию такой переменной величиной является время, но в качестве ее можно использовать любое другое значение, вычисляемое при моделировании схемы. Описанная возможность далее при-

¹ Разное начертание цены деления на рис. 2.24 и 2.25 — орехи свободно распространяемого ПО. — *Ред.*

годится 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. 2.26.

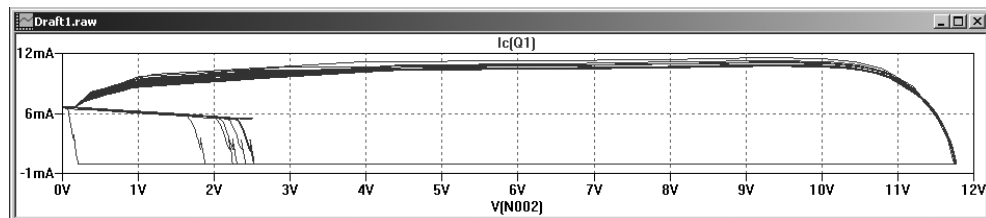


Рис. 2.26. Траектория рабочей точки транзистора VT1

На этот раз, немного разобравшись с интерфейсом программы LTspice, займемся 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. 2.27).

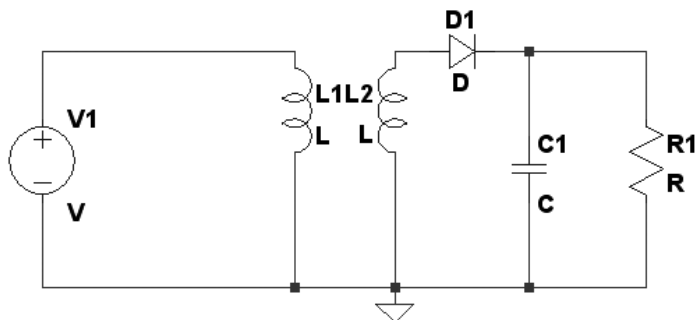


Рис. 2.27. Низковольтный источник постоянного тока

Первым делом настроим источник напряжения V1, который имитирует питающую сеть. Щелчком правой кнопки мышки по символу источника вызовем его меню настройки.



Рис. 2.28. Меню настройки независимого источника напряжения

По умолчанию считается, что источник напряжения генерирует постоянное напряжение. Чтобы заставить его генерировать переменное напряжение, перейдем в продвинутый режим настройки, щелкнув левой кнопкой мышки по кнопке **Advanced** (Расширенные настройки). После этого появляется меню настройки независимого источника напряжения (**Independent Voltage Source**) (рис. 2.28), 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 путем 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 определенное неудобство вызывает необходимость указывать амплитудное, а не действующее значение переменного напряжения. Для вы-

числения амплитудного значения U_{amp} из известного действующего U_{rms} , можно воспользоваться формулой $U_{amp} = \sqrt{2} \cdot U_{rms} = 1.414 \cdot 220 \approx 310$ В.

Сетевое напряжение получили, теперь требуется понизить его до 10.5 В. Предполагается, что впоследствии, за счет разницы между действующей и амплитудной составляющими синусоиды, напряжение на конденсаторе C1 (рис. 2.38) поднимется до уровня 12 В. Попробуем средствами LTspice изготовить трансформатор. Для этого берем две индуктивности L1 и L2, которые будут имитировать индуктивность первичной и вторичной обмоток трансформатора. Но этого недостаточно, надо еще имитировать связь между обмотками трансформатора. В SPICE принята модель, согласно которой связь между обмотками определяется фиктивным схемным компонентом, который называется коэффициентом связи K (рис. 2.29). 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. 2.29 также присутствуют индуктивности Ls1 и Ls2, которые обычно называются индуктивностями рассеяния и символизируют несвязанные между собой части первичной и вторичной обмоток трансформатора.

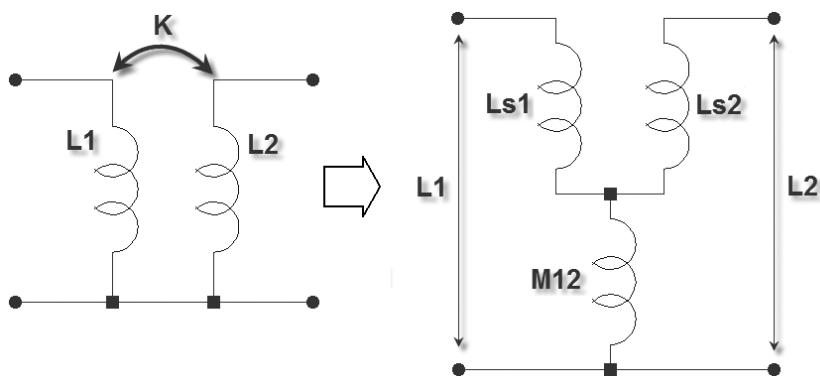



Рис. 2.29. Моделирование взаимной индуктивности двух обмоток через их коэффициент связи

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 щелчком левой кнопкой мышки по иконке

SPICE Directive (Директива симулятора)  на панели инструментов. В результате появится окно ввода текста (рис. 2.30). Вводим следующую строку: K1 L1 L2 0.999, которая означает, что индуктивности L1, L2 связаны между собой, а их коэффициент связи равен 0.999.

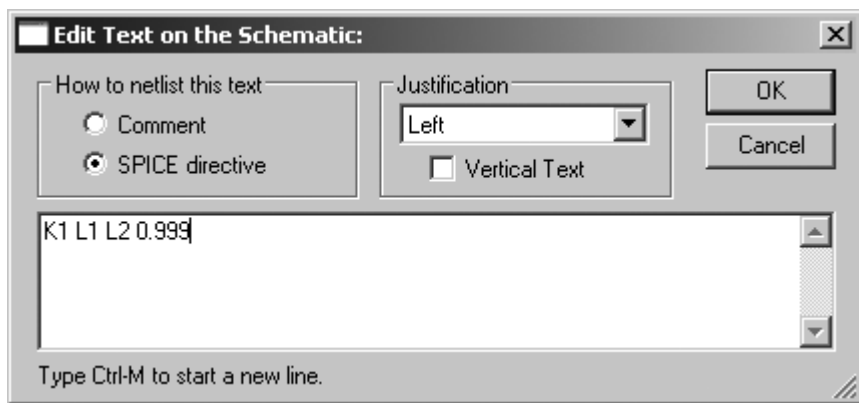


Рис. 2.30. Создание связи между индуктивностями

Далее, щелкнув левой кнопкой мышки по кнопке **OK**, переносим введенную строчку в окно редактора схем (рис. 2.31).

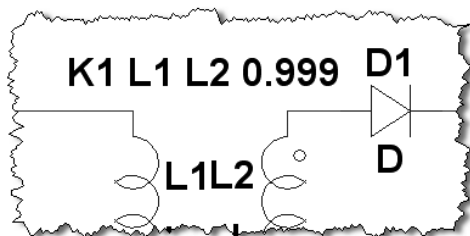


Рис. 2.31. Размещение директивы связи в окне редактора схем

Теперь осталось настроить коэффициент трансформации $K_{\delta\delta}$ 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

$$L2 = \frac{L1}{K_{mp}^2} = \frac{700}{21^2} = 1.59 \text{ Гн.}$$

Описанным способом можно создавать не только двух-, но и многообмоточные трансформаторы. Например, директива `k1 L1 L2 L3 L4 1.0` создает 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. 2.32. Здесь, кроме индуктивности (Inductance), учитывается масса паразитных параметров, таких как последовательное сопротивление обмотки *Rser* (Series Resistance), сопротивление потерь между выводами обмотки *Rpar* (Parallel Resistance), межвитковая емкость *Cpar* (Parallel Capacitance). Настроить основные и паразитные параметры модели можно в окне настройки (рис. 2.33), которое вызывается щелчком правой кнопки мышки по индуктивности L1 (или L2). Здесь индуктивность измеряется в генри, емкость — в фарадах, а сопротивление — в омах. Опцией **Show Phase Dot** (Отметить точкой начало обмотки) можно делать видимой и скрывать индикацию начала обмотки.

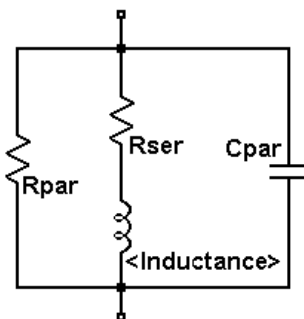


Рис. 2.32. Модель индуктивности, используемая в программе LTspice

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. 2.33). Для $L2$ соответственно $L2 = 1.59$ Гн и $R_{ser} = 1$ Ом.

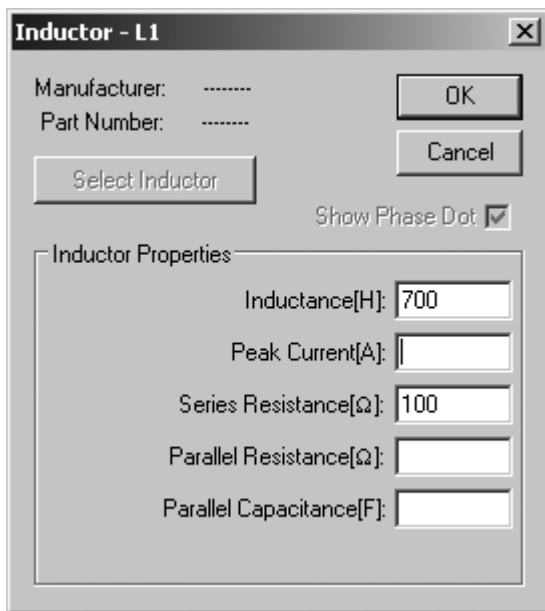


Рис. 2.33. Меню настройки индуктивности

Выберем конденсатор $C1$ и установим значение емкости 470 мкФ. Обычно в подобных устройствах устанавливают электролитические конденсаторы, которые имеют достаточно высокое внутреннее сопротивление, поэтому устанавливаем последовательное сопротивление $R_{ser} = 1$ Ом.

Так как источник должен обеспечивать 12 В при токе нагрузки 0.1 А, то

$$R1 = \frac{12}{0.1} = 120 \text{ Ом.}$$

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, щелкнув левой кнопкой мышки по кнопке **Pick New Diode** (Выбрать новый диод).

Полностью настроенная схема изображена на рис. 2.34.

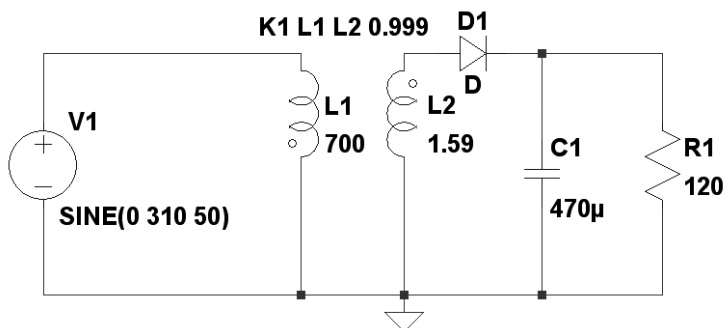



Рис. 2.34. Схема модели маломощного источника постоянного тока

Щелкнув 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 окно плоттера будут выведены последние два периода работы схемы, а предшествующий им переходной процесс останется вне поля зрения. На рис. 2.35 изображено состояние после окончания моделирования. В окно плоттера выведены диаграммы: $V(n002)$ — напряжение на вторичной обмотке трансформатора, $V(n003)$ — напряжение на резисторе R1, $I(L1)*21$ — ток первичной обмотки, приведенный 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.

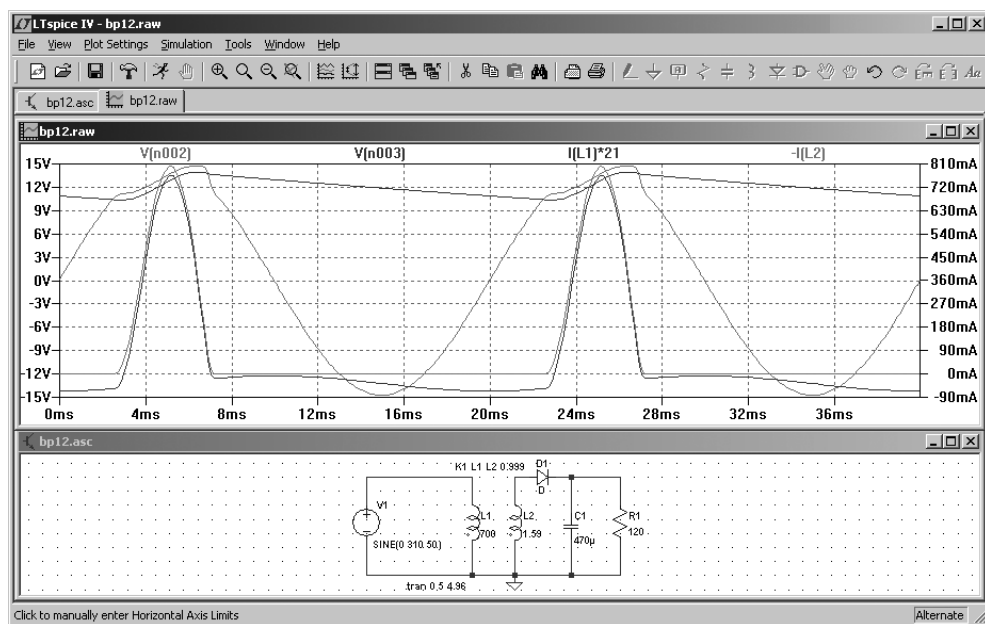


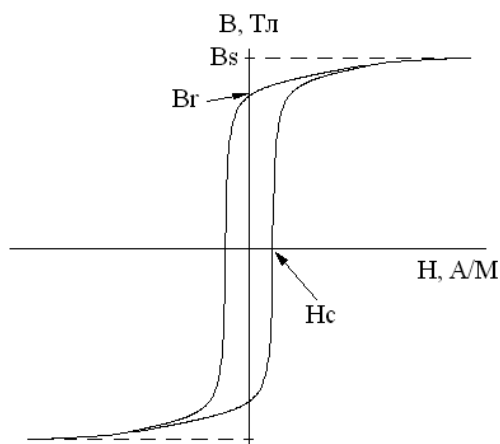
Рис. 2.35. Состояние после окончания моделирования источника постоянного тока

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 упрощенную гистерезисную модель магнитного сердечника, которую впервые предложил Джон Чан. Модель использует только основные параметры петли гистерезиса, перечисленные в табл. 2.2 и показанные на рис. 2.36.

Таблица 2.2. 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. 2.36.** Параметры петли гистерезиса магнитного материала

Наряду с параметрами петли гистерезиса, при описании нелинейной индуктивности, учитываются линейные размеры сердечника, а также количество витков катушки (табл. 2.3).

Таблица 2.3. 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, $A = 1.1 \cdot 10^{-4}$ м², $N = 6000$ витков.


В основе модели нелинейного трансформатора (на рис. 2.37 обведен пунктирной линией) лежит все 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 возникала 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. 2.4.

Таблица 2.4. 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, щелкнув правой кнопкой мышки по символу L3, вызовем меню настройки и впишем определенный 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. 2.37).

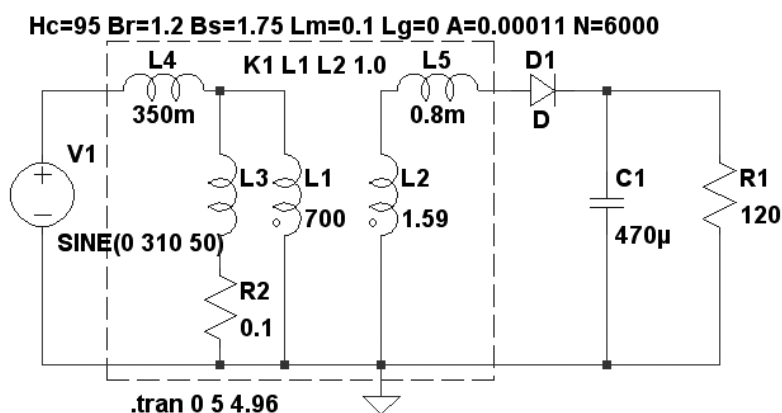


Рис. 2.37. Схема модели маломощного источника постоянного тока с нелинейным трансформатором

На рис. 2.38 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, приведенный ко вторичной обмотке (умножен на коэффициент трансформации), $I(L5)$ — ток вторичной обмотки.

На диаграмме тока первичной обмотки $I(L4) * 21$, 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.

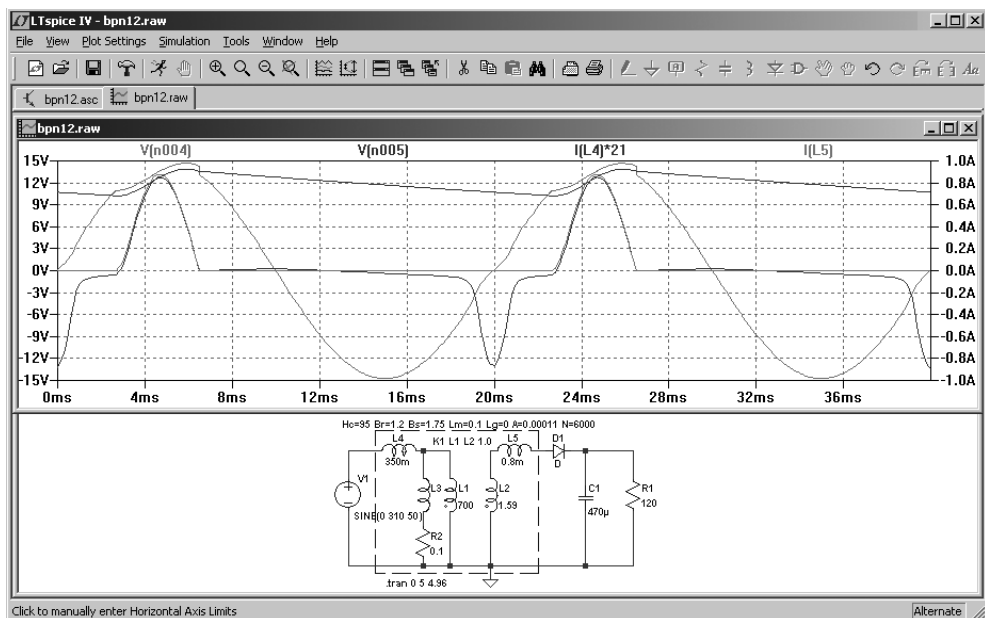


Рис. 2.38. Состояние после окончания моделирования источника постоянного тока с нелинейным трансформатором

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. 2.39).

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, обеспечи-

вающий выходное напряжение интегратора, равное индукции, можно вычислить по формуле:

$$K_{G1} = \frac{C2}{A \cdot N} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{110 \cdot 10^{-6} \cdot 6000} = 1.515 \cdot 10^{-6}.$$

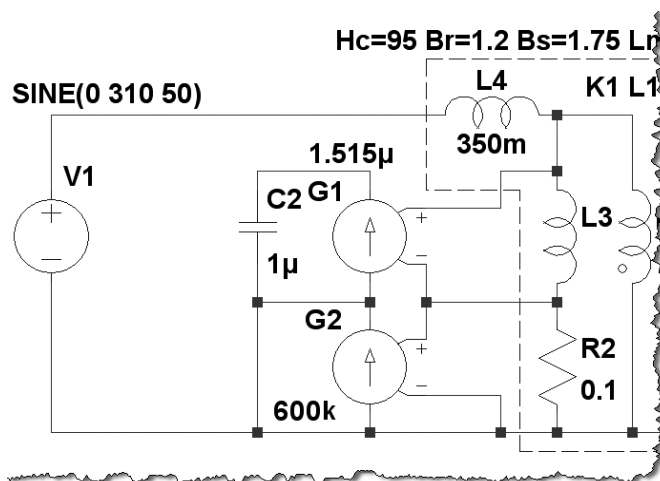


Рис. 2.39. Тестовый узел, позволяющий наблюдать траекторию перемагничивания магнитного сердечника

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, щелкнув левой кнопкой мышки по верхнему выводу конденсатора C2 (рис. 2.40).

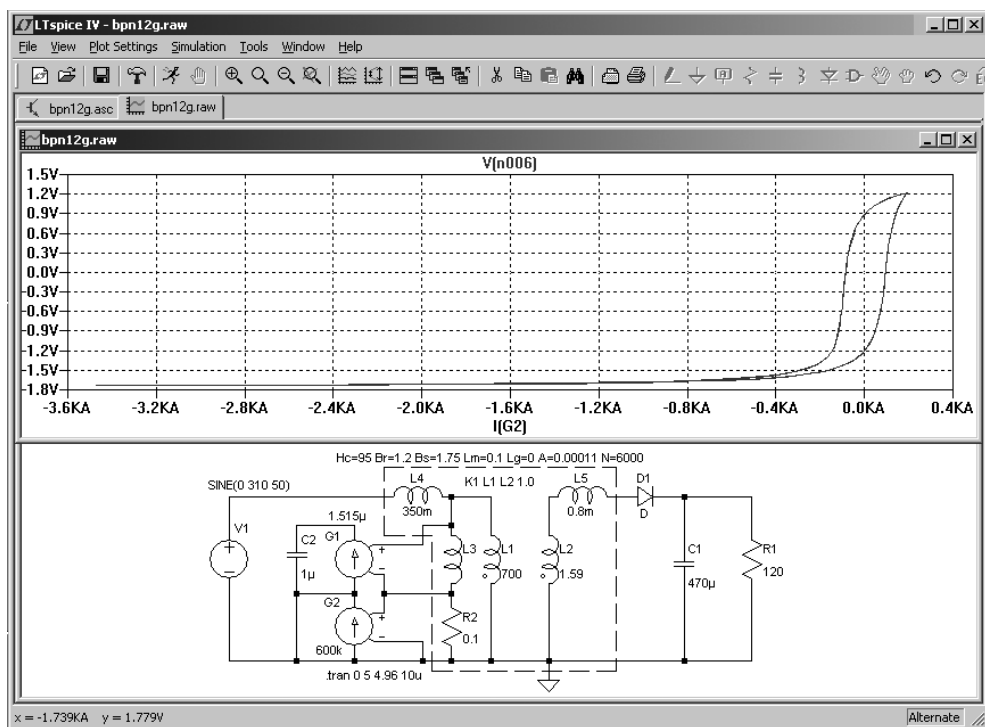


Рис. 2.40. Траектория перемагничивания сердечника нелинейного трансформатора

Из диаграммы перемагничивания (рис. 2.40) 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. 2.41).

На рис. 2.40 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 однополупе-

риодного выпрямителя на выходе трансформатора недопустимо, т. к. вызывает одностороннее насыщение его сердечника.

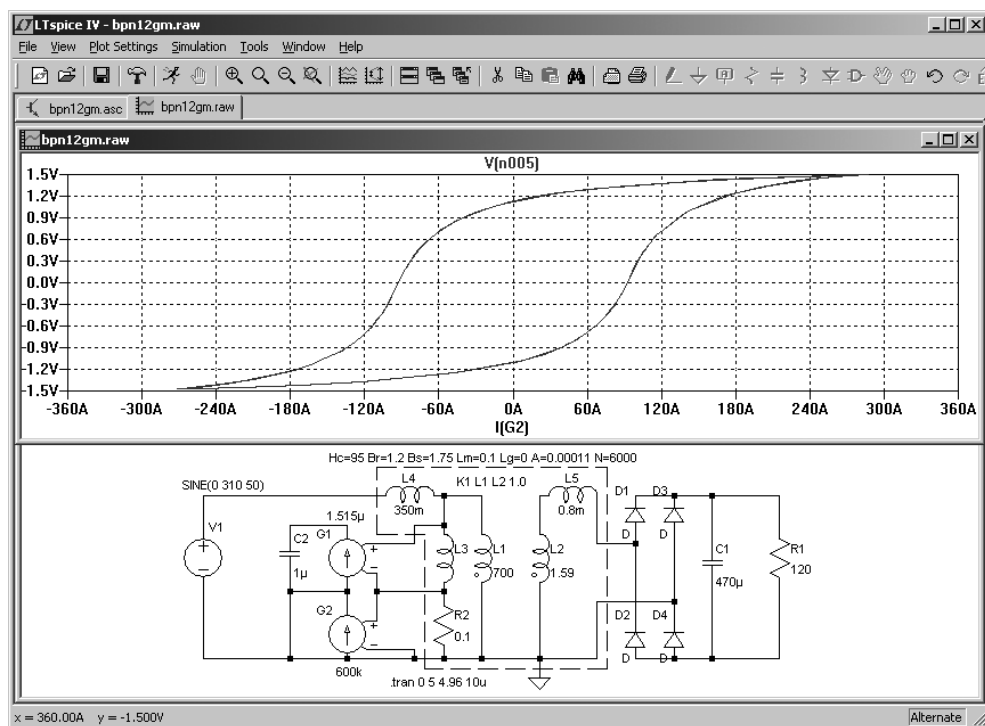


Рис. 2.41. Траектория перемагничивания сердечника трансформатора в источнике постоянного тока с двухполупериодным выпрямителем

ГЛАВА 3



Схемные элементы симулятора LTspice

Так как разработчику зачастую приходится анализировать тестовый список соединений (netlist), то в основе описания схемных элементов (далее по тексту просто элементов) будет лежать их текстовый синтаксис. Нумерация выводов элементов отражает их порядок следования в строке текстового описания.

3.1. А — специальные функции

Имена элементов: INV, BUF, AND, OR, XOR, DIFFSCHMITT, DIFFSCHMTBUF, DIFFSCHMTINV, SCHMITT, SCHMTBUF, SCHMTINV, DFLOP, VARISTOR, MODULATE и MODULATE2.

Текстовый синтаксис:

`Annn n001 n002 n003 n004 n005 n006 n007 n008 <имя модели> [требуемые параметры]`

Эти элементы предназначены для реализации специальных функций и смешанного режима симуляции и являются собственностью корпорации Linear Technology. Большинство этих элементов не имеют описания в фирменной документации, хоть и присутствуют в библиотеке. Объясняется это тем, что параметры моделей этих элементов еще не определены окончательно производителем и их свойства могут меняться с каждым обновлением симулятора LTspice.

3.1.1. Элементы INV, BUF, AND, OR и XOR

Элементы INV, BUF, AND, OR, и XOR являются идеализированными логическими элементами. Символы этих элементов можно найти в разделе **Digital** встроенной библиотеки программы LTspice. Внешние виды символов изображены на рис. 3.1.

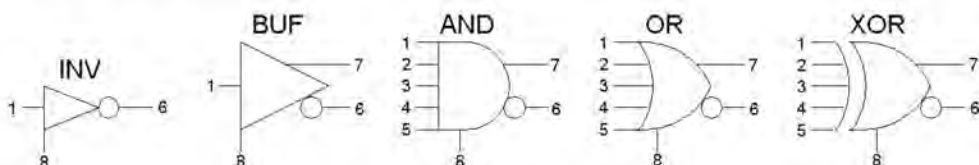


Рис. 3.1. Символы логических элементов

Нумерация выводов элемента отражает их порядок следования в строке текстового описания. Все элементы этой группы имеют восемь внешних выводов и не требуют подачи питания. Инвертирующий и неинвертирующий выходы (выводы 6 и 7) могут генерировать втекающий или вытекающий ток. Логические уровни на выводах логических элементов измеряются относительно общего вывода 8. Выводы от 1 до 5 являются входами. Неиспользуемые входы и выходы желательно подключить к общему выводу 8. Это является сигналом симулятору, что выводы не используются, и они не учитываются при моделировании. Указанная особенность позволяет, на основе базового восьмивыводного элемента, создавать до 12 его различных вариантов и при этом ускорить процесс симуляции, не затрачивая время на обработку неиспользуемых выводов. Но, в свою очередь, эта особенность может послужить причиной путаницы, когда симулятор будет исключать из моделирования никуда не подключенные выводы элемента (по причине отсутствия на них напряжения). При этом логика работы модели устройства может сильно отличаться от ожидаемой. Для устранения этой путаницы выводы, участвующие в моделировании, должны подключаться к общему проводу через сопротивление небольшой величины.

По умолчанию логические элементы работают с логическими уровнями 0 В и 1 В, порог переключения составляет 0.5 В и выходное сопротивление — 1 Ом. Настроить модель логического элемента под свои нужды можно с помощью параметров, указанных в табл. 3.1

Таблица 3.1. Параметры логических элементов

| Обозначение | Установка по умолчанию | Описание |
|--------------|------------------------|--|
| <i>Vhigh</i> | 1 | Высокий логический уровень |
| <i>Vlow</i> | 0 | Низкий логический уровень |
| <i>Ref</i> | 0.5 | Порог переключения |
| <i>Trise</i> | 0 | Время нарастания выходного импульса |
| <i>Tfall</i> | <i>Trise</i> | Время спада выходного импульса |
| <i>Tau</i> | 0 | Постоянная времени эквивалентной выходной RC-цепочки |
| <i>Td</i> | 0 | Время распространения сигнала |
| <i>Cout</i> | 0 | Выходная емкость |
| <i>Rout</i> | 1 | Выходное сопротивление |
| <i>Rhigh</i> | <i>Rout</i> | Выходное сопротивление для высокого логического уровня |
| <i>Rlow</i> | <i>Rout</i> | Выходное сопротивление для низкого логического уровня |

ПРИМЕЧАНИЕ

Не все параметры можно одновременно определять для одного элемента. Например, выходные характеристики могут быть указаны через время нарастания и спада или через постоянную времени RC-цепочки, но не обоими способами сразу.

По умолчанию входной логический порог переключения равен $0.5 \cdot (V_{high} + V_{low})$, но может быть установлен произвольным с помощью параметра *Ref*.

Для настройки логического элемента необходимо вызвать окно **Component Attribute Editor** (Редактор атрибутов компонента), щелкнув по символу элемента правой кнопкой мышки (рис. 3.1). Параметры настройки, через пробел, вписываются в строке **Value**. Изображенные на рис. 3.2 настройки установ-

ливают высокий логический уровень $V_{high}=15$ В, время нарастания $Trise=50$ нс, а также выходное сопротивление $R_{out}=50$ Ом.

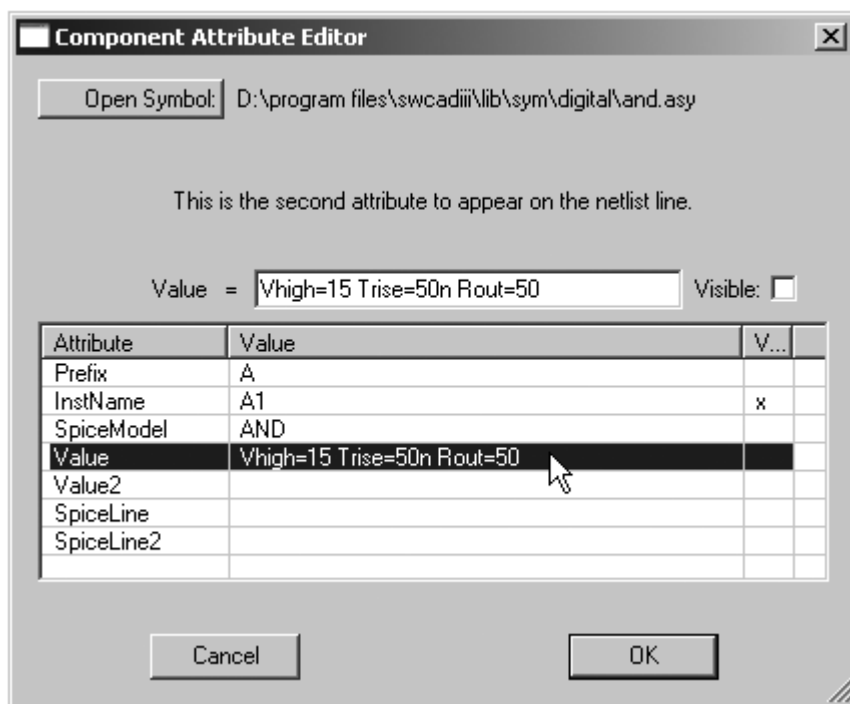


Рис. 3.2. Окно настройки атрибутов логического элемента

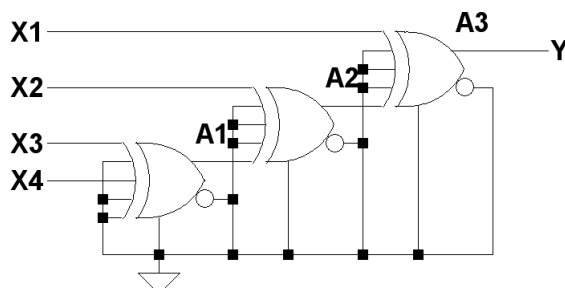


Рис. 3.3. Пример создания четырехвходового блока XOR

Все элементы имеют стандартную логику работы, за исключением элемента XOR, который имеет нестандартное поведение, если используется более двух

входов. В этом случае на выходе присутствует логическая единица только в том случае, если такая же единица присутствует только на одном из входов. Для создания блока XOR с количеством входов больше двух можно использовать ассоциативные свойства XOR (рис. 3.3).

3.1.2. Элементы DIFFSCHMITT, DIFFSCHMTBUF, DIFFSCHMTINV, SCHMITT, SCHMTBUF и SCHMTINV

Элементы DIFFSCHMITT, DIFFSCHMTBUF, DIFFSCHMTINV, SCHMITT, SCHMTBUF и SCHMTINV являются различными вариантами триггера Шмитта. Символы этих элементов можно найти в разделе Digital встроенной библиотеки программы LTspice. Внешние виды символов изображены на рис. 3.4.

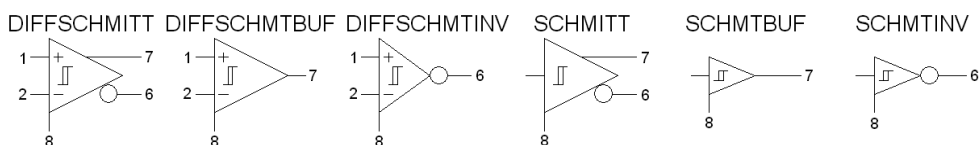


Рис. 3.4. Символы различных вариантов триггера Шмитта

Нумерация выводов элемента отражает их порядок следования в строке текстового описания.

Триггер Шмитта имеет выходные характеристики, подобные выходным характеристикам других логических элементов, но, в отличие от них, имеет два порога переключения по входу. Для задания этих порогов используются два параметра: V_t (пороговое напряжение) и V_h (напряжение гистерезиса). Пороги переключения меняются в зависимости от того, повышается входное напряжение или понижается. Если входное напряжение понижается, то порог переключения определяется по формуле $V_t - V_h$, а если повышается, то по формуле $V_t + V_h$. Триггеры Шмитта с дифференциальными входами (имеют приставку DIFF) реагируют на разницу напряжения между этими входами. Дифференциальные триггеры Шмитта очень удобно использовать в качестве идеальных компараторов.

По умолчанию логические элементы и триггер Шмитта не обеспечивают движок симулятора требуемым временным шагом. То есть движок не анализирует моменты, когда логический элемент близок к переключению, а руко-

водствуется временным шагом, определенным для аналоговой части схемы. Чтобы установить максимальный временной шаг, требуемый для цифровой части, можно воспользоваться параметром *tripdt*. Параметры настройки вписываются в строке **Value**. Изображенные на рис. 5.5 настройки устанавливают высокий логический уровень $V_{high} = 15$ В, время нарастания $T_{rise} = 50$ нс, порог переключения при понижении входного напряжения $V_t - V_h = 3.95 - 0.05 = 3.9$ В, порог переключения при повышении входного напряжения $V_t + V_h = 3.95 + 0.05 = 4$ В и временной шаг симулятора $tripdt = 10$ нс.

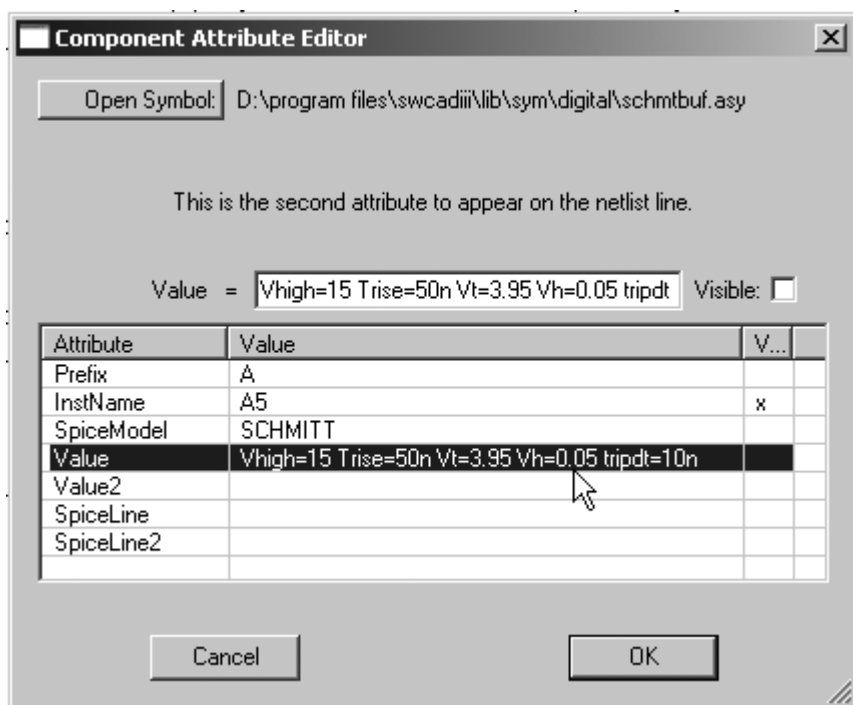


Рис. 3.5. Окно настройки триггера Шмитта

3.1.3. Элемент VARISTOR

Элемент VARISTOR является управляемым варистором. Символ варистора расположен в разделе **SpecialFunctions** встроенной библиотеки программы LTspice. Внешний вид символа изображен на рис. 3.6.

VARISTOR

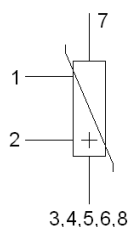


Рис. 3.6. Символ управляемого варистора

Нумерация выводов элемента отражает их порядок следования в строке текстового описания.

Напряжение пробоя варистора определяется управляющим напряжением между выводами 1 и 2. Сопротивление в пробитом состоянии определяется параметром *Rclamp*. Если, например, сопротивление пробитого варистора равно 1 Ом, то $R_{clamp} = 1$ (рис. 3.7).

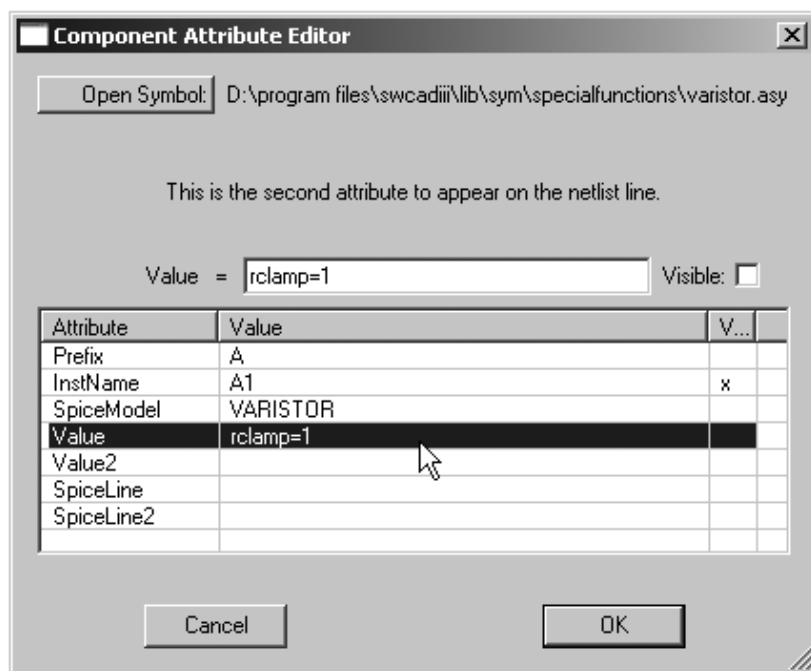


Рис. 3.7. Окно настройки варистора

Пример использования варистора можно посмотреть в файле `.\examples\Educational\varistor.asc` установленной программы LTspice.

3.1.4. Элементы MODULATE и MODULATE2

Элементы MODULATE, MODULATE2 представляют собой модулируемые генераторы. Символы этих элементов расположены в разделе **SpecialFunctions** встроенной библиотеки программы LTspice. Внешний вид символов изображен на рис. 3.8.

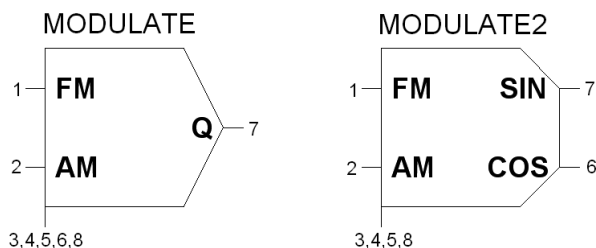


Рис. 3.8. Генераторы, управляемые напряжением

Нумерация выводов элемента отражает их порядок следования в строке текстового описания.

Амплитуда выходного напряжения генератора равна напряжению на входе AM. Если вход AM не используется (подключен к общему выводу 8), то амплитуда выходного напряжения генератора равна 1 В. Частота выходного напряжения генератора определяется напряжением на входе FM. Преобразование напряжения в частоту — линейное и определяется параметрами *mark* и *space*. Параметр *mark* определяет частоту, соответствующую случаю, когда на входе FM напряжение 1 В. Параметр *space* определяет частоту, соответствующую случаю, когда на входе FM напряжение 0 В. Например, настройки, изображенные на рис. 3.9, устанавливают изменение частоты генератора от *space* = 900 Гц до *mark* = 1100 Гц, при изменении напряжения на входе FM от 0 до 1 В.

Версия MODULATE2 отличается от MODULATE тем, что формирует квадратурные, т. е. сдвинутые на 90°, сигналы.

Пример использования модулируемого генератора можно посмотреть в файле `.\examples\Educational\PLL.asc` установленной программы LTspice.

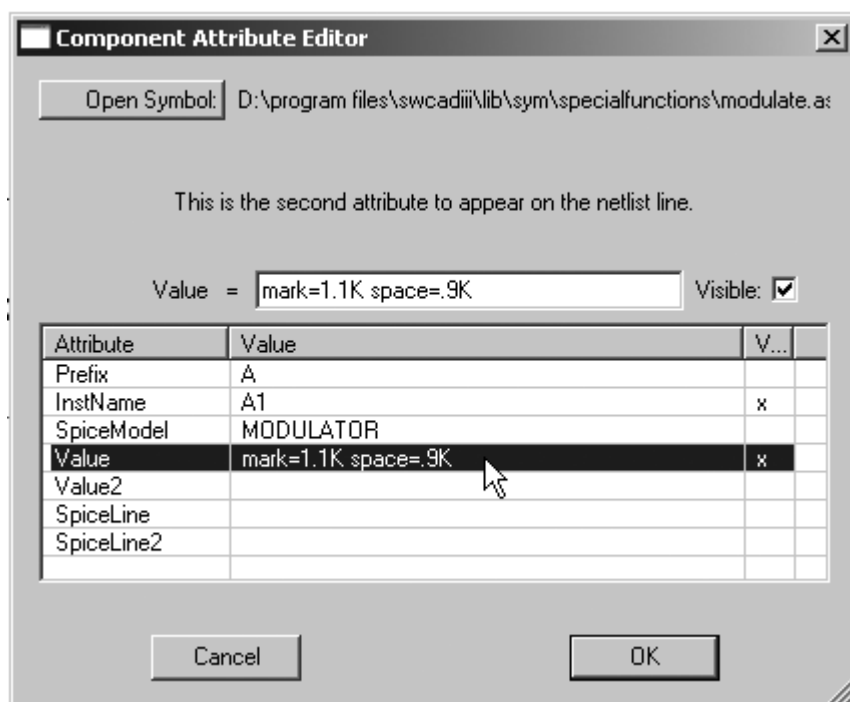


Рис. 3.9. Окно настройки генератора, управляемого напряжением

ПРИМЕЧАНИЕ

Редактор схем программы LTspice при генерации списка связей элементов специальных функций действует в своеобразной манере, согласно которой все неподключенные выходы автоматически подключаются к выводу 8. Если вывод 8 также оказался неподключенным, то он автоматически подключается к нулевому узлу (к "земле").

3.2. В — функциональные источники напряжения или тока

Имена элементов: BV, BI.

Эти элементы представляют из себя, соответственно, функциональный источник напряжения и источник тока. Символы этих источников расположены

в корневом разделе встроенной библиотеки программы LTspice. Внешний вид символов изображен на рис. 3.10.

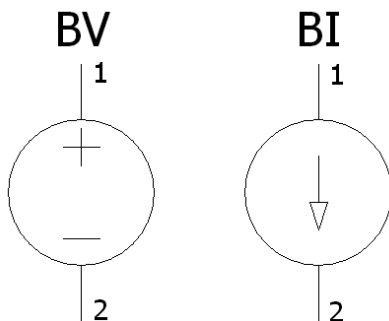


Рис. 3.10. Функциональные источники напряжения и тока

Текстовый синтаксис:

```
Bnnn N1 N2 V=<выражение> [IC=<значение>] [TRIPDV=<значение>]
+ [TRIPDT=<значение>] [LAPLACE=<выражение>] [WINDOW=<время>]
[NFFT=<число>]
+ [MTOL=<число>]
```

```
Bnnn N1 N2 I=<выражение> [IC=<значение>] [TRIPDV=<значение>]
+ [TRIPDT=<значение>] [RPAR=<значение>] [LAPLACE=<выражение>]
[WINDOW=<время>]
+ [NFFT=<число>] [MTOL=<число>]
```

Первый вариант тестового описания определяет источник напряжения, а второй — источник тока. Для определения параметров функционального источника в рабочем окне LTspice необходимо вызвать окно настройки **Component Attribute Editor** (Редактор атрибутов компонента), щелкнув правой кнопкой мышки по символу элемента (рис. 3.11). Выражение, определяющее функционирование источника, а также остальные параметры текстового синтаксиса, вносятся, по мере заполнения, в поля **Value**, **Value2**, **SpiceLine** и **SpiceLine2**. В качестве независимых переменных могут использоваться различные напряжения и токи моделируемой схемы, а также переменная *time*, символизирующая текущее время моделирования. Над этими переменными можно производить различные математические и логические операции, а также использовать их в качестве аргументов различных математических и логических функций.

Доступные математические и логические операции, в порядке уменьшения приоритета, сгруппированы в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Математические и логические операции

| Операции | Описание |
|----------|--|
| ! | Преобразовать следующее выражение в один из двух логических размеров и инвертировать |
| ** | Символ возведения в степень. Возвращается только вещественная часть, т. е. $-1 ** 0.5$ даст ноль, а не i |
| * | Умножение с плавающей точкой. |
| / | Деление с плавающей точкой |
| + | Сложение с плавающей точкой. |
| – | Вычитание с плавающей точкой |
| < | Истинно, если выражение слева меньше выражения справа, в противном случае ложно. |
| > | Истинно, если выражение слева больше выражения справа, в противном случае ложно. |
| <= | Истинно, если выражение слева меньше или равно выражению справа, в противном случае ложно. |
| >= | Истинно, если выражение слева больше или равно выражению справа, в противном случае ложно |
| & | Преобразовать выражение в один из двух логических размеров и затем AND |
| ^ | Преобразовать выражение в один из двух логических размеров и затем XOR |
| | Преобразовать выражение в один из двух логических размеров и затем OR |

Преобразование числовых значений в логический (булев) тип данных производится по следующему алгоритму: если значение больше чем 0.5, то преобразуется в логическую единицу, в противном случае — в логический ноль.

Доступные математические и логические функции перечислены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Математические и логические функции

| Функции от x | Определение | Описание |
|--------------------------|-------------------------------------|---|
| $abs(x)$ | Абсолютное значение x | |
| $absdelay(x, t[, tmax])$ | Задержать x на t | Если задержка t изменяется в процессе моделирования, то ее величина может быть ограничена с помощью параметра $tmax$ |
| $acos(x)$ | Арккосинус x | Результат в радианах. Возвращается вещественная часть арккосинуса x , что снимает ограничения на величину аргумента x |
| $arccos(x)$ | Арккосинус x | Синоним $acos(x)$ |
| $acosh(x)$ | Ареа-косинус x | Возвращает вещественную часть ареа-косинуса x , что снимает ограничения на величину аргумента x |
| $asin(x)$ | Арсинус x | Результат в радианах. Возвращает вещественную часть арксинуса x , что снимает ограничения на величину аргумента x |
| $arcsin(x)$ | Арсинус x | Синоним для $asin(x)$ |
| $asinh(x)$ | Ареа-синус x | |
| $atan(x)$ | Арктангенс x | Результат в радианах |
| $arctan(x)$ | Арктангенс x | Синоним для $atan(x)$ |
| $atan2(y, x)$ | Четырехквadrантный арктангенс y/x | Результат в радианах |
| $atanh(x)$ | Ареа-тангенс x | |

Таблица 3.3 (продолжение)

| Функции от x | Определение | Описание |
|------------------------------------|--|---|
| $\text{buf}(x)$ | | 1 если $x > 0.5$, иначе 0 |
| $\text{ceil}(x)$ | Целое равное или больше чем x | |
| $\text{cos}(x)$ | Косинус x | x в радианах |
| $\text{cosh}(x)$ | Гиперболический косинус x | |
| $\text{ddt}(x)$ | Производная $\frac{dx}{dt}$ | |
| $\text{delay}(x, t[, tmax])$ | Задержать x на t | Синоним $\text{absdelay}(x)$ |
| $\text{exp}(x)$ | Число e в степени x | |
| $\text{floor}(x)$ | Целое равное или меньше x | |
| $\text{hypot}(x, y)$ | $\text{sqrt}(x^{**2} + y^{**2})$ | |
| $\text{idt}(x[, ic[, assert]])$ | Интеграл от x | В качестве дополнительных параметров указываются: начальное состояние ic и сброс, если $assert$ истинно |
| $\text{idtmod}(x[, ic[, m[, o]]])$ | Интеграл от x | В качестве дополнительных параметров указываются: начальное состояние ic , сброс по достижению моду- ля m , смещение выхода на o |
| $\text{if}(x, y, z)$ | Если $x > 0.5$, то y , иначе z | |
| $\text{int}(x)$ | Преобразовать x в целое | |

Таблица 3.3 (продолжение)

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

Таблица 3.3 (окончание)

| Функции от x | Определение | Описание |
|------------------------|---|--|
| $sdt(x[,ic[,assert]])$ | Альтернативный синтаксис для $idt(x)$ | |
| $sgn(x)$ | Знак x | |
| $\sin(x)$ | Синус x | x в радианах |
| $\sinh(x)$ | Гиперболический синус x | |
| \sqrt{x} | Квадратный корень x | |
| $table(x,a,b,c,d)$ | Интерполировать значение для x , основанное на поиске в таблице, данной как набор пар точек | |
| $\tan(x)$ | Тангенс x | |
| $\tanh(x)$ | Гиперболический тангенс x | |
| $u(x)$ | 1 если $x > 0$, иначе 0 | |
| $uramp(x)$ | x если $x > 0$, иначе 0 | |
| $white(x)$ | Случайное число между -0.5 и 0.5 | По сравнению с $random(x)$ обеспечивает более гладкий переход между значениями |
| $!(x)$ | Альтернативный синтаксис для $inv(x)$ | |
| $\sim(x)$ | Альтернативный синтаксис для $inv(x)$ | |

Так как интерфейс LTspice не позволяет использовать буквы греческого алфавита, то число π обозначается двумя буквами — "pi" и, по сути, означает число 3.14159265358979323846.

ПРИМЕЧАНИЕ

В отличие от других SPICE-симуляторов, LTspice использует символ "^" для обозначения логической функции XOR, а символы "***" — для возведения в степень. Это означает, что при заимствовании моделей с других SPICE-симуляторов нужно позаботиться о том, чтобы синтаксис x^y переделать в $x**y$ или $pwr(x, y)$.

В LTspice операции возведения в степень $x**y$ и функция $pwr(x, y)$ работают более корректно по сравнению с другими SPICE-симуляторами, где функция $pwr(x, y)$ возводит в степень не само число, а только его модуль. Поэтому при возведении отрицательного числа в нечетную степень можно получить неожиданный результат. Например, $pwr(-3, 3) = 27$ вместо -27 . Возможно, это сделано с целью исключения проблемы возведения отрицательного числа в дробную степень. Для устранения этой некорректности функция $pwr(x, y)$ или $x**y$ в LTspice возвращает вещественную часть результата возведения в степень.

Кроме математического выражения, синтаксис функциональных источников содержит различные дополнительные параметры. Например, с помощью параметра *Rpar* можно определить резистор, подключенный параллельно функциональному источнику тока. Параметры *Tripdv* и *Tripdt* позволяют управлять временным шагом симулятора. Если напряжение на источнике изменяется больше, чем на *Tripdv* вольт в *Tripdt* секунд, то выбирается новый временной шаг.

Очень полезным является параметр LAPLACE, с помощью которого можно определить передаточную функцию функционального источника с помощью преобразования Лапласа. Если передаточная функция определена, то ее входной величиной является $V = \langle \text{выражение} \rangle$ или $I = \langle \text{выражение} \rangle$, а выход является выходом функционального источника. В свою очередь передаточная функция является функцией комплексной переменной s .

ПРИМЕЧАНИЕ

Символ "Λ", обозначающий в LTspice логическую операцию XOR, в выражении Лапласа используется в качестве символа возведения в степень.

При расчете частотных характеристик (АС-анализ) переменная s заменяется выражением $\sqrt{-1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$. Для перехода во временную область (Transient анализ) путем обратного преобразования Фурье частотной характеристики определяется импульсная переходная характеристика передаточной функции. Затем путем свертки импульсной характеристики с входным сигналом определяется выходной переходной процесс (<http://www.analog.com.ru/Public/6.pdf>). Встроенный алгоритм быстрого преобразования Фурье (FFT) использует параметры *window*, *Nfft* и сам выбирает для них подходящие значения. Параметр *window* определяет разрешение по частоте, а параметр *Nfft* — самую верхнюю частоту диапазона. Выбранные значения параметров выводятся в файл отчета с расширением *log*. При желании эти параметры можно указать принудительно.

Функциональный источник зачастую может освободить нас от необходимости моделирования достаточно сложного устройства. Например, часто возникает необходимость в генераторе, формирующем какой-то периодический ШИМ-сигнал. Предположим, что нам для моделирования генератора синусоиды бесперебойного источника питания, нужен соответствующий генератор, формирующий противофазный ШИМ-сигнал для управления мостовым DC—AC-преобразователем. Чтобы создать такой генератор, потребуется как минимум генератор опорной синусоиды, генератор пилообразного напряжения, источник постоянного напряжения, для формирования "мертвого" времени, и два компаратора. Все это окажется не нужным, если использовать два функциональных источника напряжения.

Источник B1 формирует напряжение, определяемое выражением:

$$V = (0.5 + 0.5 * \sin(2 * \pi * F * time)) > \\ > \text{if} \left(\frac{time}{T} - \text{int} \left(\frac{time}{T} \right), 1 - 2 * \frac{time}{T} + \text{int} \left(2 * \frac{time}{T} \right), 2 * \frac{time}{T} - \text{int} \left(2 * \frac{time}{T} \right) \right) + \\ + Td/T.$$

Источник B2 формирует напряжение, определяемое выражением:

$$V = (0.5 + 0.5 * \sin(2 * \pi * F * time)) < \\ < \text{if} \left(\frac{time}{T} - \text{int} \left(\frac{time}{T} \right), 1 - 2 * \frac{time}{T} + \text{int} \left(2 * \frac{time}{T} \right), 2 * \frac{time}{T} - \text{int} \left(2 * \frac{time}{T} \right) \right) - Td/T.$$

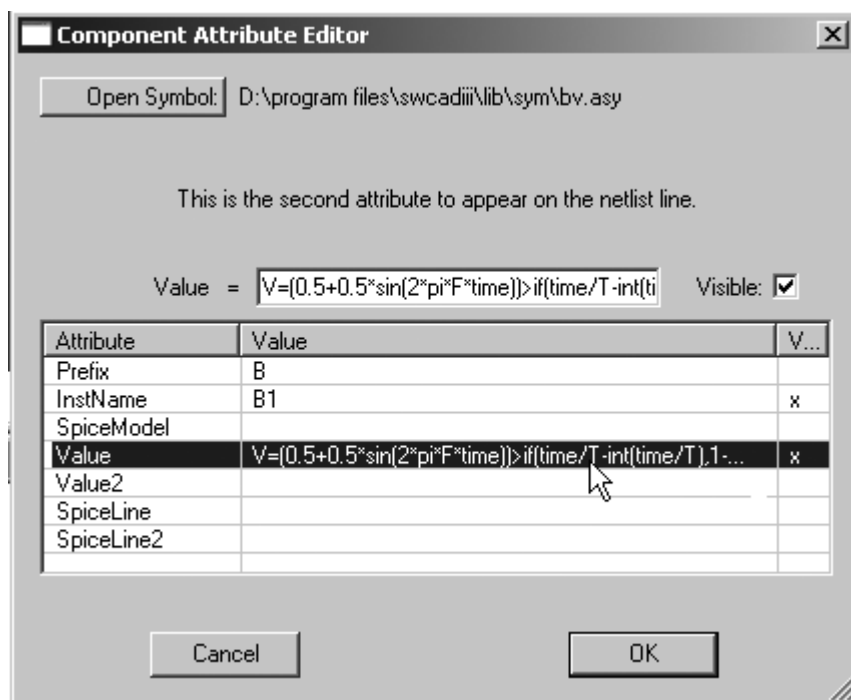


Рис. 3.11. Окно настройки функционального источника напряжения

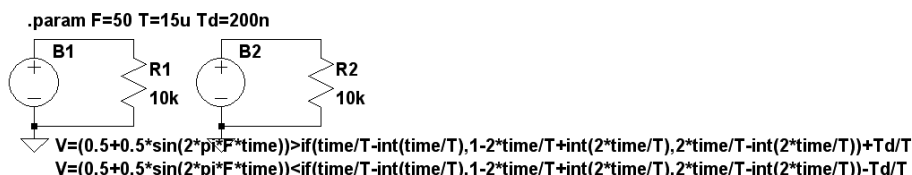
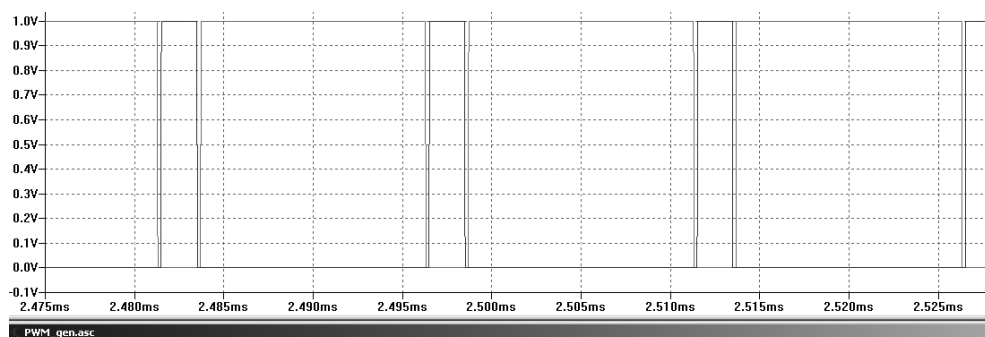


Рис. 3.12. ШИМ-генератор на функциональном источнике напряжения

Каждое выражение вводится в строке **Value** окна настройки соответствующего источника (рис. 3.11).

Для указания частоты модуляции, частоты ШИМ и "мертвого" времени можно использовать директиву `.param F=50 T=15u Td=200n`.

На рис. 3.12 показан результат моделирования работы генератора, формирующего противофазный ШИМ-сигнал, модулированный частотой 50 Гц.

3.3. C — конденсатор

Имена элементов: CAP, POLCAP.

Элемент CAP соответствует обычному конденсатору, а POLCAP — полярному. Оба элемента имеют одну и ту же встроенную модель и отличаются лишь внешним видом символов. Соответствующие символы расположены в корневом разделе встроенной библиотеки программы LTspice. Их внешний вид изображен на рис. 3.13.

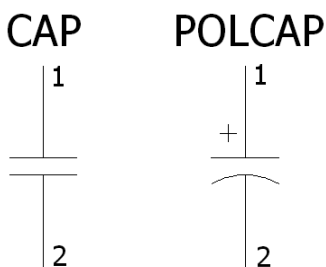


Рис. 3.13. Конденсаторы

Текстовый синтаксис:

```
Cnnn N1 N2 <Емкость> [IC=<значение>] [RSER=<значение>]
+ [LSER=<значение>] [RPAR=<значение>] [CPAR=<значение>]
[M=<значение>]
+ [RLSHUNT=<значение>] [TEMP=<значение>]
```

Строка описания, кроме емкости конденсатора, позволяет определить множество дополнительных параметров, соответствующих эквивалентной схеме модели конденсатора, изображенной на рис. 3.14.

В табл. 3.4 перечислены и описаны параметры конденсатора.

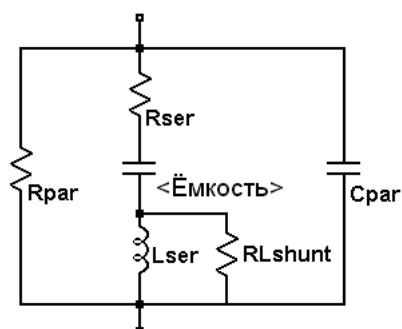


Рис. 3.14. Эквивалентная схема модели конденсатора

Таблица 3.4. Параметры конденсатора

| Обозначение | Поле в меню настройки | Ед. измерения | Описание |
|--------------|-----------------------------|---------------|--|
| C | Capacitance | Ф | Емкость конденсатора |
| R_{ser} | Equiv. Series Resistance | Ом | Эквивалентное последовательное сопротивление |
| L_{ser} | Equiv. Series Inductance | Гн | Эквивалентная последовательная индуктивность |
| R_{par} | Equiv. Parallel Resistance | Ом | Эквивалентное параллельное сопротивление |
| C_{par} | Equiv. Parallel Capacitance | Ф | Эквивалентная параллельная емкость |
| R_{lshunt} | — | Ом | Сопротивление шунтирующее L_{ser} |
| M | — | — | Если несколько аналогичных конденсаторов включены параллельно, то этим параметром можно указать их число |
| $temp$ | — | °C | Температура (передается в блок tempcos модели конденсатора, если она учитывает его температурные дрейфы) |

Таблица 3.4 (окончание)

| Обозначение | Поле в меню настройки | Ед. измерения | Описание |
|-------------|---------------------------|---------------|--|
| I_c | — | В | Начальное напряжение (используется при transient анализе, если установлен флаг uic) |
| — | Voltage Rating | В | Номинальное напряжение. Параметр при моделировании не учитывается |
| — | RMS Current Rating | А | Номинальный действующий ток. Параметр при моделировании не учитывается |
| — | Mean Time Between Failure | ч | Среднее время восстановления. Параметр при моделировании не учитывается |
| — | Parts Per Package | — | Количество конденсаторов в одном корпусе. Параметр при моделировании не учитывается |

Для определения параметров конденсатора в рабочем окне LTspice необходимо вызвать окно настройки **Capacitor** (рис. 3.15), щелкнув правой кнопкой мышки по его символу. Как видно из табл. 3.4, параметры $Rlshunt$, M , $temp$, I_c в меню настройки не учтены. При необходимости эти параметры могут быть записаны в текстовом формате через пробел после любого учтенного параметра. Например, на рис. 3.15 таким образом в строке **Capacitance** введено количество параллельных конденсаторов $M = 2$.

По возможности, при моделировании конденсатора его паразитные составляющие не стоит вводить в виде независимых элементов. Для этого лучше использовать соответствующие параметры модели. В LTspice используется своя аналитическая технология моделирования структуры конденсатора, без увеличения общего количества узлов схемы. В результате это позволяет уменьшить матрицу симуляции, ускоряет решение и улучшает его сходимость.

Capacitor - C1

Manufacturer:
 Part Number:
 Type:
 Select Capacitor

OK
 Cancel

Capacitor Properties

Capacitance[F]: 100p m=2
 Voltage Rating[V]:
 RMS Current Rating[A]:
 Equiv. Series Resistance[Ω]:
 Equiv. Series Inductance[H]:
 Equiv. Parallel Resistance[Ω]:
 Equiv. Parallel Capacitance[F]:
 Mean Time Between Failures[hr]:
 Parts Per Package:

Рис. 3.15. Меню настройки конденсатора

ПРИМЕЧАНИЕ

Модель конденсатора очень удобно использовать для моделирования пьезоэлектрического кристалла, т. к. она содержит подходящий набор паразитных элементов.

Существует возможность задания нелинейного конденсатора, емкость которого зависит от приложенного напряжения (варикап). В этом случае вместо прямого определения емкости нужно записать выражение, определяющее его заряд.

Текстовый синтаксис: Cnnn N1 N2 Q = <выражение> [IC = <значение>] [M = <значение>]

В меню настройки конденсатора выражение заряда вводится в окошке **Capacitance** вместо емкости.

Специальная переменная x означает напряжение на конденсаторе. Например, если нам нужно таким образом определить обычный конденсатор емкостью 100 пФ, то для этого потребуется текстовая строчка:

```
Cnnn N1 N2 Q=100p*x
```

Если требуется резкое изменение емкости 100 пФ до 300 пФ при изменении полярности напряжения, то для этого потребуется текстовая строчка:

```
Cnnn N1 N2 Q=x*if (x <0,100p, 300p)
```

3.4. D — диод

Имена элементов: DIODE, ZENER, SCHOTTKY, VARACTOR.

Все эти элементы имеют одну и ту же встроенную модель и отличаются лишь внешним видом символов. Соответствующие символы расположены в корневом разделе встроенной библиотеки программы LTspice. Их внешний вид изображен на рис. 3.16.

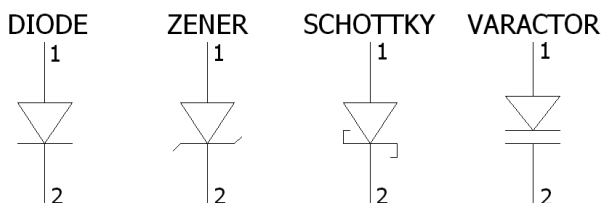



Рис. 3.16. Диоды

Текстовый синтаксис:

```
Dnnn N1 N2 <имя модели> [AREA] [OFF] [M=<значение>] [N=<значение>]
[temp=<значение>]
```

$N1$ и $N2$ — узлы, к которым подключается диод. Далее, в обязательном порядке, следует имя модели диода. Сама модель диода определяется при помощи директивы `.MODEL`. Для размещения этой директивы в рабочем поле программы LTspice необходимо вызвать окно редактирования текста **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме). Это окно (рис. 3.17) вызывается с помощью команды **Edit** (Редактировать) | **SPICE directive** (SPICE директиву), нажатием клавиши `<C>` или нажатием кнопки  на панели инструментов.

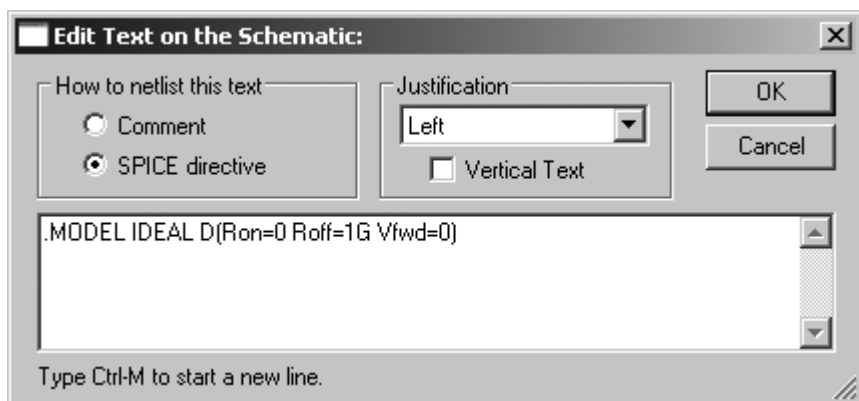


Рис. 3.17. Окно редактирования текста
Edit Text on the Schematic:

Имя модели присваивается диоду в качестве его типа. Чтобы отредактировать тип, заданный по умолчанию (для диода задан тип D), необходимо, щелкнув правой кнопкой мышки по названию типа, в появившемся окне редактирования **Enter new Value** (Ввести новое значение) ввести требуемое имя модели (рис. 3.18).

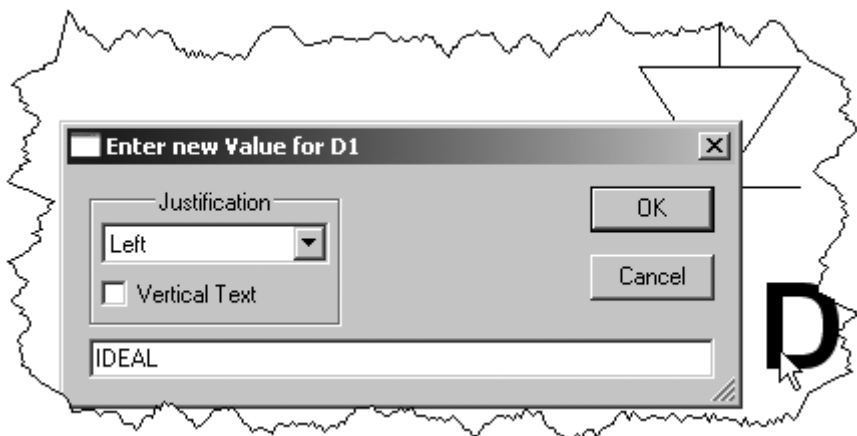


Рис. 3.18. Назначение модели для диода

В LTspice доступны две модели диода. Первая модель является кусочно-линейной моделью идеализированного диода. Эта модель имеет три линей-

ных региона проводимости: прямая проводимость, запертое состояние и обратный пробой. В табл. 3.5 указаны параметры этой модели диода.

Таблица 3.5. Параметры модели идеализированного диода

| Обозначение | Описание | Единицы измерения | Значение по умолчанию |
|------------------|--|-------------------|-----------------------|
| <i>Ron</i> | Сопротивление прямой проводимости | Ом | 1 |
| <i>Roff</i> | Сопротивление в запертом состоянии | Ом | $1/Gmin$ |
| <i>Vfwd</i> | Пороговое напряжение прямой проводимости | В | 0 |
| <i>Vrev</i> | Напряжение обратного пробоя | В | Бесконечное |
| <i>Rrev</i> | Сопротивление обратного пробоя | Ом | <i>Ron</i> |
| <i>Ilimit</i> | Прямой предельный ток | А | Бесконечный |
| <i>revIlimit</i> | Обратный предельный ток | А | Бесконечный |
| <i>epsilon</i> | Ширина прямой квадратичной области | В | 0 |
| <i>repsilon</i> | Ширина обратной квадратичной области | В | 0 |

Нелинейность прямой проводимости и обратного пробоя можно задать при помощи параметров *Ilimit* и *revIlimit*. Для получения гладкого перехода между запертым и проводящими состояниями диода можно использовать параметры *epsilon* и *epsilon*. Параметр *epsilon* влияет на область прямой проводимости, а *epsilon* — на область обратного пробоя. В этом случае переход вольт-амперной характеристики диода между выключенным и включенным состояниями определяется квадратичной функцией (параболой) и далее пере-

секает уровень предельного тока I_{limit} ($revI_{limit}$) при напряжении ϵ_{psilon} (ϵ_{psilon}).

Для рассмотренной модели параметр M устанавливает число аналогичных диодов, включенных параллельно, а параметр N — число диодов, включенных последовательно.

Идеализированная модель не учитывает временных характеристик диода и поэтому может использоваться только для обзорного или демонстрационного моделирования. Другая модель, используемая в LTspice, представляет собой расширенную стандартную SPICE-модель и позволяет более точное моделирование диода, включая моделирование его поведения в области пробоя, а также тока и времени обратного восстановления. В табл. 3.6 указаны параметры этой модели диода.

Таблица 3.6. Параметры расширенной стандартной SPICE-модели диода

| Обозначение | Описание | Единицы измерения | Значение по умолчанию |
|-------------|---|-------------------|-----------------------|
| I_s | Ток насыщения | А | 10^{-14} |
| R_s | Объемное сопротивление | Ом | 0 |
| N | Коэффициент инжекции | — | 1 |
| T_t | Время переноса заряда | с | 0 |
| C_{jo} | Барьерная емкость перехода при нулевом смещении | Ф | 0 |
| V_j | Потенциал перехода | В | 1 |
| M | Коэффициент лавинного умножения | — | 0.5 |
| E_g | Ширина запрещенной зоны | эВ | 1.11 |
| X_{TI} | Температурный коэффициент тока насыщения | — | 3 |

Таблица 3.6 (окончание)

| Обозначение | Описание | Единицы измерения | Значение по умолчанию |
|-------------|---|-------------------|-----------------------|
| Kf | Коэффициент фликкер-шума | — | 0 |
| Af | Показатель степени фликкер-шума | — | 1 |
| Fc | Коэффициент емкости прямо смещенного перехода | — | 0.5 |
| BV | Обратное напряжение пробоя | V | — |
| Ibv | Начальный ток пробоя | A | 1e-10 |
| $Tnom$ | Температура измерений | °C | 27 |
| I_{sr} | Параметр тока рекомбинации | A | 0 |
| Nr | Коэффициент эмиссии I_{sr} | — | 2 |
| I_{kf} | Предельный ток при высоком уровне инжекции | A | Бесконечный |
| T_{ikf} | Линейный температурный коэффициент I_{kf} | °C ⁻¹ | 0 |
| $Trs1$ | Линейный температурный коэффициент R_s | °C ⁻¹ | 0 |
| $Trs2$ | Квадратичный температурный коэффициент R_s | °C ⁻² | 0 |

Параметр *area* называется коэффициентом площади и определяет число одинаковых диодов, включенных параллельно. Если коэффициент площади не указан, то по умолчанию принимается равным 1. Параметр *off* используется при DC-анализе и показывает начальное состояние диода. При помощи параметра *temp* можно указать рабочую температуру диода. Значение темпе-

ратуры, определенное этим параметром, аннулирует температуру, указанную в строке директивы .OPTION.

Для модели можно определить максимальные значения напряжения, тока и рассеиваемой мощности. Эти параметры не будут оказывать влияния на электрическое поведение модели, но позволят симулятору LTspice контролировать, когда диод используется за пределами своих возможностей. В табл. 3.7 перечислены эти дополнительные параметры модели. Дополнительные параметры не масштабируются параметром *area*.

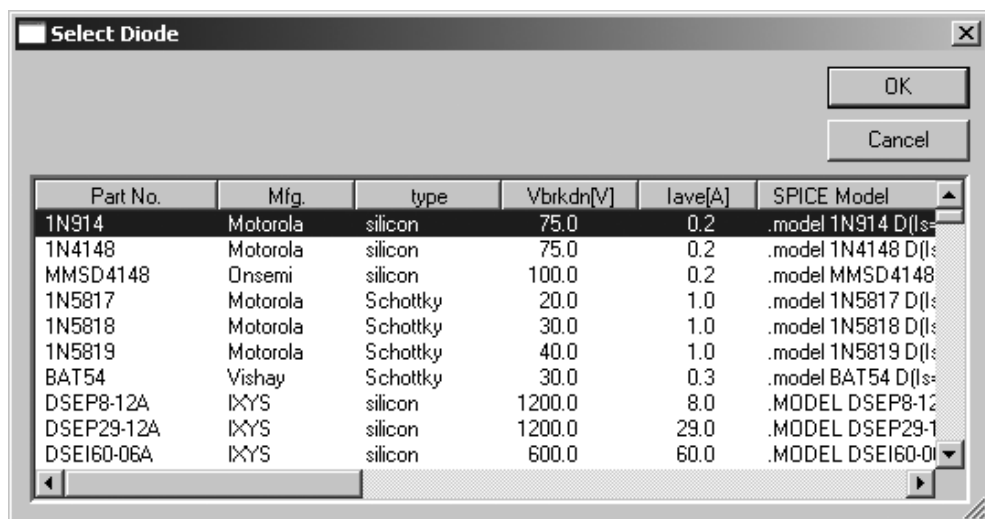


Рис. 3.19. Внешний вид окна Select Diode

Таблица 3.7. Дополнительные параметры модели

| Имя | Описание | Единицы измерения |
|-----------|------------------------------|-------------------|
| V_{pk} | Пиковое напряжение | B |
| I_{pk} | Пиковый ток | A |
| I_{ave} | Максимальный средний ток | A |
| I_{rms} | Максимальный действующий ток | A |

Таблица 3.7 (окончание)

| Имя | Описание | Единицы измерения |
|-------------|------------------------------------|-------------------|
| <i>diss</i> | Максимальная рассеиваемая мощность | Вт |
| <i>mfg</i> | Наименование производителя | — |
| <i>type</i> | Наименование типа | — |

При просмотре библиотеки моделей диодов, параметры *mfg*, *type*, *Vpk*, *Iave* отображаются рядом с названием модели диода, что облегчает поиск подходящей модели. Для примера на рис. 3.19 показано окно выбора диода (**Select Diode**), где отображены указанные параметры.

3.5. E — источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН)

Имена элементов: E, E2.

Символы расположены в корневом разделе встроенной библиотеки программы LTspice. Их внешний вид изображен на рис. 3.20.

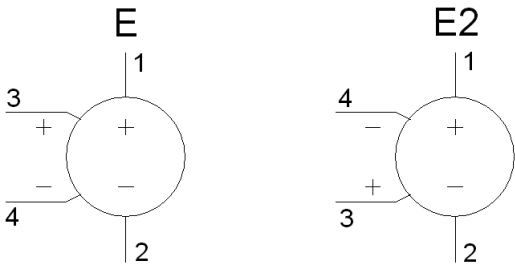


Рис. 3.20. Источник напряжения, управляемый напряжением

Существует пять типов источников напряжения, управляемых напряжением (ИНУН).

3.5.1. Первый тип ИНУН

Первый тип имеет текстовый синтаксис:

```
Exxx N1 N2 N3 N4 <GAIN>
```

Этот тип ИНУН обеспечивает выходное напряжение между узлами N1 и N2, которое имеет линейную зависимость от управляющего напряжения, приложенного между узлами N3 и N4. Связь между выходным и управляющим напряжением ИНУН устанавливается при помощи коэффициента передачи GAIN.

3.5.2. Второй тип ИНУН

Второй тип имеет текстовый синтаксис:

```
Exxx N1 N2 N3 N4 TABLE=(<пара значений>, <пара значений>, ...)
```

Этот тип ИНУН обеспечивает более сложную зависимость между выходным и управляющим напряжением, которая задается в виде таблицы. Таблица вводится при помощи параметра TABLE и представляет список пар значений. Первое значение пары определяет управляющее напряжение, а второе значение пары — соответствующее ему выходное напряжение ИНУН. Между указанными табличными значениями выход линейно интерполируется. Если управляющее напряжение выходит за границы таблицы, то выходное напряжение ИНУН приравнивается к своему последнему табличному значению.

3.5.3. Третий тип ИНУН

Третий тип имеет текстовый синтаксис:

```
Exxx N1 N2 N3 N4 LAPLACE=<функция(s)> [WINDOW=<время>]  
[NFFT=<число>] + [MTOL=<число>]
```

Передаточная функция этого схемного элемента определена с помощью преобразования Лапласа. В свою очередь передаточная функция является функцией комплексной переменной s .

ПРИМЕЧАНИЕ

Символ "^", обычно в LTspice обозначающий логическую операцию XOR, в выражении Лапласа используется в качестве символа возведения в степень.

При расчете частотных характеристик (АС-анализ) переменная s заменяется выражением $\sqrt{-1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$. Для перехода во временную область (Transient анализ), путем обратного преобразования Фурье частотной характеристики определяется импульсная переходная характеристика передаточной функции. Затем путем свертки импульсной характеристики с входным сигналом определяется выходной переходной процесс (<http://www.analog.com.ru/Public/6.pdf>). Встроенный алгоритм быстрого преобразования Фурье (FFT) использует параметры WINDOW и NFFT и сам выбирает для них подходящие значения. Параметр WINDOW определяет разрешение по частоте, а параметр NFFT — самую верхнюю частоту диапазона. Выбранные значения параметров выводятся в файл отчета с расширением log. При желании эти параметры можно указать принудительно.

3.5.4. Четвертый тип ИНУН

Четвертый тип, по сути, является альтернативной формой задания функционального источника напряжения и имеет текстовый синтаксис: Exxx N1 N2 VALUE={<выражение>}.

В выражении, описывающем поведение источника, используются те же математические и логические операции и функции, которые используются для функционального источника с индексом В.

3.5.5. Пятый тип ИНУН

Пятый тип имеет текстовый синтаксис:

```
Exxx N1 N2 POLY(<N>) <(узел1+,узел1-) (узел2+,узел2-)>  
+ ... (узелN+,узелN-)> <C0 C1 C2 C3 C4 ... >
```

Этот тип является устаревшим способом представления функционального источника напряжения с помощью полинома и в настоящее время практически не используется SPICE-симуляторами.

Количество пар управляющих узлов должно соответствовать размерности N полинома. Если напряжение между парными узлами соответственно назвать как V_1, V_2, \dots, V_N , то коэффициенты C будут связаны с полиномом в соответствии со следующим выражением:

$$\begin{aligned}
V_{вых} = & C_0 + \\
& + C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2 + \dots C_N \cdot V_N + \\
& + C_{N+1} \cdot V_1^2 + C_{N+2} \cdot V_1 \cdot V_2 + \dots C_{2 \cdot N} \cdot V_1 \cdot V_N + \\
& + C_{2 \cdot N+1} \cdot V_2^2 + C_{2 \cdot N+2} \cdot V_2 \cdot V_3 + \dots C_{3 \cdot N-1} \cdot V_2 \cdot V_N + \\
& \cdot \\
& \cdot \\
& + C_{N!/(2(N-2)!)+2 \cdot N} \cdot V_N^2 + \\
& + C_{N!/(2(N-2)!)+2 \cdot N+1} \cdot V_1^3 + C_{N!/(2(N-2)!)+2 \cdot N+2} \cdot V_1^2 \cdot V_2 \dots
\end{aligned}$$

Для одномерного полинома общий случай сводится к виду:

$$V_{вых} = C_0 + C_1 \cdot V + C_2 \cdot V^2 + \dots C_N \cdot V^N.$$

Нет необходимости приводить здесь все коэффициенты полинома, но вводить их необходимо подряд, указывая для отсутствующих нулевое значение. Рассмотрим несколько примеров использования полинома для описания функционального источника напряжения.

Пример пятивходового сумматора-вычитателя:

```
E1 N001 N002 POLY(5) (N003,0) (N004,N005) (N006,0) (N015,0) (N022,0)
0 1 1 1 -1 1
```

Пример трехвходового умножителя:

```
E1 N005 N012 POLY(3) (N001,0) (N002,0) (N003,0) 0 0 0 0 0 1 1
```

Для определения параметров ИНУН в рабочем окне LTspice необходимо вызвать окно настройки **Component Attribute Editor** (Редактор атрибутов компонента), изображенное на рис. 3.21, щелкнув правой кнопкой мышки по символу элемента. Параметры настройки ИНУН вносятся, по мере заполнения, в поля **Value**, **Value2**, **SpiceLine** и **SpiceLine2**.

На рис. 3.21 в качестве примера приведена настройка ИНУН, который с помощью таблицы имитирует передаточную характеристику усилителя ошибки ШИМ-контроллера TL494. Качество имитации можно оценить по следующему рисунку, где изображены передаточная характеристика усилителя ошибки, взятая из справочных данных на TL494 (<http://focus.ti.com/lit/an/slva001d/slva001d.pdf>) (рис. 3.22, а), и передаточная характеристика настроенного ИНУН (рис. 3.22, б).

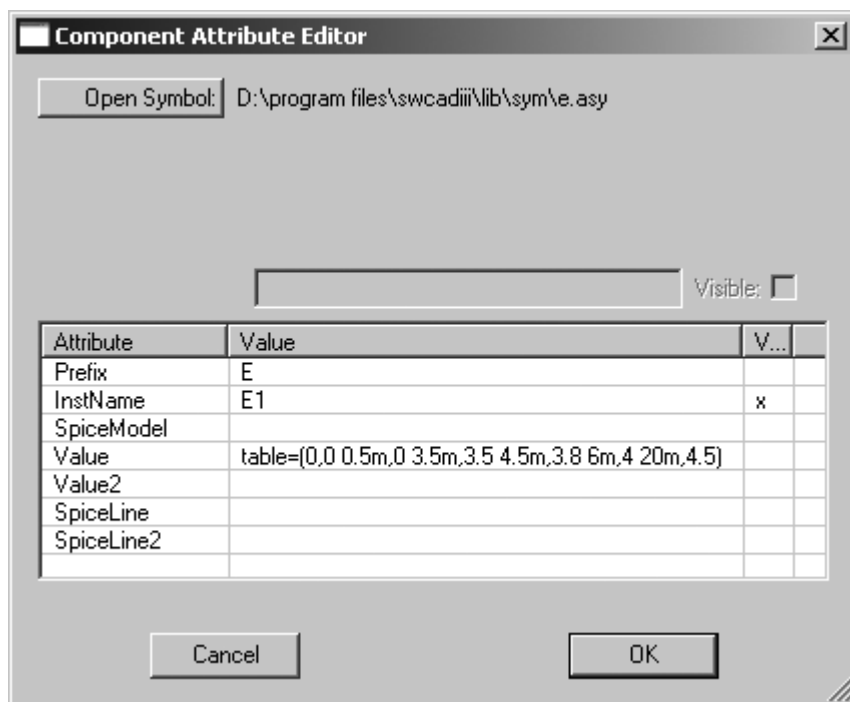
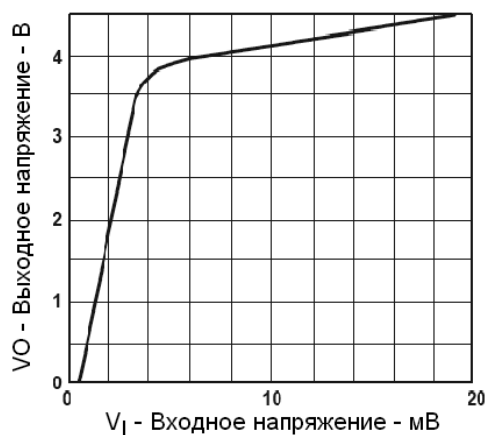
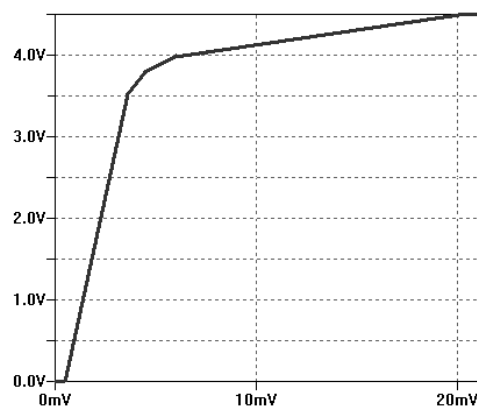


Рис. 3.21. Окно настройки ИДУН



а



б

Рис. 3.22. Моделирование передаточной характеристики усилителя ошибки ШИМ-контроллера TL494

3.6. F — источник тока, управляемый током (ИТУТ)

Имя элемента: F.

Символ источника тока, управляемого током, расположен в корневом разделе встроенной библиотеки программы LTspice. Внешний вид символа изображен на рис. 3.23.

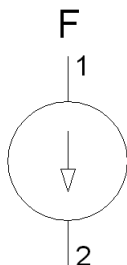


Рис. 3.23. Источник тока, управляемый током

Существует три типа источника тока, управляемого током.

3.6.1. Первый тип ИТУТ

Первый тип имеет текстовый синтаксис:

`Fxxx N1 N2 <VNAME> <GAIN>`

ИТУТ генерирует ток между `n1` и `n2`. Этот ток в `gain` раз больше тока, протекающего через источник напряжения `vname`. Причем для ИТУТ и источника напряжения положительным направлением тока считается направление от вывода 1 к выводу 2.

3.6.2. Второй тип ИТУТ

Второй тип имеет текстовый синтаксис: `Fxxx N1 N2 VALUE={<выражение>}`.

Этот тип является альтернативной формой задания функционального источника тока.

В выражении, описывающем поведение источника, используются те же математические и логические операции и функции, которые используются для функционального источника с индексом В.

3.6.3. Третий тип ИТУТ

Третий тип имеет текстовый синтаксис:

Fxxx N1 N2 POLY(<N>) <V1 V2 V3 V4 ... VN> <C0 C1 C2 C3 C4 ... >

Этот тип является устаревшим способом представления функционального источника тока с помощью полинома и в настоящее время практически не используется SPICE-симуляторами.

Количество управляющих источников напряжения должно соответствовать размерности N полинома. Если токи, протекающие через управляющие источники напряжения, соответственно назвать как I_1, I_2, \dots, I_N , то коэффициенты C будут связаны с полиномом в соответствии со следующим выражением:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{вых}} = & C_0 + \\
 & + C_1 \cdot I_1 + C_2 \cdot I_2 + \dots C_N \cdot I_N + \\
 & + C_{N+1} \cdot I_1^2 + C_{N+2} \cdot I_1 \cdot I_2 + \dots C_{2 \cdot N} \cdot I_1 \cdot I_N + \\
 & + C_{2 \cdot N+1} \cdot I_2^2 + C_{2 \cdot N+2} \cdot I_2 \cdot I_3 + \dots C_{3 \cdot N-1} \cdot I_2 \cdot I_N + \\
 & \cdot \\
 & \cdot \\
 & + C_{N!/(2(N-2)!)+2 \cdot N} \cdot I_N^2 + \\
 & + C_{N!/(2(N-2)!)+2 \cdot N+1} \cdot I_1^3 + C_{N!/(2(N-2)!)+2 \cdot N+2} \cdot I_1^2 \cdot I_2 \dots
 \end{aligned}$$

Для одномерного полинома общий случай сводится к виду:

$$I_{\text{вых}} = C_0 + C_1 \cdot I + C_2 \cdot I^2 + \dots C_N \cdot I^N.$$

Нет необходимости вводить все коэффициенты полинома, но вводить их необходимо подряд, указывая для отсутствующих нулевое значение. Рассмотрим несколько примеров использования полинома для описания функционального источника тока.

Пример четырехвходового сумматора-вычитателя:

F1 N011 0 POLY(4) V1 V3 V14 V5 0 1 1 -1 1

Пример трехвходового умножителя:

F1 N005 N012 POLY(3) V2 V5 V6 0 0 0 0 0 1 1

Для определения параметров ИТУТ в рабочем окне LTspice необходимо вызывать окно настройки **Component Attribute Editor** (Редактор атрибутов компонента), изображенное на рис. 3.24, щелкнув правой кнопкой мышки по символу элемента. Параметры настройки ИТУТ вносятся, по мере заполнения, в поля **Value**, **Value2**, **SpiceLine** и **SpiceLine2**.

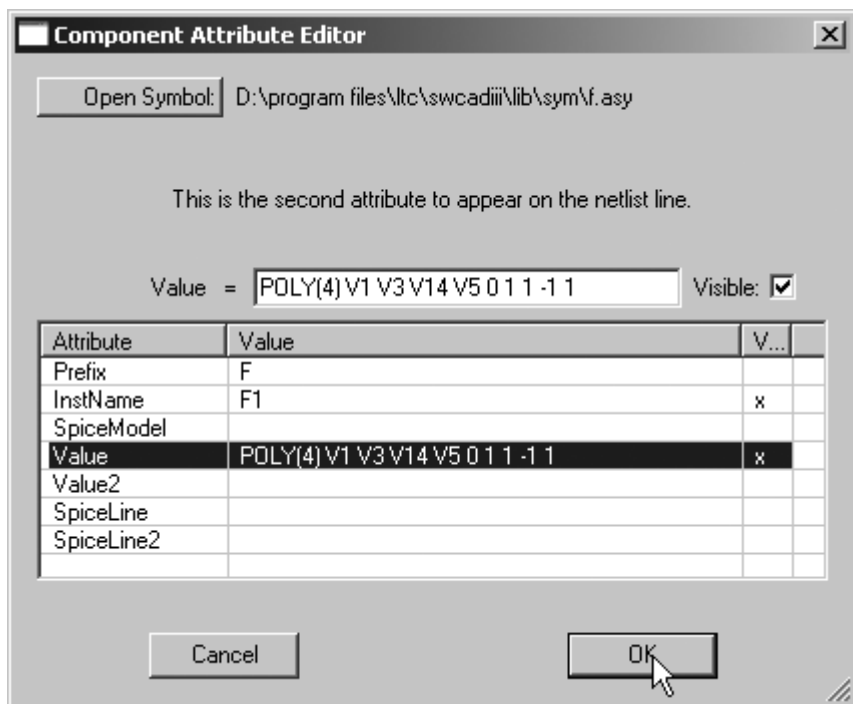


Рис. 3.24. Окно настройки ИТУТ

3.7. G — источник тока, управляемый напряжением (ИТУН)

Имена элементов: G, G2.

Символы элементов расположены в корневом разделе встроенной библиотеки программы LTspice. Их внешний вид изображен на рис. 3.25.

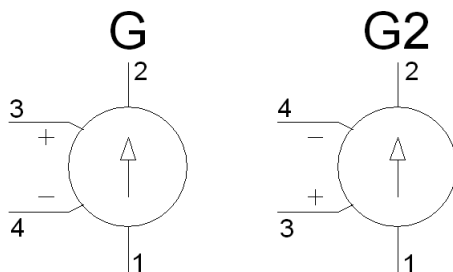


Рис. 3.25. Источник тока, управляемый напряжением

Существует пять типов источников тока, управляемых напряжением.

3.7.1. Первый тип ИТУН

Первый тип имеет текстовый синтаксис:

Gxxx N1 N2 N3 N4 <GAIN>

Этот элемент обеспечивает выходной ток между узлами n1 и n2, который имеет линейную зависимость от управляющего напряжения, приложенного между узлами n3 и n4. Связь между выходным и управляющим напряжением ИТУН устанавливается при помощи коэффициента передачи GAIN.

3.7.2. Второй тип ИТУН

Второй тип имеет текстовый синтаксис:

Gxxx N1 N2 N3 N4 TABLE=(<пара значений>, <пара значений>, ...)

Этот тип ИТУН обеспечивает более сложную зависимость между выходным током и управляющим напряжением, которая задается в виде таблицы. Таблица вводится при помощи параметра TABLE и представляет собой список пар значений. Первое значение пары определяет управляющее напряжение, а второе значение пары — соответствующий ему выходной ток ИТУН. Между указанными табличными значениями выход линейно интерполируется. Если управляющее напряжение выходит за границы таблицы, то выходной ток ИТУН приравнивается к своему последнему табличному значению.

3.7.3. Третий тип ИТУН

Третий тип имеет текстовый синтаксис:

```
Gxxx N1 N2 N3 N4 LAPLACE=<FUNC(s)> [WINDOW=<время>] [NFFT=<число>]
[MTOL=<число>]
```

Передаточная функция этого типа ИТУН определена с помощью преобразования Лапласа. В свою очередь передаточная функция является функцией комплексной переменной s .

ПРИМЕЧАНИЕ

Символ " \wedge ", обычно в LTspice обозначающий логическую операцию XOR, в выражении Лапласа используется в качестве символа возведения в степень.

При расчете частотных характеристик (АС-анализ) переменная s заменяется выражением $\sqrt{-1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$. Для перехода во временную область (Transient анализ) путем обратного преобразования Фурье частотной характеристики определяется импульсная переходная характеристика передаточной функции. Затем путем свертки импульсной характеристики с входным сигналом определяется выходной переходной процесс (<http://www.analog.com.ru/Public/6.pdf>). Встроенный алгоритм быстрого преобразования Фурье (FFT) использует параметры *window* и *Nfft*, и сам выбирает для них подходящие значения. Параметр *window* определяет разрешение по частоте, а параметр *Nfft* — самую верхнюю частоту диапазона. Выбранные значения параметров выводятся в файл отчета с расширением *log*. При желании эти параметры можно указать принудительно.

3.7.4. Четвертый тип ИТУН

Четвертый тип, по сути, является альтернативной формой задания функционального источника тока и имеет текстовый синтаксис: `Gxxx N1 N2 value={<выражение>}`.

В выражении, описывающем поведение источника, используются те же математические и логические операции и функции, которые используются для функционального источника с индексом В.

3.7.5. Пятый тип ИТУН

Пятый тип имеет текстовый синтаксис:

```
Gxxx N1 N2 POLY(<N>) <(узел1+,узел1-) (узел2+,узел2-) ...
(узелN+,узел-)> <c0 c1 c2 c3 c4 ...>
```

Этот тип является устаревшим способом представления функционального источника тока с помощью полинома и в настоящее время практически не используется SPICE-симуляторами.

Количество пар управляющих узлов должно соответствовать размерности N полинома. Если напряжение между парными узлами соответственно назвать как $V_1, V_2, \dots V_N$, то коэффициенты C будут связаны с полиномом в соответствии со следующим выражением:

$$\begin{aligned}
 I_{вых} = & C_0 + \\
 & + C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2 + \dots C_N \cdot V_N + \\
 & + C_{N+1} \cdot V_1^2 + C_{N+2} \cdot V_1 \cdot V_2 + \dots C_{2 \cdot N} \cdot V_1 \cdot V_N + \\
 & + C_{2 \cdot N+1} \cdot V_2^2 + C_{2 \cdot N+2} \cdot V_2 \cdot V_3 + \dots C_{3 \cdot N-1} \cdot V_2 \cdot V_N + \\
 & \cdot \\
 & \cdot \\
 & + C_{N!/(2(N-2)!)+2 \cdot N} \cdot V_N^2 + \\
 & + C_{N!/(2(N-2)!)+2 \cdot N+1} \cdot V_1^3 + C_{N!/(2(N-2)!)+2 \cdot N+2} \cdot V_1^2 \cdot V_2 \dots
 \end{aligned}$$

Для одномерного полинома общий случай сводится к виду:

$$I_{вых} = C_0 + C_1 \cdot V + C_2 \cdot V^2 + \dots C_N \cdot V^N.$$

Нет необходимости вводить все коэффициенты полинома, но вводить их необходимо подряд, указывая для отсутствующих нулевое значение. Рассмотрим несколько примеров использования полинома для описания функционального источника тока.

Пример пятиходового сумматора-вычитателя:

```
G1 N005 N012 POLY(5) (N003,0) (N004,N001) (N006,0) (N015,0) (N022,0)
0 1 1 1 -1 1
```

Пример трехходового умножителя:

```
G2 N005 0 POLY(3) (N001,0) (N002,0) (N003,0) 0 0 0 0 0 1 1
```

Для определения параметров ИТУН в рабочем окне LTspice необходимо вызвать окно настройки **Component Attribute Editor** (Редактор атрибутов компонента), изображенное на рис. 3.26, щелкнув правой кнопкой мышки по символу элемента. Параметры настройки ИТУН вносятся, по мере заполнения, в поля **Value**, **Value2**, **SpiceLine** и **SpiceLine2**.

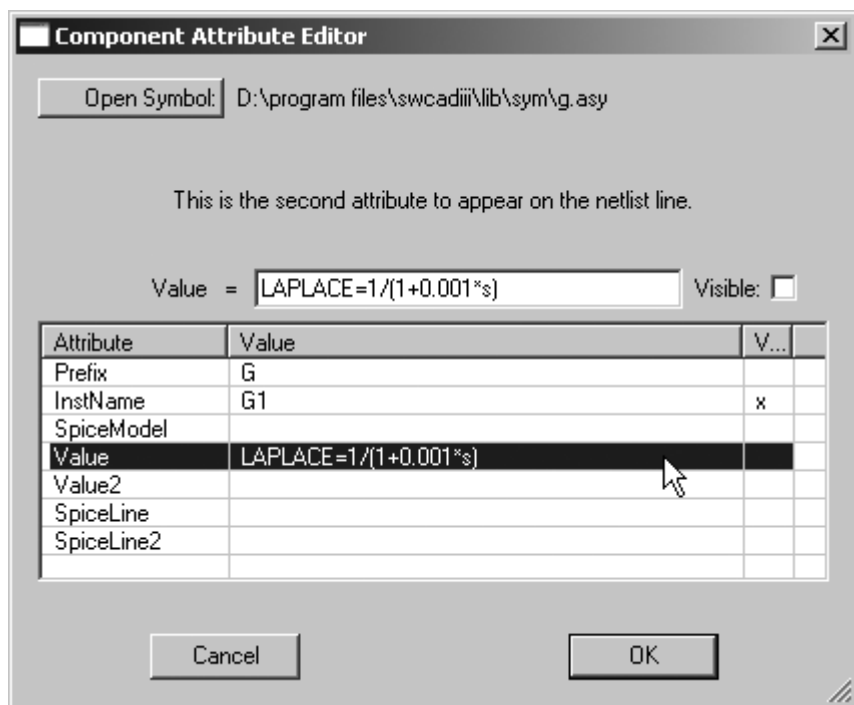


Рис. 3.26. Окно настройки ИТУН

3.8. Н — источник напряжения, управляемый током (ИНУТ)

Имя элемента: Н.

Символ источника напряжения, управляемого током, расположен в корневом разделе встроенной библиотеки программы LTspice. Внешний вид символа изображен на рис. 3.27.

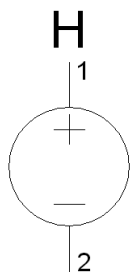


Рис. 3.27. Источник напряжения, управляемый током

Существует три типа источника напряжения управляемого током.

3.8.1. Первый тип ИНУТ

Первый тип имеет текстовый синтаксис: `Hxxx N1 N2 <VNAME> <GAIN>`.

ИНУТ прикладывает напряжение между узлами `n1` и `n2`. Это напряжение в `gain` раз больше тока, протекающего через источник напряжения `vname`. Положительным направлением управляющего тока считается направление от вывода 1 к выводу 2 `vname`.

3.8.2. Второй тип ИНУТ

Второй тип имеет текстовый синтаксис: `Hxxx N1 N2 VALUE={<выражение>}`.

Этот тип является альтернативной формой задания функционального источника напряжения.

В выражении, описывающем поведение источника, используются те же математические и логические операции и функции, которые используются для функционального источника с индексом `B`.

3.8.3. Третий тип ИНУТ

Третий тип имеет текстовый синтаксис:

`Hxxx N1 N2 POLY(<N>) <V1 V2 V3 V4 ... VN> <C0 C1 C2 C3 C4 ... >`

Этот тип является устаревшим способом представления функционального источника тока с помощью полинома и в настоящее время практически не используется SPICE-симуляторами.

Количество управляющих источников напряжения должно соответствовать размерности N полинома. Если токи, протекающие через управляющие источники напряжения, соответственно назвать как I_1, I_2, \dots, I_N , то коэффициенты C будут связаны с полиномом в соответствии со следующим выражением:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{вых}} = & C_0 + \\
 & + C_1 \cdot I_1 + C_2 \cdot I_2 + \dots C_N \cdot I_N + \\
 & + C_{N+1} \cdot I_1^2 + C_{N+2} \cdot I_1 \cdot I_2 + \dots C_{2 \cdot N} \cdot I_1 \cdot I_N + \\
 & + C_{2 \cdot N+1} \cdot I_2^2 + C_{2 \cdot N+2} \cdot I_2 \cdot I_3 + \dots C_{3 \cdot N-1} \cdot I_2 \cdot I_N + \\
 & \cdot \\
 & \cdot \\
 & + C_{N!/(2(N-2)!)+2 \cdot N} \cdot I_N^2 + \\
 & + C_{N!/(2(N-2)!)+2 \cdot N+1} \cdot I_1^3 + C_{N!/(2(N-2)!)+2 \cdot N+2} \cdot I_1^2 \cdot I_2 \dots
 \end{aligned}$$

Для одномерного полинома общий случай сводится к виду:

$$V_{\text{вых}} = C_0 + C_1 \cdot I + C_2 \cdot I^2 + \dots C_N \cdot I^N.$$

Нет необходимости вводить все коэффициенты полинома, но вводить их необходимо подряд, указывая для отсутствующих нулевое значение. Рассмотрим несколько примеров использования полинома для описания функционального источника тока.

Пример четырехвходового сумматора:

```
H1 N01 0 POLY(4) V2 V3 V4 V5 0 1 1 1 1
```

Пример трехвходового умножителя:

```
H1 N012 N005 POLY(3) V4 V5 V6 0 0 0 0 0 1 1
```

Для определения параметров ИНУТ в рабочем окне LTspice необходимо вызвать окно настройки **Component Attribute Editor** (Редактор атрибутов компонента), изображенное на рис. 3.28, щелкнув правой кнопкой мышки по символу элемента. Параметры настройки ИНУТ вносятся, по мере заполнения, в поля **Value**, **Value2**, **SpiceLine** и **SpiceLine2**.

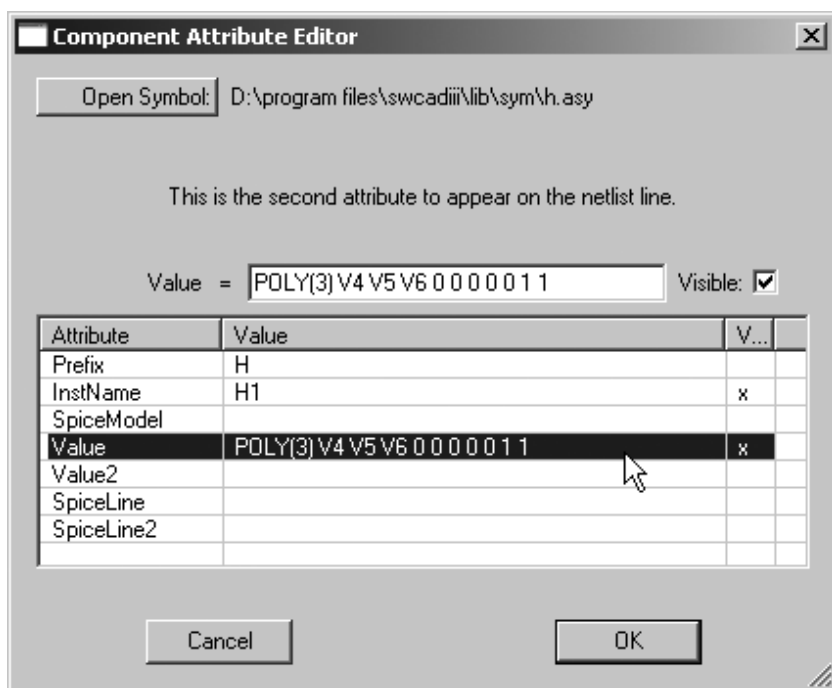


Рис. 3.28. Окно настройки ИНУТ

3.9. I — источник тока

Имя элемента: CURRENT.

Символ источника тока расположен в корневом разделе встроенной библиотеки программы LTspice. Внешний вид символа изображен на рис. 3.29.

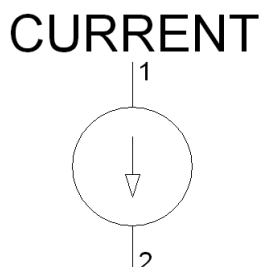


Рис. 3.29. Источник тока

Текстовый синтаксис: Ixxx N1 N2 <ток> [AC <амплитуда> [фазовый сдвиг]] [load].

Этот элемент генерирует ток между узлами n1 и n2. Достаточно щелкнуть правой кнопкой мышки по элементу, чтобы вызвать его окно настройки **Current Source** (Источник тока), изображенное на рис. 3.30.

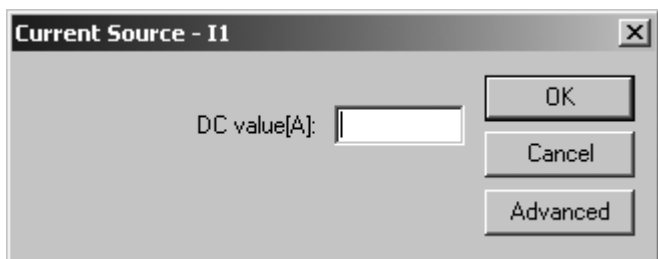


Рис. 3.30. Окно настройки источника тока

Это окно имеет только одну строчку **DC value(A)**, в которую можно вписать величину постоянного тока, генерируемого источником тока. Щелкнув по кнопке **Advanced** (Расширенные настройки), мы попадаем в окно **Independent Current Source** (Независимый источник тока), изображенное на рис. 3.31, в котором имеем возможность расширенной настройки источника тока.

Окно расширенной настройки имеет области **Functions** (Функции), **DC value** (Значение постоянного тока), **Small signal AC analysis(.AC)** (Малосигнальный анализ на переменном токе) и **Parasitic Properties** (Паразитные свойства), для каждой из которых можно выбрать опцию **Make this information visible on schematic** (Сделать эту информацию видимой на схеме), которая может делать видимой на схеме или скрывать соответствующую информацию.

На рис. 3.31 показан вид окна расширенной настройки для случая независимого источника постоянного тока, когда выбрана опция **none** (никакой) в области **Functions** (Функции). Здесь, как и в предыдущем окне, в строке **DC value** вписывается значение, определяющее постоянный ток, генерируемый источником тока.

Если источник тока используется для малосигнального анализа на переменном токе (.AC), то в строке **AC Amplitude** (Амплитуда переменного тока) следует ввести амплитуду переменного тока, а в строке **AC Phase** фазовый сдвиг. В текстовой версии описания источника тока амплитуда и фазовый сдвиг вводятся через пробел после параметра AC.

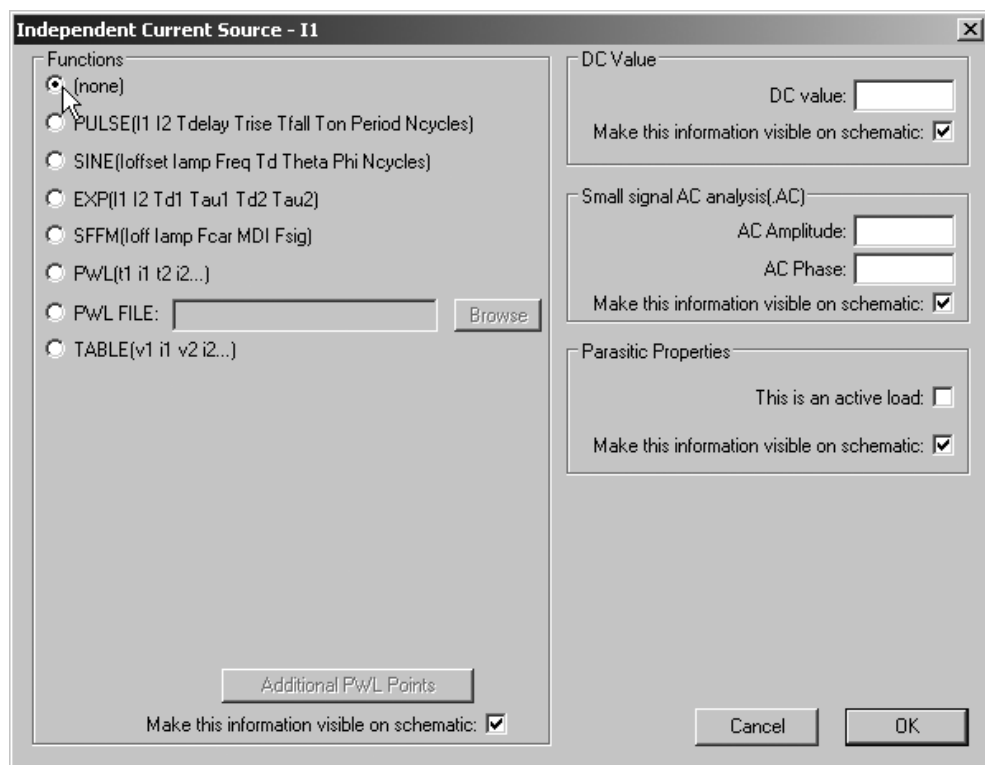


Рис. 3.31. Окно расширенной настройки источника тока

Чтобы превратить источник тока в нагрузку, нужно отметить галочкой опцию **load** (нагрузка). В текстовой версии описания надо просто указать параметр **LOAD**. В отличие от обычного источника тока, нагрузка потребляет указанный ток только в том случае, если к ней приложено положительное напряжение больше нуля (плюс к N1, минус к N2). В случае отрицательного или нулевого напряжения ток не потребляется.

3.9.1. Источник импульсного тока

Текстовый синтаксис: `Ixxx N1 N2 PULSE(Ioff Ion Tdelay Trise Tfall Ton Tperiod Ncycles)`.

Этот синтаксис определяет зависимый от времени источник импульсного тока, который выбирается установкой опции **PULSE(I1 I2 Tdelay Trise Tfall**

Ton Period Ncycles) в области **Functions** (Функции) окна расширенной настройки (рис. 3.31).

Параметры настройки источника импульсного тока перечислены в табл. 3.8

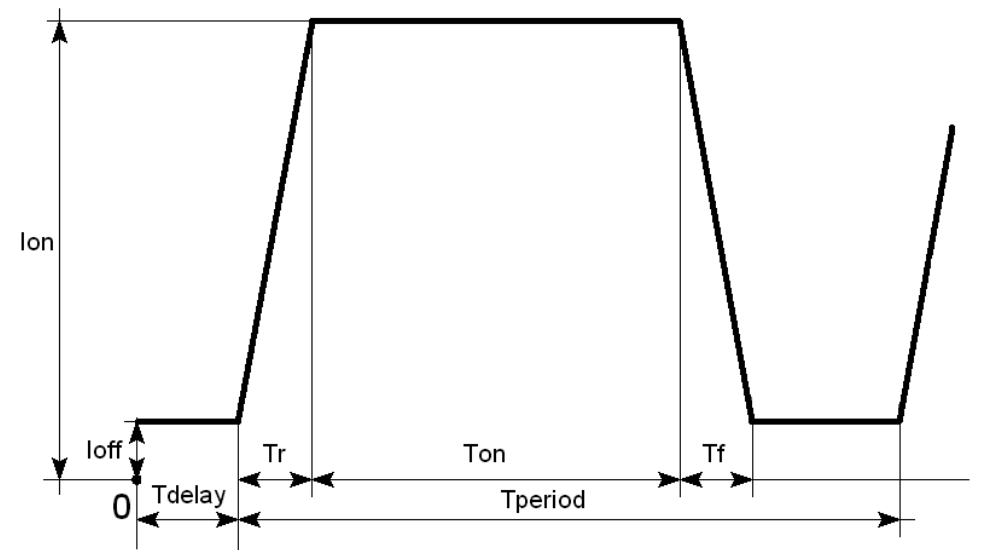


Рис. 3.32. Сигнал, формируемый импульсным источником тока

Таблица 3.8. Параметры настройки источника импульсного тока

| Обозначение | Описание | Единицы измерения |
|---------------|---------------------------|-------------------|
| <i>Ioff</i> | Начальное значение | A |
| <i>Ion</i> | Импульсное значение | A |
| <i>Tdelay</i> | Задержка | с |
| <i>Tr</i> | Время нарастания импульса | с |
| <i>Tf</i> | Время спада импульса | с |
| <i>Ton</i> | Ширина импульса | с |

Таблица 3.8 (окончание)

| Обозначение | Описание | Единицы измерения |
|----------------|--|-------------------|
| <i>Tperiod</i> | Период следования импульсов | с |
| <i>Ncycles</i> | Количество циклов (не указывается в случае формирования непрерывной импульсной последовательности) | — |

Параметры сигнала импульсного источника тока изображены на рис. 3.32.

3.9.2. Источник синусоидального тока

Текстовый синтаксис: `Ixxx N1 N2 SINE(Ioffset Iamp Freq Td Theta Phi Ncycles)`.

Этот синтаксис определяет зависимый от времени источник синусоидального тока, который выбирается установкой опции **SINE(Ioffset Iamp Freq Td Theta Phi Ncycles)** в области **Functions** (Функции) окна расширенной настройки (рис. 3.31).

Параметры настройки источника синусоидального тока перечислены в табл. 3.9.

Таблица 3.9. Параметры настройки источника синусоидального тока

| Обозначение | Описание | Единицы измерения |
|----------------|---------------------------|-------------------|
| <i>Ioffset</i> | Постоянная составляющая | А |
| <i>Iamp</i> | Амплитудное значение тока | А |
| <i>Freq</i> | Частота | Гц |
| <i>Td</i> | Задержка | с |
| <i>Theta</i> | Коэффициент затухания | 1/с |
| <i>Phi</i> | Фазовый сдвиг | градус |

Таблица 3.9 (окончание)

| Обозначение | Описание | Единицы измерения |
|----------------|--|-------------------|
| <i>Ncycles</i> | Количество циклов (не указывается в случае формирования непрерывной синусоидальной последовательности) | — |

В интервале времени от 0 до Td выходной ток будет иметь значение:

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{offset}} + I_{\text{amp}} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \text{Phi}}{180}\right).$$

После Td выходной ток будет иметь значение:

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{offset}} + I_{\text{amp}} \cdot \exp\left(-(\text{time} - Td) \cdot \text{Theta}\right) \times \\ \times \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \text{Freq} \cdot (\text{time} - Td) + \frac{\pi \cdot \text{Phi}}{180}\right).$$

Постоянная времени затухания является обратной величиной от коэффициента затухания Theta . Параметры сигнала синусоидального источника тока изображены на рис. 3.33.

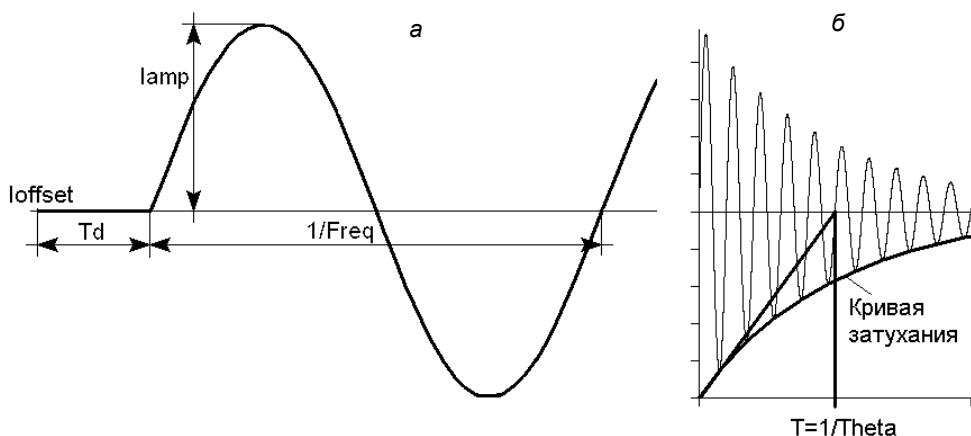


Рис. 3.33. Незатухающая (а) и затухающая (б) синусоидальные функции