

Схемы, методики и сценарии тестирования SPICE-совместимых макромоделей операционных усилителей

(часть 6)

Сергей Лозицкий (г. Брянск)

В шестой, заключительной части статьи рассматривается вопрос о выборе времени установления для корректного моделирования поведения схемы при переходных процессах, а также некоторые доработки ММ в части верного моделирования АЧХ и импедансов ОУ.

Итак, мы рассмотрели, как в процессе тестирования схемы на рис. 48 определить величины практически всех используемых показателей качества переходного процесса. Возможно, вы обратили внимание на то обстоятельство, что в процессе определения этих величин мы ни разу не ссылались на выходное напряжение $V(\text{InZone-Ni})$ АФБ А1. Возникает вопрос: с какой целью АФБ А1 введён в состав схемы тестирования? АФБ А1 используется в тех случаях, когда по результатам многовариантного анализа схемы тестирования необходимо построить зависимость времени установления t_{ss} от какого-либо варьируемого па-

раметра, например, зависимости t_{ss} от ёмкости нагрузки CL.

Программа Probe в режиме Performance Analysis позволяет построить указанную зависимость, если имеется целевая функция, с помощью которой могут быть определены величины t_{ss} для всех вариантов анализируемой схемы. Однако в файле `rspace.grb` не удаётся обнаружить стандартную целевую функцию, с помощью которой можно рассчитать время установления схемы по трассе её переходной характеристики. И это не случайно. На верхнем графике рис. 56 изображены три кривые переходного процесса различного типа. Кривая 1 со-

ответствует аperiodическому характеру установления и входит в зону заданной погрешности единичный раз, пересекая её нижнюю границу. Кривая 2 соответствует колебательному характеру процесса установления и последний раз входит в зону погрешности сверху. Кривая 3 также является колебательной, но она последний раз входит в зону заданной погрешности снизу. Несложно определить целевую функцию, которая рассчитывает время установления кривых 1 и 3. Также несложно определить целевую функцию, которая рассчитывает время установления кривой 2. Однако определить целевую функцию, которая правильно рассчитывает время установления для любого типа (вне зависимости от типа) кривой переходного процесса не представляется возможным, поскольку синтаксис языка описания целевых функций не позволяет использовать условные операторы [3, 4].

На нижнем графике рис. 56 изображены временные диаграммы выходного напряжения АФБ А1. Из сопоставления этих диаграмм с соответствующими кривыми переходных характеристик следует, что вне зависимости от типа кривой переходного процесса факт её последнего вхождения в зону заданной погрешности всегда сопровождается последним положительным перепадом выходного напряжения $V(\text{InZone-Ni})$ АФБ А1. Таким образом, задача определения времени установления переходного процесса сводится к задаче отыскания точки трассы $V(\text{InZone-Ni})$, в которой она последний раз скачком изменяется от низкого уровня (минус 0,9 В) к высокому уровню (0,9 В). Эта задача решается с помощью простой це-

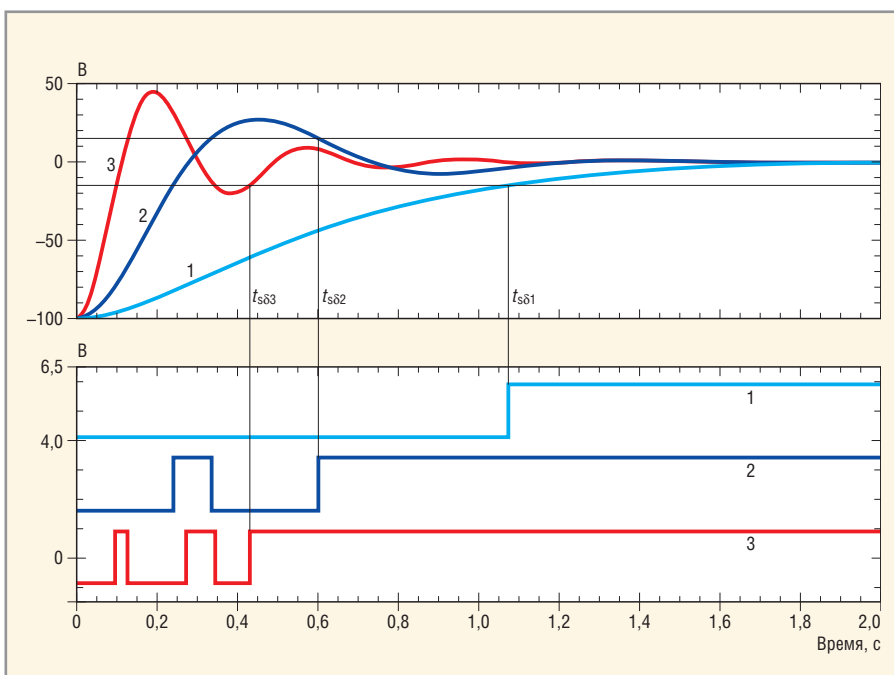


Рис. 56. Результаты моделирования переходных характеристик трёх различных типов

левой функции SettlingTime, имеющей следующее описание:

```
*****
SettlingTime(1)=x1
*
* Find the settling time of a
step response curve
* Usage: SettlingTime(InZone-Hi)
*
{
  |Search backward /End/ level
(0) !1;
}
*****
```

Следует заметить, что АФБ А1 осуществляет проверку выполнения условий функции if() только в дискретные моменты времени, которые отстоят друг от друга на шаг интегрирования. По этой причине результат определения времени установления с помощью целевой функции SettlingTime имеет методическую погрешность, абсолютная величина которой изменяется случайным образом и в худшем случае равна половине максимального шага интегрирования. Сказанное необходимо учитывать при задании величины параметра Step Ceiling, определяющего максимальный шаг интегрирования в режиме анализа Transient. Практика показала, что при тестировании времени установления с погрешностью менее 0,1% величину опции моделирования RELTOL, которая по умолчанию равна 1e-3, в некоторых случаях необходимо уменьшить до величины (1e-5...1e-4).

Зависимость результатов тестирования времени установления и выброса переходной характеристики, а также зависимость суммарного времени анализа схемы от выбора величины максимального шага интегрирования позволяют оценить данные таблицы 3. Эти данные соответствуют графикам, изображённым на рис. 54, 55, и величине опции моделирования RELTOL = 1e-5. Выброс переходной характеристики определялся позиционированием курсора на максимум трассы V(DevPercent).

Использование возможностей параметрического анализа (Performance Analysis) рассмотрим на примере тестирования ММ LT1055/LT. Требуется построить графики зави-

симостей времени установления с погрешностью 0,1% и график максимального выброса переходной характеристики схемы в зависимости от ёмкости нагрузки, величина которой изменяется от 10 до 1000 пФ. В статье [1] отмечалось, что ММ LT1055/LT некорректно моделирует величину выходного сопротивления на высоких частотах. Для создания ММ LT1055/My, свободной от указанного недостатка и к тому же позволяющей оперативно изменять величины входных паразитных ёмкостей, достаточно скопировать описание ММ LT1055/LT и откорректировать в нём следующие строки:

```
.SUBCKT LT1055/My 3 2 7 4 6
+PARAMS: Cd=3pF Ccm=2pF
* INPUT
CIN 2 3 {Cd} ; My Correction
CcmM 2 0 {0.5*Ccm}
; My Addition
CcmP 3 0 {0.5*Ccm}
; My Addition
.....
* OUTPUT
RSO 1 6 59.989 ; My Correction.
* Old Value=1
ECL 18 0 1 6 0.2874
; My Correction.
* Old Value=17.241
.....
.ENDS LT1055/My
```

На высоких частотах выходное сопротивление ММ LT1055/My равно 60 Ом, в чём можно убедиться, протестировав ММ на предмет её выходного сопротивления в схеме на рис. 38.

В простейшем случае параметрическая зависимость – это график зависимости целевой функции от варьируемого параметра [3]. Нам необходимо осуществить многовариантный анализ схемы тестирования, варьируя величину глобального па-

раметра CL, и по его результатам построить графики:

- зависимости целевой функции MAX(V(devPercent)) от величины варьируемого параметра CL;
- зависимости целевой функции SettlingTime(V(InZone-Hi)) от величины варьируемого параметра CL.

Задайте следующие величины глобальных параметров: Vs = 30 V, CL = = 1000 pF, RL = 2K, Rf = 1e-6, Av = 1, Ck = 0 pF, Vstart = 0, Vend = 50 mV, Tfr = = 1 ns, ErrPercent = 0.1, Td = 0, Ri = 1e-6.

Многовариантный анализ занимает достаточно много времени, и поэтому перед его осуществлением очень важно определить оптимальное время анализа (задаётся опцией моделирования Final Time). Оно, с одной стороны, должно быть минимальным, а с другой – гарантированно обеспечивать установление переходного процесса с погрешностью 0,1% в самом худшем случае, т.е. при самой неблагоприятной величине варьируемого параметра. Естественно предположить, что в нашем примере худшим является случай, когда ёмкость нагрузки максимальна, т.е. CL = 1000 pF. Результат тестирования схемы при задании CL = 1000 pF, Final Time = 10 us и Step Ceiling = 10 ns показывает, что время установления переходного процесса не превышает 3,5 мкс.

Оценим необходимое количество вариантов анализа схемы. График параметрической зависимости программа Probe строит, осуществляя линейную интерполяцию расчётных точек целевой функции или, проще говоря, соединяя прямыми линиями соседние точки графика, полученные в каждом из вариантов расчёта. Из паспортных данных ОУ следует, что графики интересующих нас зависимостей изменяются плавно, и поэтому для их построения вполне достаточно двух-трёх десятков расчётных точек. Величина параметра

Таблица 3. Зависимости $t_{S 0,1\%}$, OvSh[%] и Total Job Time от максимального шага интегрирования

Step Ceiling	Время установления $t_{S 0,1\%}$, нс		Выброс переходной характеристики, %	Total Job Time, с
	позиционирование курсора в точку трассы V(DevPercent) с ординатой 0,1	вызов целевой функции SettlingTime(V(InZone-Hi))		
1 ps	44,087	44,086	49,333	37,49
10 ps	44,088	44,09	49,333	3,44
50 s	44,1	44,085	49,333	0,72
75 ps	44,113	44,124	49,343	0,51
150 ps	44,181	44,15	49,415	0,31

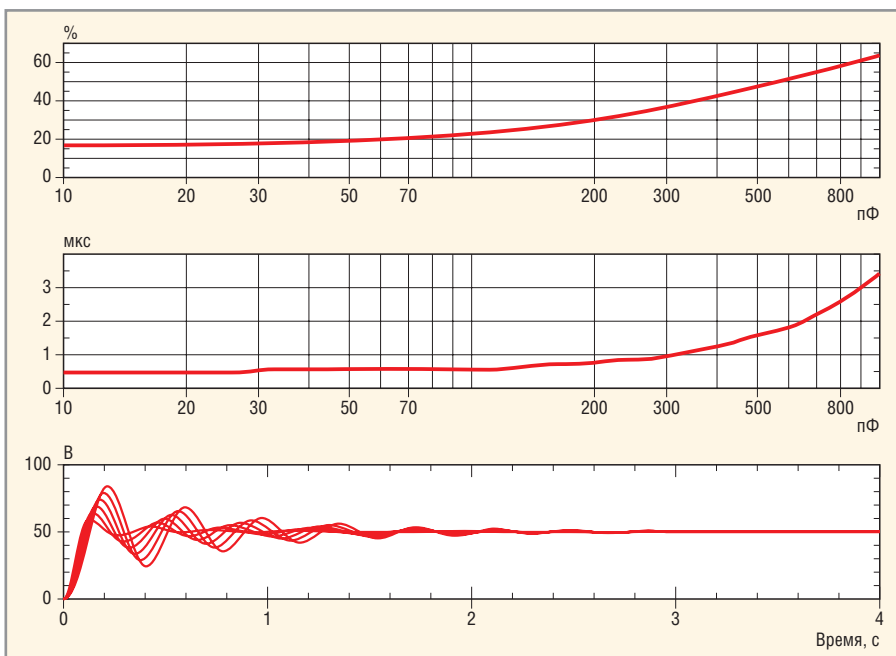


Рис. 57. Зависимости $t_{s\ 0,1\%}$ и $OvSh[\%]$ от ёмкости нагрузки CL (MM LT1055/My)

CL варьируется в двухдекадном диапазоне, и, следовательно, с помощью опций моделирования необходимо задать 10 – 15 расчётных точек на каждую декаду изменения параметра CL. Вот теперь подготовительная работа завершена, и можно приступать к моделированию.

Последовательно открыв окна Analysis Setup и Transient, установите следующие параметры моделирования:

- Final Time: 4 us,
- Step Ceiling: 1 ns.

Закройте окно Transient и откройте окно Parametric, в котором задайте параметры:

- Sweep Var. Type: Global Parameter,
- Name: CL,
- Sweep Type: Decade,
- Start Value: 10 p,
- End Value: 1 n,
- Pts/Decade: 12.

Закройте открытые окна и последовательно выберите опции меню Analysis и Probe Setup. В открывшемся

окне Probe Setup Options активизируйте опции:

- Automatically run Probe after simulation,
- Restore last Probe session.

Затем откройте вкладку Data Collection. Укажите переменные, которые необходимо сохранить в файле результатов моделирования (в DAT-файле):

- Voltages: All but Internal Subcircuits,
- остальные выходные переменные: None.

Закройте открытые окна и щёлкните указателем мыши по иконке Simulate. Спустя некоторое время, которое зависит от производительности компьютера, на экране Probe открывается окно Available Sections, в котором пользователю из всех доступных секций результатов многовариантного моделирования предлагается выбрать нужные.

Нам необходимы все секции результатов моделирования, которые по умолчанию уже являются выбран-

ными, поэтому просто нажмите курсором мыши кнопку ОК. Откройте окно Add Traces, из списка выходных переменных выберите V(Out) и нажмите кнопку ОК. При этом на экран Probe выводится семейство переходных характеристик тестируемой схемы. Указателем мыши щёлкните на иконке Performance Analysis, а затем по иконке Plot, и в выпадающем меню выберите опцию Add Plot to Window. В результате выполнения указанных действий на экране Probe появляются два пустых поля графиков, ось X которых оцифрована в единицах варьируемого параметра CL. Активизируйте верхнее поле графика (на него должен указывать перемещаемый указатель SEL>>) и щёлкните указателем мыши по иконке Add Trace. В открывшемся окне из списка Goal Functions выберите целевую функцию Max, а для задания её аргумента из списка Simulation Variables выберите переменную V(DevPercent) и нажмите кнопку ОК. В результате выполнения указанных действий выводится график зависимости максимального выброса переходной характеристики от величины ёмкости CL. Теперь активизируйте нижнее (пустое) поле графика и повторите описанные действия со следующими отличиями: из списка целевых функций выберите SettlingTime, а в качестве аргумента этой функции используйте выходную переменную V(InZone-Hi). После масштабирования осей и вывода сетки мы получаем графики, изображённые на рис. 57.

Совет: сохраните текущую конфигурацию экрана Probe (присвойте сохранённой конфигурации содержательное имя, например, OvSh & Settling Time vs CLoad).

Результаты тестирования в тех же самых условиях фирменной MM LT1055/LT изображены на рис. 58. Сопоставление графиков на рис. 57 и 58 наглядно показывает, что проведённая доработка модели даёт увеличение выходного сопротивления MM на высоких частотах с явно нереальной величины 1 Ом (MM LT1055/LT) до паспортной величины 60 Ом (MM LT1055/My).

При проведении многовариантных расчётов становится актуальным вопрос минимизации времени тестирования. Данные таблицы 4 показывают, что время тестирования и объём дискового простран-

Таблица 4. Зависимости времени тестирования и размера DAT-файла от объёма выводимой в DAT-файл информации

Выводимые в DAT-файл переменные	Величины TOTAL JOB TIME, с, в трёх прогонах анализа		Размер DAT-файла, Мб	
	LT1055/My	OPA604M/BB	LT1055/My	OPA604M/BB
Все (по умолчанию)	32,8	66,91	111	151
	33,48	68,45		
	32,58	67,73		
Только напряжения внешних (по отношению к MM OУ) узлов	21	47,42	7,82	7,84
	21,19	48,31		
	22,03	47,51		

ства, занимаемого выводимыми данными, существенно зависят от выбора опций программы Probe (Probe Setup Options), определяющих список сохраняемых выходных переменных.

Совет: выводите в файл данных только те переменные, которые необходимы для построения графиков. Не выводите в DAT-файл токи и напряжения внутренних узлов ММ ОУ.

Существенное различие времени тестирования макромоделей LT1055/Му и ОРА604М/ВВ объясняется тем, что первая из них является модифицированной ММ Бойля, а вторая – классической MPZ ММ [1].

Известно [2], что недостаточный запас устойчивости ОУ, ёмкостной характер его нагрузки, а также дополнительный фазовый сдвиг петлевого усиления цепью, образованной резисторами Rf, Rg и паразитной входной ёмкостью ОУ, часто являются причиной резонансного всплеска АЧХ (Peaking) усилителя на высоких частотах. Для уменьшения его величины или полного устранения этого всплеска АЧХ параллельно резисто-

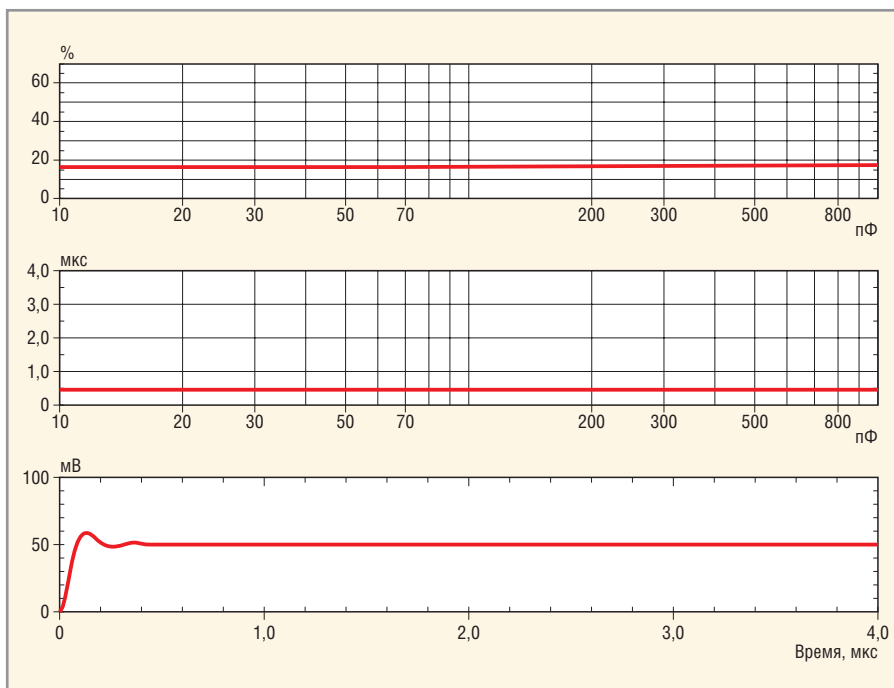


Рис. 58. Зависимости $t_s 0,1\%$ и $OvSh[\%]$ от ёмкости нагрузки CL (ММ LT1055/LT)

ру Rf обычно подключают конденсатор Ck небольшой ёмкости [2, 5]. На рис. 59 изображены:

- семейство ЛАЧХ инвертирования на ОУ ОРА627, полученного при вариации ёмкости конденсато-

ра Ck в диапазоне от 0,2 до 8 пФ (нижний график);

- параметрическая зависимость величины всплеска ЛАЧХ в дБ от ёмкости конденсатора Ck (верхний график);



Программируемые источники питания – МОЩЬ И ИНТЕЛЛЕКТ



Серия ZUP (Zero-Up)

- Выходная мощность 200/400/800 Вт
- Встроенный интерфейс RS-232/485 (GPIB по заказу)
- Универсальный вход 85-265 В переменного тока
- Выходные напряжения до 120 В, ток нагрузки до 132 А
- Программная калибровка

Серия Genesys™

- Выходная мощность 750/1500/3300 Вт
- Встроенный интерфейс RS-232/485 (GPIB IEEE488/488.2 SCPI по заказу)
- Выходные напряжения до 600 В, ток нагрузки 400А
- Конфигурирование посредством внешнего напряжения/тока и ПО
- Драйверы LabView и LabWindows
- Высота 1U и 2U

Применения ZUP и Genesys™

- Автоматическое испытательное оборудование
- Управление технологическими процессами
- Электротермотренировка полупроводниковых изделий
- Лазеры



Тел.: (495) 234-0636 • Факс: (495) 234-0640
E-mail: info@prosoft.ru • Web: www.prosoft.ru

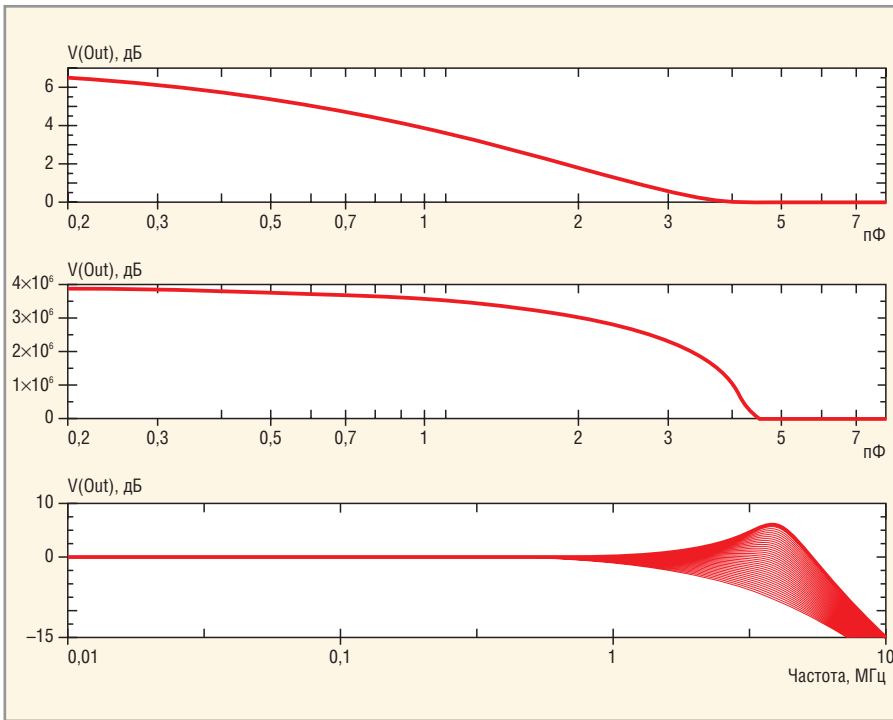


Рис. 59. Зависимости параметров резонансного всплеска АЧХ от ёмкости конденсатора Ск (ОРА627Е/ВВ)

- параметрическая зависимость частоты, на которой ЛАЧХ имеет максимальную величину, от ёмкости конденсатора Ск (средний график).

Схема на рис. 48 тестировалась при следующих значениях параметров: $V_s = 30 \text{ V}$, $C_L = 0 \text{ pF}$, $R_L = 2 \text{ K}$, $R_f = 10 \text{ K}$, $A_v = -1$, $C_k = \text{VAR} = 0,2...8 \text{ pF}$, $R_i = 1e-6$ (величины пяти не указанных параметров в режиме анализа AC Sweep не используются и могут иметь произвольные значения). Для построения параметрических зависимостей используются нестандартные целевые функции. Функция Peaking (TraceName) рассчитывает разность ординат точки трассы с максимальной Y-координатой и стартовой (самой левой) точки трассы. Функция XatMaxY(TraceName) численно равна X-координате точки трассы, на кото-

рой Y-координата максимальна. Эти целевые функции определяются следующим образом:

```

*****
Peaking(1)=y2-y1
*
* Find the Peaking of a frequency response
* Usage: Peaking(<trace name>)
{
  1|Search forward x value (0%)
!1
  Search forward max !2;
}
*****
XatMaxY(1) = x1
*
* Find the value of X corresponding
* to the maximum value of the trace.
* Usage: XatMaxY(<trace name>)
*
{
  1|Search forward max !1;
}
*****
    
```

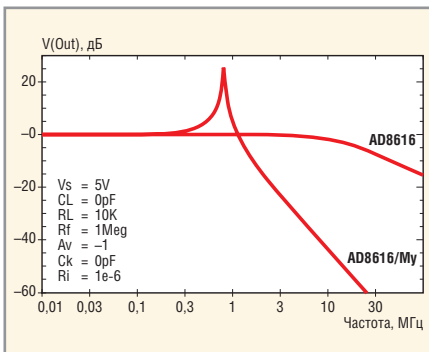


Рис. 60. Влияние на ЛАЧХ инвертора напряжения входных емкостей ММ ОУ

Кривые на рис. 59 позволяют, что называется, почувствовать механизм частотной компенсации и выбрать оптимальную величину ёмкости конденсатора Ск, которая обеспечивает АЧХ, адекватную специфике решаемой усилителем в РЭУ задачи.

В принципе, варьируя любой глобальный параметр, можно построить целый ряд полезных параметрических зависимостей. Если учесть, что конфигурация и характеристики тестируемого усилителя определяются двенадцатью глобальными параметрами, то становится очевидным – рассмотреть все полезные параметрические зависимости в рамках журнальной статьи не представляется возможным. Завершая разговор о параметрических зависимостях, следует отметить, что эффективность их использования во многом определяется накопленным «арсеналом» тщательно проверенных целевых функций.

Опыт тестирования ММ ОУ в схеме на рис. 48 показал, что наиболее типичными являются проблемы, обусловленные тем, что, к сожалению, многие ММ не моделируют паразитные входные ёмкости реального ОУ. В некоторых случаях использования таких ММ ошибки моделирования становятся неприемлемо большими. При прочих равных условиях влияние входных ёмкостей ОУ на АЧХ усилителя возрастает при увеличении частоты единичного усиления ОУ, а также при увеличении сопротивления резисторов R_f , R_g цепи ОС. На рис. 60 изображены две ЛАЧХ, полученные в результате тестирования инвертора напряжения с высокоомной цепью ОС ($R_f = R_g = 1 \text{ MOm}$).

Одна ЛАЧХ получена при использовании в инверторе CMOS ОУ, представленного фирменной ММ AD8616, а другая – усовершенствованной ММ AD8616/Mu. Вопиющее различие ЛАЧХ объясняется просто: фирменная ММ не моделирует входные ёмкости ОУ, а усовершенствованная ММ моделирует типовые величины ($C_d = 2,5 \text{ пФ}$; $C_{cm} = 7,6 \text{ пФ}$ [www.analog.com]) входных ёмкостей реального ОУ. Показано [1], что учёт макромоделью входных ёмкостей ОУ является обязательным условием корректного моделирования АЧХ входного сопротивления операционных схем, в которых входной сигнал поступает непосредственно на неинвертирующий вход ОУ. Кстати, для построения графика АЧХ входного сопротивления неинвертирующего усилителя ($A_v \gg 0$) достаточно на экран Probe вывести трассу $1/(V_{in+})$.

Совет. Если результаты тестирования показывают, что ММ не моделирует (или моделирует некорректно)

но) входные ёмкости ОУ, модифицируйте описание этой ММ, руководствуясь рекомендациями статьи [1].

Так, например, для преобразования ММ AD8616 в ММ AD8616/Му в описание первой из них достаточно внести следующие изменения:

```
.SUBCKT AD8616/Му 1 2 99 50 45
+PARAMS: Cd=2.5pF Ccm=6.7pF
*
* INPUT STAGE
*
Cd 1 2 {Cd} ; Му Addition
Ccm1P 1 99 {0.25*Ccm}
; Му Addition
Ccm1M 1 50 {0.25*Ccm}
; Му Addition
Ccm2P 2 99 {0.25*Ccm}
; Му Addition
Ccm2M 2 50 {0.25*Ccm}
; Му Addition
.....
.ENDS AD8616/Му
```

Заметим, что модифицированная ММ AD8616/Му не только учитывает входные ёмкости ОУ, но и позволяет оперативно изменять их в процессе моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главный вывод из сказанного выше достаточно очевиден: использование непроверенных ММ ОУ не гарантирует достоверность результатов моделирования прикладных операционных схем.

Очевидно, что затраты времени и сил на тестирование ММ ОУ и документирование полученных результатов являются разовыми. Результаты же тестирования (а возможно, и доработок) ММ ОУ вы можете многократно использовать в своей повседневной деятельности.

В процессе практического использования крайне важно САПР избегать двух крайностей – слепой веры в истинность результатов моделирования – с одной стороны, и отношению к САПР как к большой и дорогостоящей игрушке – с другой. Если пользователь знает о возможностях и ограничениях, связанных с использованием САПР, умеет критически оценивать результаты моделирования прикладных схем, знает основные разновидности и принципы построения используемых ММ, владеет методологией тестирования

и оценки качества ММ и умеет корректировать описания ММ с целью устранения их отдельных недостатков, выявленных в процессе тестирования, то САПР, несомненно, будет его надёжным помощником, мощным и эффективным инструментальным средством разработки современной и конкурентоспособной РЭА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лозицкий С. Эволюция SPICE-совместимых макромоделей операционных усилителей. Современная электроника. 2005. №№ 4–6.
2. Лозицкий С. Методы анализа операционных схем в частотной области. Схемотехника. 2004. №№ 7–12; 2005. №№ 1–5.
3. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab. М.: Солон, 1999.
4. Разевиг В.Д. Система проектирования OrCAD 9.2. М.: Солон, 2001.
5. Достал И. Операционные усилители. Пер. с англ. М.: Мир, 1982.
6. Jung W. LT1056 Improved JFET Op Amp Macromodel Slews Asymmetrically. Design Note DN43. Linear Technology Corporation, January 1991.





Industrial Electronic Engineers, Inc.

- Операторские терминалы с последовательным интерфейсом RS-232/422
- Вакуумно-люминесцентные индикаторы с последовательным и параллельным интерфейсом
- Символы высотой 5, 9 и 11мм
- Поддержка кириллицы
- Температурный диапазон
– 40...+85°C (для индикаторов)
– 20...+75°C (для операторских терминалов)

ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ



Официальный дистрибьютор продукции IEE – компания ПРОСОФТ
 (495) 234-06-36 • www.prosoft.ru • info@prosoft.ru