

**ПРИМЕЧАНИЕ**

Разницу двух напряжений  $v(a) - v(b)$  можно записывать в сокращенной форме  $v(a, b)$ .

В математических выражениях доступны математические и логические функции, перечисленные в табл. 6.2.

**Таблица 6.2. Математические и логические функции**

Имя функции	Определение	Примечание
$abs(x)$	Абсолютное значение $x$	
$acos(x)$	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 $x$
$asin(x)$	Арксинус $x$	Результат в радианах. Возвращает вещественную часть арксинуса $x$ , что снимает ограничения на величину аргумента $x$
$arcsin(x)$	Арксинус $x$	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 6.2 (продолжение)

Имя функции	Определение	Примечание
$\text{buf}(x)$	1, если $x > 0.5$ , иначе 0	
$\text{ceil}(x)$	Целое равное или больше, чем $x$	
$\cos(x)$	Косинус $x$	$x$ в радианах
$\cosh(x)$	Гиперболический косинус $x$	
$d(\ )$	Производная	
$\exp(x)$	Число $e$ в степени $x$	
$\text{floor}(x)$	Целое равное или меньше $x$	
$\text{hypot}(x, y)$	$\text{sqrt}(x^{**2} + y^{**2})$	
$\text{if}(x, y, z)$	Если $x > 0.5$ , то $y$ , иначе $z$	
$\text{int}(x)$	Преобразовать $x$ в целое	
$\text{inv}(x)$	0, если $x > 0.5$ , иначе 1	
$\text{limit}(x, y, z)$	Промежуточное значение $x$ , $y$ , и $z$	
$\ln(x)$	Натуральный логарифм $x$	
$\log(x)$	Альтернативный синтаксис для $\ln(x)$	
$\log_{10}(x)$	Логарифм по основанию 10	
$\text{max}(x, y)$	Большее из $x$ или $y$	

Таблица 6.2 (продолжение)

Имя функции	Определение	Примечание
$\min(x, y)$	Меньшее из $x$ или $y$	
$\text{pow}(x, y)$	$x^{**y}$	Возвращает вещественную часть, что снимает ограничения на знак аргумента $x$
$\text{pwr}(x, y)$	$\text{abs}(x)^{**y}$	
$\text{pwrs}(x, y)$	$\text{sgn}(x) \cdot \text{abs}(x)^{**y}$	
$\text{rand}(x)$	Случайное число между 0 и 1 в зависимости от целого значения $x$	
$\text{random}(x)$	То же, что и $\text{rand}(x)$	Обеспечивает гладкий переход между значениями
$\text{round}(x)$	Ближайшее целое $x$	
$\text{sgn}(x)$	Знак $x$	
$\sin(x)$	Синус $x$	$x$ в радианах
$\sinh(x)$	Гиперболический синус $x$	
$\text{sqrt}(x)$	Квадратный корень $x$	
$\text{table}(x, a, b, c, d)$	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	

Таблица 6.2 (окончание)

Имя функции	Определение	Примечание
$uramp(x)$	$x$ , 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

Для комплексных данных функции  $atan2(y,x)$ ,  $sgn(x)$ ,  $u(x)$ ,  $buf(x)$ ,  $inv(x)$ ,  $uramp(x)$ ,  $int(x)$ ,  $floor(x)$ ,  $ceil(x)$ ,  $rand(x)$ ,  $min(x,y)$ ,  $limit(x,y,z)$ ,  $if(x,y,z)$ , и  $table(x,a,b,c,d)$  недоступны. Функции  $Re(x)$ ,  $Im(x)$ ,  $Ph(x)$ ,  $Mag(x)$  и  $conj(x)$  работают только с комплексными числами. Функции  $Re(x)$  и  $Im(x)$  соответственно возвращают вещественную и мнимую части комплексного числа. Функции  $Ph(x)$  и  $Mag(x)$  соответственно возвращают фазовый сдвиг и амплитуду аргумента. Функция  $conj(x)$  возвращает число, комплексно сопряженное к  $x$ .

В математических выражениях можно использовать константы, перечисленные в табл. 6.3.

Таблица 6.3. Заранее определенные константы

Имя	Значение	Имя	Значение
E	2.7182818284590452354	K	1.3806503e-23
Pi	3.14159265358979323846	Q	1.602176462e-19

Ключевое слово `time`, обозначающее текущее время TRAN-анализа, позволяет вводить в математическое выражение временную зависимость. Примерно аналогичную функцию для АС-анализа выполняют ключевые слова `freq` и `omega`, обозначающие частоту и круговую частоту. Символ `w` можно использовать как синоним для ключевого слова `omega`.

## 6.6. Функции, определяемые пользователем

Кроме заранее определенных функций и констант, перечисленных в табл. 6.2 и 6.3, пользователь может создавать свои функции и константы с тем, чтобы использовать их для обработки данных в окне плоттера. Пользовательские функции и константы хранятся в файле `plot.defs`, который находится в корневом каталоге программы LTspice (обычно `C:\Program Files\LTC\LTspiceIV`). Этот файл можно вызвать для редактирования при помощи команды **Plot Settings** (Настройки плоттера) | **Edit Plot Defs File** (Редактировать файл `plot.defs`), как показано на рис. 6.15.

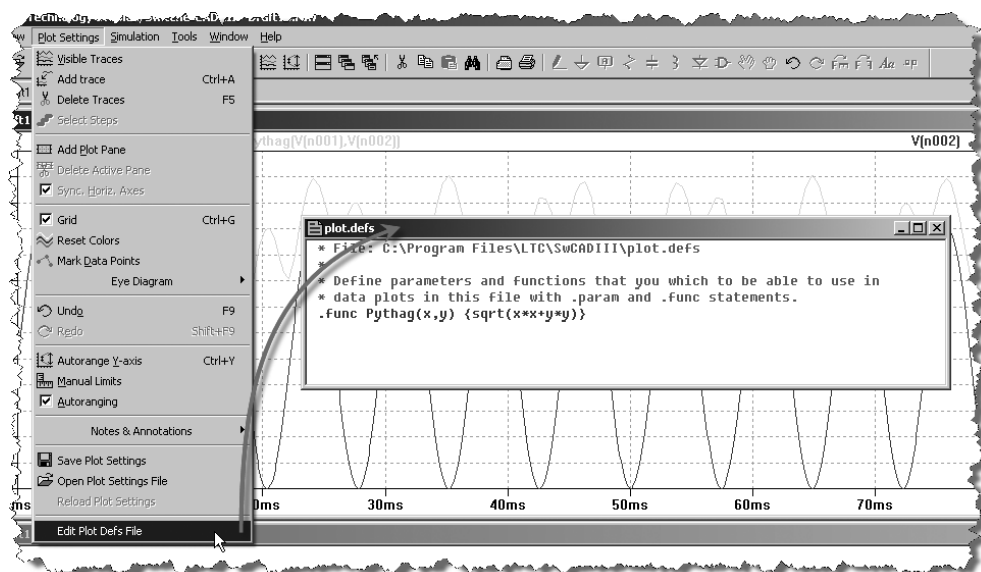


Рис. 6.15. Вызов для редактирования файла `plot.defs`

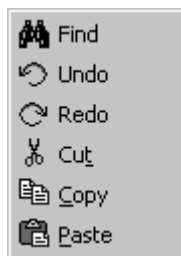
В этом случае файл открывается в специальном окне встроенного текстового редактора программы LTspice. Щелкнув правой кнопкой мышки в рабочей области этого окна можно вызвать простейшее меню редактирования (рис. 6.16), содержащее шесть команд редактирования:

- ☐ **Find** — найти фрагмент текста по образцу;
- ☐ **Undo** — отменить предыдущее действие;
- ☐ **Redo** — вернуть отмененное действие;

- ❑ **Cut** — вырезать выделенный фрагмент текста в буфер обмена;
- ❑ **Copy** — копировать выделенный фрагмент текста в буфер обмена;
- ❑ **Paste** — вставить содержимое буфера обмена.

Чтобы закрыть окно текстового редактора, нужно щелкнуть по крестику в его правом верхнем углу. Если в содержимое файла были внесены изменения, то LTspice предложит их сохранить.

При необходимости файл `plot.defs` может быть отредактирован любым текстовым редактором.



**Рис. 6.16.** Меню редактирования  
встроенного текстового редактора файла `plot.defs`

Для записи функций и констант используется синтаксис директивы `.FUNC` и `.PARAM`. Например, строка

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

определяет функцию `Pythag( )` как квадратный корень от суммы квадратов двух аргументов.

В свою очередь, строка параметризации:

```
.param twopi = 2*pi
```

определяет новую константу, которая в два раза больше числа  $\pi$ .

## 6.7. Управление осями

Чтобы изменить масштаб отображения в направлении любой из осей плоттера, нужно поместить курсор мышки в область числовой разметки соответствующей оси и, когда тот превратится в маленькую линейечку, щелкнуть левой кнопкой мышки. Результатом этого действия будет появление меню настрой-

ки соответствующей оси. Меню настройки горизонтальной оси **Horizontal Plotted** (рис. 6.17) и меню настройки вертикальной оси **Vertical Axis** (рис. 6.18) имеют область **Axis Limits** (Ограничения оси), в которой указываются крайние точки оси, а также цена деления (tick). В отличие от меню вертикальной оси, меню горизонтальной оси имеет дополнительное поле **Quantity Plotted**, в котором пользователь может ввести параметр развертки. Для TRAN-анализа таким параметром по умолчанию является время *time*. Для АС-анализа по горизонтальной оси откладывается частота *frequency*.

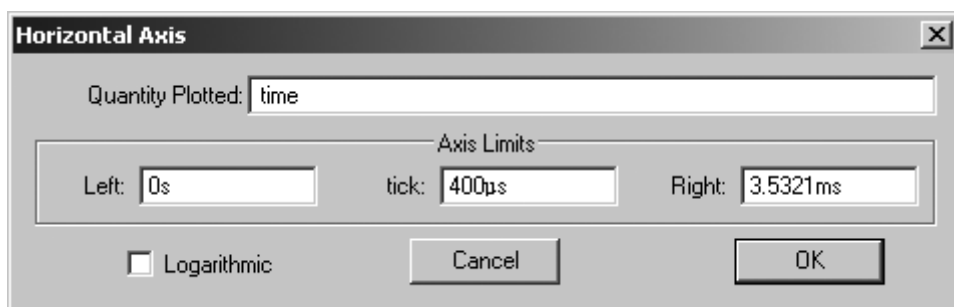


Рис. 6.17. Меню горизонтальной оси плоттера

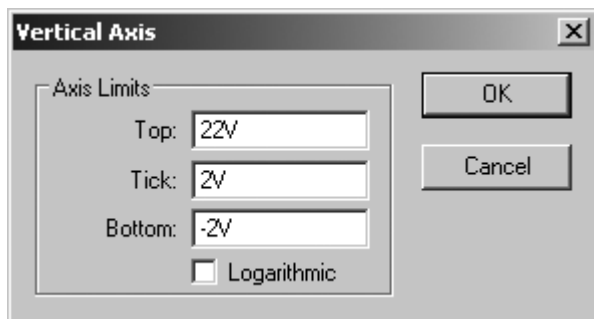


Рис. 6.18. Меню вертикальной оси плоттера

Для комплексных данных, получаемых при АС-анализе, имеются различные меню **Left Vertical Axis** для левой (рис. 6.19) и меню **Right Vertical Axis** для правой (рис. 6.20) вертикальных осей.

Меню левой оси имеет область **Range** (Диапазон), которая аналогична области **Axis Limits** (Ограничения оси) предыдущих меню. Кроме этого, имеется

дополнительная область **Representation** (Представление), где можно выбрать тип диаграммы и закон распределения точек оси.

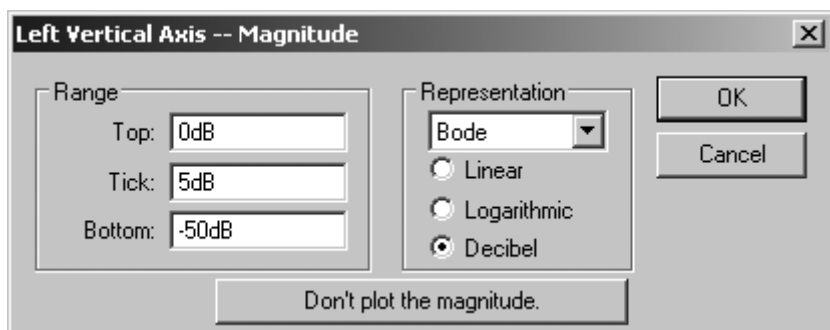


Рис. 6.19. Меню левой вертикальной оси для комплексных данных

Возможны три типа диаграммы.

- ❑ **Bode** — диаграмма Боде или амплитудно-фазочастотная характеристика (АФЧХ). Здесь левая вертикальная ось характеризует модуль коэффициента передачи, а правая фазовый сдвиг. Горизонтальная ось соответствует частоте. Обычно подобные диаграммы удобно выражать в логарифмическом масштабе, где модуль коэффициента передачи выражается в децибелах (дБ), а частота — в масштабе десятичного логарифма, для которого единица горизонтальной оси соответствует десятикратному изменению частоты.
- ❑ **Nyquist** — диаграмма Найквиста или комплексная частотная характеристика. Здесь левая вертикальная ось характеризует мнимую часть комплексного параметра, а горизонтальная ось — вещественную часть комплексного параметра.
- ❑ **Cartesian** — диаграммы частотной зависимости вещественной и мнимой части комплексного параметра в декартовых координатах. Здесь левая вертикальная ось характеризует вещественную часть комплексного параметра, а правая вертикальная ось — мнимую часть комплексного параметра. Горизонтальная ось соответствует частоте.

Распределение точек вдоль вертикальной оси может быть линейным (**Linear**), логарифмическим (**Logarithmic**) или выражаться в децибелах (**Decibel**).

Кнопка **Don't plot the magnitude** (Не строить величину), расположенная в нижней части меню левой вертикальной оси, позволяет отключить эту ось.



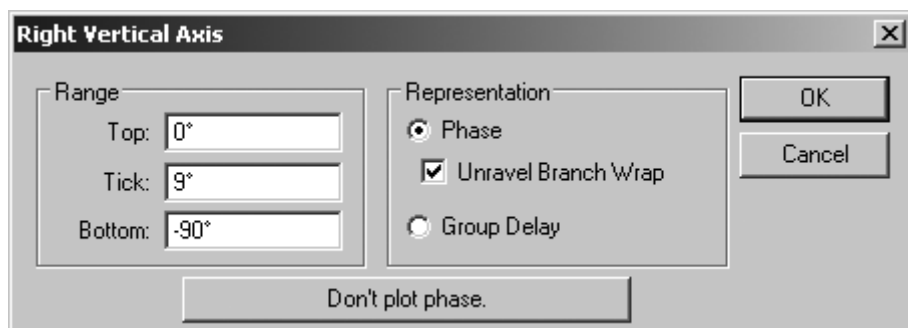
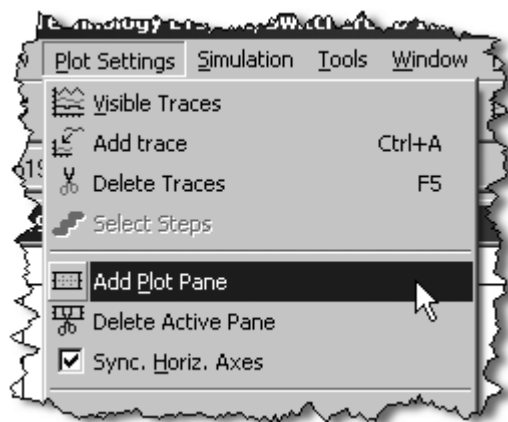


Рис. 6.20. Меню правой вертикальной оси для комплексных данных

Меню правой оси меняет свой вид в зависимости от выбранного типа диаграммы. Например, в режиме Nyquist правая вертикальная ось вообще отсутствует, в режиме Cartesian располагает только областью **Range**. В режиме Bode меню правой оси содержит дополнительную область **Representation** (Отображение), где можно выбрать для отображения фазовый сдвиг (**Phase**) или групповое время запаздывания (**Group Delay**). Выбор опции **Unravel Branch Wrap** позволяет плоттеру выводить реальное значение фазового сдвига, не ограничивая его диапазоном  $\pm 180^\circ$ .

## 6.8. Подокна плоттера

Используя команду **Plot Setting** (Настройки плоттера) | **Add Plot Pane** (Добавить окно плоттера), окно плоттера можно разбить на несколько подокон меньшего размера. Это позволяет группировать диаграммы с одинаковыми масштабами отображения в отдельных подокнах, что должно улучшить их наблюдаемость. Загрузка отображаемых параметров производится в активное на данный момент окно плоттера. Чтобы сделать окно активным, достаточно щелкнуть левой кнопкой мышки по ее строке заголовка. При необходимости диаграммы можно перетаскивать из одного окна в другое. Для этого нужно навести курсор мышки на название диаграммы, нажать левую кнопку мышки и, удерживая ее, переместить курсор в область другого подокна и там отпустить кнопку мышки. Если в момент отпускания кнопки удерживать клавишу <Ctrl> нажатой, то оригинал диаграммы будет оставлен в предыдущем подокне.



**Рис. 6.21.** Разбиение окна плоттера на несколько подокон

Команда **Plot Setting** (Настройки плоттера) | **Delete Active Pane** (Удалить активное окно) позволяет удалить активное в данный момент окно плоттера. Выбор опции **Sync. Horiz. Axes** позволяет синхронизировать горизонтальные оси всех окон плоттера.



# Пополнение библиотеки моделей

Так или иначе, на каком-то этапе работы со SPICE симулятором каждый пользователь сталкивается с необходимостью пополнения библиотеки моделей. К радости пользователей программы LTspice могу сообщить, что проблема пополнения библиотеки новыми моделями уже в большой мере решена поколениями энтузиастов, работающих с этой программой. Очень много дополнительных моделей можно найти в файловом архиве независимой пользовательской группы программы LTspice (<http://groups.yahoo.com/group/LTspice>). Кроме этого, стоит посетить небольшую, но весьма информативную домашнюю страничку Андрея Кадатч и скачать дополнительную библиотеку EXTRA (<http://forest2.homeip.net/Electronics/extra.rar>), которая выводит объем библиотеки LTspice на уровень, сравнимый с библиотеками коммерческих симуляторов.

К сожалению, даже пополненная библиотека не гарантирует того, что под рукой всегда найдется необходимая модель. Во многих коммерческих SPICE-симуляторах присутствуют специальные утилиты, позволяющие рассчитывать параметры стандартных моделей по справочным данным реальных компонентов. Разумеется, в бесплатной программе LTspice подобная утилита отсутствует, однако это не мешает пользователям LTspice воспользоваться результатами расчета сторонней программы. Кроме этого, практически все производители электронных компонентов выкладывают соответствующие SPICE-модели этих компонентов на своих интернет-сайтах. Обычно эти модели выполнены в виде подсхем. Остается только корректно пополнить этими моделями существующую библиотеку. Если используется стандартная модель, то процесс пополнения простой и выполняется без особых проблем. Если же используется модель в виде подсхемы, то пополнение усложняется и не всегда может закончиться успешно. Рассмотрим оба этих варианта.

## 7.1. Пополнение библиотеки схемными компонентами, имеющими стандартную модель

Параметры схемных компонентов, имеющих стандартные модели, расположены в подкаталоге /lib/cmp относительно корневого каталога программы. Здесь можно обнаружить следующие файлы:

- ☐ standard.bjt — библиотека моделей биполярных транзисторов;
- ☐ standard.cap — библиотека моделей конденсаторов;
- ☐ standard.dio — библиотека моделей диодов;
- ☐ standard.ind — библиотека моделей индуктивностей;
- ☐ standard.jft — библиотека моделей полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом (JFET);
- ☐ standard.mos — библиотека моделей полевых транзисторов с изолированным затвором (MOSFET).

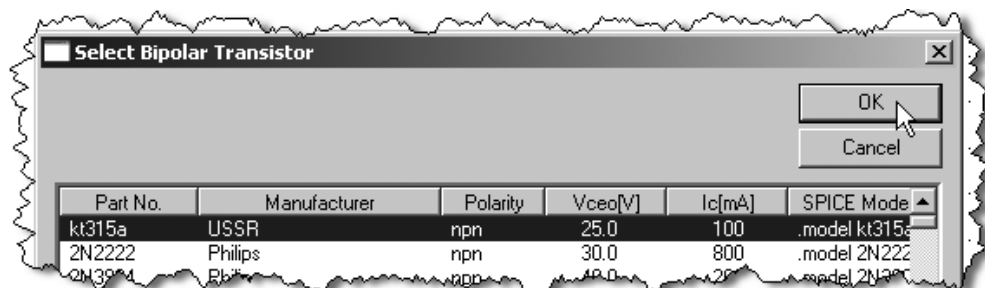


Рис. 7.1. Выбор биполярного транзистора KT315A из библиотеки LTspice

Каждая строка в этих файлах, кроме standard.cap и standard.ind, представляет собой соответствующую директиву .model, описанную ранее в разд. 4.15. Следовательно, пополнение этих библиотек можно осуществить простым вписыванием очередной директивы .model с соответствующими параметрами. Например, дополним библиотеку биполярных транзисторов моделью отечественного транзистора типа KT315A:

```
.model kt315a NPN (Is=2.82f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=3.32K Bf=55 Ne=2.35
Ise=554.1p Ikf=18.04m
```

```
+ Xtb=1.5 Br=.6455 Nc=2 Isc=0 Ikr=0 Rc=0 Cjc=17p Vjc=.75 Mjc=.333 Fc=.5
Cje=8.55p
+ Vje=.75 Mje=.333 Tr=3.36u Tf=1.02n Itf=0 Vtf=0 Xtf=0 Vceo=25 Icrat-
ing=100m mfg=USSR)
```

Последние три параметра  $V_{ceo}$ ,  $I_{crating}$  и  $mfg$  в моделировании не участвуют, но, соответственно, позволяют вывести в строке выбора транзистора его максимальное напряжение коллектор—эмиттер, ток коллектора и наименование производителя.

После дополнения библиотечного файла транзистор КТ315А становится доступным для использования (рис. 7.1).

## 7.2. Пополнение библиотеки схемными компонентами, имеющими модель в виде подсхемы

Если модель существует в виде подсхемы, то в этом случае придется решить, как минимум, две задачи. Во-первых, надо создать новый или подобрать готовый символ для будущего библиотечного компонента. Во-вторых, надо согласовать SPICE-синтаксис, используемый при описании модели, с синтаксисом LTspice.

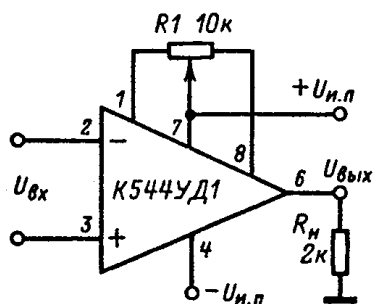


Рис. 7.2. Схема включения операционного усилителя К544УД2

Например, пополним библиотеку отечественным операционным усилителем типа К544УД2 (рис. 7.2), подсхема которого приведена в листинге 7.1.

**Листинг 7.1. Текст подсхемы модели операционного усилителя K544УД2**

```

* k544ud2 operational amplifier "macromodel" subcircuit
* created using Parts version 1.04 on 10/11/90 at 10:58
*
* connections:  non-inverting input
*                | inverting input
*                | | positive power supply
*                | | | negative power supply
*                | | | | output
*                | | | | | compensation
*                | | | | | / \
.subckt k544ud2  1 2 3 4 5 6 7
*
c1  11 12 174.6E-15
dc   5 53 dx
de  54  5 dx
dlp 90 91 dx
dln 92 90 dx
dp   4  3 dx
egnd 99  0 poly(2) (3,0) (4,0) 0 .5 .5
fb   7 99 poly(5) vb vc ve vlp vln 0 127.3E6 -100E6 100E6 100E6 -100E6
ga   6  0 11 12 1.885E-3
gcm  0  6 10 99 188.5E-9
iss  3 10 dc 400.0E-6
hlim 90  0 vlim 1K
j1   11  2 10 jx
j2   12  1 10 jx
r2   6  9 100.0E3
rd1  4 11 530.5
rd2  4 12 530.5
ro1  8  5 50
ro2  7 99 25
rp   3  4 9.000E3
rss 10 99 500.0E3
vb   9  0 dc 0

```

```
vc      3 53 dc 2
ve      54  4 dc 2
vlim    7   8 dc 0
vlp     91  0 dc 20
vln     0 92 dc 20
.model  dx D(Is=800.0E-18)
.model  jx PJF(Is=15.00E-12 Beta=17.77E-3 Vto=-1)
.ends
```

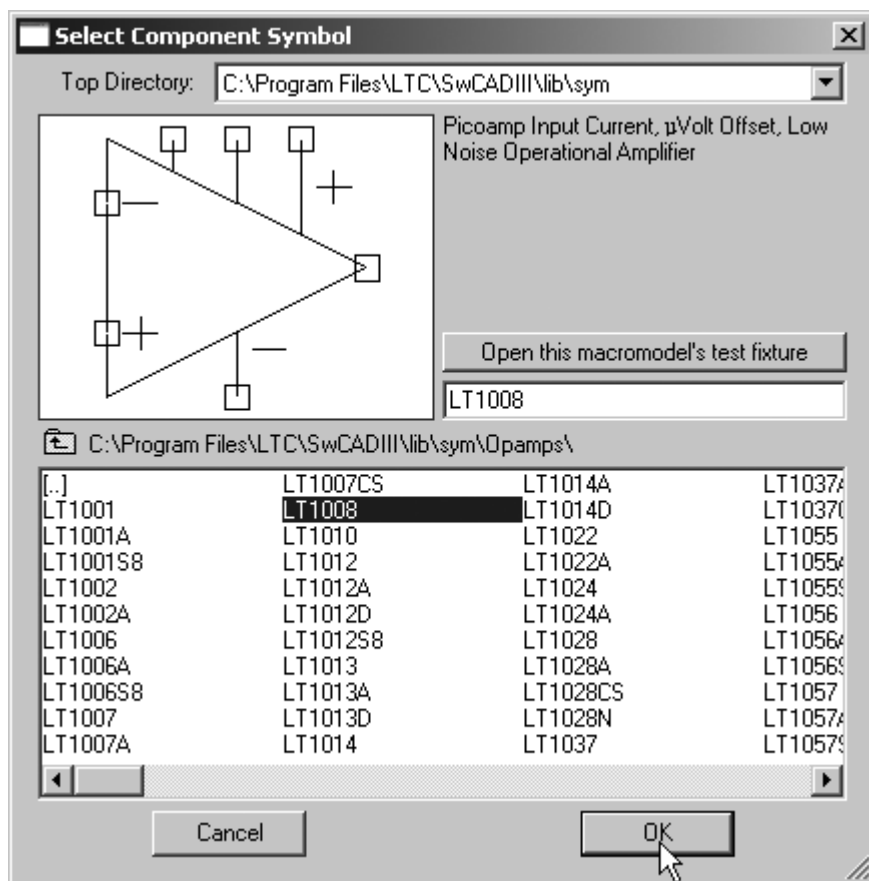
Синтаксис различных SPICE-симуляторов может иметь различия. Поэтому, если подсхема модели позаимствована от другого симулятора или взята с сайта производителя электронных компонентов, необходимо внимательно просмотреть ее текст на предмет выявления и ликвидации различных синтаксических несоответствий.

Сравнив нумерацию выводов реального операционного усилителя (рис. 7.2) и порядок узлов в строке директивы `.subckt k544ud2 1 2 3 4 5 6 7`, можно заметить их несоответствие. Соответствие нумерации и порядка узлов подсхемы может потребоваться, если схемный редактор LTspice используется как генератор списка связей для сторонней программы, например, предназначенной для разводки печатной платы. В данном случае такая задача не ставится и поэтому для нормального функционирования модели достаточно лишь обеспечить верный порядок передачи узловых потенциалов из основной схемы в подсхему, без привязки к физической реализации самой микросхемы.

Так как операционный усилитель является стандартным электронным узлом, то найти для него готовый символ, скорей всего, не составит труда. И в самом деле, требуемый символ можно позаимствовать у операционного усилителя LT1008, который расположен в подкаталоге **Opamps** встроенной библиотеки (рис. 7.3).

Чтобы использовать готовый символ, мы должны знать порядок, в котором он передает узлы в подсхему модели. Этот порядок можно узнать, воспользовавшись редактором символов программы LTspice. К сожалению, мы еще не приступили к изучению этого редактора и поэтому постараемся решить проблему уже знакомыми средствами, т. е. при помощи схемного редактора. Для этого размещаем операционный усилитель в рабочем поле схемного редактора, подключаем к его выводам коротенькие фрагменты внешних цепей и принудительно присваиваем им имена, соответствующие порядку перечисле-

ния узлов в строке директивы `.subckt` подсхемы модели операционного усилителя K544УД2 (рис. 7.4).



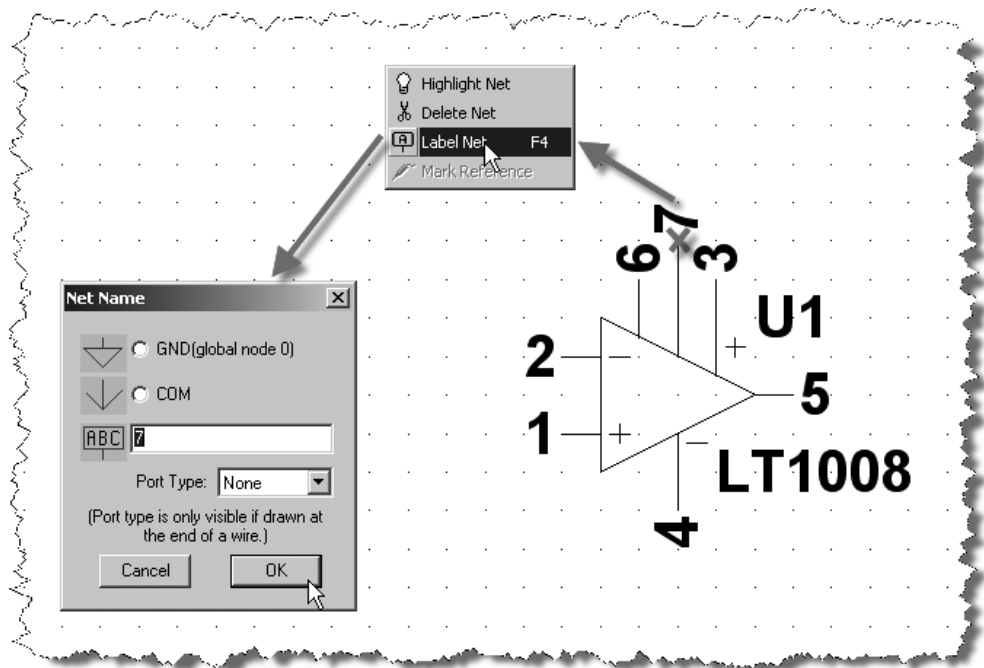
**Рис. 7.3.** Поиск подходящего символа во встроенной библиотеке программы LTspice

Чтобы присвоить имя цепи, нужно вызвать соответствующее меню операций, щелкнув по требуемой цепи правой кнопкой мышки. В появившемся меню выбрать режим **Label Net** (Ярлык для цепи), что позволит получить доступ к меню **Net Name** (Имя цепи), где в строке **ABC** присваивается требуемое имя (рис. 7.4).

Воспользовавшись командой **View | SPICE Netlist**, посмотрим список связей нашей небольшой схемы (рис. 7.5) и убедимся, что порядок узлов в строке



XU1 1 2 3 4 5 6 7 LT1008 соответствует порядку узлов в строке .subckt k544ud2 1 2 3 4 5 6 7. В противном случае необходимо соответствующим образом отредактировать строку директивы .subckt.



**Рис. 7.4.** Присвоение имен внешним цепям символа операционного усилителя LT1008

Программа LTspice регулярно обновляется через Интернет. Поэтому, чтобы не потерять свои библиотеки, желательно выделить их в свою пользовательскую папку. Чтобы папка была видна при выборе нового компонента, ее необходимо разместить в подкаталоге `sym` встроенной библиотеки. Присвоим этой папке имя `Mylib`. Создадим в этой папке файл `g-opamp.lib` и скопируем туда вышеуказанный текст подсхемы модели. Впоследствии этот файл можно пополнять другими моделями операционных усилителей отечественного производства. В начале файла, в виде комментариев, необходимо сделать небольшую информационную вставку (листинг 7.2), описывающую содержимое библиотеки. Это облегчит работу с библиотекой, а также позволит избежать каких-то досадных ошибок.

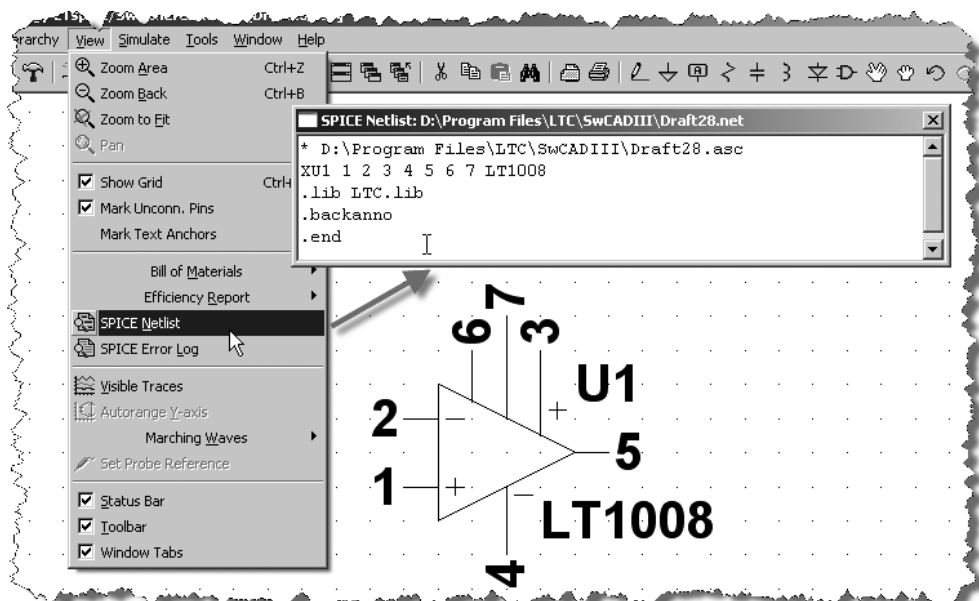


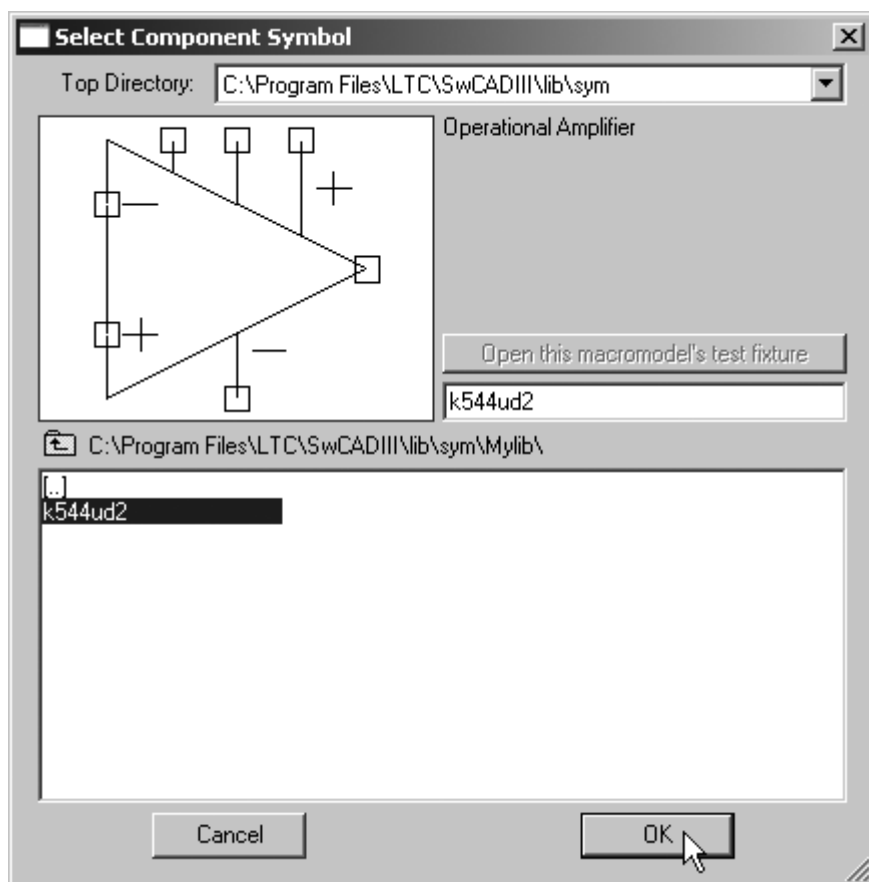
Рис. 7.5. Проверка порядка узлов, передаваемого символом LT1008 в подсхему модели

#### Листинг 7.2. Пример информационной вставки в начале библиотечного файла

```
*****
****
*   Библиотека моделей операционных усилителей отечественного производства
*
*****
****
*
*   Библиотека содержит:
*   К544УД2
*
*****
****
*   Внимание! Нумерация (порядок) входных узлов подсхем моделей всех ОУ не
сопадает с
*   реальной нумерацией выводов корпуса микросхем.
*****
****
```

### ПРИМЕЧАНИЕ

Для схемных компонентов различных типов лучше создавать независимые библиотечные файлы. Например, для ШИМ-контроллеров можно создать файл `pwm.lib`, для полевых транзисторов с изолированным затвором `mosfet.lib` и т. д.



**Рис. 7.6.** Выбор операционного усилителя K544УД2 из библиотеки пользователя

Скопируем файл символа `LT1008.asy` из своего каталога `..\lib\sym\Opamps` в пользовательский каталог `..\lib\sym\ Mylib` и переименуем его в `k544ud2.asy`. Однако одного переименования недостаточно. Необходимо также внести некоторые изменения и в сам файл.

Для этого откроем его при помощи любого текстового редактора и изменим содержимое атрибутов SYMATTR:

- ☐ SYMATTR Value — вместо LT1008 записываем k544ud2;
- ☐ SYMATTR Prefix X — оставляем без изменения;
- ☐ SYMATTR SpiceModel — вместо LTC.lib записываем r-opamp.lib;
- ☐ SYMATTR Value2 — вместо LT1008 записываем k544ud2;
- ☐ SYMATTR Description — запишем Operational Amplifier.

После этого сохраним изменения и приступим к испытанию. Для этого запустим программу LTspice в режиме схемного редактора и проверим наличие нового электронного компонента в библиотеке. Если все сделано правильно, то операционный усилитель K544УД2 можно обнаружить именно там, где он и должен быть, т. е. в пользовательском каталоге Mylib (рис. 7.6).

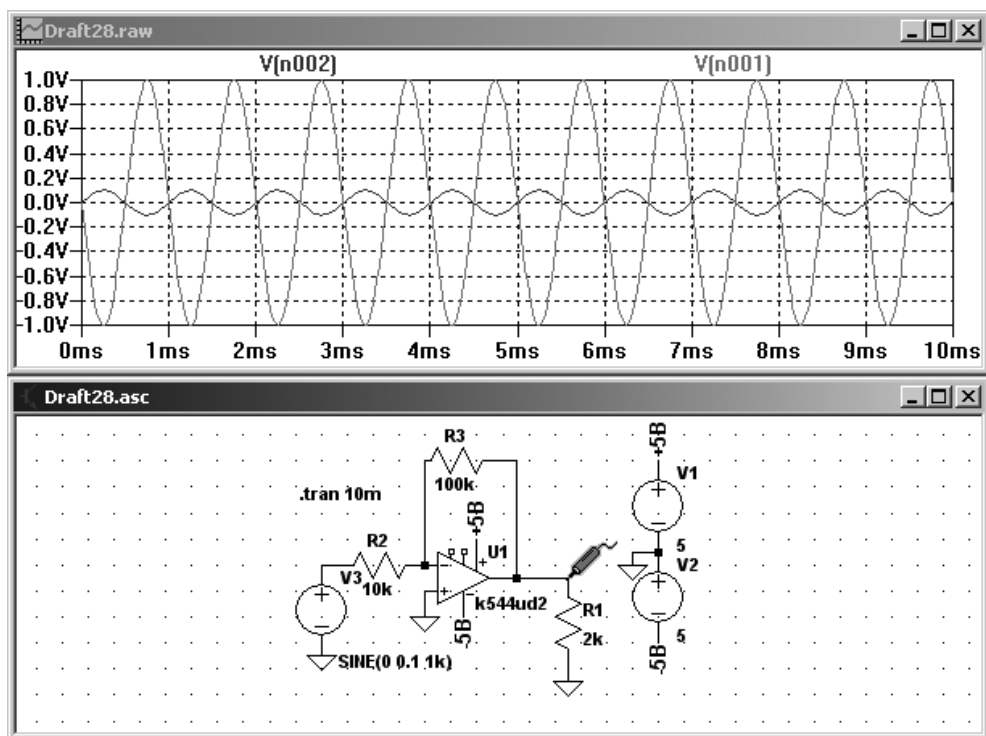


Рис. 7.7. Тестовая схема инвертирующего усилителя на ОУ К544УД2

Для проверки функционирования схемного компонента можно собрать какую-то тестовую схему. Пусть такой схемой будет обычный инвертирующий усилитель (рис. 7.7).

Согласно результатам моделирования, модель операционного усилителя К544УД2 функциональна, и инвертирующий усилитель, собранный на нем, обеспечивает заданное усиление  $K_y = \frac{R_3}{R_2} = \frac{100k}{10k} = 10$ .

## 7.3. Создание модели схемного компонента с использованием иерархической схемы

Ранее мы рассмотрели случаи создания схемного компонента, когда его модель уже существует в том или ином виде. Обычно так и происходит, но иногда бывают ситуации, когда модели нет, и ее невозможно найти ни в одном из доступных информационных источников. В этом случае приходится создавать схемный компонент с нуля. Обычно создание нового компонента начинается с создания его модели.

В качестве примера, используя средства программы LTspice, создадим модель микросхемы TL494. Микросхема TL494 является ШИМ-контроллером импульсного источника питания и включает в себя все необходимые для этого блоки. Эта микросхема, благодаря своим достаточно высоким характеристикам и низкой стоимости, очень популярна как среди любителей, так и среди профессионалов силовой электроники. Так же как и широко известный 555-й таймер, TL494 производится многими мировыми производителями электронных компонентов, такими как Texas Instruments, ON Semiconductor, Motorola, Fairchild Semiconductor, Fujitsu, Samsung и т. д. Эта микросхема выпускается под своим оригинальным, а также под альтернативными названиями, такими как mPC494C, MB3759, KA7500B, IR3M02 и т. п. Отечественной версией TL494 является микросхема 1114ЕУ4.

Однако, несмотря на популярность, модель TL494 пока отсутствует в библиотеках коммерческих симуляторов и на сайтах производителей электронных компонентов.

### 7.3.1. Иерархические схемы

В программе LTspice предусмотрена очень полезная возможность замены отдельных фрагментов схемы схемами с более низким уровнем иерархии или попросту иерархическими схемами. Причем в основной схеме, имеющей высокий уровень, эти иерархические схемы выглядят как абстрактные символы с выводами. В этом смысле иерархические схемы, по сути, очень похожи на подсхемы, но гораздо удобнее и показательнее, т. к. пользователю приходится работать не с текстовым файлом, а с реальной схемой. Эта схема легко изменяется и контролируется обычными средствами схемного редактора программы LTspice.

Так же как и подсхемы, иерархические схемы могут быть помещены в библиотеку для последующего использования в различных проектах. Но, в отличие от подсхем, ссылаться на иерархическую схему из основного проекта можно только с помощью символа. Файл символа должен иметь такое же имя, что и файл иерархической схемы. Например, если файл иерархической схемы имеет название tl494h.asc, то файл символа должен иметь название tl494h.asy. По этой же причине имя символа не должно содержать пробелы, а также символы, недопустимые для имени файла.

#### **ПРИМЕЧАНИЕ**

Иерархическая схема должна располагаться в одном каталоге с основной схемой.

Имена выводов символов должны соответствовать именам соответствующих цепей иерархической схемы. Таким образом создается связь между основной и иерархическими схемами.

Любой файл, открытый с помощью команды **File | Open**, рассматривается как схема высокого уровня.

### 7.3.2. Создание модели TL494 в виде иерархической схемы

Справочную информацию на микросхему TL494 можно взять, например, на сайте компаний Texas Instruments (<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf>) или ON Semiconductor (<http://www.onsemi.com/pub/Collateral/TL494-D.PDF>).

На рис. 7.8 изображена функциональная схема этой микросхемы.

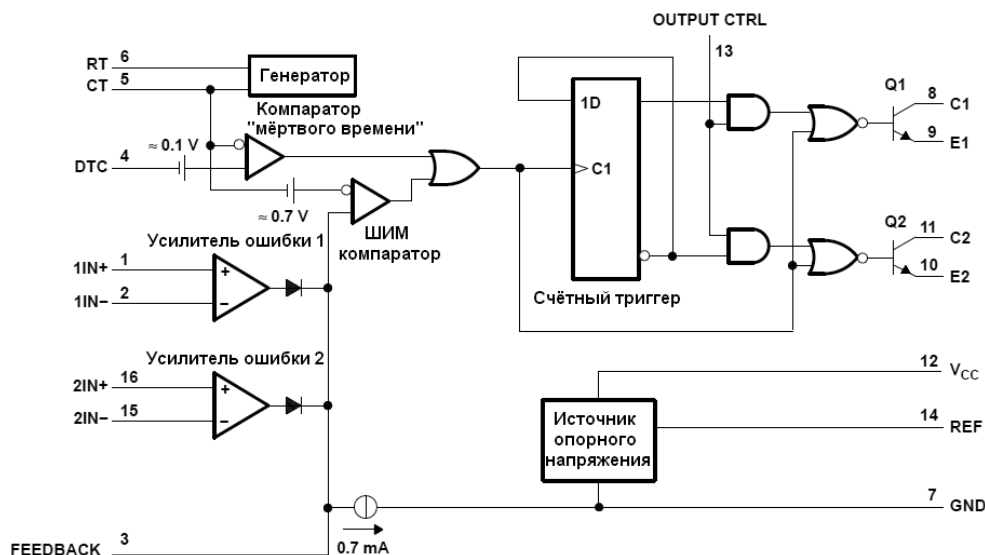


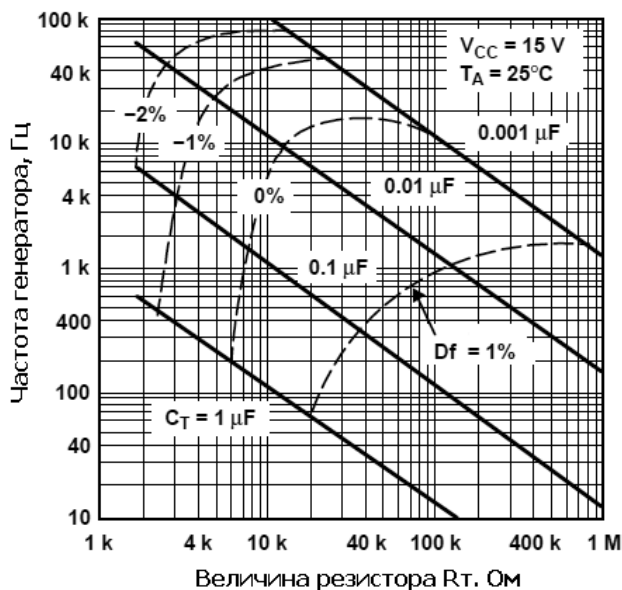
Рис. 7.8. Функциональная схема микросхемы TL494

Казалось бы, что для создания корректной модели достаточно найти и продублировать принципиальную электрическую схему этой микросхемы. Благо, упрощенные версии отдельных узлов даже приводятся в документации (<http://focus.ti.com/lit/an/slva001d/slva001d.pdf>), расположенной на сайте Texas Instruments. Однако попытка создания модели таким способом, скорее всего, закончится неудачей. Дело в том, что несмотря на свои маленькие размеры, микросхема имеет достаточно сложную электрическую принципиальную схему, содержащую более пятидесяти транзисторов. Модель, содержащая такое количество активных компонентов, способна в значительной мере снизить скорость симуляции или сделать ее вообще невозможной из-за проблем сходимости. Выходом из данной ситуации является использование встроенных схемных элементов Ltspice, которые являются функциональными аналогами отдельных узлов моделируемой микросхемы.

## Генератор

ШИМ-контроллер TL494 работает на фиксированной частоте, которая определяется внутренним генератором. Частота генератора программируется внешними резистором и конденсатором, подключаемыми к выводам R<sub>t</sub> и C<sub>t</sub> микросхемы. Конденсатор C<sub>t</sub> заряжается стабильным током, величина кото-

рого задается с помощью резистора  $R_T$ . После того как напряжение на конденсаторе достигает 3 В, он быстро разряжается до нуля и процесс снова повторяется. Величину зарядного тока можно определить по формуле  $I_{зар} \approx 3.65/R_T$ . На рис. 7.9 приведены графические зависимости частоты внутреннего генератора от номиналов частото задающих элементов. Эту частоту также можно определить по формуле 
$$F_{ген} = \frac{1.2}{R_T \cdot C_T}.$$



**Рис. 7.9.** Частота генератора и ее температурный дрейф в зависимости от величин  $R_T$  и  $C_T$

Схема модели генератора изображена на рис. 7.10.

Источник напряжения  $V1$  имитирует напряжение, приложенное к резистору  $R_T$ . Управляемый ток источника тока  $F1$  является своеобразным токовым зеркалом, которое формирует ток зарядки конденсатора  $C_T$ , равный току, протекающему через источник напряжения  $V1$  и резистор  $R_T$ . Под воздействием этого тока конденсатор  $C_T$  линейно заряжается. Как только напряжение на конденсаторе достигает порогового напряжения 3 В, он разряжается с помощью ключа  $S1$ . Диод  $D1$  предотвращает обратный ток и позволяет напряжению на выводе  $R_T$  подниматься выше потенциала источника напряжения  $V1$ .



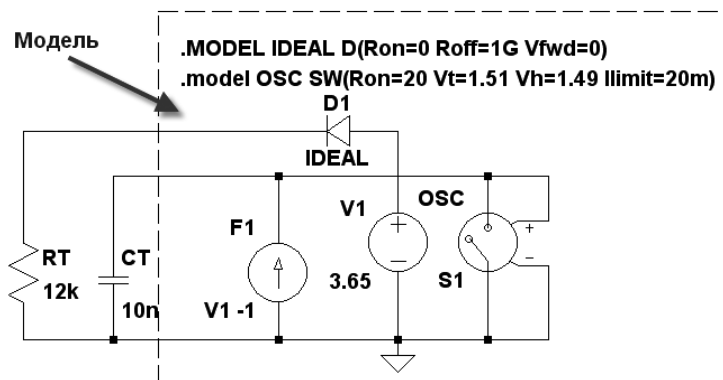


Рис. 7.10. Схема модели задающего генератора

При указанных на схеме номиналах резистора  $R_T = 12$  кОм и конденсатора  $C_T = 10$  мкФ рабочая частота генератора составляет 10 кГц, что соответствует графическим зависимостям, изображенным на рис. 7.9.

## Усилитель ошибки

Регулировочные характеристики ШИМ-контроллера определяются амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) его усилителя ошибки.

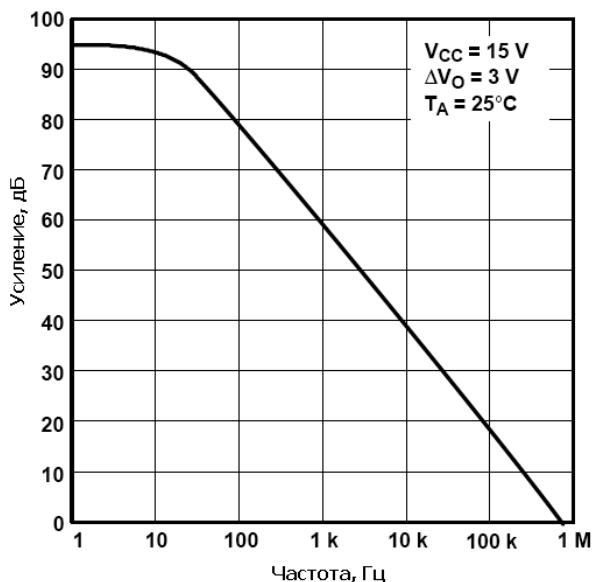


Рис. 7.11. Амплитудно-частотная характеристика усилителя ошибки

Поэтому при создании модели усилителя нужно обеспечить корректность этой характеристики. Согласно документации Texas Instruments и других производителей, АЧХ усилителя ошибки ЕД494 имеет частоту среза 10 Гц с последующим завалом 20 дБ/дек (рис. 7.11).

Подобную АЧХ можно легко получить с помощью RC-фильтра нижних частот. Схема модели усилителя ошибки с RC-фильтром нижних частот, а также результаты моделирования изображены на рис. 7.12.

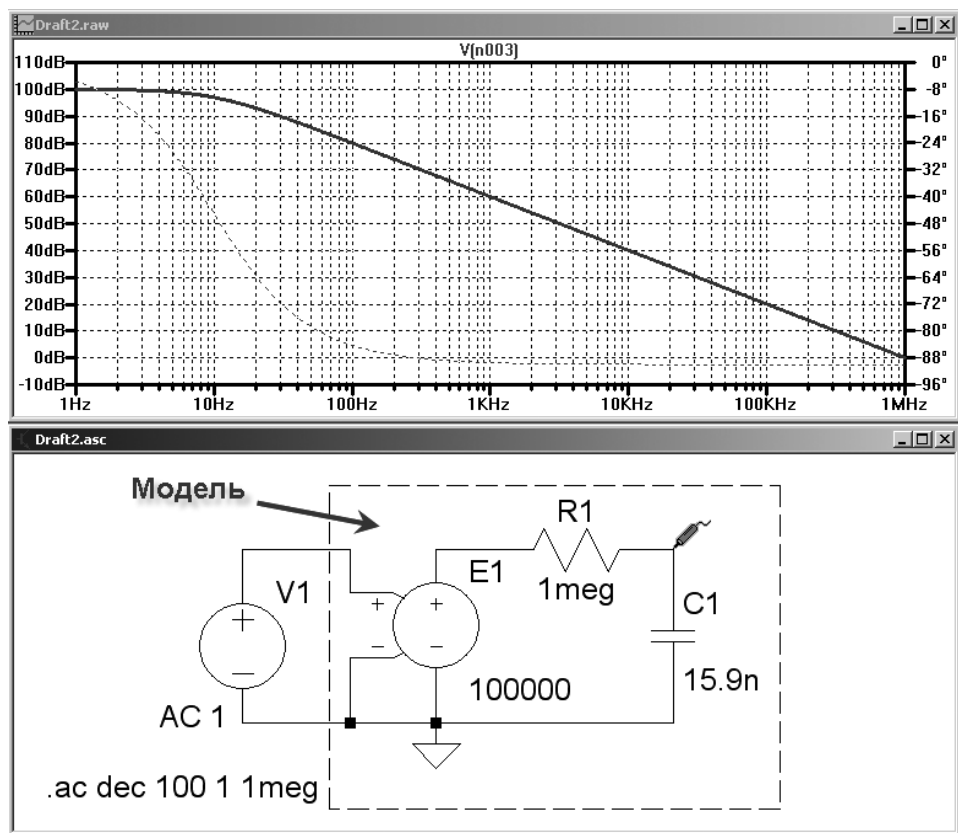


Рис. 7.12. Модель усилителя ошибки

Фильтр нижних частот R1, C1 позволяет получить АЧХ, которая идеально совпадает с изображенной на рис. 7.11.

Коэффициент усиления усилителя ошибки на низких частотах имитируется с помощью ИНУН E1.

Однако не достаточно имитировать только АЧХ реального усилителя ошибки. При резких изменениях входного сигнала АЧХ усилителя может сильно искажаться.

Это происходит потому, что выходное напряжение усилителя не может изменяться с бесконечно большой скоростью. К сожалению, производитель замалчивает необходимую информацию и поэтому придется обратиться к эксперименту.

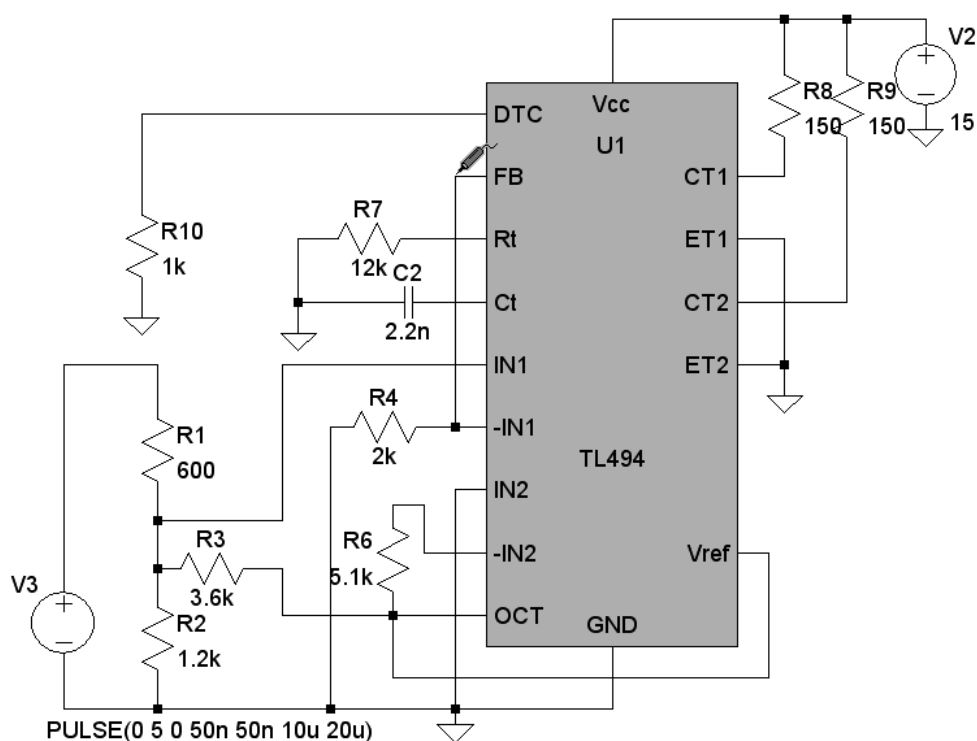
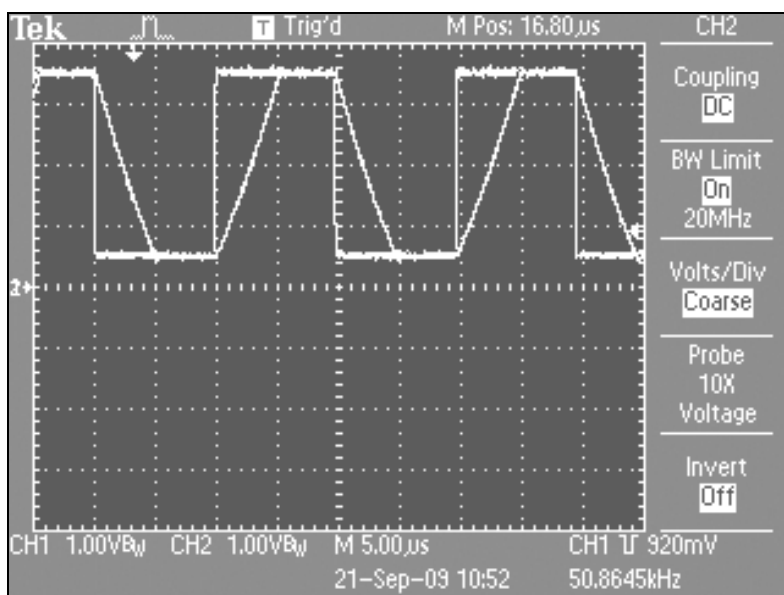


Рис. 7.13. Модель тестовой схемы

Для экспериментального определения максимальной скорости изменения выходного напряжения можно использовать тестовую схему, изображенную на рис. 7.13. Здесь усилитель ошибки включен по схеме единичного уси-

ния, а на его неинвертирующий вход (IN1) подается последовательность прямоугольных импульсов. По искажениям сигнала на выходе (FB) усилителя можно судить о максимальной скорости изменения его выходного напряжения. На рис. 7.14 показаны экспериментальные осциллограммы на ножках IN1 (желтый цвет) и FB (синий цвет) ШИМ-контроллера TL494. В соответствии с экспериментальными данными максимальная скорость изменения выходного напряжения составляет  $3 \text{ В} / 5 \text{ мкс} = 0.6 \text{ В/мкс}$ . Чтобы ограничить максимальную скорость нарастания выходного напряжения, модель усилителя ошибки необходимо привести к виду, изображенному на рис. 7.15.



**Рис. 7.14.** Экспериментальные осциллограммы усилителя ошибки

В улучшенной модели эффект ограничения скорости изменения выходного напряжения усилителя ошибки получается за счет введения источников тока I1 и I2, включенных в режим нагрузки (Load). Благодаря этому максимальный ток зарядки/разрядки конденсатора C1 не может превышать 10 мА. При этом скорость изменения напряжения на конденсаторе C1 ограничена на требуемом уровне 0.6 В/мкс. Диод D1 не допускает перезарядки конденсатора отрицательным напряжением. Дополнительный ИНУН E1 используется для формирования передаточной характеристики усилителя ошибки.

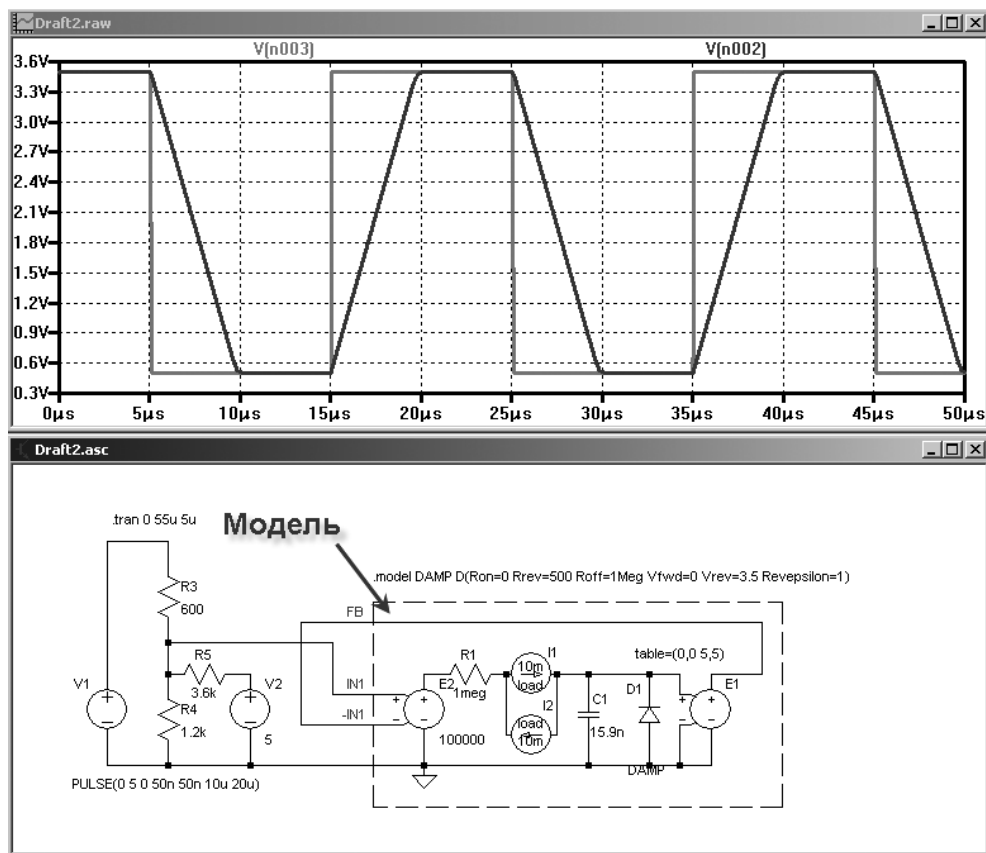
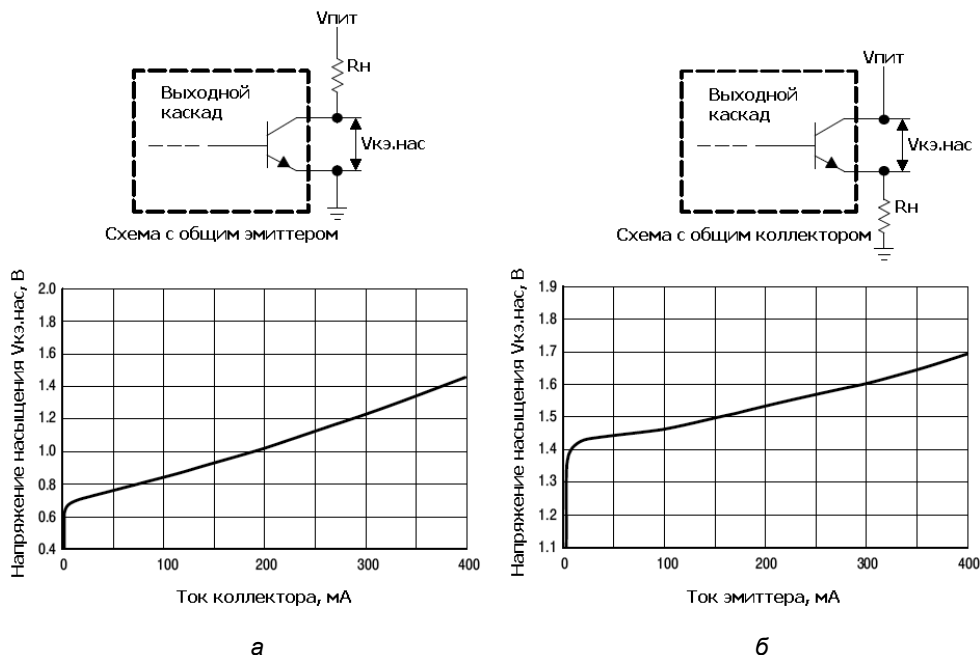


Рис. 7.15. Улучшенная модель усилителя ошибки

## Выходной каскад

Выходной каскад контроллера TL494 представляет из себя транзистор с открытыми эмиттером и коллектором. Благодаря этому возможны два варианта включения этого транзистора, где он включен по схеме с общим эмиттером (рис. 7.16, а) или общим коллектором (рис. 7.16, б). Каждому из этих включений соответствует своя вольтамперная характеристика (ВАХ) напряжения открытого транзистора  $V_{кэ.нас}$  от тока нагрузки.

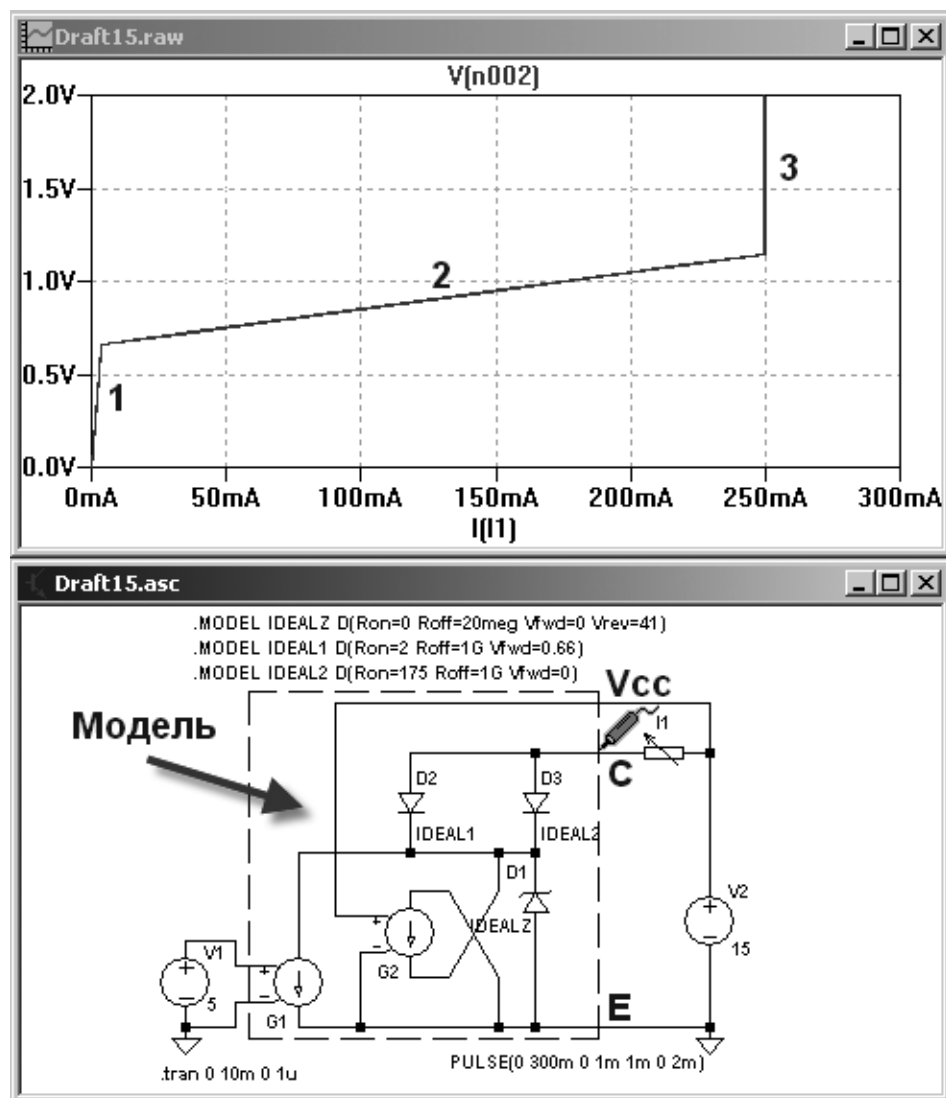
Желательно, чтобы модель корректно имитировала эти характеристики насыщения, а также ситуации превышения максимального тока и пробоя повышенным напряжением транзистора выходного каскада.



**Рис. 7.16.** Характеристики напряжения насыщения транзистора выходной схемы для включения с общим эмиттером (а) и общим коллектором (б)

Сначала рассмотрим модель выходного каскада, включенного по схеме с общим эмиттером, изображенную на рис. 7.17.

С помощью ИТУН G1 и стабилитрона D1 имитируется открытый транзистор выходного каскада. Этот эквивалентный транзистор полностью открыт, если ток нагрузки  $I_l$  не превышает максимально допустимого значения в 250 мА (для микросхемы TL494 производства Texas Instruments). При превышении максимального тока эквивалентный транзистор насыщается и напряжение на его выводах резко возрастает (участок 3 ВАХ). В области малых токов (участок 1) ВАХ эквивалентного транзистора определяется внутренним сопротивлением  $R_{on}$  диода D3, а в области средних токов (участок 2) — внутренним сопротивлением параллельно включенных диодов D2 и D3. Пробой эквивалентного транзистора при повышенном напряжении имитируется стабилитроном D1, имеющим напряжение стабилизации  $V_{rev} = 41$  В). ИТУН G2 в данном режиме не активен, т. к. напряжение управления всегда равно напряжению питания микросхемы.

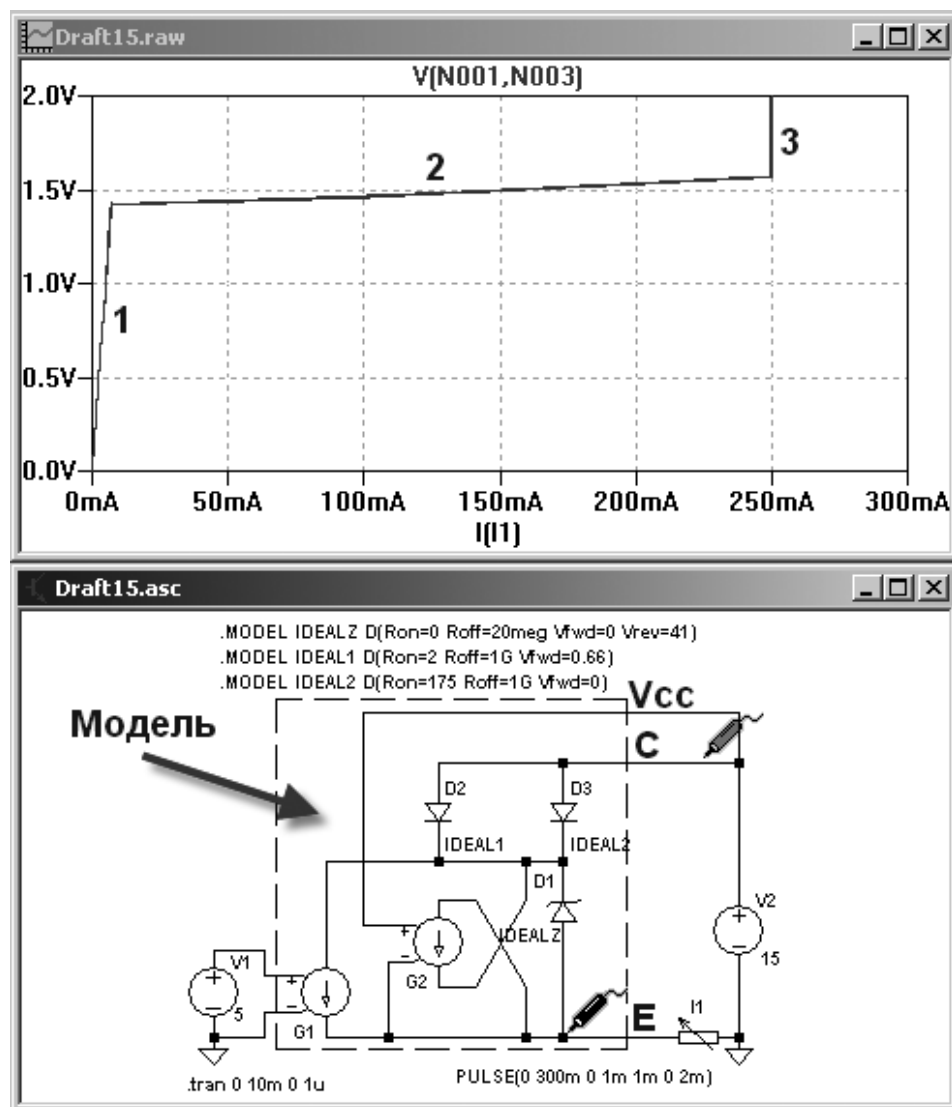


**Рис. 7.17.** Модель выходного каскада, включенного по схеме с общим эмиттером

Теперь рассмотрим модель выходного каскада, включенного по схеме с общим коллектором, изображенную на рис. 7.18.

В схеме с общим коллектором ИТУН G2 контролирует напряжение на открытом транзисторе выходного каскада. Коэффициент передачи G2 описыва-

ется таблицей  $table = (0 \ 250m, 1.42 \ 243m, 1.46 \ 150m, 1.57 \ 0)$ . Согласно этой таблице, если входное напряжение ИТУН G2 падает ниже 1.57 В, последний начинает шунтировать выход ИТУН G1. Следствием этого шунтирования будет сдвиг ВАХ открытого транзистора в сторону больших напряжений.

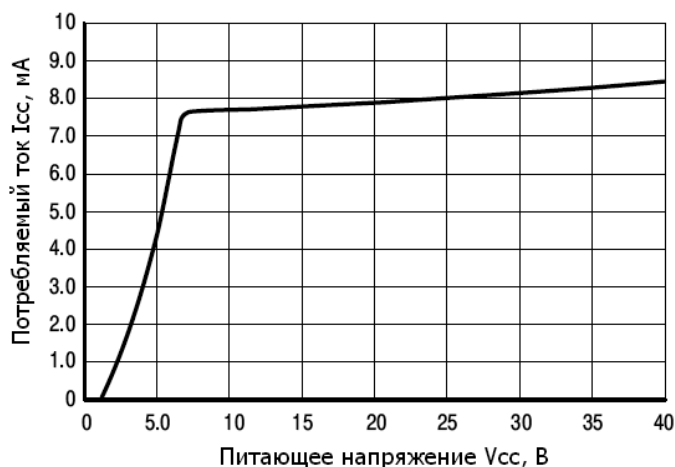


**Рис. 7.18.** Модель выходного каскада, включенного по схеме с общим коллектором



## Потребляемый ток и источник опорного напряжения

Ток  $I_{ss}$ , потребляемый микросхемой TL494, имеет нелинейную зависимость от питающего напряжения  $V_{cc}$ . Эта зависимость изображена на рис. 7.19.



**Рис. 7.19.** Зависимость тока, потребляемого микросхемой TL494, от питающего напряжения

На рис. 7.20 изображена модель, которая с помощью ИТУН G1 имитирует потребляемый ток микросхемы. Коэффициент передачи ИТУН задан таблицей  $table = (1 \ 0,5 \ 4.5m, 6.85 \ 7.6m, 40 \ 8.4m)$ . Источник опорного напряжения имитируется при помощи источника тока I1 и стабилитрона D1. Ток нагрузки источника опорного напряжения при помощи функционального источника тока B1 суммируется к току, потребляемому микросхемой. В соответствии со справочными данными, ток короткого замыкания источника опорного напряжения составляет 25 мА.

## Общая схема модели микросхемы TL494

После того как созданы основные узлы модели, создание общей схемы модели (рис. 7.21) не вызывает особых затруднений.

Всем внешним цепям иерархической схемы необходимо присвоить имена. Удобнее всего использовать имена соответствующих выводов микросхемы прототипа.

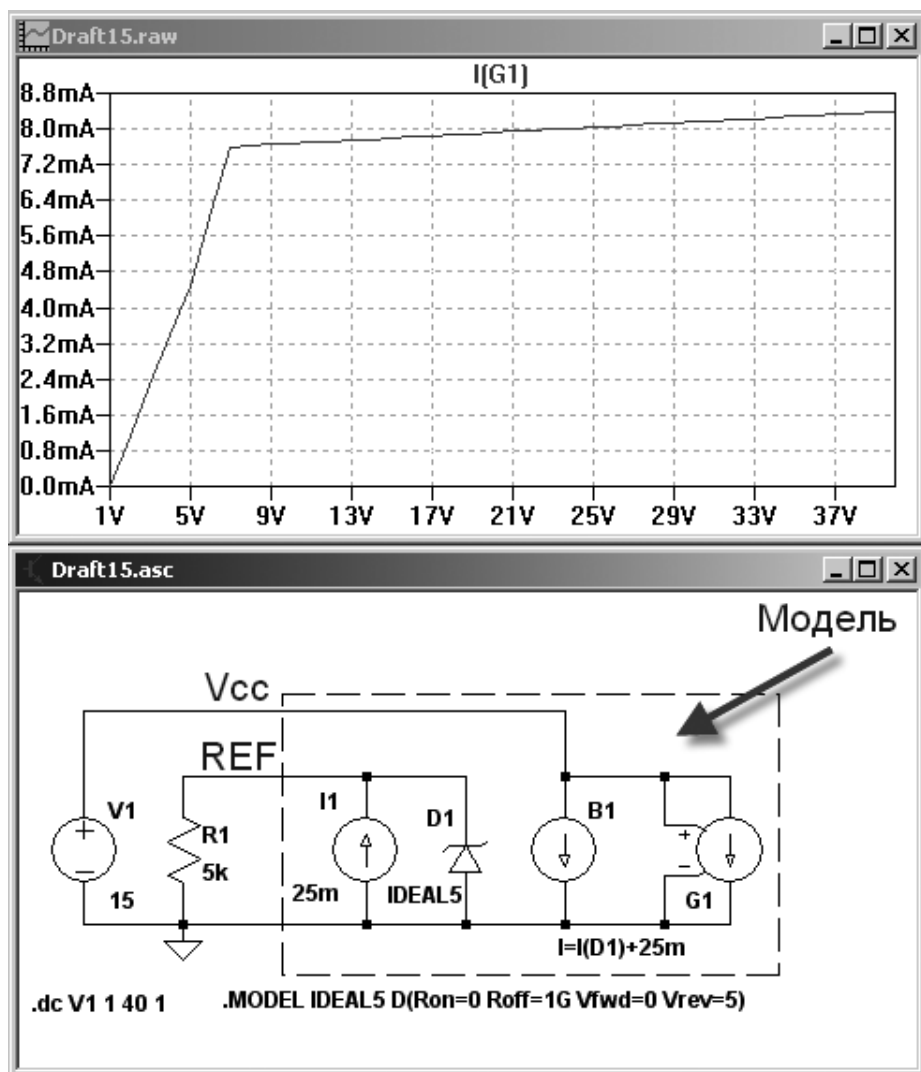


Рис. 7.20. Модель источника опорного напряжения и имитатора потребляемого тока

Чтобы присвоить имя цепи, нужно вызвать соответствующее меню операций, щелкнув по требуемой цепи правой кнопкой мышки. В появившемся меню выбрать режим **Label Net** (Ярлык для цепи), что позволит получить доступ к меню **Net Name** (Имя цепи), где, в строке **ABC** присваивается требуемое имя (рис. 7.22).

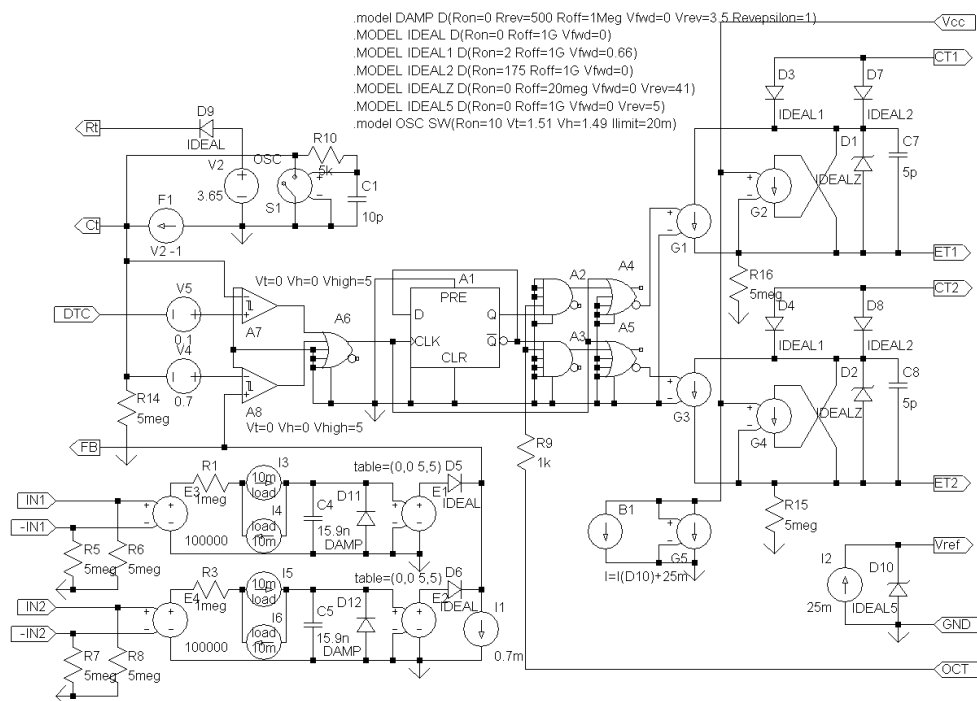


Рис. 7.21. Иерархическая схема модели микросхемы TL494

Для большей наглядности можно указывать направления сигнала во внешних цепях с помощью указателя **Port Type**:

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

### ПРИМЕЧАНИЕ

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

При помощи команды **File (Файл) | Save As (Сохранить как)** назовем полученную иерархическую схему модели TL494 как TL494H.asc и сохраним в пользовательский каталог `..\lib\sym\ Mylib`.

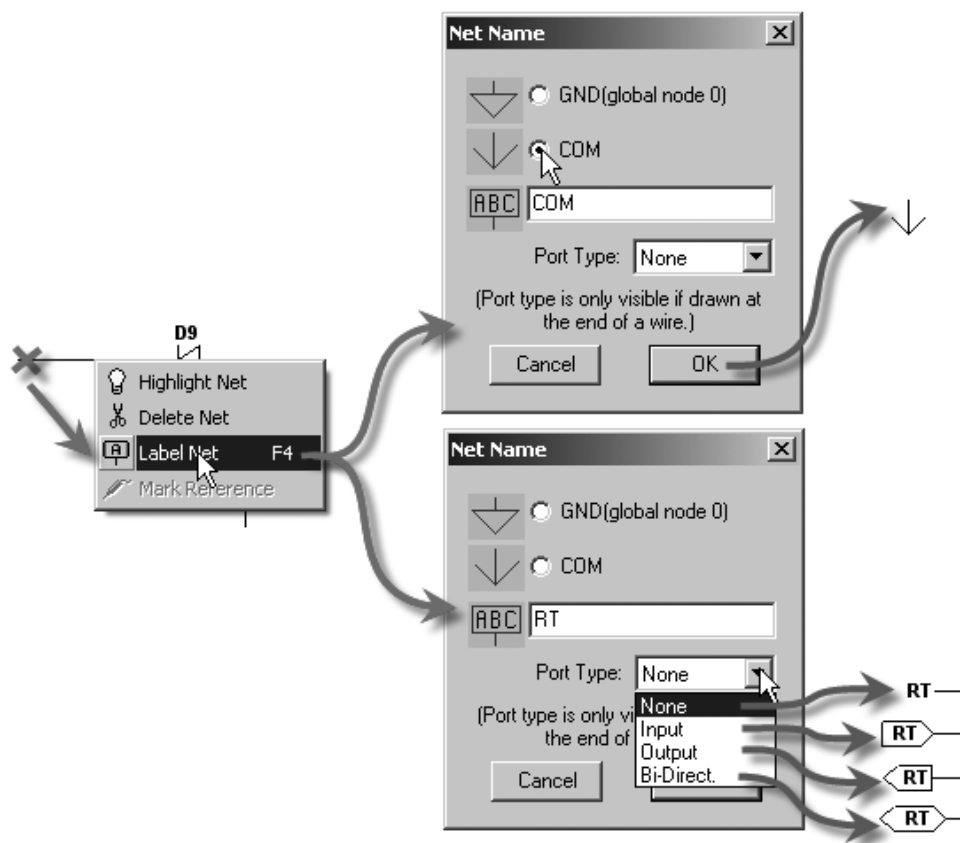


Рис. 7.22. Указание наименования и направления цепей

## 7.4. Редактор символов

Каждый схемный компонент имеет собственный символ, позволяющий легко идентифицировать его на электрической принципиальной схеме. Внешний вид символов схемных компонентов, таких как резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы и т. п., оговаривается соответствующим стандартом на конструкторскую документацию. В настоящее время в мире существует два основных стандарта, один из которых *американский*, а другой *европейский*. К последнему весьма близка отечественная Единая Система Конструкторской Документации (ЕСКД). В библиотеках LTspice использован американский стандарт на символы схемных компонентов. С этим можно

смириться, т. к. обычно данный симулятор не используется для подготовки конструкторской документации, но при необходимости символы схемных компонентов можно привести к более привычному виду.

## 7.4.1. Окно редактора символов

В LTspice имеется специальный редактор символов, с помощью которого можно изменять существующие или создавать новые символы схемных компонентов. Для запуска этого редактора необходимо активизировать команду **File (Файл) | New Symbol (Новый символ)**. В результате появится окно редактора символов (рис. 7.23).

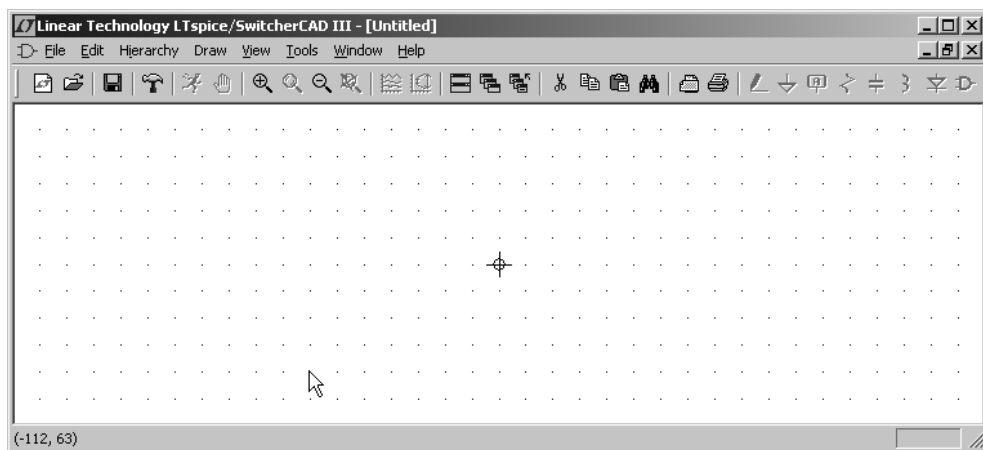



Рис. 7.23. Окно редактора символов

Отличительным признаком этого окна является крестик с кружочком в центре рабочего поля, а также символ логического вентиля  синего цвета в левой части панели команд.

## 7.4.2. Панель команд редактора символов

Панель меню команд очень похожа на аналогичную панель схемного редактора. В отличие от панели команд редактора схем здесь присутствует меню **Draw (Рисовать)**, но зато отсутствует меню **Simulate (Моделировать)**.

Рассмотрим подробнее подпункты меню команд.

- ❑ **File** (Файл) — подпункты этого меню аналогичны подпунктам меню **File** редактора схем.
- ❑ **Edit** (Редактировать) — служит для редактирования символа и содержит следующие подпункты:
  - **Undo** (Отменить) или <F9> — отменить предыдущее действие;
  - **Redo** (Вернуть) или <Shift>+<F9> — вернуть отмененное действие;
  - **Attributes** (Атрибуты) — атрибуты символа:
    - ◇ **Edit Attributes** (Редактировать атрибуты) или <Ctrl>+<A> — редактировать отдельные атрибуты символа;
    - ◇ **Attribute Window** (Окно атрибутов) или <Ctrl>+<W> — делать видимыми отдельные атрибуты символа;
  - **Add Pin/Port** (Добавить вывод/порт) или <P> — добавить электрическое подключение (вывод) символу;
  - **Move** (Переместить) или <F7> — переместить выбранные элементы символа. При этом существующие связи разрываются;
  - **Drag** (Перетащить) или <F8> — перетащить выбранные элементы символа. При этом существующие связи сохраняются;
  - **Rotate** (Вращать) или <Ctrl>+<R> — вращать выбранные элементы символа;
  - **Mirror** (Отразить) или <Ctrl>+<E> — отразить выбранные элементы символа;
  - **Delete** (Удалить) или <F5> — удалить выбранные элементы символа;
  - **Duplicate** (Дублировать) или <F6> — копировать (дублировать) выбранные элементы символа.
- ❑ **Hierarchy** (Иерархия) — посмотреть внутреннюю структуру иерархического символа.
- ❑ **Draw** (Рисовать) — создавать изображения символа при помощи графических примитивов и текста:
  - **Line** (Линию) или <L> — выбрать рисование прямой линии;
  - **Rect** (Прямоугольник) или <R> — выбрать рисование прямоугольника;
  - **Circle** (Круг) или <C> — выбрать рисование круга;

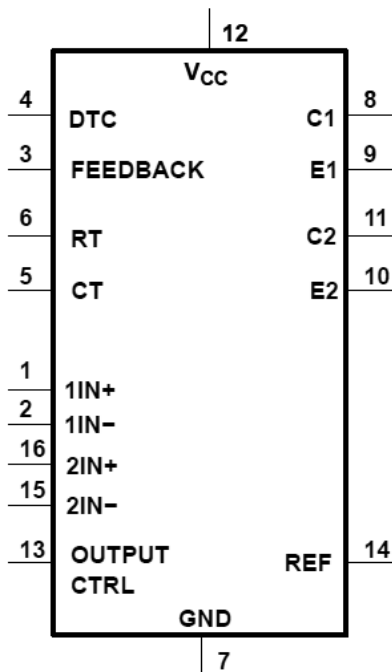
- **Arc** (Дуга) или <A> — выбрать рисование дуги;
  - **Line Style** (Стиль линии) — определить стиль линии;
  - **Text** (Текст) или <T> — выбрать ввод текста.
- **View** (Просмотр) — управление режимом просмотра изображения символа:
- **Zoom In** или <Ctrl>+<Z> — увеличить изображение символа;
  - **Zoom to Fit** (Подогнать окно) — установить масштаб изображения, позволяющий максимально использовать текущий размер рабочей области редактора символов;
  - **Zoom Out** или <Ctrl>+<B> — уменьшить изображение символа;
  - **Anchor Points** (Точки привязки) или <O> — включить/выключить видимость точек привязки графических элементов или текста;
  - **Pin Table** (Таблица выводов) — вывести таблицу, связывающую имена выводов символа с их порядковыми номерами;
  - **Status Bar** (Панель состояния) — вывести/убрать строку подсказки редактора символа;
  - **Toolbar** (Панель инструментов) — вывести/убрать панель инструментов редактора символа;
  - **Windows Tabs** (Раскладка окон) — вывести/убрать панель вложенных окон.
- **Tools** (Инструменты) — подпункты этого меню аналогичны подпунктам меню **Tools** редактора схем.
- **Windows** (Окна) — подпункты этого меню аналогичны подпунктам меню **Windows** редактора схем.
- **Help** (Помощь) — подпункты этого меню аналогичны подпунктам меню **Help** редактора схем.

### 7.4.3. Панель инструментов редактора символов

Панель инструментов редактора символов полностью аналогична панели инструментов редактора схем.

### 7.4.4. Создание изображения символа

В редакторе символов для создания изображения символа используются различные графические примитивы, такие как линия, прямоугольник, круг и дуга. Кроме этого, в изображения символа можно вносить текст, который используется для наименования выводов, а также для указания различных атрибутов символа.



**Рис. 7.24.** Схематехническое обозначение ШИМ-контроллера TL494

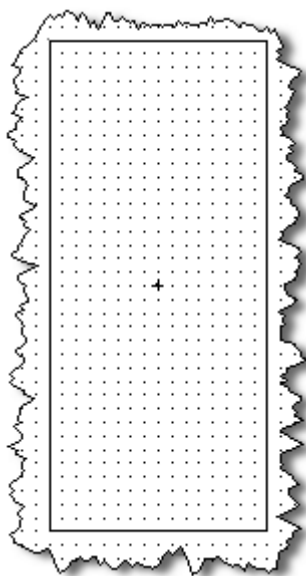
Все графические и текстовые элементы символа имеют специальные точки привязки, которые отображаются в виде маленьких красных кружочков, если с помощью команды **View | Mark Object Anchors** разрешить видимость точек привязки. Именно за эти точки элементы перемещаются или перетаскиваются при помощи команд **Move** (Переместить) и **Drag** (Перетащить). Для улучшения ориентации в рабочем поле редактора символов нанесена сетка. Шаг сетки равен 16 внутренним единицам программы, которые не имеют определенной привязки к метрическим или дюймовым мерам длины. Напри-



мер, если судить по резисторам, то этот шаг составляет примерно 2.5 мм, а если по микросхемам, то примерно 1.25 мм. Особо не вникая в эти проблемы, будем создавать новые символы, ориентируясь на те подходы, которые уже используются в программе LTspice.

В качестве примера создадим символ ШИМ-контроллера TL494 (рис. 7.24), для которого ранее уже была создана модель в виде иерархической схемы.

Согласно неписанному соглашению, принятому для символов микросхем из библиотеки программы LTspice, расстояние между отдельными выводами символа составляет 4 шага сетки. Поэтому, выбрав команду **Draw | Rect**, нарисуем прямоугольник шириной 16 и высотой 32 клетки. Так как курсор не привязан к узлам сетки, то при этом придется хорошенько прицеливаться. Результат данного художества изображен на рис. 7.25.

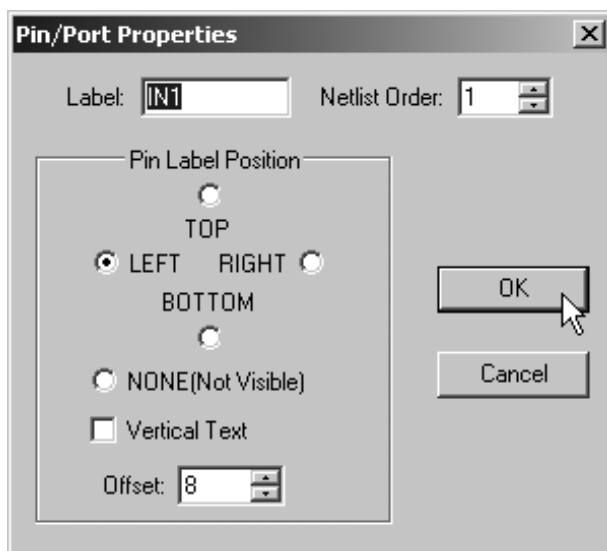


**Рис. 7.25.** Заготовка символа ШИМ-контроллера TL494

## 7.4.5. Добавление выводов

Далее надо указать точки, в которых символ будет подключаться к схеме. Эти точки создаются при помощи команды **Edit | Add Pin/Port**. Результа-

том будет появление окна **Pin/Port Properties** (Свойства вывода/порта), изображенного на рис. 7.26. В области **Pin Label Position** (Позиция названия вывода) определяются видимость (**NONE**) и расположение названия вывода. Вывод может быть расположен левее (**LEFT**), правее (**RIGHT**), выше (**TOP**) или ниже (**BOTTOM**) своего названия. С помощью поля настройки **Offset** (Смещение) можно определить смещения названия относительно вывода во внутренних единицах программы. По умолчанию это смещение составляет 8 единиц, но может быть установлено любое значение в диапазоне от 0 до 50.



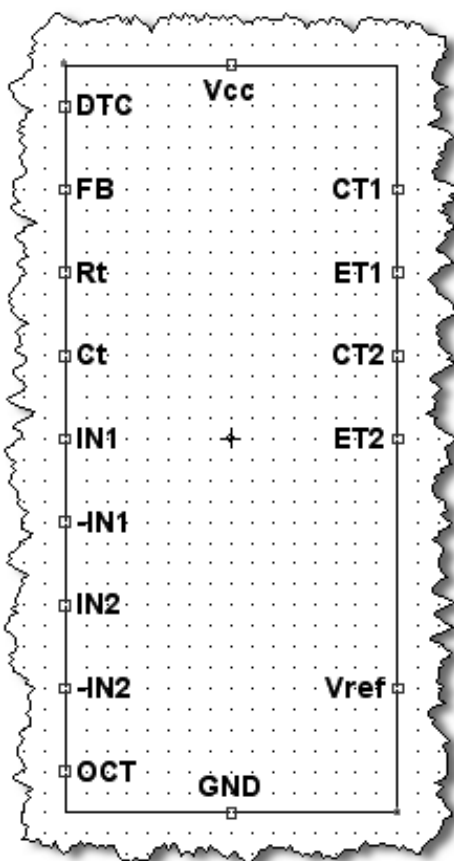
**Рис. 7.26.** Окно **Pin/Port Properties**, определяющее свойства вывода

Если символ представляет элемент, являющийся нижним уровнем иерархической схемы, то название вывода должно соответствовать названию цепи в схеме нижнего иерархического уровня. Если символ представляет стандартный SPICE-примитив, то название вывода не имеет особого значения, но порядковый номер в поле **Netlist Order** (Порядок в списке соединений) должен соответствовать номеру вывода схемного компонента. То же самое справедливо и для символа, представляющего библиотечный элемент в виде подсхемы. Но в этом случае номер в поле **Netlist Order** должен соответствовать порядковому номеру соответствующего узла в строке директивы `.subckt`.

Если создаваемый с нуля схемный компонент не является стандартным SPICE-примитивом, то желательно, чтобы нумерация выводов его символа соответствовала нумерации выводов оригинального электронного компонента, которая указывается производителем в виде справочных данных.

Ошибки, допущенные при добавлении выводов, можно легко исправить, если повторно вызвать окно **Pin/Port Properties**, щелкнув правой кнопкой мышки по соответствующему выводу символа.

На рис. 7.27 изображен результат, который должен быть получен после добавления всех выводов символа микросхемы TL494.



**Рис. 7.27.** Вид символа микросхемы TL494 после добавления всех выводов

## 7.4.6. Добавление атрибутов

Чтобы получить доступ к атрибутам символа, необходимо с помощью команды **Edit | Attributes | Edit Attributes** вызвать окно редактирования атрибутов **Symbol Attribute Editor** (Редактор атрибутов символа), изображенное на рис. 7.28.

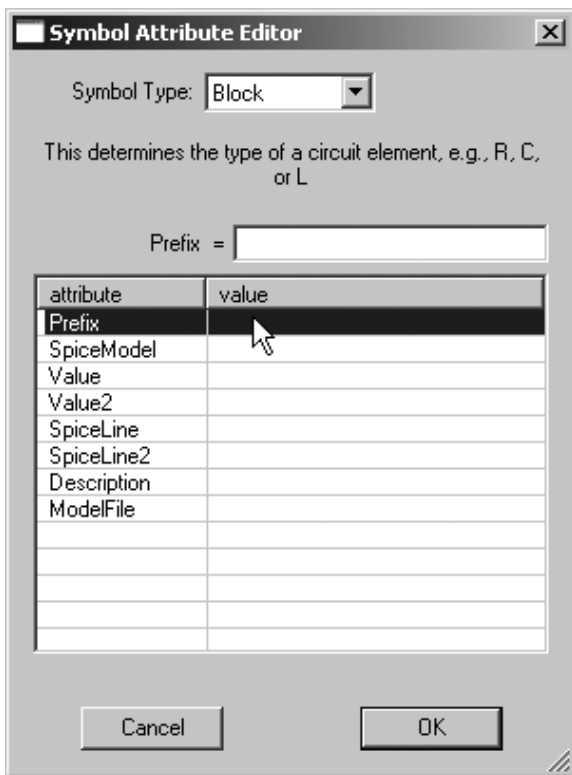


Рис. 7.28. Окно редактирования атрибутов символа

В строке **Symbol Type** необходимо выбрать тип символа:

- ☐ **Cell** — тип соответствует символам компонентов, имеющих встроенную SPICE-модель или модель в виде подсхемы. Для этих символов надо указывать атрибут **Prefix**;
- ☐ **Block** — тип соответствует символам компонентов, имеющих модель в виде иерархической схемы. Для этих символов не надо указывать атрибут **Prefix**.

Далее в виде таблички перечисляются все атрибуты символа:

- ❑ **Prefix** — этот атрибут является наиболее важным. Он определяет тип схемного компонента. Например, резистор имеет префикс R, конденсатор — C, MOSFET-транзистор — M и т. д. Если модель схемного компонента представлена подсхемой, то используется префикс X. Возможна ситуация, когда модель стандартного схемного компонента, например MOSFET-транзистора, представлена подсхемой. В этом случае символу схемного компонента также присваивается префикс X;
- ❑ **SpiceModel** — полное или относительное имя библиотечного файла, включающего модель схемного компонента;
- ❑ **Value** — атрибут отображается на схеме и обозначает номинал или тип схемного компонента;
- ❑ **Value2** — атрибут выводится в список соединений и должен совпадать с именем подсхемы в библиотечном файле. Если этот атрибут указан, редактирование компонента на схеме становится недоступным;
- ❑ **SpiceLine** — атрибут позволяет передавать параметры в подсхему;
- ❑ **SpiceLine2** — атрибут позволяет передавать параметры в подсхему;
- ❑ **Description** — атрибут, позволяющий вставить краткое описание схемного компонента;

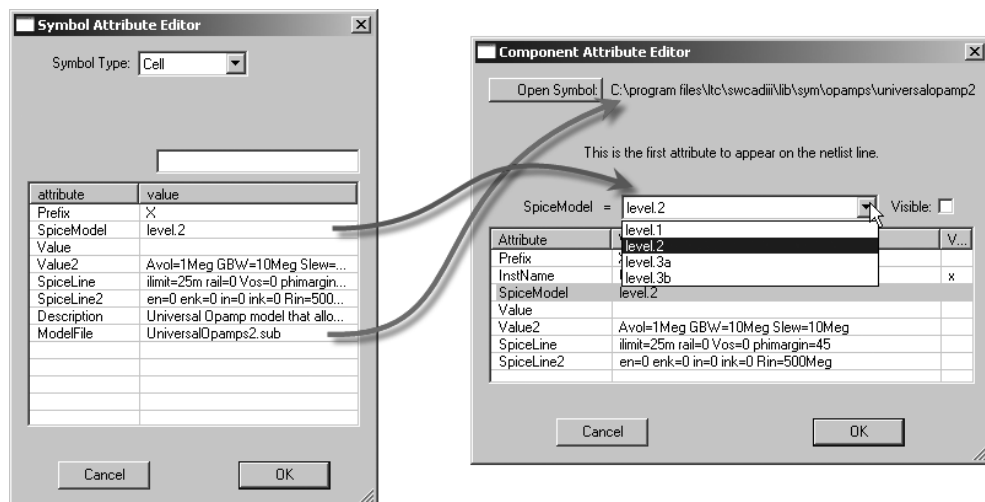


Рис. 7.29. Пример использования атрибута ModelFile

- **ModelFile** — атрибут позволяет определить файл, который будет включен в список соединений как библиотечный. Использование этого атрибута меняет назначение атрибута **SpiceModel**, который теперь указывает название конкретной подсхемы в библиотечном файле. В свою очередь, в окне редактирования компонента появляется строка выбора, позволяющая выбирать отдельные подсхемы библиотечного файла. Хорошим примером использования этого атрибута является пара символа `..lib/sym/Opamps/UniversalOpamp2.asy` и подсхемы `..lib/sub/UniversalOpamps2.sub` (рис. 7.29).

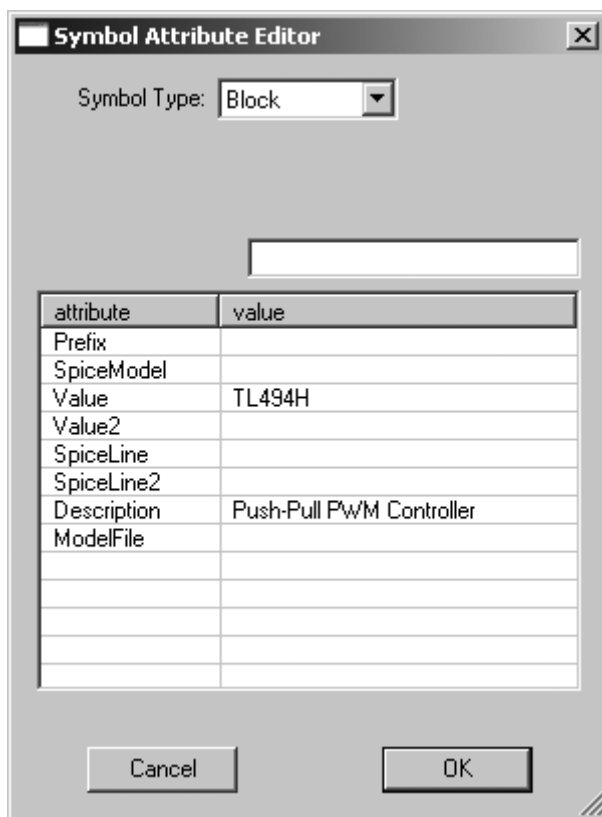


Рис. 7.30. Окно редактирования атрибутов, заполненное для символа TL494

Атрибуты **SpiceModel**, **Value**, **Value2**, **SpiceLine** и **SpiceLine2** формируют строку текстового описания компонента в формате SPICE-списка соедине-

ний. В результате генерируется SPICE-строка, которая выглядит следующим образом:

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

Компонент, имеющий префикс *x* и определенные атрибуты *Value* и *Value2*, в списке связей представлен двумя SPICE-строками:

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

Как говорилось ранее, редактирование такого компонента недоступно из редактора схем.

Также двумя SPICE-строками в списке соединений представлен компонент, имеющий префикс *x* и определенный атрибут *ModelFile*:

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

Редактирование такого компонента доступно из редактора схем.

На рис. 7.30 показано окно редактирования атрибутов **Symbol Attribute Editor**, заполненное для символа схемного компонента TL494, модель которого выполнена в виде иерархической схемы.

## 7.4.7. Видимость атрибутов

Пользователь может сам выбирать те атрибуты, которые должны быть видимыми на изображении символа. Видимость атрибутов устанавливается при помощи окна **Attribute Windows to Add**, которое вызывается командой **Edit | Attributes | Attribute Window** (рис. 7.31).

Выбрав требуемый атрибут из списка, необходимо щелкнуть по кнопке **ОК**. После этого атрибут можно разместить в рабочем поле редактора символов. После размещения атрибута можно редактировать его текст, изменять выравнивание и направление написания. Все это позволяет меню **Symbol Attribute** (Атрибут символа) (рис. 7.32), которое вызывается щелчком правой кнопки мышки по тексту атрибута.

На рис. 7.33 показан внешний вид символа микросхемы TL494 после добавления атрибутов.

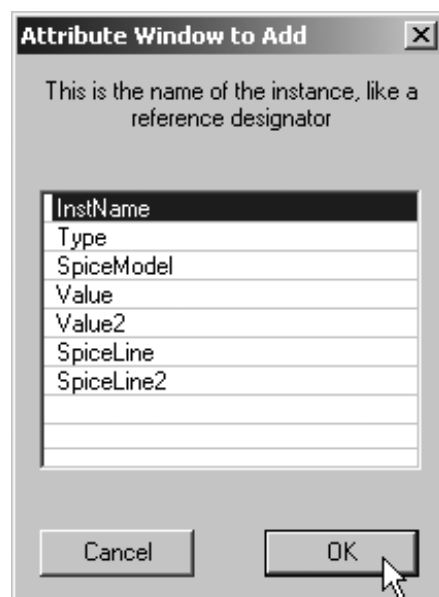


Рис. 7.31. Окно видимости атрибутов символа

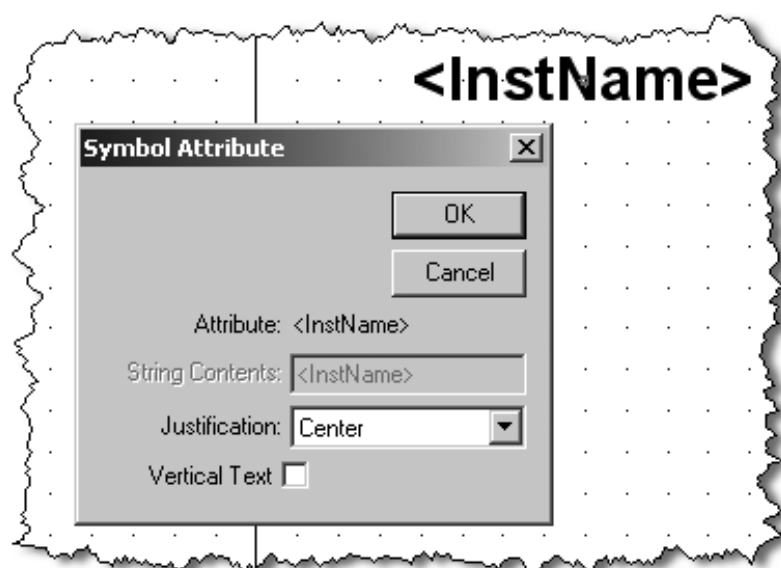
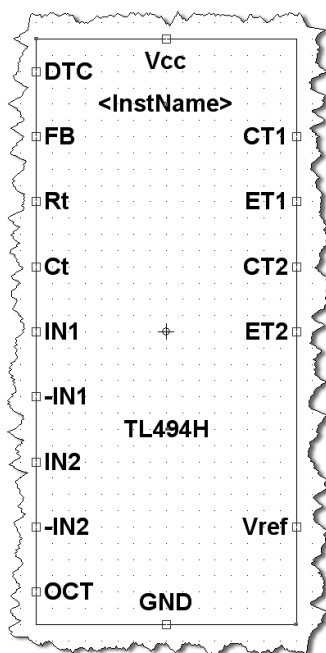


Рис. 7.32. Меню редактирования текста атрибута



При помощи команды **File | Save As...** назовем как TL494H.asy и сохраним в пользовательский каталог `..\lib\sym\ Mylib` полученный символ.



**Рис. 7.33.** Вид символа микросхемы TL494 после добавления атрибутов

## 7.5. Проверка схемного компонента, созданного в виде иерархической схемы

После того как созданы и размещены в пользовательском каталоге символ и модель схемного компонента, можно приступить к его проверке. Для проверки можно использовать тестовую схему из документации производителя (рис. 7.34).

Для этого запустим программу LTspice в режиме схемного редактора и проверим наличие нового электронного компонента в библиотеке. Если все сделано правильно, то ШИМ-контроллер TL494H можно обнаружить именно там, где он и должен быть, т. е. в пользовательском каталоге Mylib (рис. 7.35).

Разместив символ в рабочем поле схемного редактора, щелкнем по нему, чтобы вызвать окно настройки **Navigate/Edit Schematic Block** (Навигация/редактирование схемного блока). В верхней части окна расположены две кнопки **Open Symbol** (Открыть символ) и **Open Schematic** (Открыть схему), которые позволяют получить доступ к символу или схеме иерархического схемного блока. Ниже, в поле **Instance Name** (Обозначение) необходимо указать позиционное обозначение схемного компонента. По умолчанию там, как для подсхемы, написано **X1**. Далее, в поле **PARAMS** (Параметры) можно перечислить параметры, которые необходимо передать в иерархическую схему. Окошечки выбора **Visible** (Видимость) позволяют включать и выключать видимость информации, введенной в соответствующем поле.

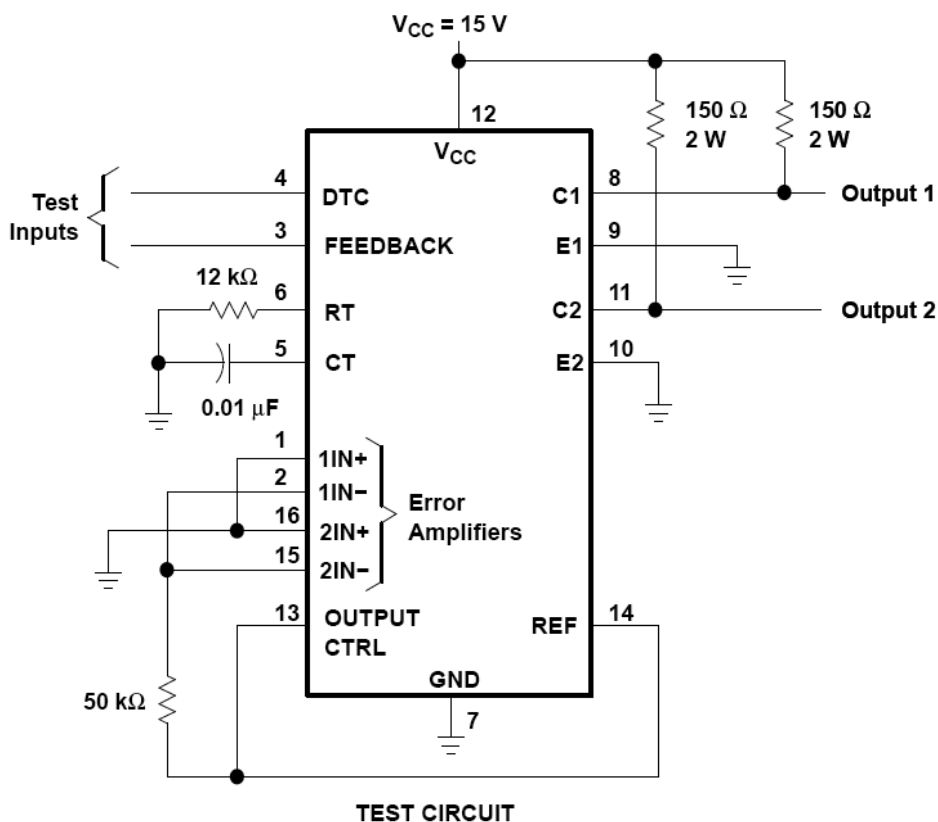


Рис. 7.34. Схема проверки ШИМ-контроллера TL494, рекомендуемая производителем

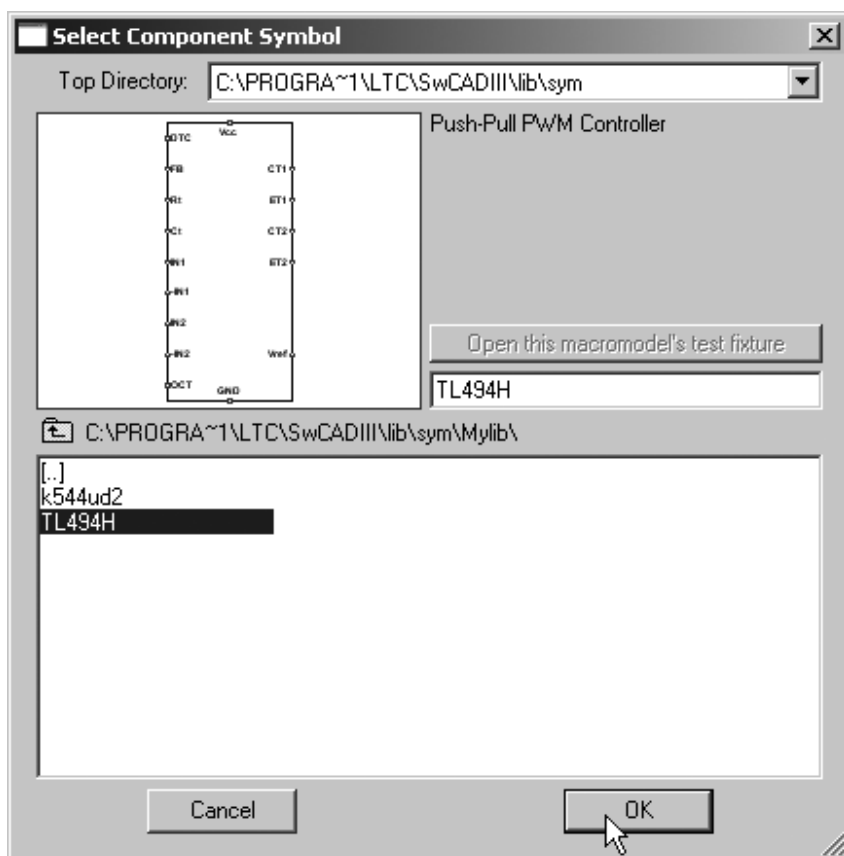


Рис. 7.35. Выбор ШИМ-контроллера TL494H из библиотеки пользователя

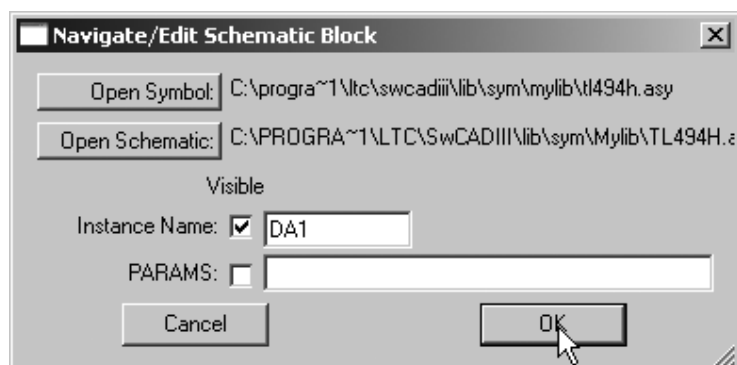


Рис. 7.36. Окно настройки иерархического схемного блока

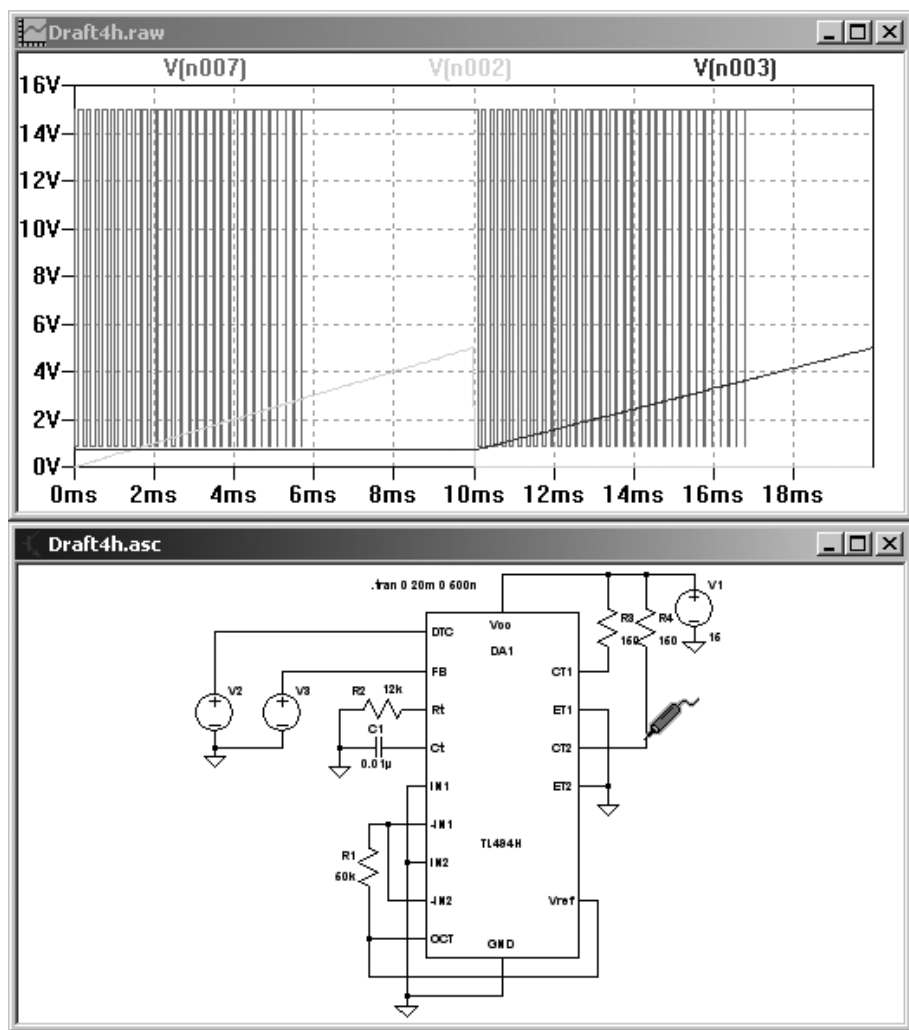


Рис. 7.37. Тестовая проверка модели микросхемы TL494, созданной в виде иерархической схемы

Иерархическому схемному компоненту, в отличие от встроенных, можно присваивать позиционное обозначение с любым префиксом. Поэтому впишем в поле **Instance Name** более привычное наименование — DA1 и нажмем кнопку **OK** (рис. 7.36).

Далее, в уже знакомой манере, создадим схему тестирования микросхемы TL494 и запустим процесс моделирования (рис. 7.37).

## 7.6. Создание модели схемного компонента с использованием подсхемы

Несмотря на многие положительные качества, такие как наглядность и удобство редактирования, иерархические схемы имеют и некоторые недостатки. Например, невозможно использовать модели в виде иерархической схемы на других SPICE-симуляторах, а также требуется держать файл иерархической схемы в одном каталоге с основной схемой.

### 7.6.1. Преобразование иерархической схемы в библиотечную подсхему

Рассмотрим процесс преобразования иерархической схемы в соответствующую ей подсхему.

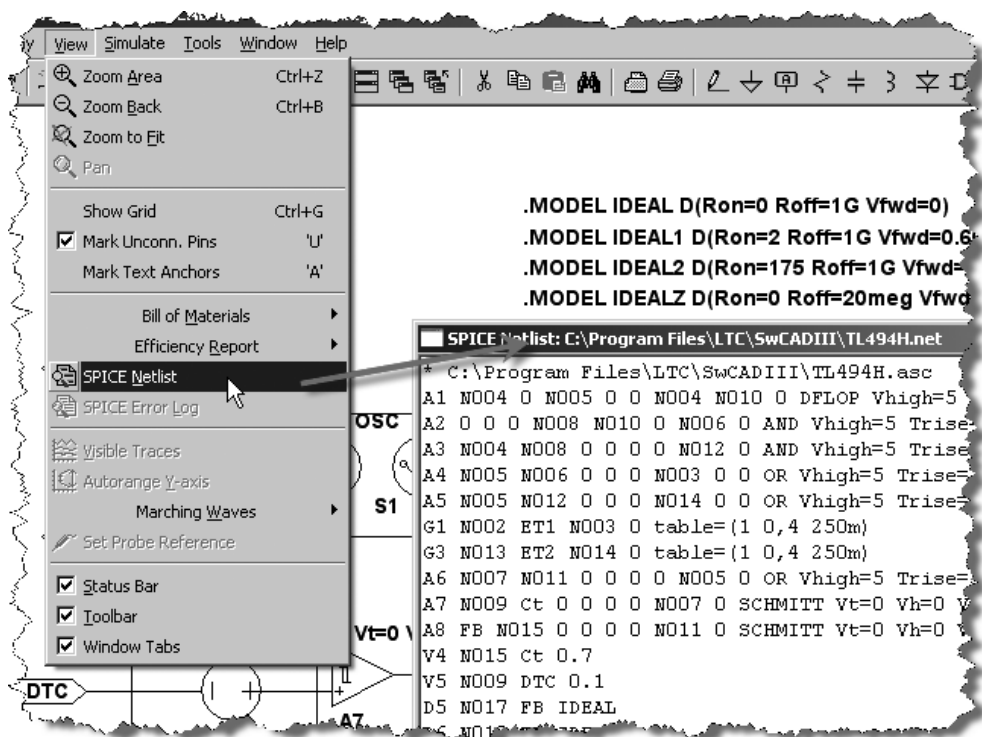


Рис. 7.38. Вызов списка связей иерархической схемы TL494

Подобное преобразование можно произвести с помощью схемного редактора программы LTspice. Для этого загрузим в его окно иерархическую схему контроллера TL494H (рис. 7.21), созданную на предыдущих этапах. Далее можно сгенерировать список связей, но перед этим, при помощи команды **Tools | Control Panel**, вызовем панель управления **Control Panel** и сбросим флажок напротив опции **Default Devices**, расположенной на вкладке **Netlist Options**.

Это позволит исключить ненужные строки определения моделей по умолчанию. После этого при помощи команды **View | SPICE Netlist** вызовем окно просмотра списка связей иерархической схемы (рис. 7.38).

Теперь необходимо выделить весь текст списка связей, с помощью комбинации клавиш <Ctrl>+<C> скопировать его в буфер обмена, а затем вставить в окно любого текстового редактора, например в блокнот. Чтобы превратить полученный список связей в подсхему, необходимо вставить в него соответствующие директивы. В начале списка вставляется строка:

```
.subckt tl494 IN1 -IN1 IN2 -IN2 FB DTC Vref OCT CT1 ET1 CT2 ET2 Ct Rt GND
Vcc
```

Порядок перечисления узлов должен соответствовать порядку, в котором эти узлы передаются в подсхему. Напомним, что этот порядок устанавливается для каждого вывода символа в поле **Netlist Order** (рис. 7.26) при его описании.

В конце списка удаляются строки с директивами `.backanno` и `.end`, а вместо них вставляется директива конца подсхемы `.ends`. В результате получим список соединений, приведенный в листинге 7.3.

### Листинг 7.3. Список соединений подсхемы ШИМ-контроллера TL494

```
*
.subckt tl494 IN1 -IN1 IN2 -IN2 FB DTC Vref OCT CT1 ET1 CT2 ET2 Ct Rt GND
Vcc

A1 N005 0 N006 0 0 N005 N011 0 DFLOP Vhigh=5 Trise=50n Rout=30
A2 0 0 0 N009 N011 0 N007 0 AND Vhigh=5 Trise=50n Rout=30
A3 N005 N009 0 0 0 N013 0 AND Vhigh=5 Trise=50n Rout=30
A4 N006 N007 0 0 0 N004 0 0 OR Vhigh=5 Trise=300n Rout=30
A5 N006 N013 0 0 0 N015 0 0 OR Vhigh=5 Trise=300n Rout=30
G1 N002 ET1 N004 0 table=(1 0,4 250m)
G3 N014 ET2 N015 0 table=(1 0,4 250m)
```

A6 N008 N012 0 0 0 0 N006 0 OR Vhigh=5 Trise=50n Rout=30  
 A7 N010 Ct 0 0 0 0 N008 0 SCHMITT Vt=0 Vh=0 Vhigh=5  
 A8 FB N016 0 0 0 0 N012 0 SCHMITT Vt=0 Vh=0 Vhigh=5  
 V4 N016 Ct 0.7  
 V5 N010 DTC 0.1  
 D5 N018 FB IDEAL  
 D6 N020 FB IDEAL  
 R1 IN1 N017 1meg  
 R3 IN2 N019 1meg  
 C4 N017 -IN1 15.9n  
 C5 N019 -IN2 15.9n  
 D1 ET1 N002 IDEALZ  
 E1 N018 0 N017 -IN1 table=(0,0 1.96m,0 2m,2 2.04m,4 20m,4.5)  
 E2 N020 0 N019 -IN2 table=(0,0 1.96m,0 2m,2 2.04m,4 20m,4.5)  
 R5 -IN1 0 5meg  
 R6 IN1 0 5meg  
 R7 -IN2 0 5meg  
 R8 IN2 0 5meg  
 I1 FB 0 0.7m  
 V2 N001 0 3.65  
 F1 0 Ct V2 -1  
 S1 0 Ct N003 0 OSC  
 D3 CT1 N002 IDEAL1  
 D7 CT1 N002 IDEAL2  
 G2 ET1 N002 Vcc ET1 table=(0 250m,1.42 243m,1.46 150m,1.57 0)  
 D2 ET2 N014 IDEALZ  
 D4 CT2 N014 IDEAL1  
 D8 CT2 N014 IDEAL2  
 G4 ET2 N014 Vcc ET2 table=(0 250m,1.42 243m,1.46 150m,1.57 0)  
 C7 N002 ET1 5p  
 C8 N014 ET2 5p  
 D9 N001 Rt IDEAL  
 R14 Ct 0 5meg  
 R15 ET2 0 5meg  
 R16 ET1 0 5meg

```

G5 Vcc 0 Vcc 0 TABLE=(1 0,5 4.5m,6.85 7.6m,40 8.4m)
I2 0 Vref 25m
D10 0 Vref IDEAL5
B1 Vcc 0 I=I(D10)+25m
R9 N009 OCT 1k
R10 Ct N003 5k
C1 N003 0 10p
.MODEL IDEALZ D(Ron=0 Roff=20meg Vfwd=0 Vrev=41)
.MODEL IDEAL D(Ron=0 Roff=1G Vfwd=0)
.model OSC SW(Ron=10 Vt=1.51 Vh=1.49 Ilimit=20m)
.MODEL IDEAL1 D(Ron=2 Roff=1G Vfwd=0.66)
.MODEL IDEAL2 D(Ron=175 Roff=1G Vfwd=0)
.MODEL IDEAL5 D(Ron=0 Roff=1G Vfwd=0 Vrev=5)
.ends tl494

```

Сохраним подсхему в пользовательскую папку `..lib\sym\Mylib` под именем `tl494.lib`.

## 7.6.2. Редактирование символа схемного компонента

Загрузим в редактор символов созданный ранее символ `TL494H.asy` и с помощью команды **Edit | Attributes | Edit Attributes** или комбинации клавиш `<Ctrl>+<A>` вызовем окно редактирования атрибутов символа. Далее отредактируем его так, как это показано на рис. 7.39.

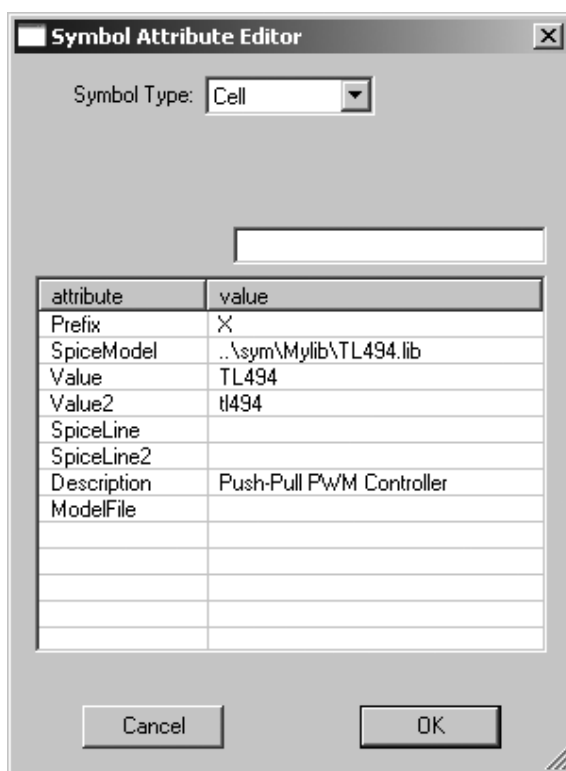
После этого сохраним символ в пользовательскую папку `..lib\sym\Mylib` под именем `tl494.asy`.

## 7.6.3. Проверка схемного компонента, созданного в виде подсхемы

Для проверки схемного компонента, созданного в виде подсхемы, можно использовать тестовую схему (рис. 7.37), которая ранее уже использовалась для проверки схемного компонента, созданного в виде иерархической схемы. Для этого достаточно заменить схемный компонент `TL494H` на вновь созданный `TL494`. Так как схемный компонент создан в виде подсхемы, то редактирование его параметров в окне схемного редактора становится недоступным.



В этом можно убедиться, щелкнув по символу компонента правой кнопкой мышки (рис. 7.40).



**Рис. 7.39.** Вид отредактированного окна атрибутов символа TL494



**Рис. 7.40.** Окно предупреждения невозможности редактирования

Далее запустим процесс моделирования (рис. 7.41).

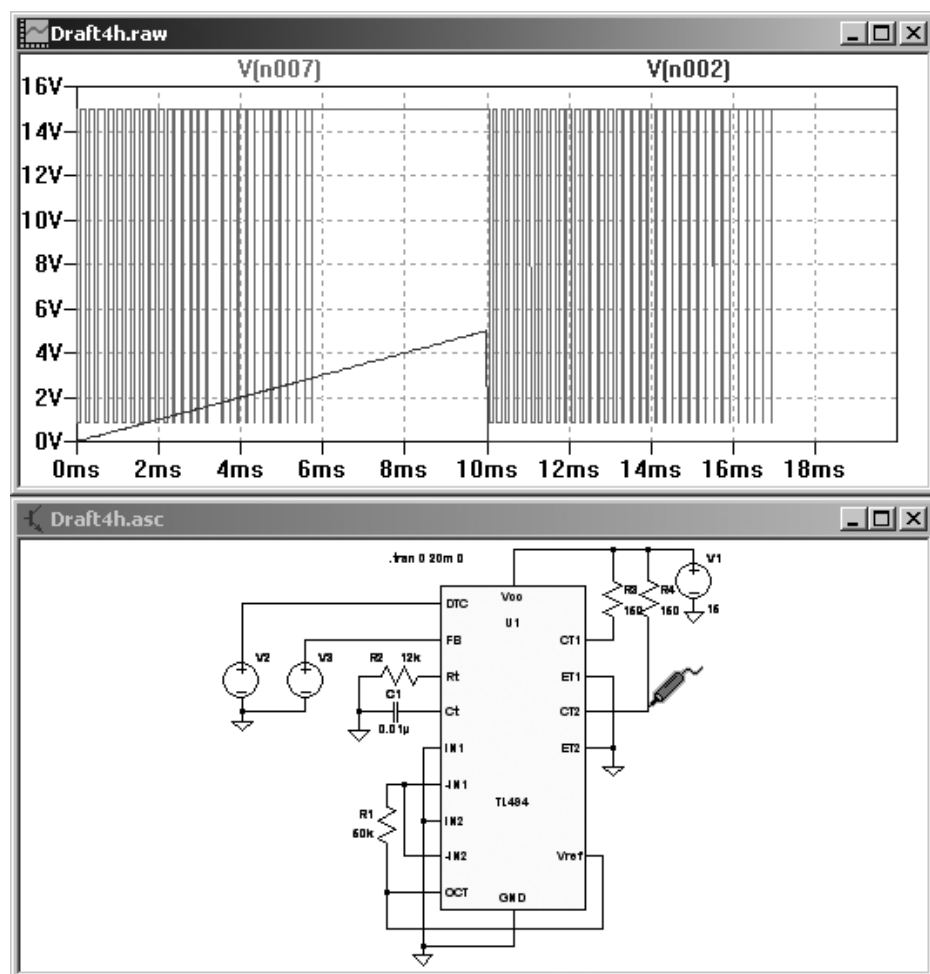
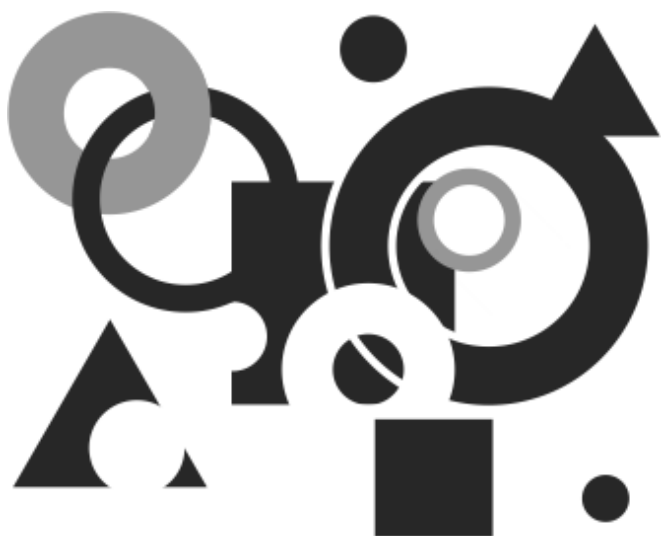
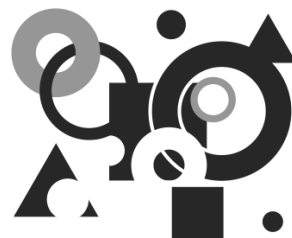


Рис. 7.41. Тестовая проверка модели микросхемы TL494, созданной в виде подсхемы



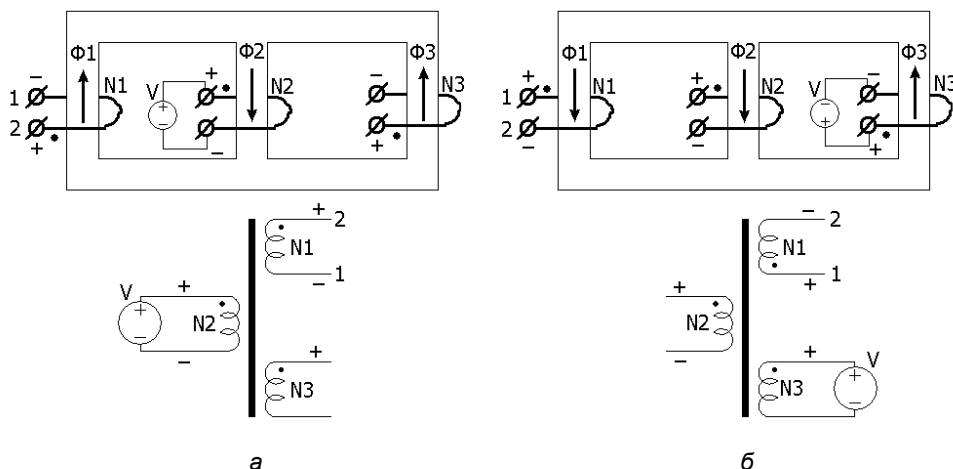
**П Р И Л О Ж Е Н И Я**

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1



# Моделирование сложных электромагнитных компонентов при помощи LTspice

LTspice имеет встроенные средства, позволяющие моделировать линейный и нелинейный трансформаторы с неразветвленным сердечником. Попытка таким же образом моделировать трансформатор с разветвленным сердечником требует большой осторожности, т. к. может привести к серьезным ошибкам, одна из которых показана на рис. П1.1.



**Рис. П1.1.** Типичная ошибка неверного моделирования разветвленного трансформатора

Согласно рис. П1.1, взаимная фазировка обмоток трехобмоточного и трех-  
стержневого трансформаторов зависит от того, какая обмотка в данный мо-  
мент подключена к источнику напряжения. Например, если источник напря-  
жения подключен к обмотке N2 на среднем стержне (рис. П1.1, *а*), то в  
рассматриваемый момент на выводе 1-N1 будет "-", а на выводе 2-N1 будет  
"+". Если источник напряжения подключить к обмотке N3 на крайнем стерж-  
не (рис. П1.1, *б*), то фаза напряжения на выводах N1 будет сдвинута на  $180^\circ$ ,  
т. е. теперь на 1-N1 будет "+", а на 2-N1 будет "-". Если же этот трансформа-  
тор моделировать как неразветвленный, то ничего подобного происходить не  
будет. В этом случае взаимная фазировка обмоток будет сохраняться незави-  
симо от того, к какой из обмоток подключен источник напряжения.

Следовательно, для корректного моделирования электромагнитных компо-  
нентов с разветвленным или сложным сердечником необходимо создавать  
специальные модели, способные имитировать их физическую структуру.  
Наиболее распространенным является метод создания модели, использую-  
щий модель магнитного сопротивления. Этот метод имеет преимущество  
простой генерации модели. При этом между имитационной моделью и физи-  
ческим компонентом сохраняется вполне очевидная взаимосвязь, что упро-  
щает процесс создания модели, а также позволяет избежать многих ошибок.

## П1.1. Принцип подобия электрических и магнитных цепей

Процесс создания модели связан с трансляцией физической структуры маг-  
нитного компонента в электрическую схему. Подобное преобразование воз-  
можно благодаря принципу подобия, согласно которому к расчету магнит-  
ных цепей применимы все приемы расчета электрических цепей с  
нелинейными сопротивлениями<sup>1</sup>. В этом случае подобными считаются сле-  
дующие электрические и магнитные величины.

1. Электродвижущая сила — ЭДС ( $V$ ) — и магнитодвижущая сила — МДС ( $F$ ).
2. Напряженность электрического поля ( $E$ ) и напряженность магнитного поля ( $H$ ).
3. Электрический ток ( $I$ ) и магнитный поток ( $\Phi$ ).

---

<sup>1</sup> Л. А. Бессонов. Теоретические основы электротехники. 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Выс-  
шая школа, 1973.

4. Плотность электрического тока ( $J$ ) и плотность магнитного потока ( $B$ ).
5. Электрическое сопротивление ( $R$ ) и магнитное сопротивление ( $R$ ).
6. Проводимость ( $s$ ) и проницаемость ( $\mu$ ).

Подобные параметры электрических и магнитных цепей сведены в табл. П1.1.

**Таблица П1.1. Подобные параметры электрических и магнитных цепей**

Электричество	Магнетизм
$V$ — электрическое напряжение (электродвижущая сила) $E$ — напряженность электрического поля $V = -\int \bar{E} \cdot d\bar{l}_c = E \cdot l_c$ $E = \frac{V}{l_c}$	$F = N \cdot I$ — магнитное напряжение (магнитодвижущая сила) $H$ — напряженность магнитного поля $F = \oint \bar{H} \cdot d\bar{l}_m = H \cdot l_m$ $H = F/l_m = N \cdot I/l_m$
$J$ — плотность тока $J = \sigma \cdot E$ , где $\sigma$ — удельная электропроводность	$B$ — плотность магнитного потока $B = \mu \cdot H$ , где $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ — абсолютная проницаемость; $\mu_r$ — относительная проницаемость; $\mu_0$ — проницаемость вакуума $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$
$I$ — электрический ток $I = \int_s \bar{J} \cdot d\bar{s} = J \cdot A_c$ , где $A_c$ — сечение проводника	$\Phi$ — магнитный поток $\Phi = \int_s \bar{B} \cdot d\bar{s} = B \cdot A_m$ , где $A_m$ — сечение сердечника
$R$ — сопротивление $R = V/I = l_c / (\sigma \cdot A_c)$ $G = 1/R$ — проводимость	$R$ — магнитное сопротивление $R = F/\Phi = l_m / (\mu \cdot A_m) = N^2/L$ $P = 1/R$ — проницаемость

Индуктивность магнитной цепи непосредственно связана с магнитным сопротивлением  $R$  и количеством витков в обмотке  $N$ :

$$L = N^2 / R = N^2 \cdot P. \quad (1)$$

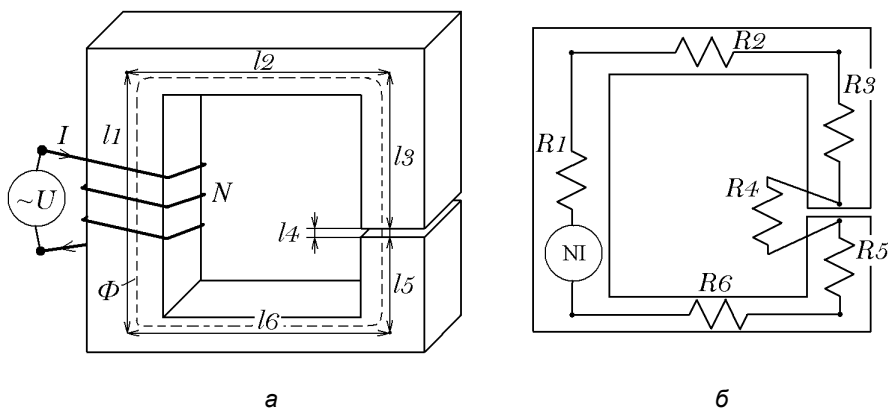
Аналогично для взаимной индуктивности:

$$M_u = N_1 \cdot N_2 / R_{12} = N_1 \cdot N_2 \cdot P_{12}$$

Воспользовавшись принципом подобия, создадим модель индуктора с неразветвленным сердечником различного сечения и немагнитным зазором, общий вид которого изображен на рис. П1.2, а.

Обычно модель разрабатывается в следующей последовательности.

1. Сердечник делится на отдельные части, включая немагнитный зазор, и каждой части присваивается соответствующее магнитное сопротивление (рис. П1.2, б).



**Рис. П1.2.** Моделирование индуктора с неразветвленным сердечником и немагнитным зазором

2. Вычисляется магнитное сопротивление каждой части.

Для участков сердечника:

$$R1 = \frac{l1}{\mu_0 \mu_r A_{m1}}; \quad R2 = \frac{l2}{\mu_0 \mu_r A_{m2}}; \quad R3 = \frac{l3}{\mu_0 \mu_r A_{m3}};$$

$$R5 = \frac{l5}{\mu_0 \mu_r A_{m5}}; \quad R6 = \frac{l6}{\mu_0 \mu_r A_{m6}}.$$

Для немагнитного зазора:

$$R4 = \frac{l4}{\mu_0 A_{m4}}.$$

3. Присваивается магнитное напряжение источнику с ампервитками  $F = N \cdot I$ .
4. Рисуеться эквивалентная цепь, показанная на рис. П1.3.

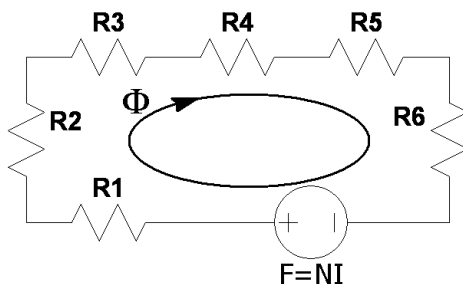


Рис. П1.3. Результирующая модель магнитной цепи индуктора

Некоторые симуляторы, такие как SIMPLORER, используют именно этот принцип для моделирования сложных магнитных цепей. Для этого в библиотеке симулятора есть соответствующие элементы, такие как источник магнито-движущей силы (MMF), источник магнитного потока (FLUX), магниторе-зистор (RMAG), обмотка (ELTOMAG) и т.д. И все же, если вам понадобилось создать модель сложного трансформатора или дросселя, то можете пока не торопиться с покупкой и изучением достаточно дорогого и сложного симулятора. В большинстве случаев подобная задача вполне под силу симулятору LTspice IV. Для создания реалистичной модели разветвленного сердечника нам будет достаточно всего лишь его модели нелинейного индуктора.

## П1.2. Дуальность физических цепей

Под *дуальностью* или двойственностью обычно понимают аналогичность математического описания различных процессов, происходящих в различных физических цепях. В табл. П1.2 указаны типичные дуальные пары для электрических цепей.



Таблица П1.2. Дуальные пары

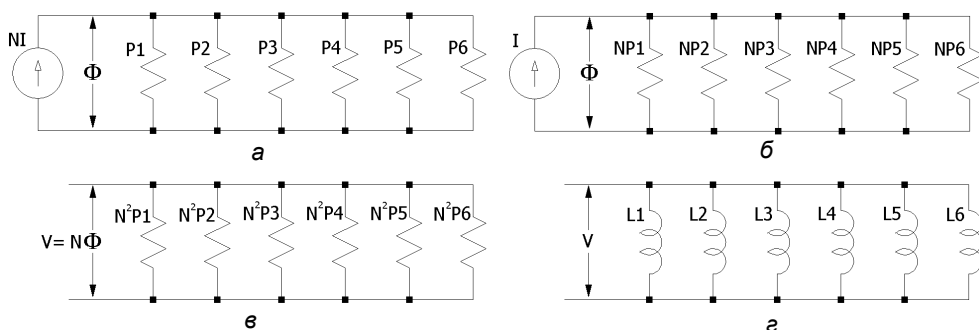
Величина	$\leftrightarrow$	Дуальная величина
$V$		$I$
$I$		$V$
$R$		$G = 1/R$
$G$		$R = 1/G$
$C$		$L$
$L$		$C$
Разомкнутая цепь		Замкнутая цепь
Замкнутая цепь		Разомкнутая цепь
Генератор напряжения		Генератор тока
Генератор тока		Генератор напряжения
Ветвь		Узел
Узел		Ветвь

### П1.2.1. Модель неразветвленной магнитной цепи

Чтобы преобразовать модель магнитной цепи в соответствующую ей электрическую схему, необходимо проделать следующие шаги<sup>1</sup>.

1. Исходя из структуры моделируемого магнитного устройства, начертим соответствующую схему магнитной цепи (рис. П1.2 и рис. П1.3).
2. Используя принцип дуальности, конвертируем модель сопротивлений ( $R$ ) в модель проводимостей ( $P$ ). В этом случае последовательные цепи превращаются в параллельные, магнитный поток превращается в магнитное напряжение, а источник магнитного напряжения превращается в источник тока (рис. П1.4, а).

<sup>1</sup> Steven M. Sandler. SMPS Simulation with Spice 3. — McGraw-Hill Professional, 1996.



**Рис. П1.4.** Последовательность получения модели неразветвленной магнитной цепи

3. Чтобы убрать витки из источника тока, умножим величины магнитных проводимостей на количество витков  $N$  (рис. П1.4, б).
4. Согласно закону Фарадея, всякое изменение магнитного потока  $\Delta\Phi$ , сцепленного с обмоткой  $N$ , в течение интервала времени  $\tau$ , независимо от причины вызвавшей это изменение, приведет к тому, что в обмотке будет наведено напряжение  $V$ <sup>1</sup>:

$$-V = N \cdot \Delta\Phi / \tau$$

Знак минус в формуле отражает правило Ленца, согласно которому индукционный ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре, имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле противодействует тому изменению магнитного потока, которым был вызван данный ток.

Следовательно, если к обмотке  $N$  приложить напряжение  $V$ , то в течение интервала времени  $\tau$  магнитный поток, сцепленный с витками обмотки, изменится на величину  $\Delta\Phi$ :

$$\Delta\Phi = -V \cdot \tau / N. \quad (2)$$

Таким образом, магнитный поток имеет вольт-секундную зависимость и его изменение зависит только от количества витков обмотки, намотанной поверх сердечника, и времени, в течение которого к этой обмотке приложено напряжение. Материал сердечника, а также его длина и сечение не оказывают какого-то влияния на изменение потока. Если считать, что нас не ограничивают временные рамки, и магнитный поток изменяется от 0,

<sup>1</sup> В. П. Миловзоров. Электромагнитная техника. — М.: Высшая школа, 1966.

то без всякой потери точности можно записать закон Фарадея в несколько упрощенной форме  $-V = N \cdot \Phi$ , используя вместо  $\Delta\Phi$ . Теперь, чтобы перейти к обмоточному напряжению, каждый элемент схемы и поток  $\Phi$  умножим на количество витков обмотки  $N$ . В результате схема будет представлена обмоточным напряжением и магнитными проводимостями в масштабе  $N^2$  (рис. П1.4, в).

5. Согласно уравнению (1),  $L = N^2 \cdot P$ . Следовательно, все масштабированные проводимости можно заменить соответствующими индуктивностями (рис. П1.4, з).

Таким образом, последовательную магнитную цепь, состоящую из различных фрагментов, можно моделировать с помощью  $k$  отдельных индукторов, каждый из которых соответствует определенному фрагменту магнитной цепи, т. е. имеет соответствующие длину, сечение и материал сердечника.

Подтвердим полученные выводы с помощью следующей цепочки логических рассуждений.

Так как цепь не разветвленная, то через нее протекает один и тот же поток  $\Phi$ . Возникает вопрос, как создать одинаковый поток в сердечниках независимых индукторов? В решении этой задачи нам поможет тот же закон электромагнитной индукции (2), согласно которому мы можем получить равный поток в различных сердечниках, если намотаем на них обмотки с равным количеством витков и соединим эти обмотки параллельно.

Теперь, обеспечив равенство потоков, решим проблему корректного моделирования намагничивающего тока.

На каждом из участков различного сечения поток  $\Phi$  вызывает различную индукцию:

$$B_k = \frac{\Phi}{S_k}.$$

В свою очередь магнитная индукция  $B_k$ , через кривую намагничивания конкретного фрагмента, связана с напряженностью магнитного поля  $H_k$  внутри фрагмента сердечника. Зная напряженность магнитного поля и длину фрагмента, можно найти магнитное напряжение  $H_k \cdot l_k = F_k$ , которое прикладывается к каждому из фрагментов. Так как фрагменты сердечника включены последовательно, то общее магнитное напряжение будет равно сумме напряжений, требуемых для создания потока в каждом фрагменте:

$$\sum F_k = F.$$

То, что токи намагничивания отдельных фрагментов суммируются, позволяет моделировать их при помощи той же модели, которая моделирует равные потоки, и где отдельные фрагменты моделируются независимыми индукторами с одинаковыми обмотками, включенными параллельно (рис. П1.5):

$$\sum F_k = \sum (I_k \cdot N) = I \cdot N.$$

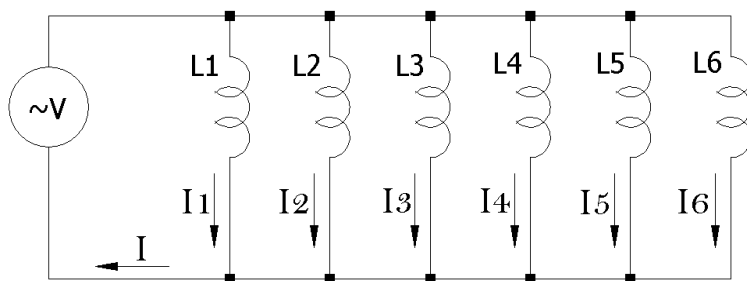


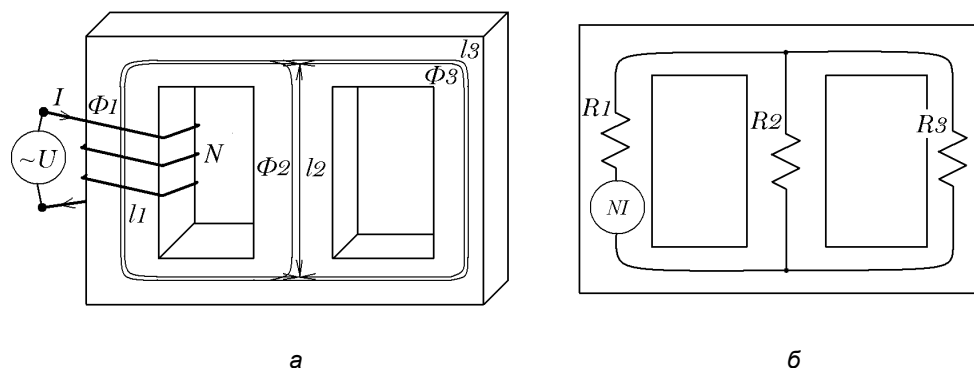
Рис. П1.5. Модель последовательной магнитной цепи

Так как на всех фрагментах модели сердечника мотаются обмотки, имеющие одинаковое количество витков, то для моделирования витковых данных реального трансформатора можно использовать идеальные трансформаторы напряжения.

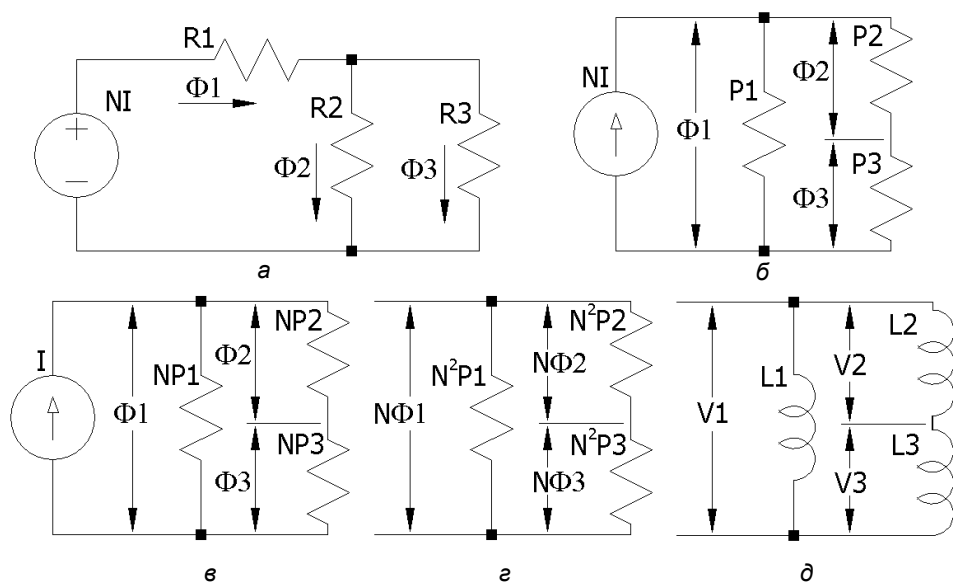
## П1.2.2. Моделирование разветвленной магнитной цепи

Чтобы преобразовать модель разветвленной магнитной цепи (рис. П1.6, а) в соответствующую ей электрическую схему, необходимо проделать шаги, аналогичные проделанным ранее с неразветвленной магнитной цепью:

1. Исходя из структуры моделируемого магнитного устройства, начертим соответствующую схему магнитной цепи (рис. П1.6, б).
2. Используя принцип дуальности, конвертируем модель сопротивлений ( $R$ ) в модель проводимостей ( $P$ ). В этом случае последовательные цепи превращаются в параллельный, магнитный поток превращается в магнитное напряжение, а источник магнитного напряжения превращается в источник тока (рис. П1.7, б).



**Рис. П1.6.** Моделирование магнитной цепи индуктора с разветвленным сердечником

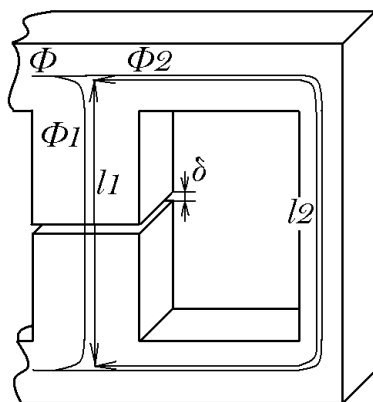


**Рис. П1.7.** Последовательность получения модели разветвленной магнитной цепи

3. Чтобы убрать витки из источника тока, умножим величины магнитных проводимостей на количество витков  $N$  (рис. П1.7, в).
4. Чтобы перейти к обмоточному напряжению, каждый элемент схемы и поток  $\Phi$  умножим на количество витков обмотки  $N$ . В результате схема

теперь будет представлена обмоточными напряжениями и магнитными проводимостями в масштабе  $N^2$  (рис. П1.7, *з*).

5. Из уравнения (1) мы знаем, что  $L = N^2 \cdot P$ . Таким образом, все масштабированные проводимости можно заменить соответствующими индуктивностями (рис. П1.7, *д*).
6. Как и в предыдущем случае, можно рассуждать похожим образом. Представим себе некую магнитную цепь, состоящую из  $k$  (в данном случае  $k = 2$ ) включенных параллельно фрагментов, имеющих различные длину и сечение (рис. П1.8).



**Рис. П1.8.** Пример разветвленной магнитной цепи

Так как фрагменты магнитной цепи включены параллельно, то к каждому из них приложено одинаковое магнитное напряжение. Одинаковое магнитное напряжение на каждом фрагменте разветвленной магнитной цепи можно смоделировать соединив  $k$  индукторов, имеющих обмотки с равными витками, последовательно. Так как при этом через обмотки протекает одинаковый ток  $I$ , то к сердечникам прикладывается одинаковое магнитное напряжение  $N \cdot I$ .

#### **ПРИМЕЧАНИЕ**

Фрагменты реального сердечника, не имеющие обмотки, в модели все равно должны быть представлены указанным образом.

### П1.2.3. Моделирование сложной магнитной цепи

Если параллельная магнитная цепь включена последовательно с другой, например последовательной, цепью (рис. П1.9), то необходимо обеспечить равенство общего магнитного потока, протекающего через них.

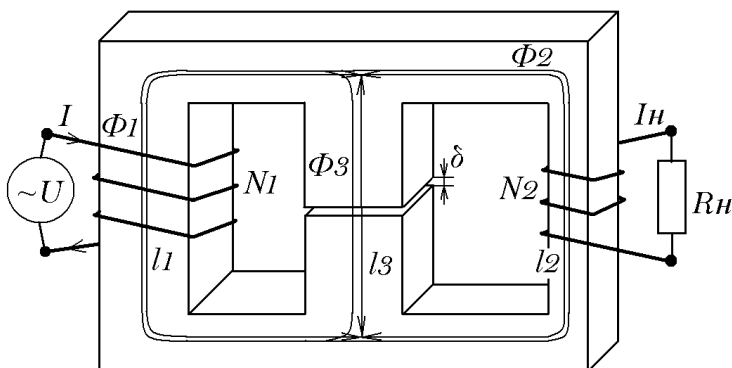


Рис. П1.9. Пример сложной последовательно-параллельной магнитной цепи

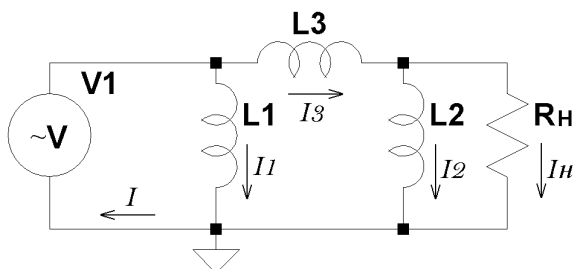
Для начала считаем, что  $R_n$  на рис. П1.9, имеет бесконечно большое сопротивление и никак не влияет на картину происходящего. В параллельной магнитной цепи общий поток является суммой потоков, протекающих по каждому параллельному фрагменту  $k$ :

$$\Phi = \sum \Phi_k .$$

Параллельная цепь моделируется последовательным включением  $k$  дросселей, имеющих одинаковые обмотки. В этом случае элементарные ЭДС  $V_k$ , индуцируемые в каждом дросселе, складываются. На основании закона электромагнитной индукции (2) определим суммарный поток для этого случая:

$$\Phi = \sum \Phi_k = \sum V_k \cdot \tau / N = V \cdot \tau / N .$$

То есть для обеспечения равенства потоков достаточно для всех дросселей модели указать одинаковое количество витков обмотки и модели отдельных магнитных ветвей включить параллельно. Кроме этого, если фрагмент сердечника равного сечения имеет немагнитный зазор, то для его имитации можно использовать один индуктор, что значительно упрощает процесс создания модели. В результате получаем модель (рис. П1.10).



**Рис. П1.10.** Модель совместной последовательно-параллельной магнитной цепи

Из модели (рис. П1.10) видно, что дроссель  $L_3$ , по сути, моделирует поток рассеяния  $\Phi_3$  между катушками  $\varpi_1$  и  $\varpi_2$ . Поэтому при подключении нагрузочного резистора  $R_n$  к обмотке  $\varpi_2$  напряжение на ней падает.

#### П1.2.4. Выводы

Каждый фрагмент реального сердечника в модели можно представить элементарной нелинейной индуктивностью (индуктором), имеющей материал сердечника, его длину, немагнитный зазор и сечение, соответствующие моделируемому фрагменту. Согласно принципу двойственности, все параллельные ветви реального сердечника в модели представляются соответствующими индукторами, включенными последовательно, и наоборот. На все индукторы модели мотаются обмотки с одинаковым количеством витков, равным количеству витков одной из обмоток прототипа. При необходимости для согласования модели с остальными элементами схемы можно использовать дополнительные идеальные согласующие трансформаторы.

### П1.3. Адаптация модели для магнитных цепей, работающих с частичным или полным подмагничиванием

Все предыдущие рассуждения основаны на законе электромагнитной индукции и справедливы для случая, когда к обмоткам магнитного компонента



приложено переменное напряжение. Если к обмотке приложено постоянное напряжение или ненулевая постоянная составляющая переменного, то распределение потока в его магнитных цепях определяется уже не законом электромагнитной индукции, а их магнитным сопротивлением и законом Ома для магнитных цепей. Что касается модели, то в ней распределение потоков определяется омическим сопротивлением обмоток индукторов. Следовательно, чтобы модель корректно отражала процессы, протекающие на постоянном токе в реальной магнитной цепи, достаточно последовательно с каждой обмоткой модели включить нелинейное сопротивление, обратно пропорциональное магнитному сопротивлению моделируемого фрагмента магнитной цепи. Так как эта часть модели работает на постоянном токе, то достаточно, чтобы нелинейное сопротивление отражало начальную кривую намагничивания без гистерезиса.

В LTspice для имитации магнитного сердечника используется упрощенная гистерезисная модель (см. разд. 3.12.2), где восходящий и нисходящий участки петли гистерезиса моделируются при помощи следующих выражений:

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

и

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

Где  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная проницаемость вакуума.

Начальная кривая намагничивания моделируется выражением:

$$B(H) = \frac{B_{up}(H) + B_{dn}(H)}{2}.$$

Для примера рассчитаем начальную кривую намагничивания для сердечника из феррита М3000НМС1, который имеет следующие основные магнитные параметры:

$$B_s = 0.45 \text{ Тл}, B_r = 0.1 \text{ Тл}, H_c = 12 \text{ А/м}.$$

Полученные данные записываются в табл. П1.3.

**Таблица П1.3.** Начальная кривая намагничивания феррита М3000НМС1, полученная программой LTspice/SwCAD III

<b>В, Тл</b>	-0.46	-0.446	-0.398	-0.3	-0.198	-0.103	0	0.103	0.198	0.3	0.398	0.446	0.46
<b>Н, А</b>	-10 000	-2500	-320	-85	-35	-15	0	15	35	85	320	2500	10 000

Для создания нелинейного сопротивления используем стандартный источник тока, управляемый напряжением. Для формирования требуемой вольтамперной характеристики (ВАХ) нелинейного сопротивления проще всего использовать табличную форму задания. Для примера ниже приведена строка настройки нелинейного резистора, имитирующего полученную кривую намагничивания сердечника из феррита М3000НМС1. В строке настройки указан ряд пар значений, первое значение пары указывает управляющее напряжение, пропорциональное индукции в сердечнике, а второе значение, соответствующий ток источника тока, пропорциональную напряженность магнитного поля:

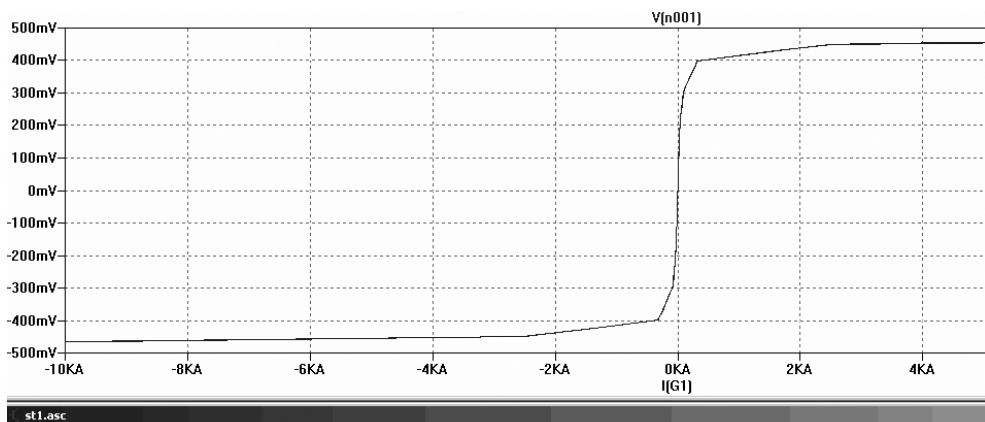
```
table=(-0.46 -10000,-0.446 -2500,-0.398 -320,-0.3 -85,-0.198 -35,-0.103 -15,0 0,0.103 15,0.198 35,0.3 85,0.398 320,0.446 2500,0.46 10000)
```

На рис. П1.11 показана результирующая ВАХ нелинейного резистора, снятая при помощи программы LTspice/SwCAD III.

Для более детальной аппроксимации достаточно лишь расширить таблицу дополнительными данными.

Так как размеры используемых сердечников отличаются от тех, которые были приняты при тестировании, то перед установкой в модель каждый нелинейный резистор должен быть настроен в соответствии с параметрами моделируемого фрагмента сердечника и соответствующей нелинейной индуктивностью, последовательно с которой он будет включен. Начальная кривая намагничивания в табл. П1.3 рассчитана для сердечника, имеющего сечение  $A = 1 \text{ м}^2$ , среднюю длину магнитной линии  $L_m = 1 \text{ м}$  и обмотку из одного витка. Требуемую величину управляющего напряжения  $V^*$  для нового сечения  $A$  сердечника можно определить по формуле:

$$V^* = V \cdot A. \quad (3)$$



**Рис. П1.11.** Кривая намагничивания феррита М3000НМС1, имитируемая при помощи нелинейного резистора, построенного на источник тока, управляемого напряжением

Соответствующую величину тока  $I^*$  для сердечника, имеющего длину  $L_m$ , длину немагнитного зазора  $L_g$  и обмотку  $N$ , можно рассчитать по формуле:

$$I^* = \frac{I \cdot L_m + B \cdot 796000 \cdot L_g}{N}. \quad (4)$$

Обычно среднее значение полученного нелинейного сопротивления не превышает долей мОм, что значительно ниже активного сопротивления обмоток трансформатора. В этом случае активные сопротивления обмоток можно полностью перенести в обмотки согласующих трансформаторов. При этом нелинейные сопротивления практически не шунтируются, что позволяет получить вполне реалистичную картину.

Падение напряжения на нелинейном резисторе пропорционально магнитному потоку, протекающему через соответствующий дроссель. Собственно, при постоянном токе о величине магнитного потока можно судить только по падению напряжения на этом резисторе. Так как для правильного распределения магнитных потоков важны относительные значения нелинейных резисторов, то величину нелинейного резистора можно выбрать из соображений удобства наблюдения магнитного потока.

## П1.4. Создание модели интегрированного магнитного компонента

Теперь, когда мы определились с принципами моделирования неразветвленных, разветвленных и сложных магнитных цепей, попробуем создать модель трансформатора с сердечником, имеющим сложную структуру.

В настоящее время в источниках вторичного электропитания все чаще используются интегрированные электромагнитные компоненты, совмещающие в себе разделительный трансформатор и дроссель фильтра. Также известны удачные попытки моделирования подобных компонентов средствами SIMPLORER (<http://www.lea.uni-paderborn.de/fileadmin/Elektrotechnik/AG-LEA/forschung/veroeffentlichungen/2003/03epe-njiende-wetzel-froehleke-cronje.pdf>).

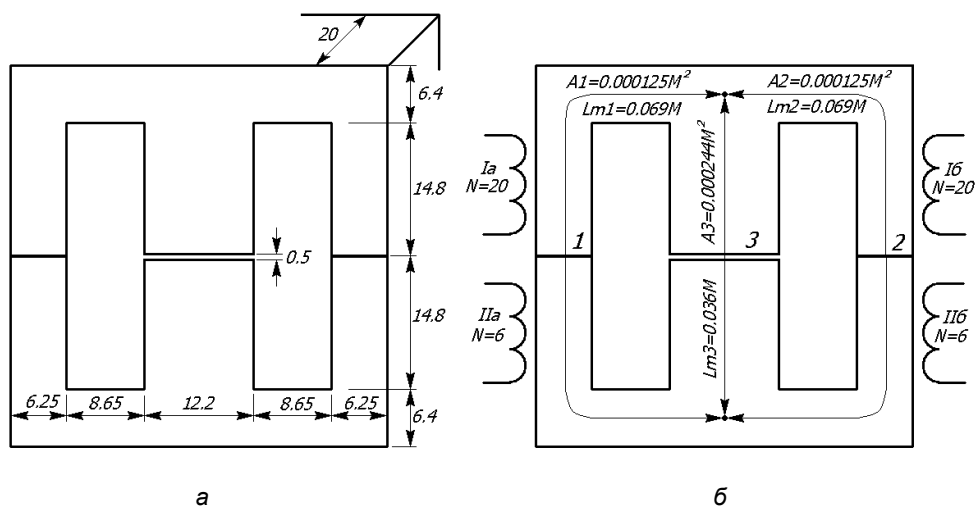


Рис. П1.12. Конструктивные параметры реального интегрированного магнитного компонента

Для примера создадим модель сложного электромагнитного компонента, изготовленного на ферритовом сердечнике Е 42/21/20 (рис. П1.12, а). Для удобства керны пронумерованы, крайним присвоены номера 1 и 2, а среднему номер 3. КERN № 3 имеет немагнитный зазор длиной  $L_g = 0.0005 \text{ м}$ . На кер-

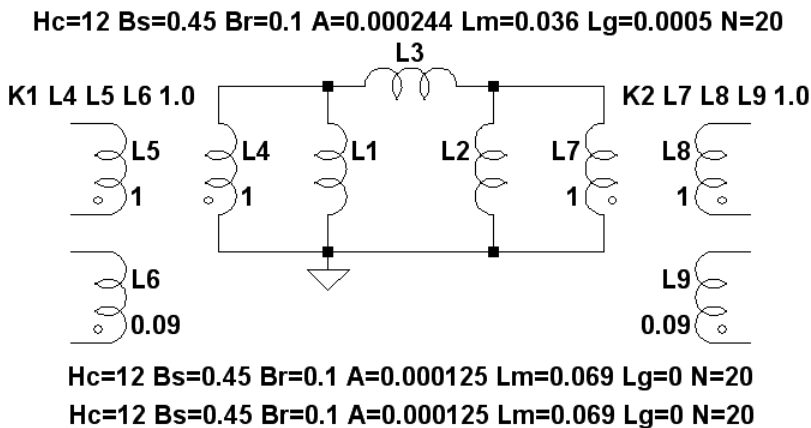
нах №№ 1, 2 расположено по две обмотки, одна из которых имеет 20 витков, а другая 6 витков (рис. П1.12, б). Обмотки Ia и Ib имеют сопротивление по 0.02 Ом.

Ранее мы уже моделировали подобную структуру сердечника. На рис. П1.10 изображена соответствующая схема для переменного тока. На рис. П1.13 изображена схема модели переменного тока для рассматриваемого примера. Здесь индуктивности L1, L2, L3 соответственно имитируют участки 1, 2, 3 магнитной цепи, изображенной на рис. П1.12, б. Кроме этого, для гальванической развязки обмоток и получения требуемых витковых данных в модели использовано два идеальных трансформатора K1 и K2.

Так как часть интегрированного компонента используется в качестве дросселя постоянного тока, то необходимо дополнить модель соответствующими нелинейными сопротивлениями, которые сделают ее более реалистичной и достоверной.

Ранее мы определили таблицу настройки нелинейного сопротивления для случая, когда сердечник имеет длину 1 м, сечение 1 м<sup>2</sup> и на него намотана обмотка в 1 виток:

```
table=(-0.46 -10000,-0.446 -2500,-0.398 -320,-0.3 -85,-0.198 -35,-0.103 -15,0 0,0.103 15,0.198 35,0.3 85,0.398 320,0.446 2500,0.46 10000)
```



**Рис. П1.13.** Модель интегрированного магнитного компонента для переменного тока

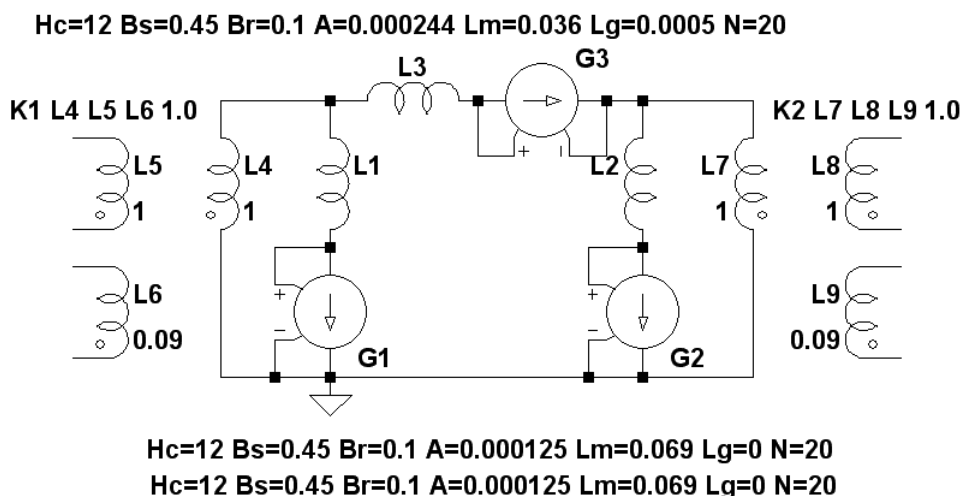
Скорректируем таблицы нелинейных резисторов с помощью формул (3) и (4). Для кернов 1 и 2, имеющих  $A = 0.000125 \text{ м}^2$ ,  $L_m = 0.069 \text{ м}$  и  $L_g = 0$ :

```
table=(-0.011625 -34.5,-0.01125 -8.625,-0.01 -1.104,-0.0075 -0.29325,-
0.005 -0.12075,-0.0025 -0.05175,0 0,0.0025 0.05175,0.005 0.12075,0.0075
0.29325,0.01 1.104,0.01125 8.625,0.011625 34.5)
```

Для керна 3, имеющего  $A = 0.000244 \text{ м}^2$ ,  $L_m = 0.036 \text{ м}$  и  $L_g = 0.0005 \text{ м}$ :

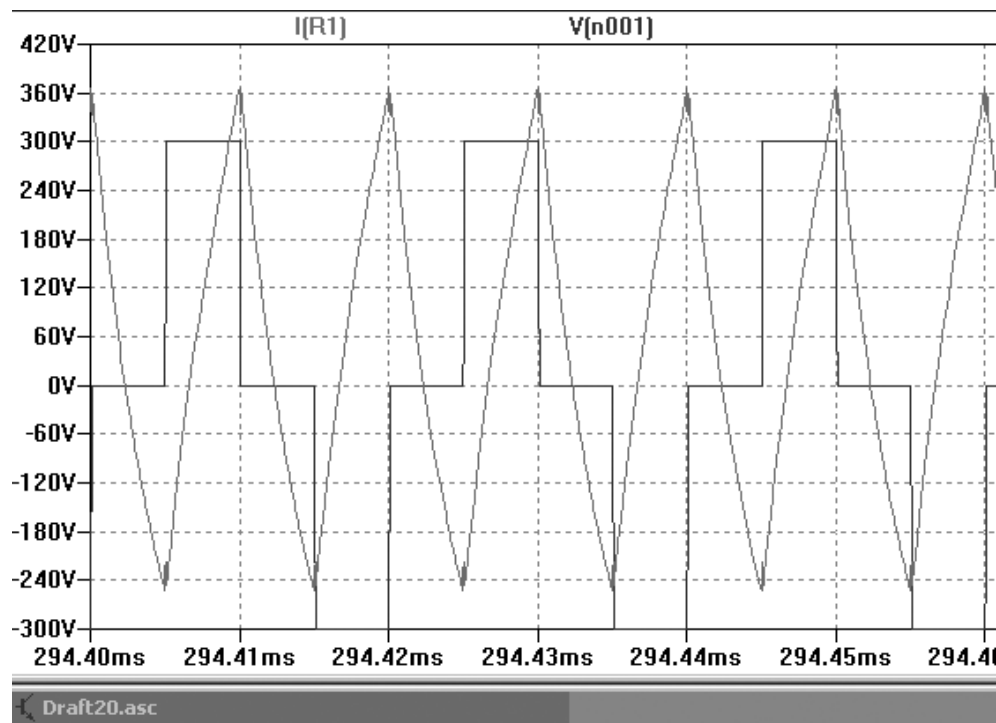
```
table=(-0.022692 -27.168,-0.02196 -13.37,-0.01952 -8.499,-0.01464 -
6.122,-0.00976 -4.013,-0.00488 -2.078,0 0,0.00488 2.078,0.00976
4.013,0.01464 6.122,0.01952 8.499,0.02196 13.37,0.022692 27.168)
```

Полная модель интегрированного магнитного компонента изображена на рис. П1.15. Отображение таблиц нелинейных сопротивлений G1, G2, G3 отключено, с тем чтобы не загромождать схему лишней информацией.



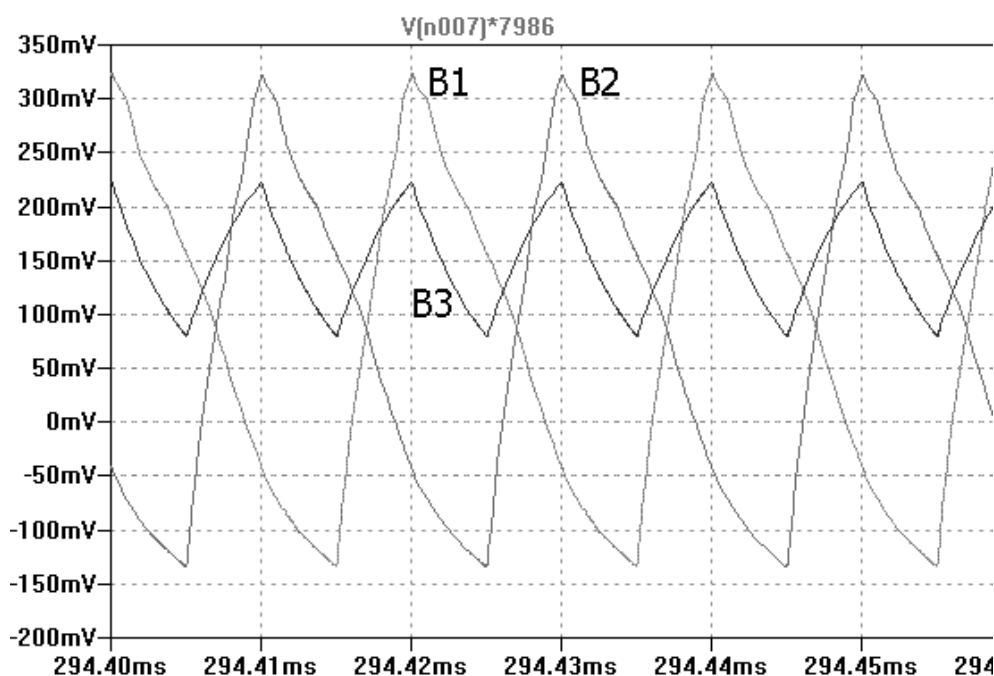
**Рис. П1.14.** Полная модель интегрированного магнитного компонента

Как уже говорилось ранее, для контроля индукции в определенном участке сердечника удобно контролировать падение напряжения на соответствующем нелинейном резисторе. Крайние значения напряжения управления в настроечных таблицах соответствуют максимальной учетной индукции в сердечнике. Например, для G1 и G2 падение напряжения, равное 57.6 мкВ, будет соответствовать индукции 0.46 Тл. Следовательно, чтобы наблюдать сигнал пропорциональный индукции, достаточно умножить соответствующий график на  $0.46 / 0.0000576 = 7986$ .

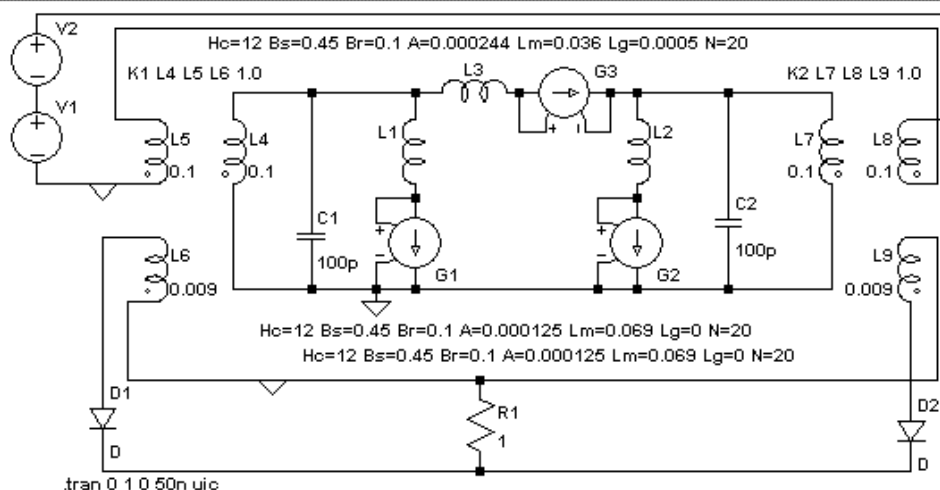


a

Рис. П1.15. Временные диаграммы для интегрированного компонента:  
a — напряжения возбуждения и выходного тока



Draft20.asc



6

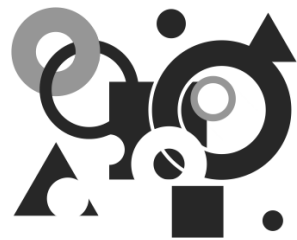
Рис. П1.15. Временные диаграммы для интегрированного компонента:  
б — индукции в ядрах сердечника



Соответственно, для G3 максимальное падение напряжения 112 мкВ, а коэффициент пересчета графика  $0.46 / 0.000112 = 4107$ .

Теперь, когда модель интегрированного электромагнитного компонента готова, осталось ее проверить. Для этого создадим простейшую тестовую схему (рис. П1.15). Напряжение возбуждения для интегрированного компонента формируется с помощью источников V1 и V2. Далее это напряжение трансформируется, выпрямляется при помощи диодов D1 и D2, сглаживается и поступает в нагрузку R1. На рис. П1.15, а изображены диаграммы напряжения возбуждения интегрированного компонента  $V(n001)$  и тока в резисторе нагрузки  $I(R1)$ . На рис. П1.15, б изображены диаграммы индукции (мТл) в крайних (B1 и B2) и среднем (B3) ядрах интегрированного компонента.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 2



## Справочная информация по LTspice

### П2.1. Параметры командной строки программы LTspice

Таблица П2.1 содержит параметры, которые понимает в командной строке исполняемый файл `scad3.exe` программы LTspice.

*Таблица П2.1. Параметры командной строки программы LTspice*

Параметр	Описание
-ascii	Использовать ASCII RAW-файлы. Сильно снижает производительность программы
-b	Запустить в пакетном режиме. Например, строка <code>scad3.exe -b deck.cir</code> выводит данные в файле <code>deck.raw</code>
-big	Начать работу в окне максимального размера
-encrypt	Кодировать библиотечную модель
-FastAccess	Пакетное преобразование бинарных файлов с расширением <code>raw</code> в формат файлов быстрого доступа
-max	Синоним для <code>-big</code>
-netlist	Пакетное преобразование схемы в список соединений
-nowine	Запрещает использование WINE (Linux) спецификаций

Таблица П2.1 (окончание)

Параметр	Описание
-PCBnetlist	Пакетное преобразование схемы в список соединений формата печатной платы
-registry	Заставляет LTspice запоминать предпочтения пользователя, MRU и т. д. в регистр вместо %WINDIR%\scad3.ini файла
-Run	Начать симуляцию схемы, открытой из командной строки, без нажатия иконки <b>Run</b>
-uninstall	Выполнить один шаг процесса деинсталляции
-web update	Эквивалентно выполнению команды <b>Tools   Sync Release</b>
-wine	Разрешает использование WINE (Linux) спецификаций

П.2.2. Перечень схемных элементов симулятора LTspice

Таблица П.2.2. Перечень встроенных схемных элементов симулятора LTspice

Схемный элемент	Текстовый синтаксис
Специальные функции	Annn n001 n002 n003 n004 n005 n006 n007 n008 + <имя модели> [требуемые параметры]
Поведенческие источники напряжения или тока	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>]

Таблица П.2.2 (продолжение)

Схемный элемент	Текстовый синтаксис
Конденсатор	Cnnn N1 N2 <Емкость> [IC=<значение>] + [RSER=<значение>] [LSER=<значение>] + [RPAR=<значение>] [CPAR=<значение>] + [M=<значение>] [RLSHUNT=<значение>] + [TEMP=<значение>]
Диод	Dnnn N1 N2 <имя модели> [AREA] [OFF] + [M=<значение>] [N=<значение>] + [temp=<значение>]
Источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН)	Exxx N1 N2 N3 N4 <GAIN>
	Exxx N1 N2 N3 N4 + TABLE=(<пара значений>, <пара значений>, ...)
	Exxx N1 N2 N3 N4 LAPLACE=<функция(s)> + [WINDOW=<время>] [NFFT=<число>] + [MTOL=<число>]
	Exxx N1 N2 VALUE={<выражение>}
	Exxx N1 N2 POLY(<N>) <(узел1+,узел1-)> + (узел2+,узел2-) ... (узелN+,узелN-)> + <C0 C1 C2 C3 C4 ... >
Источник тока, управляемый током (ИТУТ)	Fxxx N1 N2 <VNAME> <GAIN>
	Fxxx N1 N2 VALUE={<выражение>}
	Fxxx N1 N2 POLY(<N>) <V1 V2 V3 V4 ... VN> <C0 C1 C2 C3 C4 ... >
Источник тока, управляемый напряжением (ИТУН)	Gxxx N1 N2 N3 N4 <GAIN>
	Gxxx N1 N2 N3 N4 + TABLE=(<пара значений>, <пара значений>, ...)
	Gxxx N1 N2 N3 N4 LAPLACE=<FUNC(s)> + [WINDOW=<время>] [NFFT=<число>] + [MTOL=<число>]
	Gxxx N1 N2 value={<выражение>}

Таблица П.2.2 (продолжение)

Схемный элемент	Текстовый синтаксис
	Gxxx N1 N2 POLY(<N>) <(узел1+,узел1-) + (узел2+,узел2-) ... (узелN+,узел-)> + <c0 c1 c2 c3 c4 ...>
Источник напряжения, управляемый током (ИНУТ)	Hxxx N1 N2 <VNAM> <GAIN>
	Hxxx N1 N2 VALUE={<выражение>}
	Hxxx N1 N2 POLY(<N>) <V1 V2 V3 V4 ... VN> + <C0 C1 C2 C3 C4 ... >
Источник тока	Ixxx N1 N2 <ток> [AC <амплитуда> + [фазовый сдвиг]] [load]
Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом (JFET)	Jxxx N1 N2 N3 <имя модели> [AREA] [OFF] + [IC=Vds, Vgs] [TEMP=T]
Коэффициент связи	Kxxx L1 L2 [L3 ...] <коэффициент>
Индуктивность	Lxxx N1 N2 <индуктивность> [ic=<значение>] + [Rser=<значение>] [Rpar=<значение>] + [Cpar=<значение>] [m=<значение>] + [temp=<значение>]
Полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET)	Mxxx N1 N2 N3 N4 <имя модели> + [m=<значение>] [L=<длина>] [W=<ширина>] + [AD=<площадь>] [AS=<площадь>] + [PD=<периметр>] [PS=<периметр>] + [NRD=<значение>] [NRS=<значение>] [off] + [IC=<Vds, Vgs, Vbs>] [temp=<T>]
	Mxxx N1 N2 N3 <имя модели> [L=<длина>] + [W=<ширина>] [M=<площадь>] + [m=<значение>] [off] [IC=<Vds, Vgs, Vbs>] + [temp=<T>]
Линия передачи с потерями	Oxxx N1 N2 N3 N4 <имя модели>

Таблица П.2.2 (окончание)

Схемный элемент	Текстовый синтаксис
Биполярный транзистор (BJT)	Qxxx N1 N2 N3 [N4] <имя модели> + [AREA=значение] [OFF] [IC=<Vbe, Vce>] + [TEMP=<T>]
Резистор	Rxxx N1 N2 <значение> [TC=TC1,TC2, ...] + [TEMP=<значение>]
Ключ, управляемый напряжением	Sxxx N1 N2 N3 N4 <имя модели> [on,off]
Линия передачи без потерь	Txxx N1 N2 N3 N4 ZO=<значение> + TD=<значение>
Однородная RC-линия	Uxxx N1 N2 N3 <имя модели> L=<длина> + [N=<сегментов>]
Источник напряжения	Vxxx N1 N2 <напряжение> [AC=<амплитуда>] + [RSER=<значение>] [CPAR=<значение>]
Ключ, управляемый током	Wxxx N1 N2 Vnam <имя модели> [on,off]
Подсхема	Xxxx N1 N2 N3... <имя подсхемы> + [<параметр>=<выражение>]
Полевой транзистор с затвором на основе барьера Шотки (MESFET)	Zxxx 1 2 3 <имя модели> [area] [off] + [IC=<Vds, Vgs>] [temp=<value>]

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3



# Структура информации, представленной на DVD-диске, прилагаемом к книге

Информация на DVD-диске сгруппирована в двух каталогах.

## П3.1. Каталог Lessons

Каталог содержит четыре авторских видеоурока по LTspice. По мере просмотра уроков вы познакомитесь с интерфейсом программы, а также создадите и промоделируете схему симметричного мультивибратора.

## П3.2 Каталог Models

Каталог содержит электронную документацию и модели, использованные при написании данной книги. Эти материалы рассортированы в подкаталогах, соответствующих главам книги.

В подкаталоге Mylib находится авторская библиотека моделей, которая включает библиотечный файл Mylib.lib, а также символы популярных ШИМ-контроллеров TL494, UC3825 и SG3525A, оптодрайвера HCPL3180 и операционного усилителя K544УД2. Рекомендации по подключению библиотеки приведены в файле Readme.txt, который расположен в этом же подкаталоге.

# Предметный указатель

## A

AC-анализ 22, 67, 82, 84, 90, 159, 184,  
199, 203, 300, 303  
Alternate 12, 251, 264  
Average 29

## B

Bode 304

## C

Cartesian 304

## D

DC:  
op pnt 22  
sweep 22  
transfer 22  
анализ 22, 79, 99, 123, 189, 296

## E

EXP 32

## I

Integral 29

## M

MOSFET 120

## N

Netlist 3, 11, 47  
Noise 22  
Normal 12, 251, 264  
Nyquist 304

## P

PULSE 32  
PWL 32

## R

RC-линия 157  
RMS 29

## S

SFFM 32  
SINE 32  
SYMATTR 316

## T

Transient-анализ 22, 67, 82, 84, 99, 109, 123



## А

### Анализ:

АС 22, 67, 82, 84, 90, 159, 184, 199,  
203, 300, 303

DC 22, 79, 99, 123, 189, 296

step 296

temp 296

TRAN 197, 300, 303

Transient 22, 67, 82, 84, 99, 109, 123

Фурье 190

Атрибут 340, 343

SYMATTR 316

## Б

Библиотека зашифрованная 196

Биполярный транзистор 134

выходная характеристика 187

## В

Варикап 73

Варистор 52

Выходной каскад 325

## Г

Генератор 319

качающейся частоты 181

модулируемый 54

Горячие клавиши 267

## Д

Декада 181

Диаграмма:

Бode 304

Найквиста 304

напряжения 286

настройка 292

тока 286

удаление 288

частотной зависимости:

вещественной и мнимой  
части 304

Диод 74

Директива:

ac 180

backanno 185

dc 185

end 3, 189

ends 190, 350

ferret 192

four 190

func 3, 191, 302

global 193

ic 193

include 195

lib 195, 269

loadbias 197

meas 200, 281

measure 197

model 202, 308

net 203

nodeset 205

noise 206

op 210

options 211, 261, 263

param 216, 302

save 220

savebias 222

step 224

subckt 227, 311

temp 228

tf 229

tran 231

wave 235

Дуальность 361

## З

Закон Фарадея 363

Земля 16

Зондирование схемы прямое 286

## И

Индуктивность 106

взаимная 360

магнитной цепи 360

нелинейная 109

эквивалентная схема 106

Индуктор 360

Источник напряжения 159

FM 166

импульсного 162

программируемый

пользователем 167

синусоидального 163

управляемый напряжением 81

управляемый током 87

функциональный 55, 83, 84, 87

экспоненциального 165

Источник тока 89

зависимый одночастотный 96

зависимый от приложенного  
напряжения 97

импульсного 91

программируемый

пользователем 97

синусоидального 93

управляемый напряжением 83

управляемый током 80

функциональный 55, 80, 84

экспоненциального 95

## К

Ключ:

управляемый напряжением 153

управляемый током 168

Компонент схемный 237

Константа 300

определяемая пользователем 301

Конфигурирование LTspice 259

Коэффициент площади 79

Кривая намагничивания 114, 370

Курсор измерительный 293

## Л

Лапласа преобразование 66, 82, 84

Линия передачи 131, 154

Логический элемент 48

## М

Магнитный поток 358, 363

плотность 359

Магнитодвижущая сила 358

МДС 358

Метод:

Гира 264

логарифмической амплитудно-  
фазовой частотной  
характеристики 180

Моделирование:

AC 128

DC 128

Модель:

LTspice 203

VBIC 142

Герцсберга 157

Гуммеля—Пуна 136

Джона Чана, магнитного  
сердечника 112

компонента 317

межфирменная вертикальная  
биполярная 142

Мейера 124

нелинейного трансформатора 118

трансформатора, Т-образная 103

Шихмана—Ходжеса 99, 123

Эберса—Молла 136

Мощность:

мгновенная 287

средняя 287

## Н

Напряжение на конденсаторе 74

Напряженность:

магнитного поля 358

электрического поля 358

## О

Октава 181

Операция

логическая 57

математическая 57

## П

Параметры сердечника 114

Передаточная функция 66, 82, 84

импульсная переходная

характеристика 67, 82, 84

малосигнальная 229

Подсхема 349

Полевой транзистор:

с затвором на основе барьера

Шотки 175

с изолированным затвором

(MOSFET) 120

с управляющим p-n-переходом 98

Правило Ленца 363

Преобразование:

Лапласа 66, 82, 84

Фурье 282

Фурье быстрое 83, 84, 191

Фурье обратное 67, 82, 84

Проводимость 359

Проницаемость 359

## Р

Редактирование цветовой палитры 275

Редактор схем 237

панель инструментов 249

панель команд 238

панель состояния 251

Резистор 150

## С

Сердечник, параметры 114

Сжатие данных 260

Сигнал ШИМ 67

Создание электрических связей 257

Сопротивление:

магнитное 359

электрическое 359

Схема иерархическая 318, 329, 346, 349

## Т

Транзистор:

биполярный 134

полевой с изолированным затвором

(MOSFET) 120

полевой с управляющим

p-n-переходом 98

Трансформатор 358

нелинейный 118

Триггер Шмитта 51, 154, 170

## У

Усилитель ошибки 321

## Ф

Фазировка 358

Функция:

для комплексных чисел 300

логическая 57, 297

математическая 57, 297

определяемая пользователем 301

передаточная 82

Фурье:

анализ 190

преобразование 282

преобразование быстрое 83, 84, 191

преобразование обратное 67, 82, 84

## Ч

Число  $\pi$  66

## Ш

Шихмана—Ходжеса модель 99

## Э

ЭДС 358

Эквивалентная схема:

Нортонa 109

Тевенина 109

Электрический ток 358

плотность 359

Электродвижущая сила 358