

Продолжение. Начало в № 11 `2008

Программа схемотехнического моделирования SwitcherCAD III

Михаил ПУШКАРЕВ

В данной части статьи дается описание моделей компонентов на языке LTspice.

Модели компонентов

Компоненты

со специальными функциями

Имена символов: AND (И с комплементарными выходами), BUF (буфер с комплементарными выходами), BUF1 (буфер), DFLOP (D-триггер), DIFFSCHMITT (триггер Шмитта с комплементарными выходами и дифференциальными входами), DIFFSCHMTBUF (триггер Шмитта с буфером и дифференциальными входами), DIFFSCHMTINV (инвертирующий триггер Шмитта с дифференциальными входами), INV (инвертор), OR (ИЛИ с комплементарными выходами), PHIDET (фазо-частотный детектор), SCHMITT (триггер Шмитта с комплементарными выходами), SCHMTBUF (триггер Шмитта с буфером), SCHMTINV (инвертирующий триггер Шмитта), SRFLOP (RS-триггер), XOR (исключающее ИЛИ), MODULATE и MODULATE2 (модуляторы), SAMPLE (устройство выборки-хранения) и VARISTOR (варистор).

Синтаксис: Annn n001 n002 n003 n004 n005 n006 n007 n008 <имя модели> [конкретные параметры].

Примечание. Здесь и далее в угловые скобки заключены обязательные параметры, а в квадратные скобки — необязательные параметры.

Это устройства со специальными функциями и смешанным режимом моделирования разработки Linear Technology Corporation's.

INV, BUF, AND, OR и XOR — распространенные логические элементы с идеализированным поведением. Все элементы имеют по восемь выводов. Им не нужны внешние источники питания. Ток вытекает или втекает через комплементарные выходы, выводы 6 и 7 и общий для устройства вывод 8. Выводы с 1 по 5 — входы. Неиспользуемые входы и выходы должны быть подключены к выводу 8, это условие выполняется автоматически, если оставить вывод неподключенным. Компилятор цифровых устройств таким образом определяет, что вывод не использован, и исключает его из моделирования. Это лучше потенциально возможной ситуации, когда вход элемента AND заземлен или подключен к точке с нулевым потенциалом. Если «земля» для элементов общая, заземление входа не будет логической ошиб-

кой, но он не исключается из моделирования. Резонность подобного использования элементов в том, что они работают как 2-, 3-, 4- и 5-входные устройства с прямым, инвертирующим или комплементарным выходом, и при этом не тратится время на моделирование неиспользуемых портов. Таким образом, устройство AND заменяет 12 различных типов элементов AND. Характеристики устанавливаются параметрами, перечисленными в таблице 14.

Таблица 14. Параметры моделей цифровых устройств

Имя параметра	Параметр	Значение по умолчанию
Vhigh	Высокий логический уровень	1 В
Vlow	Низкий логический уровень	0 В
Ref	Входное напряжение переключения	(Vhigh+Vlow)/2
Trise	Время нарастания	0
Tfall	Время спада	Trise
Tau	Выходная постоянная времени	0
Td	Задержка распространения	0
Cout	Выходная емкость	0
Rout	Выходное сопротивление	1 Ом
Rhigh	Импеданс высокого логического уровня	Rout
Rlow	Импеданс низкого логического уровня	Rout

Не все параметры могут быть определены одновременно, например, выход может характеризоваться либо временем нарастания, либо постоянной времени, но не обоими параметрами сразу.

Исключающее ИЛИ (XOR) имеет нестандартное поведение при использовании более двух входов.

Пороговые точки триггеров Шмитта определены параметрами **Vt** и **Vh**. Нижняя пороговая точка — это **Vt - Vh**, верхняя пороговая точка — это **Vt + Vh**.

По умолчанию цифровые компоненты не дают никакой информации о шаге моделирования для управления моделированием. То есть они не дают предупреждений о предстоящем изменении текущего состояния. Для изменения максимального шага моделирования, установленного уставками симулятора, можно задать значение встроенного параметра **tripdt**.

Примечание. Библиотека цифровых устройств не содержит ни одной модели конкретной цифровой микросхемы.

Устройство MODULATE является генератором, управляемым напряжением. Пример схемы — в файле .\examples\Educational\PLL.asc. Текущая частота генерации устанавливается напряжением на входе FM. Преобразование напряжения в частоту линейное и устанавливается двумя встроенными параметрами, **mark** и **space**. **Mark** — частота при напряжении на входе FM, равном 1 В, а **space** — частота, для которой напряжение на входе FM равно 0 В. Амплитуда устанавливается напряжением на входе AM и по умолчанию равна 1 В, если этот вход не использован (подключен к общему выводу MODULATE).

VARISTOR — это управляемый напряжением варистор. Напряжение ограничения устанавливается напряжением между выводами 1 и 2. Сопротивление в режиме ограничения определяется встроенным параметром **rclamp**. Пример схемы — в файле .\examples\Educational\varistor.asc.

Пример схемы с устройством выборки-хранения SAMPLE содержится в файле .\examples\Educational\SampleAndHold.asc.

В LTspice список цепей с этими устройствами создается специальным образом. Все неподключенные выводы автоматически подключаются к выводу 8. Если вывод 8 не подключен, то и он подключается к узлу 0.

Источники сигнала с произвольным поведением

Имена символов: BV, VI.

Синтаксис модели источника напряжения с произвольным поведением: Bnnn <+узел> <-узел> V=<выражение> [ic=<значение>] [tripdv=<значение>] [tripdt=<значение>] [laplace=<выражение>] [window=<время>] [nfft=<число>] [mtol=<число>].

Синтаксис модели источника тока с произвольным поведением: Bnnn <+узел> <-узел> I=<выражение> [ic=<значение>] [tripdv=<значение>] [tripdt=<значение>] [Rpar=<значение>] [laplace=<выражение>] [window=<время>] [nfft=<число>] [mtol=<число>].

Выражения могут содержать следующее:

- Узловой потенциал, например V(n001).
- Разность узловых потенциалов, например V(n001, n002).

Таблица 15. Математические функции в источниках с произвольным поведением

Функция	Определение
ABS(x)	Абсолютное значение x
ABSDelay(x,t[<i>tmax</i>])	Задержка сигнала x на время t. Как вариант, уведомление о максимальной задержке <i>tmax</i>
ACOS(x)	Действительная часть аркосинуса от x
ARCOS(x)	Синоним для acos(x)
ACOSH(x)	Действительная часть гиперболического аркосинуса от x
ASIN(x)	Действительная часть арксинуса от x
ARCSIN(x)	Синоним для asin(x)
ASINH(x)	Гиперболический синус x
ATAN(x)	Арктангенс x
ARCTAN(x)	Синоним для atan(x)
ATAN2(y, x)	Арктангенс y/x
ATANH(x)	Гиперболический тангенс x
BUF(x)	buf(x) = 1, если x > 0,5; buf(x) = 0, если x ≤ 0,5
CEIL(x)	Целое число, равное или большее x
COS(x)	Косинус x
COSH(x)	Гиперболический косинус x
DDT(x)	Производная dx/dt
DELAY(x,t[<i>tmax</i>])	То же, что и ABSDELAY(x,t[<i>tmax</i>])
D(x)	Производная dx/dt
EXP(x)	Экспонента числа x
FLOOR(x)	Целое число, равное или меньшее x
HUPOT(x,y)	sqrt(x**2 + y**2)
IDT(x[,ic[,a]])	Интегрирование x, при необходимости с начальными условием ic, со сбросом интегратора по достижении сигналом значения a.
IDTMOD(x[,ic[,m[,o]])]	Интегрирование x, при необходимости с начальными условием ic, со сбросом интегратора по достижении сигналом по модулю значения m, со сдвигом сигнала на значение o.
IF(x, y, z)	y, если x истинно, иначе z
INT(x)	Округление x до целого числа
INV(x)	inv(x) = 0, если x > 0,5; inv(x) = 1, если x ≤ 0,5
LIMIT(x,y,z)	x, если y < x < z; y, если x < y; z, если x > y
LN(x)	Натуральный логарифм x
LOG(x)	Альтернативный синтаксис для ln(x)
LOG10(x)	Десятичный логарифм x
MAX(x,y)	Максимальное из x или y
MIN(x,y)	Минимальное из x или y
POW(x, y)	Действительная часть от x**y
PWR(x, y)	abs(x)**y
PWRS(x, y)	sgn(x)*abs(x)**y
RAND(x)	Случайные числа между 0 и 1 в зависимости от значения x
RANDOM(x)	Функция, подобная rand(x), но с плавными переходами между значениями
ROUND(x)	Ближайшее целое к x
SDT(x[,ic[,a]])	Альтернативная форма для IDT(x[,ic[,a]])
SIN(x)	Синус x
SINH(x)	Гиперболический синус x
SQRT(x)	Квадратный корень из x
TABLE(x,a,b,c,d,...)	Табличная зависимость функции от x. Координаты точек (x, y) в виде таблицы, в промежутках между точками линейная аппроксимация
TAN(x)	Тангенс x
TANH(x)	Гиперболический тангенс x
U(x)	Ступенчатая функция: u(x) = 1, если x > 0; u(x) = 0, если x ≤ 0
URAMP(x)	Функция ограничения: uramp(x) = x, если x > 0; uramp(x) = 0, если x ≤ 0
WHITE(x)	Случайные числа между -0,5 и 0,5 с плавными переходами между значениями, даже более плавными, чем в random()
!(x)	Альтернативная форма для INV(x)
~(x)	Альтернативная форма для INV(x)

- Токи через элементы схемы, например, I(S1) — ток через ключ S1, или Ib(Q1) — ток базы транзистора Q1. Считается, что ток через элемент схемы изменяется квазистатически, то есть нет немедленной обратной связи между током через управляющее устройство и выходным сигналом источника. Аналогично, любой компонент переменного тока, текущего через устройство, при .AC-анализе принимается равным нулю.
- Ключевое слово **time**, означающее текущее время при моделировании.

Таблица 16. Математические операции для источников с произвольным поведением

Символ операции	Назначение
&	Преобразование, эквивалентное логическому И (AND)
	Преобразование, эквивалентное логическому ИЛИ (OR)
^	Преобразование, эквивалентное логическому исключающему ИЛИ (XOR)
>	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева больше выражения справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
<	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева меньше выражения справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
>=	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева больше или равно выражению справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
<=	ИСТИНА (TRUE), если выражение слева меньше или равно выражению справа, иначе ЛОЖЬ (FALSE)
+	Сложение с плавающей точкой
-	Вычитание с плавающей точкой
*	Умножение с плавающей точкой
/	Деление с плавающей точкой
**	Возведение первого числа в степень второго. Возвращается только действительная часть, например, -1**1.5 дает ноль, а не i
!	Преобразование, эквивалентное логическому инверсии

- Ключевое слово **pi**, означающее 3.14159265358979323846.
- Функции, перечисленные в таблице 15.
- Математические операции, перечисленные в таблице 16.

Параметр **ic** устанавливает начальные условия, напряжение или ток источника в момент начала моделирования.

Параметры **tripdv** и **tripdt** управляют шагом моделирования. Если скорость изменения напряжения источника больше, чем **tripdv/tripdt** [В/с], то шаг моделирования **timestep** отвергается.

Для источника тока параметром **Rpar** задается подключенное параллельно сопротивление.

Истина численно эквивалентна 1, а ложь — 0. В булевом преобразовании величина, ббльшая 0,5, преобразуется в 1, в противном случае величина преобразуется в 0.

В LTspice символ ^ используется в логической операции исключающее ИЛИ (XOR), а символ ** — для возведения в степень. Также в LTspice различаются возведение в степень, x**y и функция **pwr(x,y)**. При возведении в степень отрицательного числа LTspice возвращает действительную часть результата возведения в степень. Например, -2**1.5 оценивается нулем, который является действительной частью правильного ответа 2.82842712474619i. При импорте модели третьей стороны, предназначенной для другого симулятора, возможно, придется изменить синтаксис, например, x^u на x**y или даже **pwr(x,y)**.

Если определен дополнительный атрибут LAPLACE, источник с произвольным поведением будет описываться с использованием преобразования Лапласа. Преобразование Лапласа обязательно должно быть функцией от s. Логический оператор XOR, ^, когда он использован в выражении Лапласа, понимается как возведение в степень, **. При расчете частотных характеристик в .AC-анализе переменная s заменяется на **sqrt(-1)*2*pi*f**. Выходной ток (напряжение) сигнала отыски-

вается путем свертки импульсной характеристики с входным током (напряжением). В LTspice реакция на импульсное воздействие представляет собой набор результатов БПФ в дискретных точках частотной области. В процессе преобразования возможны такие специфические проявления БПФ, как прорезывание спектра, и выбросы, присущие дискретному БПФ. В LTspice используется собственный алгоритм, дающий точное аналитическое выражение в частотной области, выбирающий точки и интервал таким образом, что артефакты практически отсутствуют. LTspice должен определить подходящие частотный диапазон и разрешение. Рекомендуется сначала позволить программе сделать приближенный расчет. Длина интервала и количество использованных в FFT точек данных будут приведены в .log-файле. В дальнейшем можно подстроить выбранный алгоритм, устанавливая параметр **nfft** и длину интервала. Величина, обратная длине временного интервала, является частотным разрешением. Значение времени **nfft** определяет максимальную рассматриваемую частоту.

Конденсатор

Имя компонента: CAP, POLCAP. Синтаксис: Cnpp <+узел> <-узел> <емкость> [ic=<начальное напряжение>] [Rser=<значение>] [Lser=<значение>] [Rpar=<значение>] [Cpar=<значение>] [m=<значение>] [RLshunt=<значение>] [tc=<температурный коэффициент емкости>] [temp=<температура>].

При необходимости можно задать эквивалентное последовательное сопротивление, последовательную индуктивность, параллельное сопротивление и параллельную шунтирующую емкость. Эквивалентная схема конденсатора показана на рис. 50.

Параметры модели конденсатора приведены в таблице 17.

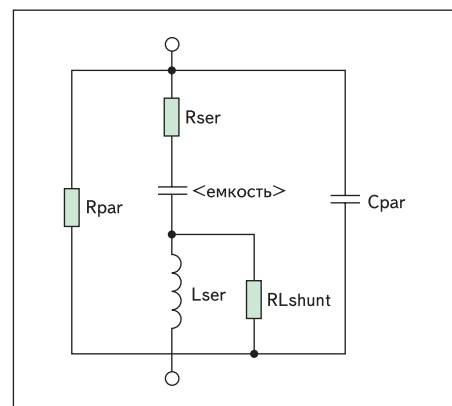


Рис. 50. Эквивалентная схема конденсатора

Для вычислений лучше включить паразитные Rpar, Rser, RLshunt, Cpar и Lser в состав конденсатора, чем изображать их в явном виде. В LTspice используется собственная технология для имитации физического конденсатора моделью без внутренних узлов. Это

Таблица 17. Параметры модели конденсатора

Обозначение	Параметр
Rser	Эквивалентное последовательное сопротивление
Lser	Эквивалентная последовательная индуктивность
Rpar	Эквивалентное параллельное сопротивление
Cpar	Эквивалентная параллельная емкость
RLshunt	Шунтирующий резистор, параллельный Lser
m	Количество включенных параллельно устройств
tc	Температурный коэффициент емкости
temp	Температура компонента (в соответствующей директиве .MODEL)
ic	Начальное напряжение (используется, если только модификатор UIC включен в .TRAN-анализ)

делает имитационную матрицу меньше, быстрее решаемой, с меньшей вероятностью, что она окажется сингулярной при малом временном шаге.

Похожую эквивалентную схему имеет и макромоделль пьезоэлектрического резонатора.

Можно моделировать и нелинейный конденсатор, при этом вместо указания емкости записывается выражение для заряда.

LTspice компилирует это выражение, дифференцирует его в символьном виде относительно всех переменных с нахождением частных производных, соответствующих емкостям.

Синтаксис: Cnnp <+узел> <-узел> Q=<выражение> [ic=<значение>] [m=<значение>].

Специальная переменная x обозначает напряжение на устройстве. Таким образом, постоянная емкость 100 пФ может быть записана как: Cnnp <+узел> <-узел> Q=100p*x.

Емкость со ступенчатым изменением величины от 100 до 300 пФ, когда напряжение становится равным нулю, описывается как: Cnnp <+узел> <-узел> Q=x*if(x<0,100p,300p).

Емкость, управляемая напряжением в узле N01 и имеющая значение 1000 пФ при напряжении 1 В, описывается как: Cnnp <+узел> <-узел> Q=1000p*x*V(N01).

Диод

Имя компонента: DIODE, ZENER, SCHOTTKY, VARACTOR. Синтаксис: Dnnp <анод> <катод> <имя модели> [off] [m=<значение>] [n=<значение>] [temp=<значение>].

Например:

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

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

Ключевое слово **off** исключает диод из схемы при первой итерации расчета по постоянному току. Параметр **m** устанавливает количество параллельно включенных устройств, а параметр **n** — количество последовательно включенных устройств. Эти параметры имеют аналогичное значение и в моделях некоторых других компонентов.

Характеристики диода задаются в строке .MODEL. Есть два способа описания модели диода. Один представлен линейной моделью

Таблица 19. Параметры модели диода

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию	Пример
Af	Показатель степени в формуле для фликкер-шума	—	1	1
BV	Обратное пробивное напряжение	V	?	40
Cjo	Барьерная емкость при нулевом смещении	пФ	0	2
Eg	Ширина запрещенной зоны	эВ	1,11	1,11 Si 0,67 Ge
Fc	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода	—	0,5	
Ibv	Ток при пробивном напряжении	A	1×10^{-10}	
Ikf	Максимальный ток при высоком уровне инжекции	A	∞	
Is	Ток насыщения	A	1×10^{-14}	1×10^{-7}
Isr	Параметр тока рекомбинации	A	0	
Kf	Коэффициент фликкер-шума	—	0	
M	Коэффициент лавинного умножения	—	0,5	0,5
N	Коэффициент инжекции	—	1	1
Nr	Коэффициент эмиссии для тока Isr	—	2	
Rs	Объемное сопротивление	Ом	0	10
Tkf	Линейный температурный коэффициент для Ikf	1/°C	0	
Tnom	Температура	°C	27	50
Trs1	Линейный температурный коэффициент для Rs	1/°C	0	
Trs2	Квадратичный температурный коэффициент для Rs	1/°C ²	0	
Tt	Время переноса заряда	нс	0	2
Vj	Контактная разность потенциалов	V	1	0,6
Xti	Температурный коэффициент тока насыщения	—	3	3

Таблица 18. Параметры идеализированной модели диода

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию
Epsilon	Протяженность квадратичного участка характеристики	V	0
Ilimit	Ограничение тока в прямом включении	A	∞
Revepsilon	Протяженность квадратичного участка характеристики в обратном включении	V	0
Revlimit	Ограничение тока в обратном включении	A	∞
Roff	Сопротивление в запертом состоянии	Ом	1/Gmin
Ron	Сопротивление в прямом включении	Ом	1
Rrev	Обратное сопротивление	Ом	Ron
Vfwd	Прямое пороговое напряжение до начала проводимости	V	0
Vrev	Обратное пробивное напряжение	V	∞

простого для расчетов идеализированного диода. Модель имеет три линейных участка электропроводности: прямое включение, обратное включение и пробой при обратном включении. Характеристика на участках прямой проводимости и обратного пробоя может определяться нелинейно с ограничением токов через **Ilimit** (**revIlimit**). Переход к ограничению тока на участке прямой проводимости формируется с использованием функции **tanh()**. Стоит отметить, что поведение модели с использованием параметров **Ilimit**, **revIlimit** не соответствует привычному поведению полупроводникового диода. Параметры **epsilon** и **revepsilon** определяют плавность переключения между запертым и проводящим состояниями. Участок характеристики между проводящим и запертым состояниями описывается квадратичной функцией таким образом, что вольт-амперная характеристика диода сохраняется непрерывной и гладкой. В проводящем состоянии переход обеспечивается при напряжении, определяемом значением **epsilon**, а переход меж-

Таблица 20. Предельно допустимые параметры модели диода

Обозначение	Параметр	Единица измерения
Vpk	Максимальное значение напряжения	V
Ipk	Максимальное значение тока	A
Iave	Среднее значение тока	A
Irms	Среднеквадратичное значение тока	A
diss	Максимальное значение рассеиваемой мощности	Вт

ду непроводящим состоянием и пробоем при обратном напряжении определяется **revepsilon**.

Идеализированная модель используется, если любое из **Ron**, **Roff**, **Vfwd**, **Vrev** или **Rrev** определено в модели.

Параметры идеализированной модели диода приведены в таблице 18.

Другая модель является стандартной SPICE-моделью полупроводникового диода, но расширенной так, чтобы более подробно описывать поведение при пробое и токи рекомбинации. Множитель **Area** определяет количество аналогичных параллельно включенных устройств. В таблице 19 приведены параметры модели для этого диода.

Можно задать для модели предельные значения напряжения, тока и мощности. Эти параметры, перечисленные в таблице 20, не влияют на электрическое поведение модели и не масштабируются множителем **Area**. Они позволяют LTspice проверить использование диода в номинальных режимах.

Источник напряжения, управляемый напряжением

Имя компонента: E, E2. Есть три типа источников напряжения, управляемых напряжением.

Синтаксис: Exxx <+узел> <-узел> <управляющий узел> <-управляющий узел> <коэффициент передачи>. Это источник с линейной зависимостью выходного напряжения, имеющий постоянный коэффициент

передачи. Он воспроизводит выходное напряжение между узлами <+узел> <-узел>, зависящее от входного напряжения между узлами <+управляющий узел> <-управляющий узел>.

Синтаксис: Exxx <+узел> <-узел> <+управляющий узел> <-управляющий узел> table=(<пара значений>, <пара значений>, ...). Используется табличная форма задания коэффициента передачи в виде списка пар значений. Второе число в паре равно выходному напряжению, когда управляющее напряжение равно первому числу этой пары. Выходное напряжение изменяется линейно, когда управляющее напряжение изменяется между заданными точками. Если управляющее напряжение выходит за пределы диапазона, заданного в таблице, выходное напряжение экстраполируется как постоянное напряжение в соответствующей крайней точки таблицы.

Синтаксис: Exxx <+узел> <-узел> <+управляющий узел> <-управляющий узел> Laplace=<функция(и)> [window=<временной интервал>] [nfft=<число>] [mtol=<число>]. Передаточная функция этого источника напряжения определяется преобразованием Лапласа.

Синтаксис: Exxx <+узел> <-узел> value={<выражение>}. Это альтернативный синтаксис для источника напряжения с произвольным поведением В.

Синтаксис: Exxx <+узел> <-узел> POLY(<N>) (+узел управляющего источника 1, -узел управляющего источника 1) (+узел управляющего источника 2, -узел управляющего источника 2) ... (+узел управляющего источника N, -узел управляющего источника N) <коэффициенты полинома...>. Это устаревшая форма моделирования произвольного поведения, описываемого полиномом. Используется для управления имеющимися поведенческими моделями Linear Technology.

Примечание. Лучшие использовать источник тока G, шунтированный сопротивлением, для имитации источника E. Источник тока, управляемый напряжением, шунтированный сопротивлением, обчитывается быстрее и вызывает меньше проблем со сходимостью, чем источник напряжения, управляемый напряжением. Кроме того, ненулевое выходное полное сопротивление чаще встречается в практических схемах.

Источник тока, управляемый током

Имя компонента: F.

Синтаксис: Fxxx <+узел> <-узел> <имя управляющего источника напряжения> <коэффициент передачи>. Этот элемент цепи обеспечивает ток между узлами <+узел> <-узел>. Выходной ток равняется произведению коэффициента передачи на ток через независимый источник напряжения.

Синтаксис: Fxxx <+узел> <-узел> value={<выражение>}. Это альтернативный синтаксис для источника тока с произвольным поведением В.

Синтаксис: Fxxx <+узел> <-узел> POLY(<N>) <V1 V2... VN> <коэффициенты полинома...>. Это устаревшая форма моделирования произвольного поведения, описываемого полиномом. Используется для управления имеющимися поведенческими моделями Linear Technology.

Источник тока, управляемый напряжением

Имя компонента: G, G2. Есть три типа источников тока, управляемых напряжением.

Синтаксис: Gxxx <+узел> <-узел> <+управляющий узел> <-управляющий узел> <коэффициент передачи>. Линейный источник с постоянным коэффициентом передачи, выходной ток которого течет между узлами <+узел> <-узел> и зависит от входного напряжения между узлами <+управляющий узел> <-управляющий узел>.

Синтаксис: Gxxx <+узел> <-узел> <+управляющий узел> <-управляющий узел> table=(<пара значений>, <пара значений>, ...). Источник с табличной формой задания коэффициента передачи. Таблица представляет собой список пар значений. Второе число в паре равно выходному току, когда управляющее напряжение равно первому числу этой пары. Выходной ток изменяется линейно, когда управляющее напряжение изменяется между заданными точками. Если управляющее напряжение выходит за пределы диапазона, заданного в таблице, выходной ток экстраполируется как постоянный ток в соответствующей крайней точке таблицы.

Синтаксис: Gxxx <+узел> <-узел> <+управляющий узел> <-управляющий узел> Laplace=<функция(и)> [window=<временной интервал>] [nfft=<число>] [mtol=<число>].

Функция передачи этого элемента схемы определена преобразованием Лапласа.

Синтаксис: Gxxx <+узел> <-узел> value={<выражение>}. Это альтернативный синтаксис для источника тока с произвольным поведением В.

Синтаксис: Gxxx <+узел> <-узел> POLY(<N>) (<+узел управляющего источника 1, -узел управляющего источника 1) (+узел управляющего источника 2, -узел управляющего источника 2) ... (+узел управляющего источника N, -узел управляющего источника N) <коэффициенты полинома...>. Это устаревшая форма моделирования произвольного поведения, описываемого полиномом. Используется для управления имеющимися поведенческими моделями Linear Technology.

Источник напряжения, управляемый током

Имя компонента: H.

Синтаксис: Hxxx <+узел> <-узел> <имя управляющего источника напряжения> <коэффициент передачи>. Напряжение, приложенное между узлами <+узел> <-узел>, линейно зависит от тока через управляющий источник напряжения, умноженного на коэффициент передачи.

Синтаксис: Hxxx <+узел> <-узел> value={<выражение>}. Это альтернативный синтаксис для источника напряжения с произвольным поведением В.

Синтаксис: Hxxx <+узел> <-узел> POLY(<N>) <управляющий источник напряжения 1 управляющий источник напряжения 2 ... управляющий источник напряжения 3> <коэффициенты полинома...>. Это устаревшая форма моделирования произвольного поведения, описываемого полиномом. Используется для управления имеющимися поведенческими моделями Linear Technology.

Источник тока

Имя компонента: CURRENT.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> <ток> [AC=<амплитуда>] [load]. Это источник постоянного тока между узлами <+узел> <-узел>. Если источник используется как нагрузка, он должен быть потребителем, и в таком случае ток стремится к нулю, если напряжение между узлами <+узел> <-узел> стремится к нулю или имеет отрицательное значение. Цель этого варианта — в моделировании токовой нагрузки источника питания, который не дает ток, если выходное напряжение равно нулю. При этом применяется ключевое слово **load**.

Для анализа на переменном токе используется амплитудное значение переменного тока на анализируемой частоте.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> PULSE (Ioff Ion Tdelay Trise Tfall Ton Tperiod Ncycles). Это источник импульсного тока, параметры модели которого приведены в таблице 21.

Таблица 21. Параметры модели источника импульсного тока

Обозначение	Параметр	Размерность
Ioff	Начальное значение тока	А
Ion	Максимальное значение тока	А
Tdelay	Время задержки	с
Trise	Длительность переднего фронта	с
Tfall	Длительность заднего фронта	с
Ton	Длительность импульса	с
Tperiod	Период следования импульсов	с
Ncycles	Количество импульсов в серии (опускается для источника с непрерывной генерацией)	число

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> SINE (Ioffset Iamp Freq Td Theta Phi Ncycles). Так записывается источник синусоидального тока, параметры модели которого приведены в таблице 22.

Таблица 22. Параметры модели источника синусоидального тока

Обозначение	Параметр	Размерность
Ioffse	Постоянная составляющая тока	А
Iamp	Амплитуда переменной составляющей	А
Freq	Частота	Гц
Td	Время задержки	с
Theta	Коэффициент затухания	1/с
Phi	Фаза	°
Ncycles	Количество циклов (опускается для источника с непрерывной генерацией)	число

На этапах времени, которые меньше, чем Td, и после завершения Ncycles выходной ток описывается выражением:

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

Для $T_d < \text{time} < N_{\text{cycles}} / \text{Freq}$ ток равен:

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

Коэффициент затухания Theta — аналог постоянной времени затухания.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> EXP (I1 I2 Td1 Tau1 Td2 Tau2). Это источник экспоненциального тока с параметрами модели, приведенными в таблице 23.

Таблица 23. Параметры модели источника экспоненциального тока

Обозначение	Параметр	Размерность
I1	Начальное значение тока	А
I2	Максимальное значение тока	А
Td1	Начало переднего фронта	с
Tau1	Постоянная времени нарастания	с
Td2	Начало заднего фронта	с
Tau2	Постоянная времени нарастания	с

Для времени меньше Td1 ток равен I1. На участке времени Td1 < time < Td2 ток описывается выражением:

$$I1 + (I2 - I1) \times (1 - \exp(-(\text{time} - Td1) / \text{Tau1})).$$

Для времени больше Td2 ток описывается выражением:

$$I1 + (I2 - I1) \times (1 - \exp(-(\text{time} - Td1) / \text{Tau1})) \times (I1 - I2) \times (1 - \exp(-(\text{time} - Td2) / \text{Tau2})).$$

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> SFFM(Ioff Iamp Fcar MDI Fsig). Параметры модели источника синусоидального тока с частотной модуляцией приведены в таблице 24.

Таблица 24. Параметры модели источника синусоидального тока с частотной модуляцией

Обозначение	Параметр	Размерность
Ioff	Постоянная составляющая тока	А
Iamp	Амплитуда переменной составляющей	А
Fcar	Частота несущей	Гц
MDI	Индекс частотной модуляции	—
Fsig	Частота сигнала	Гц

Выходной сигнал описывается следующей функцией:

$$I_{\text{off}} + I_{\text{amp}} \times \sin((2\pi \times F_{\text{car}} \times \text{time}) + \text{MDI} \times \sin(2\pi \times F_{\text{sig}} \times \text{time})).$$

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> tbl=<напряжение,ток>, <напряжение,ток>, ...). Ток этого источника определяется как функция напряжения на выходных узлах в табличной

Таблица 25. Параметры модели полевого транзистора

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Значение по умолчанию	Пример
AF	Показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока через переход	—	1	
alpha	Коэффициент ионизации	1/B	0	
B	Параметр легирования	—	1	1,1
Beta	Крутизна	A/B2	1×10^{-4}	1×10^{-3}
BetaTce	Экспоненциальный температурный коэффициент крутизны	%/°C	0	
Cgd	Емкость перехода затвор—сток при нулевом смещении	пФ	0	1
Cgs	Емкость перехода затвор—исток при нулевом смещении	п	0	5
Fc	Коэффициент нелинейности емкостей переходов при прямом смещении	—	0,5	
gdsnoi	Коэффициент теплового шума канала	—	1	
Is	Ток насыщения p-n-перехода затвор—канал	А	1×10^{-14}	1×10^{-14}
Isr	Параметр тока рекомбинации перехода затвор—канал	А	0	
KF	Коэффициент, определяющий плотность фликкер-шума	—	0	
Lambda	Коэффициент модуляции длины канала	1/B	0	1×10^{-4}
N	Коэффициент неидеальности перехода затвор—канал	—	1	
nlev	Выбор уравнения шумов	—	2	
Nr	Коэффициент эмиссии для тока Isr	—	2	
Pb	Контактная разность потенциалов p-n-перехода затвора	В	1	0,6
Rd	Объемное сопротивление области стока	Ом	0	100
Rs	Объемное сопротивление области истока	Ом	0	100
Tnom	Номинальная температура	°C	27	50
Vk	Напряжение ионизации перехода затвор—канал	В	0	
Vto	Пороговое напряжение	В	-2,0	-2,0
VtoTc	Температурный коэффициент порогового напряжения	В/°C	0	
Xti	Температурный коэффициент тока Is	—	3	

форме. Такая форма используется для моделирования особенностей нагрузки.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> <значение> step (<значение1>, [<значение2>], [<значение3>, ...]) [load]. Это специальная форма для источника тока. Ток определен как список токов, такая форма используется при ступенчатом изменении нагрузки при анализе переходного процесса. В этом способе моделирование проводится, пока для первого тока в списке, <значение1>, не будет достигнуто установившееся состояние. Тогда ток переключается к следующему значению в списке, <значение2>. Процесс повторяется, пока список не будет исчерпан. Если директивой .tran не определен шаг step, то используются оригинальные <значения>.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> R=<значение>. Это вообще-то не источник тока, а резистор. Такая форма используется, чтобы моделировать сопротивление нагрузки, когда нагрузка записана в списке соединений как источник тока.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> PWL(t1 i1 t2 i2 t3 i3...). Так описывается источник тока с кусочно-линейной функцией.

На отрезке времени меньше t1 ток равен i1. В течение времени между t1 и t2 ток изменяется линейно между i1 и i2. Допускается любое количество точек время-ток. Для времени, больше указанного в последней точке, ток равен последнему значению в списке.

Синтаксис: Ixxx <+узел> <-узел> wavfile=<имя файла> [chan=<номер канала>]. Такая модель позволяет использовать файл .wav в качестве входного для LTspice. <Имя файла> — это либо полный, абсолютный путь к файлу .wav, либо относительный путь, определяемый каталогом, содержащим моделируемую схему или список соединений.

Двойные кавычки могут использоваться для определения пути. Файл .wav может содержать до 65 536 каналов, пронумерованных от 0 до 65 535. Следует определить используемый канал. По умолчанию используется первый канал под номером 0. Файл .wav интерпретируется как имеющий полную шкалу от -1 до 1 А.

Этот источник применяется только в .TRAN-анализе.

Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом (JFET)

Имя компонента: NJF, PJF.

Синтаксис: Jxxx <узел стока> <узел затвора> <узел истока> <имя модели> [коэффициент кратности area] [проводимость] [IC=<Vds,Vgs>] [temp=<температура>].

Примеры:

```
J1 0 in out MyJFETmodel
.model MyJFETmodel NJF(Lambda=.001)

J2 0 in out MyPJFETmodel
.model MyPJFETmodel PJF(Lambda=.001)
```

Для определения особенностей полевого транзистора с управляющим p-n-переходом используется директива .MODEL. Ключевые слова NJF и PJF в списке параметров модели определяют проводимость транзистора. Коэффициент кратности определяет количество идентичных устройств данной модели, включенных параллельно.

Модель JFET получена из модели Шихмана-Ходжеса, дополненной током рекомбинации затвора и реакцией на ионизирующие воздействия. Характеристики на постоянном токе определены параметрами VTO и BETA, которые связывают изменение тока стока с напряжением затвора;

LAMBDA, который определяет выходную проводимость, и Is, током насыщения двух переходов. Включены два омических сопротивления, Rd и Rs. Накопление заряда моделируется нелинейными емкостями обедненного слоя для обоих переходов, которые изменяются в степени -1/2 приложенного к переходу напряжения и определены параметрами Cgs, Cgd и PV. Добавлен параметр В. Параметры модели полевого транзистора приведены в таблице 25.

Взаимная индуктивность

Имя компонента: net, помещается в виде текста на схеме.

Синтаксис: Kxxx L1 L2 [L3...] <коэффициент связи>. L1 и L2 — обозначения катушек индуктивности в схеме. Коэффициент связи может находиться в пределах от -1 до 1.

Строка K1 L1 L2 L3 L4 1 эквивалентна шести строкам при одинаковом коэффициенте связи между каждой из пар обмоток:

- K1 L1 L2 1;
- K2 L2 L3 1;
- K3 L3 L4 1;
- K4 L1 L3 1;
- K5 L2 L4 1;
- K6 L1 L4 1.

Рекомендуется начинать моделирование с коэффициента связи, равного 1. Это устранит индуктивность рассеивания, которая может вызвать звон на очень высоких частотах, если отсутствует демпфирование, и замедлить моделирование. Однако коэффициент связи -1 или 1 может привести к проблемам с моделированием, если в директиве .tran присутствует модификатор uic.

Индуктивность

Имя компонента: IND, IND2.

Синтаксис: Lxxx <+узел> <-узел> <индуктивность> [ic=<начальный ток>] [Rser=<значение>] [Rpar=<значение>] [Cpar=<значение>] [m=<значение>] [tc1=<значение>] [tc2=<значение>] [temp=<значение>].

Можно задать эквивалентное последовательное сопротивление, последовательную индуктивность, параллельное сопротивление и параллельную шунтирующую емкость.

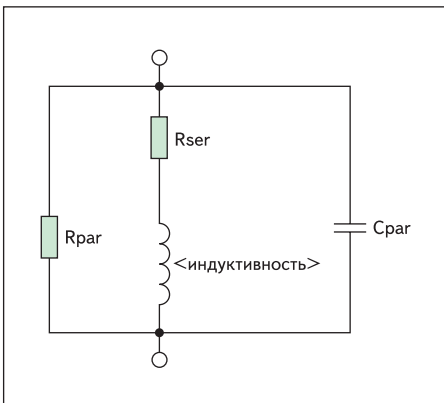


Рис. 51. Эквивалентная схема катушки индуктивности

Таблица 26. Параметры модели индуктивности

Обозначение	Параметр
Rser	Эквивалентное последовательное сопротивление
Rpar	Эквивалентное параллельное сопротивление
Cpar	Эквивалентная параллельная емкость
RLshunt	Шунтирующий резистор, параллельный Lser
m	Количество включенных параллельно устройств
ic	Начальный ток (используется, если только модификатор uic включен в .tran-анализ)
tc1	Линейный температурный коэффициент индуктивности
tc2	Квадратичный температурный коэффициент индуктивности
temp	Рабочая температура

На рис. 51 изображена эквивалентная схема индуктивности.

Параметры индуктивности приведены в таблице 26.

Предпочтительнее включить в состав катушки индуктивности паразитные Rpar, Rser и Cpar, чем специально предусматривать их. LTspice использует собственную технологию моделирования схемы для моделирования такой физической катушки индуктивности без внутренних узлов. Это делает матрицу моделирования меньше, ускоряет вычисления и уменьшает вероятность несходимости при малых шагах времени.

По умолчанию LTspice будет вычислять потери мощности в катушках индуктивности при расчете переходного процесса для ИИП. Эти потери обычно незначительны, и их расчет при желании может быть выключен. Отключите “Supply a min. inductor damping if no Rpar is given” на странице “Tools=>Control Panel=>Hacks!” Эта установка будет сохранена при перезапуске программы. По умолчанию также присутствуют последовательные сопротивления 1 мОм, не упомянутые в описании взаимной индуктивности. Наличие Rser позволяет SwitcherCAD III объединять индуктивности по эквивалентной схеме Нортона вместо эквивалентной схемы Тевенина, чтобы уменьшить размер матрицы линеаризованной схемы. Если нежелательно, чтобы такое минимальное сопротивление присутствовало в схеме, необходимо явно установить Rser = 0 для конкретной катушки индуктивности. При этом в процедуре анализа переходного процесса для катушки индуктивности будет использована более сложная эквивалентная схема Тевенина.

В LTspice есть два варианта нелинейных индуктивностей. Каждый из них — это поведенческая индуктивность, описываемая выражением для потока. Ток через индуктивность в выражении записывается ключевым словом x. Пример записи в списке соединений:

```
*
L1 N001 0 Flux=1m*tanh(5*x)
I1 0 N001 PWL(0 0 1 1)
.tran 1
.end
```

В примере скорость изменения тока di/dt задана равной 1 А/с, поэтому значение ин-

Таблица 27. Параметры модели индуктивности с сердечником

Обозначение	Параметр	Единица измерения
Hc	Козрцитивная сила	Ампер-виток/м
Br	Остаточная индукция	Т
Bs	Индукция насыщения	Т
Lm	Средняя длина магнитной силовой линии	м
Lg	Ширина воздушного зазора	м
A	Площадь поперечного сечения	м²
N	Количество витков	—

дуктивности можно считать как напряжение в узле N001, естественно, заменив вольты на генри.

Другая нелинейная катушка индуктивности в LTspice базируется на гистерезисной модели магнитопровода, предложенной Джоном Чаном. Эта модель определяет петлю гистерезиса только тремя параметрами: Hc, Bs и Br. Параметры модели индуктивности с сердечником перечислены в таблице 27.

Верхняя и нижняя ветви основной петли гистерезиса описываются как:

$$B_{up}(H) = B_s \times \frac{H + H_c}{|H + H_c| + H_c \times \left(\frac{B_s}{B_r - 1}\right)} + \mu_0 \times H$$

и

$$B_{dn}(H) = B_s \times \frac{H + H_c}{|H - H_c| + H_c \times \left(\frac{B_s}{B_r - 1}\right)} + \mu_0 \times H.$$

График этой функции изображен на рис. 52.

Hc и Br — точки пересечения предельной петли гистерезиса с осями H и B. Bs — точка пересечения оси B с асимптотической прямой, приблизительно Bsai(H) = Bs + μ₀ × H, поскольку H стремится к бесконечности.

Начальная кривая намагничивания:

$$B_{mag}(H) = 0,5 \times [B_{up}(H) + B_{dn}(H)].$$

Абсолютная и дифференциальная магнитные проницаемости сердечника — функции H и предшествующих значений H. На рис. 53 изображена асимметричная частная петля гистерезиса типового феррита для силовых устройств.

Отметим, что напряженность магнитного поля H в воздушном зазоре не пропорциональна току в обмотке. LTspice определяет магнитные поля в магнитопроводе и зазоре в предположении равенства площадей поперечного сечения магнитопровода и короткого или равномерно распределенного зазора.

Следующий пример демонстрирует зависимость индуктивности L1, представляющей собой катушку на сердечнике с зазором, от протекающего тока:

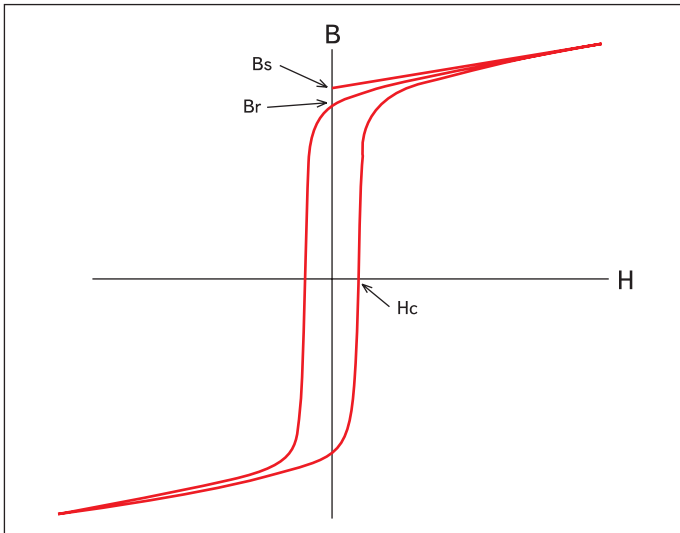


Рис. 52. Предельная петля гистерезиса магнитного сердечника

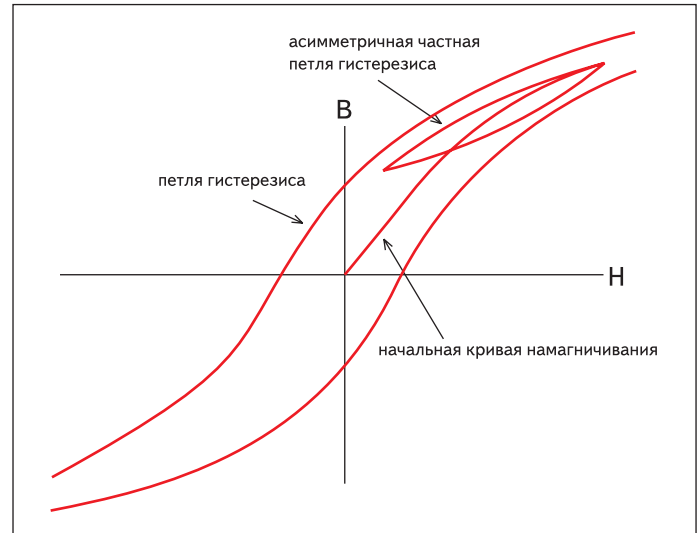


Рис. 53. Асимметричная частная петля гистерезиса феррита

```
*
N001 0 Hc=16. Bs=.44 Br=.10 A=0.0000251
+ Lm=0.0198 Lg=0.0006858 N=1000
I1 0 N001 PWL(0 0 1 1)
.tran .5
.options maxstep=10u
.end
```

Схема и результаты моделирования изображены на рис. 54. Как и в предыдущем примере, значения индуктивности эквива-

лентны значениям напряжения в узле (N001). Намагничивание сердечника идет по начальной кривой намагничивания, так что можно заметить, что сначала магнитная проницаемость увеличивается по сравнению с начальным значением, а затем с ростом тока уменьшается вплоть до насыщения сердечника. Поскольку воздушный зазор уменьшает влияние изменения магнитной проницаемости

на индуктивность катушки, чтобы заметить увеличение магнитной проницаемости, нужно увеличить масштаб изображения $V(N001)$, что и сделано в окне графиков в правом верхнем углу рис. 54. Максимальное значение соответствует напряженности магнитного поля, равной коэрцитивной силе H_c .

Окончание следует

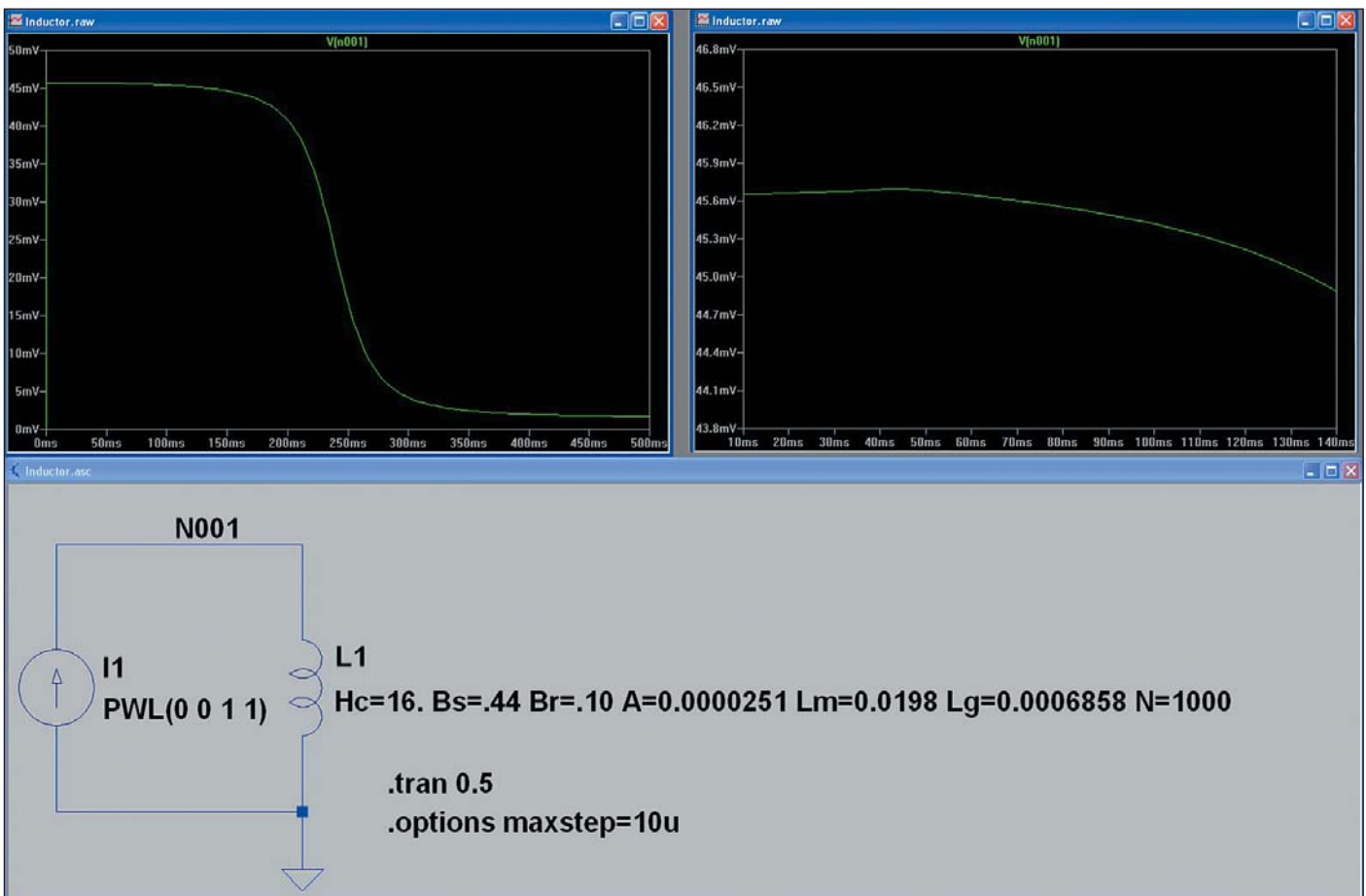


Рис. 54. Моделирование начальной кривой намагничивания