ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ LTSPICE OT LINEAR TECHNOLOGY, ЧАСТЬ 1

В статье кратко рассмотрены основные возможности программы моделирования LTspice XVII. Программа в основном ориентирована на анализ аналоговых и импульсных устройств. Наиболее широко в базе компонентов LTspice представлены ИМС компании Linear Technology. Возможность пополнения библиотек компонентов продукцией различных производителей значительно расширяет возможности программы. В статье рассмотрен пример моделирования несложного устройства с использованием LTspice.

ЭКиС

В. Макаренко

THE SOFTWARE FOR MODELING ELECTRONIC CIRCUITS LTSPICE FROM LINEAR TECHNOLOGY, PART 1

Abstract - The article briefly describes the main features of the simulation program LTspice XVII. The program is mainly focused on the analysis of analog and pulse devices. ICs by Linear Technology have been most widely submitted in the LTspice component basis. The possibility of replenishment of the libraries of components with products from different vendors greatly enhances the program. The article presents an example of modeling a simple device using LTspice.

V. Makarenko

Разработка любого радиоэлектронного устройства сопровождается физическим или математическим моделированием. Физическое моделирование связано с большими материальными затратами, поскольку требуется изготавливать макет и проводить достаточно трудоемкие исследования. Зачастую физическое моделирование невозможно. Эти факторы приводят к необходимости применения при проектировании программ математического моделирования, которые не только позволяют снизить сроки и стоимость разработки, но и предоставляют разработчику целый ряд инструментов анализа, которые либо недоступны при физическом моделировании, либо их стоимость чрезвычайно высока.

На сегодняшний день разработчики используют множество программ схемотехнического моделирования: Micro-Cap, Alpak, Orcad, Altium Designer, Multisim, TINA-TI, LTspice и многие другие.

Некоторые из этих программ являются универсальными и позволяют моделировать как аналоговые, так и цифровые устройства на основе элементной базы различных производителей. Примером такой программы является NI Multisim от National Instruments. Есть специализированные программы для моделирования аналоговых схем. Например, TINA-TI от Texas Instruments. Есть программы, ориентированные на продукцию одного производителя. У каждой из этих программ есть свои достоинства и недостатки, но все они используют spice-модели электронных компонентов. Универсальные программы хороши тем, что позволяют работать с элементной базой многих производителей, и в них предусмотрена возможность как создания собственных моделей элементов, так и пополнения базы элементов моделями различных производителей. Кроме того, тот же NI Multisim позволяет разрабатывать печатные платы в автоматическом и ручном режимах на основе действующей модели.

Однако они имеют и один существенный недостаток. Пополнение базы данных компонентов осуществляется разработчиком только при выпуске новой версии программы, а пополнение базы компонентов новыми моделями от разных производителей требует высокой квалификации пользователя и зачастую даже требует переработки модели под используемую программу моделирования.

Программы, которые ориентированы в основном на продукцию одного производителя, как правило и разрабатываются этим производителем. Несомненным их достоинством является наличие в базе программы новейших элементов, разработанных компанией, и большое число примеров с их применением. Хотя, они тоже позволяют расширять базу компонентов за счет подключения моделей от других производителей.

Именно к такой категории программ и относится программа LTspice, распространяемая бесплатно компанией Linear Technologies [1]. Доступны для скачивания версии программы как для Windows различных версий, так и для Mac OS X 10.7+ [2].



Рассмотрим кратко интерфейс и основные возможности программы. Более подробную информацию о работе с программой LTspice можно найти в [3].

Интерфейс программы можно назвать аскетичным. В верхней части экрана располагается меню и строка с пиктограммами, некоторые из которых расшифрованы на рис. 1.

Конечно, все операции и размещение элементов можно выполнить и через меню. Это наглядно демонстрирует рис. 2, на котором представлены развернутыми основные пункты меню.

Быстрый доступ ко многим функциям меню

обеспечивают "горячие клавиши":

• F2 – вызывает диалоговое окно выбор элементов (Select Component Symbol)

• F3 – рисование проводника (Draw Wire)

• F4 – поместить имя (Label Net)

• F5 – удалить один либо группу схемных элементов

 F6 – копировать один либо группу схемных элементов

• F7 – переместить один либо группу схемных элементов

• F8 – перетащить один, либо группу схемных элементов



Рис. 1. Интерфейс программы LTspice

ITspice XVII - [Draft1]

Edit Hierarchy View File Simulate Tools E Zoom Area 🔆 <u>R</u>un 🔿 Undo F9 D- Open this Sheet's Symbol Ctrl+Z to Copy bitmap to Clipboa Q Zoom Back - Create a <u>N</u>ew Symbol Ctrl+B Write image to .emf file Redo Shift+F9 Pause Ctrl+P 🂐 Zoom to <u>F</u>it Halt K Create a New Sheet Control Panel Ctrl+H A a Text 'T' 🔍 Pan Clear Waveform '0' 🐑 Color Preferences .00 SPICE Directive'S Efficiency Calculation 0 Sync Release SPICE Analysis Г Show Grid Ctrl+G Control Panel Export Netlist Mark Unconn. Pins 'U Resistor 'R Edit Simulation Cmd Mark Anchors 'A Capacitor 'C' 3 Inductor ų, Bill of Materials Efficiency Report 🛨 Diode 'D' SPICE Netlist D- Component F2 E SPICE Error Log Rotate Ctrl+R 🔆 Visible Traces Mirror Ctrl+E Ē C Autorange Y-axis 0 Draw Wire F3 Marching Waves Label Net Set Probe Reference F4 Place <u>G</u>ND 'G' ✓ Toolbar - Place BUS tap ✓ Status Bar A Delete Vindow Tabs F5 Duplicate F6 Move Move E7 🕐 Drag E8 Paste Ctrl+V Draw

Рис. 2. Основные пункты меню программы LTspice

• F9 – вернуться к предыдущему состоянию,

ЭКиС

Shift + F9 – вернуться к последующему состоянию.

Перетаскивание, в отличие от перемещения, позволяет перемещать компоненты на рабочем поле без разрыва электрических связей. Таким образом, например, можно проводить линии под углом, отличным от прямого.

Вращать компонент можно комбинацией клавиш Ctrl+R или кнопками на панели инструментов, предназначенными для вращения и зеркального отображения выбранного компонента. Но для этого необходимо первоначально выделить компонент предварительно нажав кнопку Переместить (Move). Значок Общий провод, к сожалению, повернуть невозможно.

При нажатии на кнопку Панель управления (Control Panel) открывается окно с настройками программы, имеющее 10 вкладок. На рис. 3 показаны в развернутом виде все эти вкладки.

С помощью панели управления можно изменить точность измерения тока и напряжения, метод интегрирования, цветовую схему программы, шрифт по умолчанию, указать путь для поиска файлов и библиотек элементов, размер иконок меню, объем используемой оперативной памяти и многое другое. Параметры, установленные по умолчанию, позволяют осуществлять моделирование в большинстве случаев.

Полный перечень "горячих клавиш" можно просмотреть на вкладке **Waveforms Панели управле**ния нажав кнопку **Hot Keys**. В той же вкладке редактируется и цветовая схема. Для получения более контрастного изображения полученных графиков была произведена коррекция цвета фона – черный цвет заменен на белый, а цвет надписей на осях сделан черным.

Программа позволяет изменить горячие клавиши. Программирование горячих клавиш осуществляется на вкладке **Control Panel/Drafting Options/Hot Keys**. Для изменения горячих клавиш, установленных по умолчанию, необходимо щелкнуть "мышью" по надписи команды (например, Place Component) и затем нажать ключевую комбинацию клавиш, которой надо закодировать эту команду. Чтобы удалить ключевую комбинацию, надо после щелчка "мышью" по команде нажать "**Delete**". Чтобы вернуться к установкам горячих клавиш по умолчанию, нужно нажать кнопку **Reset to Default Values** в том же окне.

Познакомимся с составом библиотек, устанав-



Рис. З. Все вкладки панели управления

ливаемых с программой по умолчанию. При нажатии на кнопку **Компонент** (Component) открывается окно выбора типа элементов (рис. 4).

Comparators (компараторы)





Рис. 4. Окно выбора группы компонентов

- Digital (цифровые схемы)
- FilterProducts (ИМС для построения фильтров)
- Міsc (набор различных компонентов)
- · Opamps (операционные усилители
- Optos (оптопары)

 PowerProducts (компоненты для построения источников питания и преобразователей)

• References (источники опорных напряжений)

 SpecialFunctions (ИМС специальных функций – супервизоры, мониторы питания, различные контроллеры управления, цифро-аналоговые преобразователи и многое другое).

Что касается библиотеки **Цифровые схемы** (Digital), то в ее составе всего 15 виртуальных компонентов – несколько логических элементов, триггер Шмитта, триггеры D-, RS- и Т-типа. Из этого следует, что программа ориентирована на анализ работы аналоговых схем.

Кроме компонентов, собранных в группы, имеется большое число отдельных компонентов, как пассивных, так и активных.

Рассмотрим немного более подробно состав библиотек. В группе компараторы, ИМС для построения фильтров, компонентов для построения источников питания, ИМС специальных функций присутствуют только компоненты Linear Technologies (кроме двух ИМС в группе источников питания). А операционные усилители представлены в основном продукцией компании Analog Devices и Linear Technologies.

На рис. 5 показан состав группы элементов **Ком**параторы.

Для расширения состава библиотек можно воспользоваться рекомендациями, приведенными в [4]. Рекомендации снабжены примерами пополнения библиотек новыми элементами.



Рис. 5. Состав библиотеки Компараторы

Зная состав библиотек, можно приступить к созданию простейшей модели для иллюстрации процесса создания и испытаний готовых моделей. Рассмотрим процесс создания модели усилителя с заданными параметрами.

Пусть требуется создать усилитель с полосой пропускания от 0 до 5 МГц с коэффициентом усиления 30. Чтобы приступить к процессу создания модели, необходимо выбрать ОУ, удовлетворяющий заданным параметрам. Учитывая, что для усилителей с одним полюсом передаточной характеристики справедливо соотношение $f_1 = f_{\rm B}K_u$, где f_1 – частота единичного усиления, $f_{\rm B}$ – верхняя частота полосы пропускания, K_u – коэффициент усиления каскада по напряжению.

Для заданных условий частота единичного усиления ОУ должна составлять не менее 150 МГц при реализации усилителя с помощью одного каскада. На сайте Analog Devices можно быстро выбрать необходимый усилитель с помощью параметрического поиска. Например, ОУ AD4896 имеет полосу пропускания 230 МГц. Напряжение питания усилителя от ±1.5 до ±5 В. Такой ОУ имеется в составе библиотеки Ltspice.

Приступим к созданию модели. На схеме обязательно должен присутствовать компонент "**Общий провод**", т. е. схемы, на которых данный компонент будет отсутствовать, неработоспособны. Поэтому его располагают в первую очередь. Для размещения на листе ОУ достаточно выбрать требуемую модель в соответствующей библиотеке и нажать кнопку ОК (рис. 6).

По умолчанию, как и во многих аналогичных программах, предусмотрено многократное размещение выбранного элемента на рабочем листе схемы.





Рис. 6. Выбор типа используемого ОУ

Для прекращения повторной установки компоненты достаточно нажать клавишу **Esc** или нажать правую кнопку "мыши".

Источники напряжения в библиотеке LTspice обозначаются как **Voltage** (рис. 7). Это универсальные источники, которые можно использовать как источник питания постоянного или переменного тока, генератор синусоидальных, импульсных, экспоненциальных и других сигналов.

Расположив необходимые элементы на рабочем листе, можно приступить к их соединению. Нажав на кнопку с изображением карандаша или функциональную клавишу F3, соединим элементы, предварительно повернув резисторы горизонтально (рис. 8).

После завершения компоновки схемы и соединения ее компонентов необходимо задать параметры всех компонентов. Начнем с источников питания V1 и V2. Для задания требуемых значений необходимо раз-



Рис. 7. Выбор компонента Источник питания (Voltage)



Рис. 8. Предварительная схема инвертирующего усилителя

местить курсор на генераторе и нажать правую кнопку "мыши". В открывшемся окне (рис. 9) задать значение напряжения в Вольтах и внутреннее сопротивление источника в Омах.

Voltage Source - V1	
DC unit on D dt	ОК
DC value[v]:	Cancel
	Advanced

Рис. 9. Окно настройки параметров источника питания

Для задания параметров генератора входных сигналов необходимо проделать аналогичную процедуру, а в открывшемся окне (рис. 10) нажать кнопку **Advanced**. Во вновь открывшемся окне задаем требуемые параметры.

Задаем форму сигнала Sine, амплитуду 0.01 В, а фазу и задержку задаем равными 0. Чтобы на рабочем листе не загромождать схему надписями, снимаем птички в окошках **Make this information visible on schematic**.

Для задания параметров резисторов осуществляем аналогичную процедуру (рис. 11). Параметры резистора можно вписать вручную, либо предварительно нажав кнопку **Select Resistor**, выбрать требуемый номинал из выпадающего списка.

Схема с установленными параметрами компонентов приобретает вид, показанный на рис. 12.

После завершения редактирования схемы можно приступить к анализу ее работы. После нажатия кнопки Run открывается окно выбора типа анализа (рис. 13):

• анализ переходных процессов (Transient)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ



Рис. 10. Окно настройки параметров генератора сигналов до установки (а) и после установки (б) параметров сигнала

7 Resistor - R3	>
Manufacturer: Part Number: Select Resistor	OK Cancel
Resistor Properties	HOM
Registancell II.	TUK
ricalatarioc[sz].	
Tolerance[%]:	1

Рис. 11. Окно установки параметров резисторов

- анализ по переменному току (AC Analysis)
- анализ по постоянному току (DC Analysis)
- анализ шумовых параметров (Noise)

• анализ передаточной функции по постоянному току (DC Transfer)

 режим работы по постоянному току или рабочая точка (DC op pnt).

Для анализа частотной характеристики усилителя выберем режим AC Analysis. После выбора вкладки AC Analysis необходимо задать параметры анализа:



ЭКиС

Рис. 12. Схема усилителя с установленными параметрами компонентов

Fransient	AC Analysis	DC sweep	Noise	DC Transfer	DC op pnt	
Compute	the sm <mark>all s</mark> igna	I AC behavio	r of the c point.	ircuit linearized	about its DC ope	rating
		Type of	sweep:	Decade	~	
	Number	of points per	decade:	100		
		Start fre	quency:	10		
		Stop fre	quency:	1000000	00	
ntax: .ac	c <oct. dec.="" lin:<="" td=""><td>> <npoints> ·</npoints></td><td><startfre< td=""><td>a> <endfrea></endfrea></td><td></td><td></td></startfre<></td></oct.>	> <npoints> ·</npoints>	<startfre< td=""><td>a> <endfrea></endfrea></td><td></td><td></td></startfre<>	a> <endfrea></endfrea>		

Рис. 13. Окно выбора типа анализа

• Туре of sweep (масштаб по горизонтальной оси)

- Octave (логарифмический в октавах)
- Decade (логарифмический в декадах)
- Linear (линейный)
- ♦ List.

Для анализа был выбран логарифмический масштаб. Количество точек на декаду задано равным 100, начальная частота 10 Гц, конечная частота анализа 100 МГц.

Чтобы провести анализ, необходимо задать номер точки (ноды), соответствующей выходу усилителя. Для ее определения необходимо подвести курсор к точке на схеме и нажать правую кнопку "мыши" и в выпадающем меню выбрать **Mark Reference** (Реперная точка). На рис. 14 показано размещение реперной точки на выходе усилителя.

После выбора нужной точки можно запустить выполнение анализа **Run**. В верхней части экрана от-





Рис. 14. Установка реперной точки для анализа

кроется окно с результатами анализа (рис. 15). По умолчанию масштаб по вертикальной оси устанавливается автоматически, но при необходимости его можно легко изменить. Для этого достаточно подвести курсор к вертикальной оси и, когда на нем появится желтая линейка, выделить курсором нужную область графика. Масштаб графика будет увеличен. Вернуться к первоначальному масштабу позволяет кнопка, обозначенная как перечеркнутая лупа (Zoom full extents). Анализ полученной АЧХ показывает, что АЧХ смоделированного усилителя линейна в диапазоне до 6 МГц. Уровень сигнала на выходе равный -10 дБ объясняется тем, что при всех видах анализа сигналы нормируются по отношению к уровню 1 В, который принят за 0 дБ.



Рис. 15. Результаты анализа частотной характеристики усилителя

Если в процессе анализа возникнет необходимость построить АЧХ в другой точке схемы, то достаточно подвести курсор к нужной точке схемы и после появления значка **Mark Reference** нажать левую кнопку "мыши". На графике АЧХ будет добавлена новая кривая другого цвета, а в верхней части графика будут выведены номера точек и соответствующий им цвет графика (рис. 16).



Рис. 16. Результаты анализа частотной характеристики усилителя в двух точках схемы

На рис. 16 зеленым цветом обозначены АЧХ усилителя (сплошная линия), ФЧХ усилителя (пунктирная линия), а синим цветом – АЧХ генератора входного сигнала. Вверху, над графиком АЧХ, отображены номера соответствующих точек – n0002 и n0004. Буква V перед номером точки обозначает, что измеряется АЧХ по напряжению. При необходимости можно в Контрольной панели на вкладке Save Defaults задать измерение параметров по току.

При необходимости изменить параметры анализа или выбрать другой вид анализа, необходимо в меню **Simulate** выбрать пункт **Edit Simulation Tool** и открывшемся окне задать необходимые параметры.

Для того, чтобы увидеть форму сигнала, необходимо выбрать режим анализа переходных процессов (рис. 17). Результат проведенного анализа приведен на рис. 18.

Для анализа импульсной переходной характеристики необходимо подать на вход импульсный сиг-

Transient	AC Analysis	DC sweep	Noise	DC Transfer	DC op pnt
	Perf	orm a non-lin	ear, time	-domain <mark>s</mark> imulat	ion.
				Stop time:	0.01s
		Time	e to start	saving data:	0
			Maximu	ım Timestep:	
	Start e	external DC s	upply vo	tages at OV: 🛛	
	Stop sin	ulating if stea	ady state	is detected:	
	Don't reset T	=0 when ste	ady state	is detected:	
		Step the	load cu	ment source:	
	1	Skip initial op	erating p	oint solution:	
yntax: .tra	an <tprint> <t< td=""><td>stop> [<tstar< td=""><td>t> (<tma< td=""><td>ixstep>]] [<optio< td=""><td>on> [<option>]]</option></td></optio<></td></tma<></td></tstar<></td></t<></tprint>	stop> [<tstar< td=""><td>t> (<tma< td=""><td>ixstep>]] [<optio< td=""><td>on> [<option>]]</option></td></optio<></td></tma<></td></tstar<>	t> (<tma< td=""><td>ixstep>]] [<optio< td=""><td>on> [<option>]]</option></td></optio<></td></tma<>	ixstep>]] [<optio< td=""><td>on> [<option>]]</option></td></optio<>	on> [<option>]]</option>

Рис. 17. Окно настройки параметров анализа переходных процессов





Рис. 18. Результаты анализа переходных процессов при гармоническом сигнале на входе усилителя

нал и задать значение времени анализа (Stop Time на рис. 17) равным 0.01 мс. Результаты анализа импульсной переходной характеристики усилителя приведены на рис. 19.



Рис. 19. Результаты анализа переходных процессов при импульсном сигнале на входе усилителя

Для анализа спектра выходного сигнала необходимо, находясь в окне с графиком входного и выходного сигналов, нажать правую кнопку "мыши" и в выпадающем меню выбрать пункт **View/FFT** (рис. 20). При анализе дополнительно необходимо задать число точек усреднения (по умолчанию 262144). Напомним, что результаты анализа нормируются к уровню сигнала 1 В. Результаты спектрального анализа приведенв на рис. 21.

Для настройки параметров анализа передаточной функции по постоянному току выбираем вкладку DC Transfer (в меню Simulate/Edit Simulation Tool). На этой вкладке есть два окна. В верхнем окне Output (Выход) необходимо указать выходную точку



Рис. 20. Выбор пункта меню анализ спектра сигнала с помощью БПФ (FFT)



Рис. 21. Результаты анализа спектра сигнала с помощью БПФ (FFT)

схемы, или, если выходное напряжение снимается между двумя узлами схемы, две точки, записанные через запятую. Для рассматриваемого примера это напряжение между выходом (точка n002) и входом (точка n004) усилителя. Синтаксис записи V(n002,n004). В нижнем окне **Source** (Источник) необходимо указать источник входного напряжения V3. На рис. 22 показано окно настройки параметров анализа переходной функции по постоянному току. Результаты анализа показаны на рис. 23.

Из рис. 23 следует, что коэффициент усиления схемы равен 29.99, входное сопротивление равно 9.1 МОм, а выходное сопротивление – 0.002 Ом.

Для настройки анализа по постоянному току при вариации параметров выбираем вкладку **DC sweep**. На этой вкладке имеется три аналогичные вкладки: **1st Source** (Первый источник), **2nd Source** (Второй источник) и **3rd Source** (Третий источник), – необходимые для настройки трех возможных источников сигнала. Так как схема в рассматриваемом при-





fransient	AC Analysis	DC sweep	Noise	DC Transfer	DC op pnt	
	Đ	nd the DC sm	all-sional	transfer function	on.	
		Outpu	t: V(n0	02,n004)		
		Source	e:	V3		
ntax: .tf \	/(<out>[,<ref>]</ref></out>	<src></src>				
V(n002,n	1004) V3					
	C-	and the second		0	V	

Рис. 22. Окно настройки параметров анализа передаточной функции по постоянному току

Transfer Function	-1 2		
Transfer_function: v3#Input impedance:	29.9997 9.1059e+006	transfer impedance	
output_impedance_at_V(n002,n0	04):	0.00192119	impedance

Рис. 23. Результаты анализа передаточной функции по постоянному току

мере имеет один вход, то достаточно заполнить первую вкладку для анализа по постоянноому току.

В окне Name of 1st Source to Sweep (Название источника сигнала), необходимо указать имя V3. Ниже, в окне Type of Sweep (Тип развертки), необходимо выбрать масштаб передаточной функции по горизонтальной оси. Для такого анализа наиболее удобен линейный масштаб (Linear). В окне Start Value, указываем начальное напряжение на входе усилителя, в окне Stop Value конечное напряжение на его входе, а в окне Increment – шаг приращения напряжения источника V3. Источник переменного напряжения следует заменить на источник постоянного тока (достаточно изменить свойства генератора V3 как указывалось выше).

Окно с заданными параметрами анализа по постоянному току показано на рис. 24.

После нажатия кнопки **Run** выводится пустое окно с результатами анализа. Чтобы построить график результата анализа, необходимо подвести курсор к выходу усилителя и, после появления вместо него значка **Mark Reference**, коснуться им выходного провода усилителя. Результат проведенного анализа показан на рис. 25.

Из графика следует, что амплитудная характеристика усилителя линейна в диапазоне выходных напряжений от -5 до +5 В, но на выходе усилителя имеется небольшое напряжение смещения. Если использовать генератор переменного напряжения, то, как оказалось, результат будет получен аналогичный.

ransient	AC Analysis	DC sweep	Noise	DC Tran	nsfer	DC op pnt	
Compute trea	the DC operati ting capacitan	ng point of a ces as open	circuit w	/hile stepp and induct	ing in tance	dependent sou s as short circu	rces an its.
	1st Source	e 2nd Sou	irce 3rd	d Source			
	Nam	e of 1st sour	ce to sw	eep:	٧	3	
		Type of sweep:				ear 🗸	
		Start value:			-20	Om	
		Stop value:				Om	
			Incren	nent:	10)m	
ntax: .do	: [<oct,dec,lin></oct,dec,lin>] <source 1=""/>	<start></start>	<stop> [<</stop>	Incr>]	[<source2>]</source2>	

Рис. 24. Окно настройки параметров анализа передаточной функции по постоянному току



Рис. 25. Результаты анализа DC Sweep по постоянному току

Для анализа собственного шума усилителя выбираем вкладку **Noise** (в меню **Simulate/Edit Simulation Tool**). В окне **Output** (Выход) вводим номер выходной точки схемы. Если выходное напряжение прикладывается между двумя узлами схемы, то в окне, через запятую, нужно указать номера этих точек. Для рассматриваемого примера запись будет иметь вид **V(n002)**.

В окне **Input** (Вход) необходимо указать имя источника, подключенного ко входу схемы. В окне **Type of Sweep** (Тип развертки) выбирается масштаб по горизонтальной оси (аналогично ранее рассмотренным примерам). Если требуется определить шумовые характеристики для одной или нескольких частот, то можно выбрать распределение частот **LIST** (Список).

Название следующего ниже окна зависит от выбранного масштаба. Если выбран масштаб Octave (Октава), то окно называется Number of points per octave (Число точек на октаву) и позволяет выбрать



количество точек частотной характеристики в пределах одной октавы. В случае выбора масштаба **Decade** – задается число точек на декаду. В поле **Start Frequency** (Начальная частота) указывается нижняя, а в окне **Stop Frequency** (Конечная частота) – верхняя частота исследуемого частотного диапазона. Окно с установленными для анализа параметрами приведено на рис. 26.

Transient	AC Analysis	DC sweep	Noise	DC Transfer	DC op pnt	
Perform	n a stochastic n	oise analysis	of the ci point.	rcuit linearized	about its DC operating	3
		c	Output:	V(n002)		
			Input:	V3		
	Type of sweep:				~	
	Number of points per decade:			100		
	Start Frequency:					
		Stop Frequ	Jency:	1000000		
Syntax: .n	oise V(<out>[,<</out>	ref>]) <src> <</src>	oct, dec	, lin> <npoints></npoints>	<startfreq> <endfre< td=""><td>q></td></endfre<></startfreq>	q>

Рис. 26. Окно настройки параметров анализа шума усилителя

Одновременно с заполнением информационных полей в нижнем поле **Syntax** (Синтакс) формируется строка директивы **.noise V(n002) V3 dec 100 10 1000000**. Заполнив все поля, нажимаем кнопку **OK**.

На листе схемы появляется директива. После нажатия кнопки **Run** необходимо опять подвести курсор к выходу усилителя и, после появления вместо него значка **Mark Reference**, коснуться им выходного провода усилителя.

Спектральная плотность шума на выходе усилителя, полученная в результате анализа, приведена на рис. 27.



Рис. 27. Результаты анализа шума на выходе усилителя

В окне плоттера можно построить график спектральной плотности шума, приведенного ко входу усилителя. Для этого достаточно в окне, где выведен график, нажать правую кнопку "мыши" и в выпадающм меню выбрать **View/Visble Traces**, а в открывшемся после этого окне (рис. 28) выбрать источник шума **V(inoise)**.

	Only list traces ma	olons	OK ancel
elect Waveforms Ctrl-Click to toggle	to Plot: Alt-Double-Click to ent	er an expression	
V(inoise)	V(d:u1:inp.fid)	V(d:u1:nin.fid)	V(d
V(onoise)	V(d:u1:inp.rs)	V(d:u1:nin.rs)	V(d
V(r1)	V(d:u1:inp.sid)	V(d:u1:nin.sid)	V(d
V(r2)	V(d:u1:ioutn)	V(d:u1:nin1)	V(d
V(r3)	V(d:u1:ioutn.fid)	V(d:u1:nin1.fid)	V(d
V(v1)	V(d:u1:ioutn.rs)	V(d:u1:nin1.rs)	V(d
V(v2)	V(d:u1:ioutn.sid)	V(d:u1:nin1.sid)	V(d
V(d:u1:inn)	V(d:u1:ioutp)	V(d:u1:nip)	V(d
V(d:u1:inn.fid)	V(d:u1:ioutp.fid)	V(d:u1:nip.fid)	V(d
V(d:u1:inn.rs)	V(d:u1:ioutp.rs)	V(d:u1:nip.rs)	V(d
V(d:u1:inn.sid)	V(d:u1:ioutp.sid)	V(d:u1:nip.sid)	V(d
V(d:u1:inp)	V(d:u1:nin)	V(d:u1:nip1)	V(d

Рис. 28. Окно выбора источника шума для анализа

Спектральная плотность шума, приведенного ко входу усилителя, приведена на рис. 29.



Рис. 29. Результаты анализа шума, приведенного ко входу усилителя

На примере усилителя были рассмотрены различные виды анализа, доступные для рассматриваемой в примере модели.

Создание новых компонентов в LTspice

Прежде чем рассматривать более сложные примеры, рассмотрим, как можно создать несложные компоненты в программе LTspice.

Создание нового символа начинается командой меню File/New Symbol. Символ создается из набора



линий, прямоугольников, кругов и дуг, а также текста. Эти объекты никак не влияют на схему. Точки привязки этих объектов отмечаются маленькими красными кругами. Точки привязки нужны для удобства перемещения объектов. Их можно включить/выключить командой View/Mark Object Anchors.

Следует учесть, что перемещение линий и других объектов на рабочем листе редактора производится по более мелкой сетке, относительно той, которая видна на экране. С помощью точек привязки можно точно установить выводы компонента в узлах видимой сетки.

Проще начинать создание нового элемента путем редактирования, имеющегося в базе. Продемонстрируем это на примере создания резистора, соответствующего по обозначению международному стандарту ІЕС 60617. Для этого открываем окно редактирования символов File/New Symbol и загружаем из библиотеки LTspice изображение резистора. Библиотека элементов располагается по адресу C:\Users\Name\Documents\LTspice\lib\sym, гле Name – имя пользователя. Путь к библиотеке символов можно увидеть в верхней части окна Select Component Symbol (рис. 4). Имя файла с изображением резистора res.asy. Расширение .asy применяется ко всем изображениям компонентов. Окно редактирования символа с помещенным в нем резистором показано на рис. 30.



Рис. 30. Окно редактирования символа программы LTspice

Для сохранения совместимости со стандартным символом библиотеки LTspice сохраним точки привязки (обозначены прямоугольниками на рис. 30), а удалим только линии самого резистора. После чего в меню **Draw** выбираем пункт **Rect** (прямоугольник) и рисуем на свободном от старых линий резистора прямоугольник и соединяем его с точками привязки, как показано на рис. 31.

В случае неудачного редактирования восстановить первоначальную версию обозначения элемента достаточно просто. Копии библиотек находятся в папке c:\Program Files\LTC\LTspiceXVII\lib\sym\.

Проверим как выглядит схема усилителя с отре-



Рис. 31. Отредактированное обозначение резистора

дактированным изображением резистора (рис. 32). Как следует из рисунка, сохранилась полная преемственность между старым и новым изображением резистора. Аналогично можно отредактировать или создать новые компоненты.



Рис. 30. Окно редактирования символа программы LTspice

Полная информация о создании и редактировании новых элементов или модификации существующих приведена в [4].

Особенности источников токов, напряжений, модулированных сигналов, трансформаторов и других базовых компонентов, описание работы с графиками, методами измерения различных величин и приемами анализа различных устройств будут рассмотрены в последующих публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

1.http://ltspice.linear-tech.com/software/LTspiceXVII.exe.

2.http://www.linear.com/designtools/software/#LT PowerPlay.

3.LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 400 с.: ил.

4.В. Володин Пополнение библиотеки схемных элементов симулятора LTspice. Создание модели ШИМ_контроллера TL494 / Компоненты и техноло-гии №4, 2009. – с. 127-138. (http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2009_04_127.pdf).