ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ LTSPICE OT LINEAR TECHNOLOGY, ЧАСТЬ 2

В о второй части статьи кратко рассмотрены источники напряжений, токов и другие функциональные устройства, а также примеры их использования. Приведены рекомендации по выбору шага интегрирования для исключения ошибок при моделировании устройств с быстропротекающими процессами.

ЭКиС

THE SOFTWARE FOR MODELING ELECTRONIC CIRCUITS LTSPICE FROM LINEAR TECHNOLOGY, PART 2

Abstract - The second part of the article briefly describes the sources of voltages, currents and other functional devices, as well as examples of their use. The recommendations for choosing the integration step to eliminate errors in the simulation of devices with fast processes are given.

V. Makarenko

В. Макаренко

Автор приносит извинения за допущенную неточность в первой части статьи. Там было указано что "значок Общий провод к сожалению, повернуть невозможно". Конечно, это не так. Просто для поворота необходимо воспользоваться комбинацией клавиш Ctrl+R.

Для эффективного использования программы необходимо знать какие источники напряжений и токов, а также функциональные узлы доступны в ней для моделирования. Рассмотрим источники тока и напряжения, которые представлены в программе.

Функциональные источники тока и напряжения

На рис. 1 приведены условные обозначения функциональных источников тока В1 (bi) и напряже-



Рис. 1. Условное графическое обозначение функциональных источников тока (bi) и напряжения (bv) в программе LTspice

ния B2 (bv).

Для определения параметров функционального источника в рабочем окне LTspice необходимо вызвать окно настройки Component Attribute Editor (редактор атрибутов компонента), щелкнув правой кнопкой мышки по символу элемента (рис. 1). Выражение, определяющее функционирование источника, а также остальные параметры текстового синтаксиса, вносятся, по мере заполнения, в поля Value, Value2, SpiceLine и SpiceLine2. В качестве независимых переменных могут использоваться различные напряжения и токи моделируемой схемы, а также переменная time, символизирующая текущее время моделирования. Над этими переменными можно производить различные математические и логические операции (табл. 1), а также использовать их в качестве аргументов различных математических и логических функций (табл. 2).

Синтаксис команды:

для источника напряжения:

Bnnn n001 n002 V=<выражение> [ic=<значение>]

+ [tripdv=< значение >] [tripdt=< значение >]

+ [laplace=<выражение> [window=<time>]

+ [nfft=<число>] [mtol=<число>]]

для источника тока:

Bnnn n001 n002 I=<выражение> [ic=< значение >]

+ [tripdv=< значение >] [tripdt=< значение >] [Rpar=< значение >]

+ [laplace=< выражение > [window=<time>]

+ [nfft=< число >] [mtol=< число >]]

<выражение> – функциональное выражение.

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

Для источника тока параллельное сопротивление может быть определено параметром Rpar.

Рассмотрим пример использования функционального источника напряжения на модели диммера, которая имеется в составе поставляемых вместе с программой примеров. Схема модели приведена на рис. 2.



Операнд	Выполняемая операция
&	Преобразование операнда к Булевской переменной и выполнение операции И
	Преобразование операнда или выражения к Булевской переменной и выполнение операции ИЛИ
^	Преобразование операнда или выражения к Булевской переменной и выполнение операции исклю- чающее ИЛИ
<	Истина, если выражение слева меньше, чем выражение справа, иначе ложь
>	Истина, если выражение слева больше, чем выражение справа, иначе ложь
<=	Истина, если выражение слева меньше, чем или равно выражение справа, иначе ложь
>=	Истина, если выражение слева больше, чем или равно выражение справа, иначе ложь
+	Сложение с плавающей запятой
-	Вычитание с плавающей запятой
*	Умножение с плавающей запятой
/	Деление с плавающей запятой
**	Возведение в степень (возвращается только вещественная часть, т. е1**0.5 даст ноль. а не і)
!	Преобразование выражения к Булевской переменной и инвертирование
@	Оператор выбора шага

Таблица 1. Математические и логические операции

Таблица 2. Математические и логические функции

Функция	Описание
abs(x)	Абсолютное значение х
absdelay(x,t[,tmax]) или delay(x,t[,tmax]	Задержка х на время t. Опционально максимальное время задержки tmax
acos(x) или arccos(x)	Действительная часть arccos(x), Например, acos(-5) возвращает значение 3.14159, а не 3.14159+2.29243i
acosh(x)	Действительная часть гиперболического косинуса ch(x). Например, acosh(.5) возвра- щает значение 0, а не 1.0472i
asin(x) или arcsin(x)	Действительная часть arcsin(x). Например, asin(-5) равно -1.57080, а не -1.57080+2.29243i
asinh(x)	Гиперболический синус sh(x)
atan(x) или arctan(x)	arctg(x)
atan2(y,x)	Четырехквадрантный arctg(y/x)
atanh(x)	Гиперболический арктангенс arcth(x)
buf(x)	1, если х > .5, иначе 0
ceil(x)	Целое число, равное или большее х
cos(x)	Косинус х
cosh(x)	Гиперболический косинус ch(x)
ddt(x)	Производная по времени от х
dnlim(x,y,z)	Аналогично max (x,y), но с непрерывной 1-й производной ширины перехода z
exp(x)	e ^x
floor(x)	Целое число, равное или меньшее х
hypot(x,y)	$sqrt(x^{*}2 + y^{*}2) = sqrt(x^{2} + y^{2})$
idt(x[,ic[,a]])	Интеграл от х, начальное состояние іс, сбросить, если это истина



Продолжение таблицы 2

Функция	Описание
idtmod(x[,ic[,m[,o]]]	Интеграл от x, начальное состояние ic, сброс при достижении абс. значения m, выход смещения о
if(x,y,z)	Если x > .5, затем у иначе z
int(x)	Преобразование х в целое число
inv(x)	0, если х > .5, иначе 1
limit(x,y,z)	Промежуточное значение х, у и z
ln(x)	Натуральный логарифм х
log(x)	Альтернативный синтаксис для In()
log10(x)	Десятичный логарифм
max(x,y)	Больше х или у
min(x,y)	Меньше х или у
pow(x,y)	Действительная часть x**y = xy. Например, pow(-1,.5)=0, без і
pwr(x,y)	$abs(x)^{**}y = abs(x)y$
pwrs(x,y)	sgn(x)Habs(x)**y = sgn(x)Habs(x)y
rand(x)	Случайное число от 0 до 1 в зависимости от целочисленного значения х
random(x)	Аналогично rand (), но плавные переходы между значениями
round(x)	Ближайшее целое число х
sdt(x[,ic[,assert]])	Альтернативный синтаксис для idt()
sgn(x)	1 при x > 0, 0 при x = 0 и -1 x < 0
sin(x)	Синус х
sinh(x)	Гиперболический синус sh(x)
sqrt(x)	Квадратный корень х
table(x,a,b,c,d,)	Интерполировать значение для х на основе таблицы (задается множеством пар точек)
tan(x)	Тангенс х
tanh(x)	Гиперболический тангенс th(x)
u(x)	Шаг изменения – 1 если x > 0., иначе 0
uplim(x,y,z)	Аналогично min (x,y), но с непрерывной 1-й производной ширины перехода z
uramp(x)	х, если х > 0., иначе 0
white(x)	Случайное число между5 а .5. Более плавные переходы между значениями, чем random ()
!(x) или ~(x)	Альтернативный синтаксис для inv(x)







Управление яркостью свечения лампы (Light Bulb) осуществляется с помощью тиристора U1. Угол отсечки тока определяется временем заряда конденсатора C1 до порога отпирания диака Q1. В модели предусмотрено дискретное изменение сопротивления резистора R1 от 1 кОм до 325 кОм. Шаг изменения сопротивления задается командой, отображаемой в нижней части рис. 2 – .step param Rdim list.

На вход диммера подается переменное напряжение 166 В/60 Гц от генератора V1. Для контроля напряжения на нагрузке используется функциональный источник напряжения В1, который формирует на своем выходе сигнал, пропорциональный мгновенной мощности на нагрузке (рис. 3). В строке Value значение напряжения определено как произведение разности напряжений между точками A и В (т.е. напряжения на сопротивлении нагрузки Rload), помноженное на ток в нагрузке I(Rload). Для того чтобы увидеть огибающие кривых, показывающих изменения мощности, на выходе В1 включен фильтр нижних частот.

Open Symbol:	C:\Users\mak\Documents\LTspiceXVII\ib\sym\bv.asy	ę
Attribute	Value	Vis.
Prefix	B	
InstName	81	х
SpiceModel		
Value	V=V(A,B)*1(Rload)	x
Value2		
SpiceLine		
SpiceLine2		

Рис. 3. Строка атрибутов функционального источника напряжения В1

На рис. 4 приведены зависимости мощности в нагрузке от времени для различных значений сопротивления резистора R1, измеренные на выходе ФНЧ.



Рис. 4. Кривые мощности в нагрузке, измеренные на выходе ФНЧ

Чтобы проконтролировать как меняется угол отсечки, достаточно отключить конденсатор C3 (рис. 2). Для того, чтобы не загромождать график большим количеством кривых, в командной строке были внесены изменения и она была записана так **.step param Rdim list 1K 300K**. В этом случае будет построено два графика – для сопротивления резистора R1, равного 1 и 300 кОм, которые приведены на рис. 5.



Рис. 5. Изменение угла отсечки тока при изменении сопротивления резистора R1 от 1 кОм (зеленый) до 300 кОм (синий)

Как следует из рис. 5, при сопротивлении резистора R1 равном 1 кОм, вся мощность передается в нагрузку, а при R1 = 300 кОм – только малая часть. Угол отсечки тока составляет примерно 270°.

Рассмотрим еще один пример использования функционального источника напряжения. На рис. 6 приведена схема амплитудного модулятора, построенного нетрадиционным способом. Модулятором служит источник напряжения В1, а источниками несущего и модулирующего колебаний – генераторы напряжений V1 и V2, соответственно.

Генератор несущего колебания V1 формирует сигнал с частотой 100 кГц и амплитудой 1 В (запись в командной строке SINE(0 1 100000), а генератор V2 – сигнал с частотой 5 кГц, амплитудой 1 В и постоянной составляющей 2 В (запись в командной строке SINE(2 1 5000).

Для того, чтобы удобно было описывать функцию, которую должен выполнять функциональный источник напряжения, разместим две точки Label NET на выходах генераторов V1 (точка A) и V2 (точка B). Генератор B1 в рассматриваемом примере выполняет функцию аналогового перемножителя (запись в командной строке V=V(A)*V(B)).

Схему можно упростить за счет исключения резисторов R1 и R2 (рис. 7). Результат работы такого модулятора приведен на рис. 8.





Рис. 6. Амплитудный модулятор на базе функционального источника напряжения



Рис. 7. Упрощенная схема амплитудного модулятора на базе функционального источника напряжения



ЭКиС

Рис. 8. Сигнал на выходе амплитудного модулятора

Если заменить команду генератора В1 на V=sqrt(V(A)*V(B)), то получим амплитудный детектор, форма сигнала на выходе которого, показана на рис. 9.



Рис. 9. Сигнал на выходе В1 при выполнении команды V=sqrt(V(A)*V(B))

К сожалению, работа этих функциональных ис-

точников практически не описана в [1, 2] и в подсказках самой программы. Кроме перечисления функций и операций, которые можно реализовать с помощью этих источников сигналов, другой информации там нет. Поэтому нужно быть осторожным в трактовке полученных результатов.

Приведем простой пример. Попробуем возвести в квадрат гармонический сигнал. В соответствии с правилами тригонометрии на выходе такого устройства должны получить

$$(\cos x)^2 = 0.5 + 0.5\cos 2x$$
,

т.е. гармонический сигнал удвоенной частоты поднятый над осью х. Воспользуемся, моделью приведенной рис. 7, и введем на команду V=(V(A)*V(B))**2, т.е. возведем в квадрат АМ-сигнал с частотой несущего колебания равной 100 кГц. Результат моделирования приведен на рис. 10,а. Как видно из рисунка, форма сигнала значительно искажена и не соответствует ожидаемой. Результат возведения в квадрат, полученный в программе Multisim, показывает совершенно другой результат. Следовательно, неверно установлены параметры моделирования.

Для изменения параметров моделирования необходимо, находясь в окне, где размещена модель (после проведения моделирования открывается второе окно, в котором строятся графики измеренных сигналов), выбрать пункт меню Simulate/Edit Simulation Cmd и в открывшемся окне (рис. 11) задать значение временного шага интегрирования Махітиш Timestep равное 10⁻⁷ с. По умолчанию в этом окошке ничего не записано, что соответствует шагу, равному 10⁻⁵ с, установленному по умолча-





Рис. 10. Результат возведения в квадрат АМ-сигнала при Maximum timestep равном 10⁻⁵ с (а), и Maximum timestep 10⁻⁷ с (б)



Рис. 11. Окно настройки параметров моделирования

нию. В результате была получена форма выходного сигнала, приведенная на рис. 10,б. Полученный результат верен и соответствует ожидаемому.

Следовательно, при работе с сигналами, частота которых превышает 1 кГц, следует проверить верность полученных результатов, уменьшив значение Maximum Timestep. Конечно, при этом время симуляции увеличится во столько раз, во сколько раз уменьшится Maximum Timestep. Но это даст уверенность в том, что получен верный результат. В [1] по этому вопросу есть одна фраза "... в окне Edit Simulation Command, выбрав вкладку Transient, можно определить время начала записи результатов моделирования (Time to Start Saving Data) и максимальный шаг интегрирования (Maximum Timestep). Если шаг интегрирования не указан, то программа сама выбирает для него максимально возможное значение". В [2] вообще нет упоминаний этого параметра. Как показал эксперимент, полагаться на автоматический выбор шага интегрирования небезопасно.

Источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН)

Для реализации многих функций можно воспользоваться источниками напряжения, управляемыми напряжением (ИНУН), которые в программе обозначены как Voltage depended voltage source, а в библиотеке элементов как е и e2. На схеме они отображаются так, как показано на рис. 12, т.е. абсолютно одинаково, но полярность напряжения управления у них противоположна.



Рис. 12. Отображение источников напряжения е и е2, управляемых напряжением, на схеме

Как указано в [1], в программе предусмотрено использование пяти типов ИНУН, а источник [2] указывает только на три типа источников. В подсказке к программе также указывается только три типа источников.

Первый тип ИНУН

Синтаксис: Exxx n1 n2 n3 n4 <GAIN>, где GAIN – коэффициент передачи.

Этот тип ИНУН обеспечивает выходное напряжение между узлами n1 и n2, которое линейно зависит от управляющего напряжения, приложенного между узлами n3 и n4. Связь между напряжениями управления и на выходе ИНУН определяется коэффициентом передачи GAIN.

Проиллюстрируем примером использование первого типа ИНУН. На рис. 13 приведена схема сумматора, реализованного с помощью ИНУН.

Сумматор предназначен для формирования сиг-





tran 0 0.01 0 startup.

Рис. 13. Схема сумматора с использованием ИНУН первого типа

нала, соответствующего сумме сигналов двух генераторов, и смещенного вверх на 0.5 В. Генератор V1 формирует сигнал частотой 5 кГц с амплитудой 1 В, а генератор V2 – сигнал частотой 100 кГц с постоянной составляющей 0.5 В. Коэффициент передачи ИНУН задан равным 0.5 (рис. 14). Изменяя его величину, можно менять коэффициент передачи от выхода генератора V1 до выхода сумматора.

Open Symbol	[] C:\Users\mak\Documents\LTspiceXVII\ib\sym	\e.asy	
Attribute	Value	Vis.	^
Prefix	E		
InstName	E1	х	
SpiceModel			
Value	0.5	×	
Value2			
SpiceLine			
Snicel ine2			Y

Рис. 14. Настройки ИНУН первого типа для реализации сумматора

После проведения анализа переходных процессов (Transient) получим на резисторе R1 напряжение, форма которого соответствует поставленной задаче (рис. 15).



Рис. 15. Форма сигнала на выходе сумматора

Второй тип ИНУН

Синтаксис: Exxx n1 n2 n3 n4 table=(< пара значений>, < пара значений >, ...) В таблице, состоящей из нескольких пар чисел, задается коэффициент передачи ИНУН. Первая цифра пары задает значение напряжения управления, а вторая – напряжение на выходе ИНУН.

Выходное напряжение линейно интерполируется между точками, заданными для входного напряжения в таблице. Если напряжение управления оказывается вне диапазона таблицы, выходное напряжение экстраполируется как постоянное напряжение, заданное в последней точке таблицы.

На рис. 16 приведен пример формирования сигнала сложной формы с помощью ИНУН второго типа. В таблице заданы следующие пары чисел table=0,0, 1,2, 2,0, 3,4. На вход управления подается гармонический сигнал амплитудой 5 В, частотой



Рис. 16. Использование ИНУН второго типа для формирования напряжения сложной формы

1 кГц с выхода генератора V1. Напряжение на выходе ИНУН приведено на рис. 17,а.

Как следует из рис. 17,а, напряжение на выходе ИНУН соответствует 0 при Uвх = 0.2 В при Uвх = 1 В, 0 при Uвх = 2 В и 4 В при Uвх = 3 В. Между точками напряжение изменяется по линейному закону (интерполируется).

При изменении частоты входного сигнала выяснилось, что скорость нарастания напряжения на выходе ИНУН ограничена. На рис. 17,6 приведена форма сигналов на выходах V1, E1 (зеленого цвета) и напряжение на резисторе R1 (красного цвета).

Анализ напряжения на выходе ИНУН показал, что скорость изменения выходного напряжения не превышает 4.5 В/мкс. Уменьшив Maximum Timestep до значения 10⁻⁶ с, получим верный результат. Если частоту сигнала управления увеличить до 100 кГц, то Maximum Timestep придется уменьшить до 10⁻⁷ с.

Третий тип ИНУН

Синтаксис: Exxx n1 n2 n3 n4 Laplace=<func(s)>

+ [window=<время>] [nfft=<число>] [mtol=<число>] Передаточная функция этого схемного элемента

передаточная функция этого схемного элемента определена с помощью преобразования Лапласа.





Рис. 17. Форма сложного сигнала, сформированного с помощью ИНУН при частоте сигнала управления 1 кГц (а) и 10 кГц (б)

В свою очередь передаточная функция является функцией комплексной переменной s. Следует обратить внимание на то, что символ "^", обозначающий в LTspice логическую операцию исключающее ИЛИ (XOR), в выражении Лапласа обозначает возведение в степень.

При расчете частотных характеристик (AC-анализ) переменная s заменяется выражением 2πf√-1. Для перехода во временную область (Transient анализ) определяется импульсная переходная характеристика передаточной функции путем обратного преобразования Фурье частотной характеристики. Затем путем свертки импульсной характеристики с входным сигналом рассчитывается переходной процесс.

LTspice автоматически определяет соответствующий диапазон частот и разрешающую способность. Можно эти значения откорректировать, явно устанавливая параметры **nfft** и **window**. Обратная величина значения **window** – разрешающая способность по частоте. Значение **nfft** – наибольшее значение частоты.

Рассмотрим пример использования ИНУН третьего типа. Вместе с программой поставляется файл примера TwoTau.asc. Схема этой модели приведена на рис. 18.





Генератор V1 формирует прямоугольные импульсы со скважностью 2 и периодом следования 10 мс.

В верхней части схемы на резисторах R1, R2 и конденсаторах C1, C2 реализован пассивный ФНЧ второго порядка. Такую же функцию реализует ИНУН E2, передаточная функция которого записана в виде Laplace=1/(1+.001*s)**2. Для источника E1 в передаточной функции добавлен множитель и она выглядит как Laplace=exp(-.001*s)/(1+.001*s)**2. Результаты моделирования приведены на рис. 19.



Рис. 19. Сигналы на выходах пассивного ФНЧ второго порядка и ИНУН2 (красный) и на выходе ИНУН1 (синий)

Форма и амплитуда сигналов в точках А и В (рис. 18) абсолютно идентичны и на рис. 19 показаны красным цветом. Сигнал в точке С (рис. 18) сдвинут по времени на 1 мс, что соответствует множителю ехр(-.001*s) в передаточной функции для E1.

Еще один пример использования ИНУН приведен в модели HalfSlope.asc, поставляемой вместе с программой. В [1] приведен пример реализации с помощью ИНУН передаточной функции усилителя ошибки ШИМ-контроллера TL494.

Альтернативный синтаксис описания источника с произвольной функцией изменения напряжения можно найти в подсказке программы и в [1].

В [2] рекомендуется использовать эквивалентный источник тока, управляемый напряжением (ИТУН) G, шунтируемый сопротивлением вместо ИНУН. ИТУН с шунтируемым сопротивлением требует меньше вычислительных затрат, чем ИНУН. Кроме того, выходное сопротивление, отличное от нуля, ближе к практическим схемам.

Источник тока, управляемый током (ИТУТ)

Источник тока, управляемый током, в программе обозначен как Current depended current source, а в библиотеке элементов как F. На схеме источник отображается так, как показано на рис. 20.



Рис. 20. Отображение на схеме источника тока, управляемого током

Синтаксис: Fxxx n1 n2 <Vnam> <GAIN>

ИТУТ генерирует ток в GAIN раз больше тока, протекающего через источник напряжения Vnam.

Пример использования ИТУТ приведен на рис. 21. Источник постоянного напряжения V1 формирует напряжение 1 В. Ток, протекающий по цепи R1, R2, практически равен 1 мА. Ток, формируемый источником тока F2, задан в 40 раз больше, чем ток, протекающий через V1 (команда V1 40). Для контроля тока F2 использован резистор R3 сопротивлением 1 Ом. Измеренное на R3 падение напряжения составило 40 мВ, что соответствует току 40 мА.



Рис. 21. Пример использования ИТУТ в качестве усилителя постоянного тока

На рис. 22 приведен пример использования ИТУТ в качестве гальванически развязанного усилителя. Усиленное напряжение частотой 100 кГц снимается с резистора R3. Форма и амплитуды сигналов на выходе V1 и на резисторе R3 приведены на рис. 23.



Рис. 22. Пример использования ИТУТ в качестве гальванически развязанного усилителя переменного напряжения



Рис. 23. Напряжение на выходе генератора V1 (синий цвет) и на резисторе R3 (зеленый цвет)

Источник тока, управляемый напряжением (ИТУН)

Обозначение источников тока, управляемых током (Current depended voltage source), обозначенных в библиотеке как g1 и g2, приведены на рис. 24. Как и для ИНУН источники отличаются только противоположной полярностью входов управления n3 и n4.



Рис. 24. Отображение на схеме источников тока, управляемых напряжением

Как и для **ИНУН** в программе предусмотрено использование трех типов ИТУН.

ИТУН первого типа

Синтаксис: Gxxx n1 n2 n3 n4 < GAIN>

Этот элемент задает ток между узлами n1 и n2, который линейно зависит от входного напряжения между узлами n3 и n4.

Пример использования ИТУН первого типа при-



веден на рис. 25. Генератор гармонического сигнала V1 формирует сигнал амплитудой 1 В с частотой 10 кГц. Последовательно с ИТУН G1 и G2, коэффициент передачи которых задан равным 10, включены резисторы сопротивлением 1 кОм. Как результат напряжение на резисторах R1 и R3 должно составить 10 кВ (произведение коэффициента усиления ИТУН, равного 10, и сопротивления резисторов 10³ Ом составляет 10⁴).



Рис. 25. Использование ИТУН первого типа для формирования требуемого тока

На рис. 26 приведены диаграммы напряжений на этих резисторах, которые соответствуют рассчитанным и измеренным значениям. А так как входы управления G1 и G2 имеют противоположную полярность, то и фазы напряжений на резисторах противоположны.



Рис. 26. Результат работы ИТУН первого типа при формировании переменного тока

ИТУН второго типа

Синтаксис: Gxxx n1 n2 n3 n4 table=(<два значения>, < два значения >, ...)

Таблица представляет собой набор пар чисел. Первое число обозначает напряжение управления, а второе – выходной ток при этом значении.

Когда напряжение управления находится между указанными точками, значение выходного тока линейно нтерполируется.

Если напряжение управления оказывается вне диапазона значений, указанных в таблице, выходной ток экстраполируется как постоянный ток последней пары чисел таблицы.

Пример формирования тока, изменяющегося по сложному закону, с помощью ИТУН второго типа приведен на рис. 27. Для контроля величины тока, формируемого ИТУН G1, используется резистор R1 сопротивлением 1 Ом. Командная строка имеет вид **table=0,0, 1,2, 2,0, 3,5**. Закон изменения тока при гармоническом сигнале управления амплитудой 4 В приведен на рис. 28,а.



Рис. 27. Использование ИТУН второго типа для формирования тока сложной формы

При частоте сигнала генератора V1, равной 10 Гц, форма сигнала соответствует заданным в таблице параметрам. Если напряжение входного сигнала равно 0, то и напряжение на резисторе R1 тоже равно 0. При напряжении входного сигнала 1 В амплитуда напряжения на резисторе составляет 2 В. При $U_{\rm BX}$ = 2 В напряжение $U_{\rm B1}$ опять равно 0, а при $U_{\rm BX}$ равном 3 В, составит 5 В. Напряжение 5 В сохраняется до тех пор, пока U_{вх} не уменьшится до 2 В. Но если увеличить частоту сигнала до 200 Гц, то ток не успевает измениться до 0 и провалы напряжения при входном напряжении 2 В будут меньшей глубины, чем должны быть. В то же время ток при входном напряжении 1 В не достигает заданного значения. Вместо U_{в1}= 2 В напряжение достигает значения только 1.4 В.

Это говорит скорее всего о неверном выборе шага интегрирования. По результатам, приведенным на рис. 28,6, можно сделать вывод о том, что скорость изменения тока на выходе такого источника не превышает 4.5 мА/мкс при значении Махітиит Timestep, равном 10⁻⁵ с. Т.е. аналогично ограничениям по скорости нарастания выходного напряжения ИНУН. Изменив значение Maximum Timestep до 10⁻⁷, с получим сигнал, аналогичный приведенному на рис. 28,а.

Как следует из этого эксперимента программа неверно определяет шаг интегрирования для слож-

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ





Рис. 28. Результат работы ИТУН второго типа при формировании тока сложной формы

ных сигналов и об этом не следует забывать.

ИТУН третьего типа

Синтаксис: Gxxx n1 n2 n3 n4 Laplace=<func(s)>

+ [window=<время>] [nfft=<число>] [mtol=<число>] Передаточная функция этого ИТУН определяет-

ся преобразованием Лапласа (аналогично ИНУН). Использование ИТУН третьего типа во многом

аналогично использованию ИНУН третьего типа. На рис. 29 приведена модель, реализующая звено ФНЧ



Рис. 29. Использование ИТУН третьего типа для реализации звена ФНЧ второго порядка



Рис. 30. АЧХ и ФЧХ (пунктирная линия) звена ФНЧ второго порядка, реализованного на ИТУН третьего типа

второго порядка на базе ИТУН, а на рис. 30 его АЧХ.

Источник напряжения, управляемый током (ИНУТ)

Пример источника напряжения, управляемого током (**Voltage depended current source)**, обозначенного в библиотеке как h, приведено на рис. 31.

Синтаксис: Hxxx n1 n2 <Vnam> <GAIN>

ИНУТ формирует напряжение между узлами n1 и n2, равное произведению значения тока через источник напряжения с именем <Vnam>, умноженного на коэффициент передачи GAIN.

Пример использования ИНУТ приведен на рис. 31. Ток, формируемый в цепи, содержащей V1 (генератор гармонического сигнала частотой 100 кГц с амплитудой 1 В) и резистор R1, равен 1 мА. Коэффициент усиления ИНУТ H1 задан равным 10³.



Рис. 31. Пример использования ИНУТ для построения гальванически развязанного усилителя

Генераторы испытательных сигналов для тестирования электронного оборудования дорожного транспорта

Генераторы представлены двумя моделями: 1. ISO 16750-2 – формирует один из тестовых сигналов в соответствии с требованиями стандарта





Рис. 32. Диаграммы напряжений на выходах V1 (синяя) и ИНУТ Н1

ISO 16750-2:2006 Транспорт дорожный. Условия окружающей среды и испытания электрического и электронного оборудования. Часть 2. Электрические нагрузки.

2. ISO 7637-2 – формирует один из тестовых сигналов в соответствии с требованиями стандарта ISO ISO 7637-2:2011 Транспорт дорожный. Электрические помехи, вызываемые проводимостью и взаимодействием. Часть 2. Нестационарная электропроводимость только по линиям электропитания.

Обозначения этих генераторов приведены на рис. 33, а формируемые ими сигналы – на рис. 34 и 35.



Рис. 33. Условные обозначения генераторов испытательных сигналов ISO 16750-2 и ISO 7637-2



Рис. 34. Импульс, формируемый генератором сигналов ISO 16750-2



Рис. 35. Импульс, формируемый генератором сигналов ISO ISO 7637-2

С другими источниками сигналов и примерами их применения мы познакомися в третьей части статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Володин В. Я. LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.: ил.

2. Сохор Ю.Н. Моделирование устройств в LT-Spice. Учебно-методическое пособие. Псковск. гос. политехн. ин-т. – Псков: Издательство ППИ, 2008. – 165 с.

3. http://www.zen22142.zen.co.uk/Circuits/Timing/1hr_timer.htm

4. http://www.amarketplaceofideas.com/addingseries-4000-cmos-library-to-ltspice.htm

