ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ LTSPICE, часть 4

Вичетвертой части статьи рассмотрены основные приемы при измерении параметров тока, напряжения и мощности постоянного и переменного токов при моделировании в LTspice. Показано как измерять коэффициент полезного действия устройств различными способами и проводить оценку нелинейных искажений усилителей и генераторов сигналов.

ЭКиС

В. Макаренко

Для иллюстрации процесса измерения тока, напряжения и мощности воспользуемся моделью, приведенной на рис. 1.



Рис. 1. Модель для иллюстрации процессов измерения тока, напряжения и мощности

Рассмотрим этот процесс на примере резистора R2. Для измерения напряжения, тока и мощности используются различные инструменты. На рис. 2,а показан вид пробника для измерения напряжения. Для измерения тока необходимо подвести курсор к выводу элемента или разместить его на изображении элемента. Вид пробника (токовые клещи) для измерения тока показан на рис. 2,6. Для измерения мощности необходимо поместить курсор на изображение элемента и нажать клавишу Alt. Пробник приобретает вид градусника (рис. 2,в).



Рис. 2. Пробники для измерения напряжения (а), тока (б) и мощности (в)

THE SOFTWARE FOR MODELING ELECTRONIC CIRCUITS LTSPICE, part 4

Abstract - The fourth part of the article describes the basic techniques for measuring the parameters of current, voltage and power of direct and alternating currents in the simulation in LTspice. It is shown how to measure the efficiency of devices in various ways and to evaluate the nonlinear distortion of amplifiers and signal generators.

V. Makarenko

После выполнения моделирования в окне вывода результатов появятся графики напряжения, тока и мощности (рис. 3) и соответствующие им оси.



Рис. З. Графики напряжения (зеленый), тока (синий) и мощности

Можно отсчитать значения измеренных параметров по осям, а для точного получения значения необходимо подвести курсор к надписи соответствующего параметра и, удерживая нажатой клавишу Ctrl, нажать на левую кнопку "мыши". На экран будет выведено окно (рис. 4), в котором выводится информация об интервале времени, на котором измеряется напряжение, среднее значение напряжения (**Average**) и среднеквадратическое значение (**RMS**). Аналогично выполняются измерения значений и других параметров. Следует помнить, что такие результаты можно получить только по окончании процесса моделирования.

Для измерения параметров переменного тока использована аналогичная модель (рис. 5), но в качестве источника испытательного сигнала исполь-

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

a)

б)



Waveform: V(n00)	2) ×
Interval Start:	Ûs
Interval End:	66ms
Average:	16.667V
RMS:	16.667V





Рис. 5. Модель для иллюстрации процессов измерения переменного тока, напряжения и мощности

зован генератор гармонического сигнала амплитудой 30 В и частотой 1 кГц.

Результаты измерений мгновенных значений тока, напряжения и мощности приведены на рис. 6.





Для измерения мощности переменного тока необходимо, удерживая нажатой кнопку Ctrl, нажать указателем "мышки" на надпись V(NOO2)*I(R2) в верхней части панели отображения результатов моделирования (Plot Pane). В зависимости от выбранного интервала времени, на котором производится измерение, полученные результаты различаются. При измерении на интервале 0...10 мс среднее значение мощности (рис.7,а) немного больше, чем при измерении на интервале 0...1 с (рис. 7,б). Это объясняется наличием переходного процесса первые 5 мс после начала симуляции.

Interval Start:	Ûs
Interval End:	11ms
Average:	296.06mW
Integral:	3.2567mJ
Waveform: V(N0	03)*I(R2) >
Waveform: V(N0	03)*I(R2) >
♥ Waveform: V(N0 Interval Start: □	03)*1(R2) > Os
₩ Waveform: V(N0 Interval Start: Interval End:	03)*1(R2) > 0s 1000ms
Waveform: V(N0 Interval Start: Interval End: Average:	03)*1(R2) > 0s 1000ms [228.17mW

Рис. 7. Значения средней мощности и рассеянной на резисторе R2 энергии на интервале времени 0...10 мс (а) и 0...1 с (б)

Чтобы измерить мощность на незаземленной нагрузке, необходимо добавить в схему точки с обеих сторон элемента, на котором необходимо измерить мощность. На рис. 8 это точки А и В. Для вычисления мощности необходимо в окне графиков полученных результатов поместить курсор на название соответствующего параметра (например, тока через резистор R1) и, удерживая нажатой клавишу Alt, нажать на правую кнопку "мыши". В открывшемся окне **Expression Editor** (рис. 9) необходимо ввести выражение для вычисления мощности.



Рис. 8. Модифицированная схема для измерения мощности, рассеиваемой на резисторе R1

🕑 Expression Editor				×
Default Color:	Att	ached Cursor:	(none) 🗸	ОК
Enter an algebraic expression	to plot:			Cancel
I(R1)*V(a,b)				A.
	Delete t	his Trace		





Для вычисления средней мощности достаточно записать **I(R1)*V(a,b)**, где V(a,b) – напряжение между точками A и B. После этого, поместив курсор на название тока через резистор R1, и, удерживая нажатой клавишу Ctrl, нажать на левую кнопку "мыши". Результат вычислений будет выведен в окно **Waveform: I(R1)*V(a,b)** (рис. 10). Как следует из полученного результата, на резисторе R1 рассеивается в два раза меньшая мощность, чем на резисторе R2, что соответствует действительности.

	(0,0)
Interval Start:	Os
Interval End:	1000ms
Average:	114.08mW
Integral:	114.08mJ

Рис. 10. Результаты вычисления средней мощности, рассеиваемой на резисторе R1

Для измерения на заданном интервале времени или в заданном диапазоне измеряемых величин удобно использовать либо один, либо два курсора. Чтобы включить курсоры, необходимо для измеряемого параметра в окне **Expression Editor** (рис. 9) в окошке **Attached Cursor** выбрать первый, второй или оба курсора (рис. 11). В рассматриваемом примере курсоры будут отображать значения тока через источник V1.

Defect Color	Attached Comm	14824	- OK
Deradic Color.	Attached Corsor.	151 @ 210	UK
nter an algebraic expression to plo	t:	(none) 1st	Cancel
I(V1)		2nd	×
107 999 b. 91		1st & 2nd	

Рис. 11. Выбор количества курсоров в окне Expression Editor

Кроме двух курсоров на экране появляется окно, в котором отображаются значения параметров по горизонтальной и вертикальной осям для каждого из курсоров (рис. 12), а также разность их значений.

По умолчанию при измерении нескольких параметров все графики выводятся в одно окно (например, на рис. 12). Если нужно поместить один или каждый из графиков в отдельное окно, то необходимо, поместив курсор "мышки" в окно отображения результатов измерения, нажать правую кнопку и выпадающем меню (рис. 13) выбрать пункт Add Plot Pane.



Рис. 12. Окно вывода результатов измерения с включенными курсорами



Рис. 13. Добавление окна отображения результатов измерения

В результате этого окно отображения будет разделено на две части (рис. 14).



Рис. 14. Окно отображения результатов измерения после выполнения команды Add Plot Pane

Чтобы перетащить один из графиков во вновь открывшееся окно, достаточно поместить курсор "мышки" на наименование параметра, график кото-



рого необходимо перенести в пустое окно, и, нажав левую кнопку, перетащить эту надпись в другое окно. В результате этого действия график будет перемещен в свободное окно (рис. 15). Размещение графиков в отдельных окнах дает возможность независимого масштабирования по вертикальной оси каждого из измеренных параметров.



Рис. 15. Результат перемещения графика тока через резистор R1 в свободное окно

ИЗМЕРЕНИЕ КПД УСТРОЙСТВ

Для вычисления КПД можно измерить мощность, отдаваемую устройством в нагрузку, и мощность, отдаваемую источником питания, а затем вычислить его значение. Рассмотрим этот процесс на примере измерения КПД двухканального синхронного преобразователя LT8650S [1, 2] с широким диапазоном входных напряжений от 3 до 42 В. Модель для исследования приведена на рис. 16.

Результаты измерения мощности, отдаваемой источником питания, и мощности, рассеиваемой на резисторах Rload1 и Rload2, приведены на рис. 17. Как следует из рисунка, переходной процесс заканчивается через 500 мкс после начала моделирования. Для корректного измерения мощности введем коррективы в командную строку, чтобы ограничить время вывода графиков интервалом от 0.5 до 6 мс (рис. 18).



Рис. 17. Результаты измерения мощности, отдаваемой источником питания, и мощности, рассеиваемой на резисторах Rioad1 и Rioad2



Рис. 18. Установка времени вывода графиков мощности в окне Edit Simulation Command



Рис. 16. Модель для исследования КПД двухканального синхронного преобразователя LT8650S





Графики изменения мощности во времени и форма тока, протекающего через источник питания, в увеличенном масштабе по оси времени приведены на рис. 19,а и б, соответственно.



Рис. 19. Графики изменения мощности (а) и форма тока, протекающего через источник питания (б)

Результаты измерения средней мощности приведены на рис. 20. Несложно рассчитать значение КПД по результатам этих измерений.



Рис. 20. Измеренные значения мощности на нагрузке Rload1 (a), Rload2 (б) и отдаваемой источником питания (в)

КПД = $[P(R_{load1}) + P(R_{load2})]/P(V1) =$ = (19.865 + 13.431)/35.092 = 0.9488.

В [1] для напряжения на входе преобразователя 12 В приведено значение КПД равное 93.3% при токе нагрузки Rload1 равном 4 А. Учитывая, что в рассматриваемой модели нагрузка подключена к обоим выходам преобразователя, результат получается близким к оговоренному производителем. Проверка при отключенной нагрузке Rload2 дала результат 95.25%, т.е. немного выше, чем заявлено производителем.

Если осуществляется моделирование устройств с одним из импульсных регуляторов производства Analog Devices, модели которых расположены в разделе PowerProducts встроенной библиотеки или размещены на сайте компании, то становятся доступными некоторые дополнительные функции.

Одна из них Stop simulating if steady state is detected (остановить моделирование, если обнаружено устойчивое состояние) - соответствует записи в командной строке Steady. Присутствие этой записи в командной строке позволяет остановить симуляцию, если переходной процесс завершен. Завершение переходного процесса требуется для верного вычисления КПД, измеряемого с помощью калькулятора эффективности (Efficiency Calculation), который позволяет определить коэффициент полезного действия моделируемого устройства, а также потери в отдельных его элементах. Переходной процесс считается завершенным, если за период тактовой частоты средний выходной ток усилителя ошибки преобразователя равен нулю. Доля пикового тока на выходе усилителя ошибки определяется параметром SSTOL. Иногда, из-за невозможности корректного определения значения SSTOL, автоматическое определение устойчивого состояния может быть неверным [3].

В этом случае можно попытаться вручную определить границы устойчивого участка. Для этого после начала симуляции нужно активизировать команду меню "Отметить начало" – **Simulate/Effi**ciency Calculation/Mark Start (рис. 21).

После этого симулятор удалит все накопленные данные и снова начнет накапливать их для калькулятора эффективности. Если повторно выполнить команду **Mark Start** (Отметить начало), то все уже накопленные данные будут повторно стерты и накопление начнется снова. После истечения некоторого времени, но не менее десяти периодов тактовой частоты импульсного регулятора, необходимо



7 <u>R</u> un	
Pause Ctrl+P	
Halt Ctrl+H	
Clear Waveforms '0'	100
Efficiency Calculation	Mark Starl
Control Panel	Mark <u>E</u> nd
Edit Simulation Cmd	

Рис. 21. Вызов команды Efficiency Calculation

активизировать команду меню Simulate/Efficiency Calculation/Mark End, отметив конец. После этого симуляция будет остановлена. Чтобы просмотреть отчет калькулятора эффективности, нужно активизировать пункт меню View/Efficiency Report. Если выбрать подпункт Show on Schematic, то отчет, в виде таблицы значений, будет размещен на схеме. Если выбран подпункт View/Efficiency Report/Paste to clipboard, то результаты расчета эффективности будут скопированы в буфер обмена Windows.

Если при установке параметров командной строки (рис. 18) поставить птичку возле строки Don't reset T=0 when steady state is detected (не сбрасывать T = 0, когда обнаружено устойчивое состояние), то в командной строке появится запись Nodiscard. В таком режиме результаты симуляции переходного процесса, предшествующего стабильному участку, сохраняются. Результаты измерения эффективности в этом случае будут совершенно другими.

На рис. 22 приведен отчет калькулятора эффективности, по результатам которого можно вычис-

		Efficiency Report	
Efficien	cy: 0.0%		
Inp	ut: 35.1W @ 12	v	
Outp	ui. 044@04		
Ref.	Irms	lpeak	Dissipation
C1	0mA	0mA	0mW
C2	0mA	0mA	0mW
C4	216mA	417mA	0mW
C5	216mA	417mA	0mW
C6	0mA	0mA	0mW
C7	0mA	0mA	0mW
C8	178mA	321mA	0mW
C9	178mA	321mA	0mW
C11	0mA	0mA	0mW
C12	0mA	0mA	0mW
C13	27mA	305mA	0mW
L1	3919mA	4636mA	65mW
L2	4029mA	4639mA	68mW
R1	0mA	0mA	18µW
R2	0mA	0mA	3µW
R3	0mA	0mA	6µW
R4	0mA	0mA	2µW
R5	0mA	0mA	67µW
Rload1	3989mA	3991mA	19891mW
Rload2	4035mA	4038mA	13431mW
114	E220m A	0200	4604 mala/

Рис. 22. Результаты работы калькулятора эффективности для модели, представленной на рис. 16

лить КПД преобразователя.

Если сравнить результаты измерения мощности обычным способом (рис. 20), то результаты измерений практически совпадают. КПД, вычисленный по результатам работы калькулятора эффективности составляет 94.93%, а измеренный обычным способом – 94.88%. Отсутствие общего значения КПД в отчете объясняется наличием двух выходов у преобразователя. Для преобразователя с одним выходом (например, LTM8073) отчет будет иметь вид, приведенный на рис. 23. Как следует из этого рисунка, программа автоматически определяет КПД всего устройства.

		Efficiency Report	
Efficier	ncy: 89.3%		
In	put: 16.5W @ 48V		
Out	put: 14.8W @ 4.97	V	
Ref.	Irms	Ipeak	Dissipation
C1	1256mA	2087mA	8mW
C2	0mA	0mA	0mW
C3	0mA	0mA	0mW
R1	0mA	0mA	31µW
R2	0mA	0mA	13µW
R3	0mA	0mA	0μW
U1	4154mA	22525mA	1769mW

Рис. 23. Отчет калькулятора эффективности для преобразователя LTM8073

Существует еще один путь для определения значений напряжений, токов и мощности – использование директивы Measure, позволяющей осуществлять обработку полученных при моделировании результатов по определенным пользователем условиям. Пользователь формулирует правила рассчета параметров, а программа автоматически выполнит вычисления. Такой подход позволяет автоматизировать процесс измерений и экономит массу времени при анализе сложных схем.

Различают два основных типа операторов директивы **MEASURE**. Те, которые ссылаются на точку вдоль абсциссы (независимая переменная по оси времени при анализе переходных процессов – **.tran** исследованиях), и операторы, которые ссылаются на диапазон значений по абсциссе.

Первый тип операторов, указывающий на одну точку на абсциссе, используется, чтобы получить значение данных или переменной в конкретной точке либо при выполнении определенного условия. Для этого используется следующий синтаксис:

.MEAS [SURE] [AC | DC | OP | TRAN | TF | NOISE] <
ums>

+ [<FIND | DERIV | PARAM > <expr>]

+ [WHEN <expr> | AT = <expr>]

+ [TD = <val1>] [<RISE | FALL | CROSS> = [<count1> |LAST]].

В этом операторе [AC | DC | OP | TRAN | TF |



NOISE] – вид анализа, к которому применяется директива; FIND (найти); DERIV (производная); PARAM (использование результатов предшествующих измерений); WHEN (условие); AT (координата точки измерения на оси абсцисс); TD (задержка в единицах измерения по оси абсцисс относительно момента выполнения условия); RISE (увеличение); FALL (уменьшение); CROSS (пересечение); LAST (последний случай).

В первой позиции можно указать вид анализа, к которому применяется директива **.meas**. Обязательно следует присваивать имя результату, который может быть использован в качестве параметра в других операторах .meas. Например,

.meas tran res1 FIND V(out) AT=5m.

Результат с именем res1 имеет значение V(out) в момент времени t = 5 мс.

На рис. 24 приведен пример измерения максимального и среднеквадратического значений синусоидального напряжения частотой 1 кГц на резисторе R2 в момент времени 0.25 мс, который соответствует максимальному значению сигнала во времени. Кроме того, будет вычисляться значение тока через резистор R1 в момент, когда напряжение на резисторе R2 достигнет максимального значения (.meas res3 find I(R1) WHEN V(2)=res1).



Рис. 24. Пример измерения напряжений в заданное время

Командная строка **.options plotwinsize=0** определяет, что компрессия при сохранении окна с результатами измерения отключена [3]. Чтобы увидеть результаты вычисления, нужно активизировать пункт меню View/SPICE Error Log. Фрагмент отчета приведен на рис. 25.

Второй вариант директивы **.MEAS** определяет диапазон значений по абсциссе. При этом используется синтаксис:

.MEAS [AC | DC | OP | TRAN | TF | NOISE] <имя результата>

[<AVG | MAX | MIN | PP | RMS | INTEG> <выражение>] [TRIG <lhs1> .OP point found by inspection.

res1: v(2)=5.28812 at 0.0004 res2: v(1,2)=0.808629 at 0.00015 res3: i(r1)=-0.0587569 at 0.000100011

Рис. 25. Фрагмент отчета о результатах вычисления напряжений и токов

[[VAL] =] <rhs1>] [TD = <значение1>] [<RISE|FALL|CROSS> =

<orcчet1>] [TARG <lhs2> [[VAL] =] <rhs2>] [TD = <значение2>]

[<RISE|FALL|CROSS> = <ottoret2>]

Диапазон значений по абсциссе ограничен точками, определенными как **<TRIG**> и **<TARG**>. По умолчанию точка **TRIG** устанавливает начало моделирования и может быть опущена. Аналогично точка TARG по умолчанию соответствует данным в конце моделирования. Если все три параметра **TRIG**, **TARG** и **WHEN** опущены, то директива **.MEAS** действует на весь диапазон данных.

Типы измерений, которые могут быть выполнены в заданном интервале значений, перечислены ниже:

- AVG вычисление среднего значения
- MIN нахождение минимального значения
- МАХ нахождение максимального значения
- RMS вычисление среднеквадратичного значения
- РР нахождение размаха от пика до пика
- INTEG интегрирование.

Если тип измерения не задан, то результатом выполнения директивы **.MEAS** будет значение величины, численно равное расстоянию по абсциссе между точками TRIG и TARG.

На рис. 26 приведена модель, иллюстрирующая выполнение директивы **.MEAS** второго типа. В качестве измеряемого параметра выбрана мощность, рассеиваемая на различных резисторах при различной форме сигнала. Генератор V1формирует



Рис. 26. Пример измерения мощности с помощью директивы MEASURE



гармонический сигнал, а V2 – прямоугольные импульсы со скважностью 2. Частота сигналов на выходах обоих генераторов равна 1000 Гц.

В результате выполнения моделирования в файле **.log** будут выведены значения, приведенные на рис. 27.

Direct Newton iteration for .op point succeeded.

res1: AVG(v(1,2)*i(r1))=-0.0498745 FROM 0 TO 0.01 res2: RMS(v(1,2)*i(r1))=0.0610835 FROM 0 TO 0.01 res3: AVG(v(3,4)*i(r4))=-0.0999987 FROM 0 TO 0.01 res4: RMS(v(4)*i(r4))=0.899993 FROM 0 TO 0.01

Рис. 27. Фрагмент файла .log с отчетом о результатах вычисления мощности, рассеиваемой на разных элементах схемы

Чтобы получить правильные значения для периодических сигналов, нужно или явно указать в параметрах этой директивы отрезок времени длительностью, кратной периоду, или задать весь интервал моделирования, исходя из этого условия.

Рассмотрим еще один пример использования директивы **.MEAS** второго типа. Исследуем зависимость пульсаций на выходе двухполупериодного выпрямителя (рис. 28) от емкости конденсатора фильтра. Для вычисления используется среднее значение напряжения на выходе выпрямителя

(.meas tran avg AVG V(out) from 200m to 300m),

размах пульсаций

(.meas tran Vpp PP V(out))

и максимальный ток через диод D1

(.meas tran Ipeak MAX I(D1) from 200m to 300m).



Рис. 28. Модель для исследования пульсаций на выходе выпрямителя в зависимости от емкости конденсатора фильтра

На рис. 29 приведены временные диаграммы выходного напряжения выпрямителя, а на рис. 30 – результаты вычислений с помощью директивы .MEASURE.

Анализ полученных результатов дает возмож-



Рис. 29. Временные диаграммы напряжений на выходе выпрямителя

.OP po .step c .step c .step c .step c	int found by insp var=5e-005 var=0.0001 var=0.0002 var=0.0005	ection.	
Measu	rement: avo		
step	AVG(v(out))	FROM	то
1	239.6490.2	0.3	
2	261.525 0.2	0.3	
3	277.311 0.2	0.3	
4	286.197 0.2	0.3	
Measu	rement: vpp		
step	PP(v(out))	FROM	TO
1	140.7880	0.4	
2	89.87010	0.4	
3	51.72690	0.4	
4	22.08190	0.4	
Measu	rement: ipeak		
step	MAX(i(d1))	FROM	то
1	4.64091 0.2	0.3	
2	6.72669 0.2	0.3	
3	8.36306 0.2	0.3	
4	9.231810.2	0.3	

Рис. 30. Результаты вычисления параметров выпрямителя с помощью директивы .MEASURE

ность проверить не только амплитуду пульсаций, но и верность выбора типа диода по максимальному току ipeak. Для измерений можно задать еще много различных параметров, необходимых для анализа работы схемы.

ИЗМЕРЕНИЯ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Измерения токов, напряжений и мощности сигналов осуществляются при проведении анализа переходных процессов. Для анализа частотных и фазовых характеристик необходимо перейти в режим анализа по переменному току. На рис. 31 приведен пример простейшей модели колебательного контура для исследования зависимости частоты резонанса от емкости конденсатора, который возбуждается источником тока.

Для анализа АЧХ необходимо после создания модели нажать кнопку Run и в открывшемся окне Edit Simulation Edit выбрать вкладку AC Analysis (рис. 32). Для анализа зададим диапазон частот



МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ



Рис. 31. Модель колебательного контура для исследования зависимости частоты резонанса от емкости конденсатора

AC Analysis	DC sweep	Noise	DC Transfer	DC op pnt
e small signa	AC behavio	r of the c point.	ircuit linearized	about its DC operating
	Type of	sweep:	Decade	Ŷ
Number	of points per	decade:	þκ	
	Start fre	quency:	100k	
	Stop fre	quency:	5Meg	
<oct, dec,="" lin:<="" td=""><td><npoints></npoints></td><td><start fre<="" td=""><td>q> <endfreq></endfreq></td><td></td></start></td></oct,>	<npoints></npoints>	<start fre<="" td=""><td>q> <endfreq></endfreq></td><td></td></start>	q> <endfreq></endfreq>	
	e small signal Number o	e small signal AC behavio Type of Number of points per Start fre Stop fre	e small signal AC behavior of the c point. Type of sweep: Number of points per decade: Start frequency: Stop frequency:	e small signal AC behavior of the circuit linearized point. Type of sweep: Decade Number of points per decade: [IK Start frequency: 100k Stop frequency: 51Meg

Рис. 32. Окно установки параметров анализа по переменному току

анализа Start и Stop frequency, масштаб по горизонтальной оси Type of sweep (по оси частот можно задать Decade, Octave, Linear и List) и число точек Number of Points. В зависимости от выбранного масштаба в окне будет отображаться либо общее число точек в режиме Linear и List, либо число точек на декаду или октаву. Для анализа схемы задан диапазон изменения частоты анализа от 100 кГц до 5 МГц с числом точек на декаду, равным 1000.

Для автоматизации процесса измерений необходимо после размещения конденсатора на схеме подвести курсор "мышки" к его обозначению и нажать правую кнопку. В открывшемся окне Enter new Value for C1 в строке с буквой С заключить ее в фигурные скобки (рис. 33). После этого необходимо ввести директиву изменения емкости конденсатора, нажав верхнюю правую кнопку на панели управления со значком **.ор**. Директива имеет вид

.step dec param C 100p 1000p 5.

Пояснить значение параметров директивы проще на примере ее редактирования. Для изменения директивы изменения шага емкости конденсатора достаточно подвести курсор "мышки" к строке с директивой и нажать правую кнопку. В открывшемся окне .step Statement Editor (рис. 34) очевидным становится значение записей в директиве. При изменении емкости в 10 раз от 100 до 1000 пФ необходимо задать 5 дискретных значений емкости плюс

Justification	Font Size	OK
Left 🗸 🗸	1.5(default) 🗸	
Vertical Text		Cance

Рис. 33. Окно Enter new Value for C1

Iransient	AC Analysis	DC sweep	Noise	DC Transfer	DC op pnt
Compute	the small signa	I AC behavio	r of the c point.	ircuit linearized	about its DC operatir
		Type of	sweep:	Decade	~
	Number	of points per	decade:	þκ	
		Start fre	quency:	100k	
		Stop fre	quency:	5Meg	
ivntax: a	c <oct. dec.="" lin<="" td=""><td>> <npoints></npoints></td><td><start fre<="" td=""><td>a> <endfrea></endfrea></td><td></td></start></td></oct.>	> <npoints></npoints>	<start fre<="" td=""><td>a> <endfrea></endfrea></td><td></td></start>	a> <endfrea></endfrea>	
grittanta.		, apointos	otortino	dy amanage	

Рис. 34. Окно редактирования шага изменения емкости конденсатора

одно значение.

Результат анализа АЧХ колебательного контура приведен на рис. 35. Пунктирными линиями на графике выводятся ФЧХ контура. Как следует из рис. 35, число графиков равно 6, хотя параметр **Number of points per decade** (рис. 34) задан равным 5.

Значения емкости конденсатора С1, изменяющиеся в процессе моделирования, приведены на рис. 36.

Если необходимо изменение емкости с фиксированным шагом ее изменения, то следует выбрать закон изменения Linear и задать шаг изменения емкости вместо числа точек на декаду или октаву.

Для автоматизации процесса измерения амплитуды и фазы на частоте резонанса достаточно добавить директиву **.meas ac par1 MAX V(Out)**, которая предусматривает измерение максимального значения напряжения на всех частотах резонанса. В процессе редактирования директивы имеется возможность просмотреть результат моделирования по искомому параметру. Для этого достаточно в окне **.meas Statement Editor** нажать кнопку **Test** в левом нижнем углу (рис. 36) и на экран будет выведен результат измерения параметра **par1** – значение напряжения в дБ и фазы в градусах.

Рассмотрим пример анализа усилителя во временной и в частотной области, используя одну схему. Схема усилителя приведена на рис. 37.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ



Рис. 35. Результат анализа АЧХ и ФЧХ колебательного контура при изменении емкости конденсатора



Рис. 36. Изменение емкости конденсатора С1 в процессе анализа

Для анализа во временной области (Transient) задана директива **.tran 50m**, которая не требует особых пояснений. Параметры генератора синусоидального сигнала, подаваемого на вход усилителя: амплитуда сигнала 0.15 B, а его частота 1 кГц.

Директива для анализа в частотной области (AC Analysis) имеет вид **.ac dec 10 10 10Meg**. Так как программа не может выполнять оба вида анализа, необходимо директиву выполняемого анализа пометить как **SPICE directiv**, а директиву другого анализа как **Comment**. Для этого достаточно подвести курсор "мышки" к нужной директиве и нажать правую кнопку. В открывшемся окне (рис. 38) отметить нужную позицию. Комментарий будет отображаться на рабочем листе синим цветом, а spice-директива активного анализа – черным.

При установке активным анализа по переменному току программа сообщила об ошибке и потребо-



ЭКиС

Рис. 37. Схема для анализа во временной и в частотной области

How to netlist this text	Justification	Font Size	OK
Comment O SPICE directive	Left 🗸	1.5(default) 🗸	Cancel
	Vertical Text		
ac dec 10 10 10Meg			

Рис. 38. Установка признака Comment на директиве неактивного анализа

вала задать **AC Amplitude**, равной 1 В (рис. 39). После этого анализ проводится нормально.



Рис. 39. Установка значения амплитуды для анализа по переменному току

Неожиданный результат был получен при анализе во временной области. С учетом напряжения источников питания равного ±5 В, входного напряжения и коэффициента усиления, равного 101, на выходе должно быть сформировано ограниченное напряжение амплитудой не более ±5 В. Результат, полученный при моделировании, приведен на рис. 40,а.

Ограничение наступает при напряжении ±13 В. Заданное на схеме напряжение лежит в диапазоне напряжений для ИМС AD549, который составляет ±5...±18 В. После замены на ОУ типа AD8047 получен верный результат (рис. 40,6), что свидетельствует о неточностях модели ОУ AD549.

Для корректного анализа входное напряжение было задано равным 10 мВ и амплитуда сигнала на



выходе не превысила 1.2 В.

Измеренные АЧХ и ФЧХ приведены на рис. 41.

Для анализа поведения АЧХ при изменении коэффициента усиления зададим директиву .step dec param R 1k 10k 5, которая определяет изменение сопротивление резистора R1 в пределах от 1 до 10 кОм. А для измерения коэффициента гармоник зададим директиву .four 1k 10 V(n003), которая осуществляет вычисление Фурье-компонентов и коэффициента гармоник после анализа переходных процессов. Т.е. выполнять измерение коэффициента гармоник необходимо при активной директиве .tran.



Рис. 40. Напряжение на выходе усилителя при Ubx = 0.15 В для ОУ AD549 (a) и ОУ AD8047 (б)



Рис. 41. АЧХ и ФЧХ неинвертирующего усилителя на ОУ АD8047

Усовершенствованная модель приведена на рис. 42, результат анализа частотных характеристик на рис. 43, а Фурье-анализа – на рис. 44.

На рис. 44 приведен фрагмент файла .log с отчетом о результатах вычисления Фурье-компонентов для первых двух значений коэффициента усиления.



Рис. 42. Модель для измерения коэффициента нелинейных искажений и АЧХ при разных коэффициентах усиления



Рис. 43. АЧХ и ФЧХ неинвертирующего усилителя на ОУ АD8047 при различных коэффициентах усиления

Direct Newton I	teration for .op point s	ucceeded.					
.step r=1000							
N-Period=1							
Fourier compor	nents of V(n003)						
DC component:0.274992							
Harmonic	Frequency	Fourier	Normalized	Phase	Normalized		
Number	[Hz]	Component	Component	[degree]	Phase [deg]		
1	1.000e+03	9.192e-01	1.000e+00	0.03°	0.00°		
2	2.000e+03	1.781e-03	1.938e-03	-94.12°	-94.15°		
3	3.000e+03	5.455e-03	5.935e-03	-169.14°	-169.17°		
4	4.000e+03	8.258e-04	8.983e-04	57.21°	57.19°		
5	5.000e+03	6.336e-03	6.893e-03	9.06°	9.03°		
6	6.000e+03	1.399e-03	1.522e-03	69.57°	69.54°		
7	7.000e+03	9.613e-04	1.046e-03	-142.84°	-142.87°		
8	8.000e+03	1.039e-03	1.131e-03	83.20°	83.17°		
9	9.000e+03	6.089e-04	6.624e-04	149.19°	149.16°		
10	1.000e+04	1.432e-04	1.558e-04	-123.78°	-123.81°		
.step r=1584.89 N-Period=1 Fourier compor	ents of V(n003)						
DC component:	0.317329						
Harmonic	Frequency	Fourier	Normalized	Phase	Normalized		
Number	[Hz]	Component	Component	[degree]	Phase [deg]		
1	1.000e+03	6.007e-01	1.000e+00	-0.03°	0.00°		
2	2.000e+03	4.255e-04	7.084e-04	-79.60°	-79.57°		
3	3.000e+03	2.330e-03	3.880e-03	-169.55°	-169.52°		
4	4.000e+03	2.690e-03	4.479e-03	77.28°	77.31°		
5	5.000e+03	2.750e-03	4.578e-03	13.39°	13.41°		
6	6.000e+03	8.708e-04	1.450e-03	92.24°	92.27°		
7	7.000e+03	1.986e-03	3.306e-03	-164.32°	-164.29°		
8	8.000e+03	4.990e-04	8.308e-04	-81.52°	-81.50°		
9	9.000e+03	2.458e-04	4.092e-04	96.61°	96.64°		
10	1.000e+04	4.866e-04	8.100e-04	-56.15°	-56.12°		
Total Harmonic	Distortion: 0.843320%(0).879884%)					

Рис. 44. Результаты вычисления коэффициента гармоник при различных коэффициентах усиления

ЛИТЕРАТУРА

1.http://www.analog.com/media/en/technicaldocumentation/data-sheets/lt8650s.pdf/

2.http://www.analog.com/media/en/simulationm o d e l s / L T s p i c e - d e m o circuits/LT8650S_DC2407A.asc.

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