

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

(часть 1)

Сергей Лозицкий (г. Брянск)

В статье рассмотрены схемы, методики и сценарии тестирования макромоделей (ММ) операционных усилителей (ОУ) средствами САПР OrCAD. Результаты рассмотренных примеров тестирования показывают, что, к сожалению, достаточно часто параметры ММ ОУ не соответствуют паспортным данным реальных ОУ. Поэтому тщательное и всестороннее тестирование макромоделей ОУ является единственной гарантией исключения ошибок при моделировании прикладных операционных схем. На примерах показано, что выявленные в процессе тестирования недостатки ММ ОУ во многих случаях могут быть устранены корректировкой (как правило, незначительной) описания макромодели. Статья ориентирована на специалистов, занимающихся практической разработкой автоматики, электроники, измерительной техники.

Данная статья логически завершает начатое в цикле статей [1], обсуждение проблем и особенностей моделирования ОУ средствами САПР OrCAD.

Макромодель – всегда упрощение, поэтому она в принципе не может абсолютно точно воспроизвести всё многообразие свойств реального ОУ. К ММ ОУ предъявляются требования точности, экономичности и универсальности. Эти требования противоречивы. Так, например, повышение точности и универсальности ММ достигается за счёт усложнения схемы замещения ОУ [1], что при прочих равных условиях увеличивает машинное время её анализа, т.е. делает ММ менее экономичной.

Точность ММ ОУ – количественная оценка степени совпадения результатов тестирования ММ ОУ средствами САПР с результатами тестирования реального ОУ с помощью измерительного оборудования. Следует заметить, что техническая документация а ОУ (Datasheet) – это ни что иное, как протокол результатов аппаратного тестирования параметров ОУ данного типа, часто дополненный описанием его специфических особенностей и рекомендациями по применению.

Важно понимать, что один и тот же параметр ММ ОУ может оказаться крайне важным (доминирующим) в одной ситуации использования ММ и второстепенным (или даже абсолютно не важным) в другой. Рассмотрим два примера.

*Пример 1.* ММ используется для моделирования ОУ, входящего в состав усилителя сигнала термопары, постоянная времени (показатель, характеризующий тепловую инерционность) которой равна 100 с. Очевидно, что в этом случае важно, чтобы ММ точно моделировала входные статические параметры реального ОУ, и в первую очередь – напряжение смещения и его температурный дрейф (доминирующие параметры). Точность моделирования частотных и динамических параметров (частоты единичного усиления, максимальной скорости изменения выходного напряжения и т.д.) ОУ в данном случае не имеет существенного значения.

*Пример 2.* ММ моделирует ОУ, входящий в состав драйвера высокоскоростной линии связи на витой паре проводов. В этом случае важно, чтобы ММ точно моделировала динамические параметры (в первую очередь – максимальную скорость изменения

выходного напряжения) и выходное сопротивление ОУ, а к точности моделирования статических параметров ОУ предъявляются весьма умеренные требования.

Если в анализируемой схеме расхождение поведения реального ОУ и его ММ невелико и устраивает разработчика, то говорят, что ММ адекватна оригиналу. Адекватность ММ ОУ – это воспроизведение макромоделью с необходимой точностью и полнотой всех свойств реального ОУ, существенных для моделирования данной прикладной схемы. Важно понимать, что понятие адекватности ММ ОУ не имеет смысла в отрыве от специфики задачи, решаемой моделируемым ОУ в прикладной схеме.

Из сказанного следует, что вывод о степени соответствия макромодели ММ ОУ и реального ОУ может быть сделан только на основании результатов сравнительного анализа их параметров. Таким образом, разработчику аналоговой РЭА, использующему схемотехнические САПР, знание параметров и особенностей ММ ОУ необходимо в такой же степени, как и знание параметров реальных ОУ. Параметры реальных ОУ приводятся в технической документации (Datasheet), которая доступна на сайтах фирм-изготовителей. К сожалению, найти сведения о параметрах и особенностях ММ ОУ в доступных источниках информации удаётся далеко не всегда. Впрочем, этому имеется объяснение: в настоящее время в мире выпускается огромное количество различных типов ОУ, а их номенклатура стремительно (практически ежедневно) расширяется и обновляется. Из сказанного следует, что пользователь САПР должен уметь оперативно получать объективную информацию о параметрах ММ ОУ самостоятельно. В принципе у поль-

зователя САПР имеется две возможности получить информацию о параметрах ММ ОУ:

- анализируя схему замещения ОУ;
- тестируя параметры ММ ОУ средствами САПР.

Каждый из этих способов имеет свои преимущества и недостатки. Достоинства анализа схемы замещения ОУ [1] заключаются в том, что его результаты позволяют разработчику:

- понять принципы и особенности работы схемы ММ;
- определить перечень моделируемых параметров реального ОУ;
- оценить погрешности моделирования отдельных параметров ОУ;
- осознанно изменять (корректировать) величины параметров ММ ОУ;
- модифицировать схему замещения ОУ с целью расширения номенклатуры моделируемых параметров.

Однако использование аналитических методов для получения численных величин параметров ММ ОУ (паспортизации ММ ОУ) крайне непродуктивно, поскольку сопряжено с громоздкими расчётными процедурами, при выполнении которых велика вероятность совершения ошибки. Возникает закономерный вопрос: разумно ли заниматься «ручным» анализом схемы замещения ОУ, имея в своём распоряжении подсистему схемотехнического моделирования современной САПР? Ответ на этот вопрос очевиден – конечно, неразумно. Тестирование ММ ОУ средствами САПР позволяет не только получить с наименьшими затратами числовые величины её параметров, но, кроме того, построить графики зависимостей параметров ММ ОУ от различных влияющих факторов, которые наглядно сопоставимы с графиками, приводимыми в Data-sheet.

Принципиально важным является то обстоятельство, что в процессе тестирования ММ ОУ нас не интересует внутреннее устройство схемы замещения – ОУ рассматривается как «чёрный ящик» с пятью внешними выводами. Тестирование ММ ОУ – это процесс получения информации о её параметрах и характеристиках по результатам анализа средствами САПР напряжений на *внешних* выводах схемы замещения ОУ и токов, протекающих через эти выводы.

Номенклатура моделируемых параметров ОУ и точность их моделирования зависит от следующих факторов:

- конфигурации схемы замещения ОУ (ММ Бойля и её модификации, МРЗ ММ, ММ упрощённого транзисторного уровня, оригинальные фирменные ММ и т.д.);
- правильности (оптимальности) параметров (номиналов резисторов и конденсаторов, токов и/или напряжений источников и т.п.) компонентов схемы замещения ОУ.

Ограничения перечня и точности моделируемых параметров ОУ, обусловленные конфигурацией схемы используемой ММ, достаточно детально рассмотрены в [1]. Результаты тестирования большого количества ММ ОУ показывают, что, к сожалению, случаи задания разработчиками ММ неоптимальных величин параметров (атрибутов) компонентов схемы замещения являются далеко не единичными. Однако если схема ММ ОУ известна и пользователь знает принципы её работы, то устранение недостатков ММ, являющихся следствием ошибки, допущенной разработчиком ММ, обычно не вызывает затруднений. Ниже приведён ряд примеров доработок схем замещения ОУ, позволяющих устранить отдельные недостатки ММ, которые обусловлены как несовершенством конфигурации схемы замещения ОУ, так и неправильным заданием числовых параметров компонентов схемы ММ.

Будем использовать следующие обозначения параметров ММ ОУ:

- $A_{VCM}$  – модуль коэффициента усиления синфазного сигнала;
- $A_{VD}$  – модуль коэффициента усиления дифференциального сигнала;
- $A_{VDO}$  – коэффициент усиления дифференциального сигнала на постоянном токе;
- $C_{CM}$  – синфазная составляющая входной ёмкости;
- $C_D$  – дифференциальная составляющая входной ёмкости;
- $CMRR$  – модуль коэффициента подавления синфазного сигнала;
- $F_T$  – частота единичного усиления ММ ОУ;
- $GBP$  – величина произведения «усиление × частота»:  $A_{VD}(F) \times F$ ;
- $I_{BI}$  – входной ток инвертирующего входа ММ ОУ;

- $I_{BN}$  – входной ток неинвертирующего входа ММ ОУ;
- $I_B = 0,5(I_{BN} + I_{BI})$  – средний входной ток ММ ОУ;
- $I_{OS} = I_{BN} - I_{BI}$  – разность входных токов  $I_{BI}$  и  $I_{BN}$ ;
- $I_{OUT \lim \rightarrow}$  – максимальная величина вытекающего выходного тока ММ ОУ;
- $I_{OUT \lim \leftarrow}$  – максимальная величина втекающего выходного тока ММ ОУ;
- $I_Q$  – ток потребления при отсутствии нагрузки выхода ММ ОУ (в режиме холостого хода выхода);
- $I_{SP}$  – ток потребления от источника положительного напряжения питания;
- $I_{SM}$  – ток потребления от источника отрицательного напряжения питания;
- $OvSh$  – относительная величина, в %, максимального выброса переходной характеристики ММ ОУ в заданной схемной конфигурации;
- $P_M$  – запас устойчивости по фазе ММ ОУ, охваченного 100-% ОС (включенного по схеме неинвертирующего повторителя напряжения);
- $P_{MGN}$  – запас устойчивости по фазе ММ ОУ, охваченного ОС такой глубины, при которой его коэффициент усиления шума [2] равен заданной величине  $G_N$ ;
- $R_{IND}$  – дифференциальное входное сопротивление ММ ОУ на постоянном токе;
- $R_{INCM}$  – синфазное входное сопротивление ММ ОУ на постоянном токе;
- $S_{R\uparrow}$  – максимальная скорость нарастания выходного напряжения;
- $S_{R\downarrow}$  – максимальная скорость спада выходного напряжения;
- $TCV_{OS}$  – температурный коэффициент напряжения смещения;
- $TCI_B$  – температурный коэффициент входного тока ММ ОУ;
- $TCI_{OS}$  – температурный коэффициент разности входных токов ММ ОУ;
- $t_{S8}$  – время установления переходной характеристики ММ ОУ в заданной схемной конфигурации с точностью  $\delta$  [%];
- $V_{CM \min}, V_{CM \max}$  – границы диапазона изменения синфазного напряжения ММ ОУ, в котором гарантируется заданная величина коэффициента подавления синфазного сигнала;

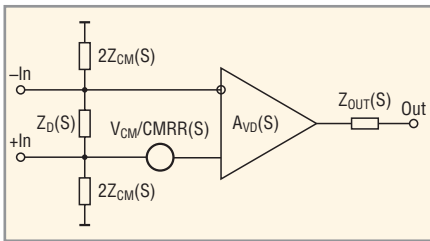


Рис. 1. Функциональная схема линейризованной схемы замещения ОУ

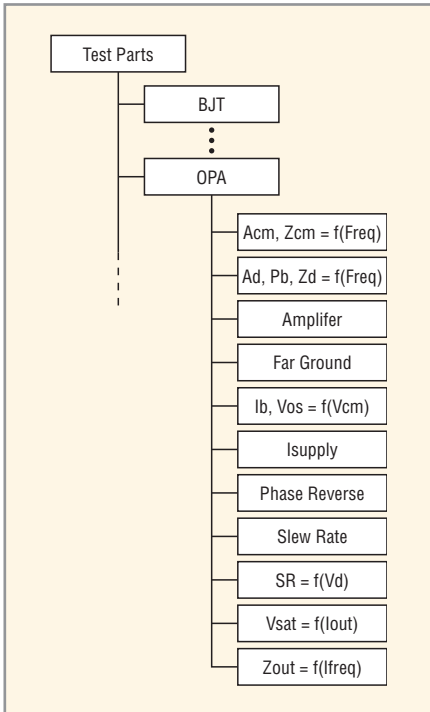


Рис. 2. Пример организации файловой структуры

- $V_{OS}$  – напряжение смещения входа ММ ОУ;
- $V_{SAT M}$  – напряжение насыщения выхода ММ ОУ относительно отрицательного напряжения  $V_{SM}$  питания;
- $V_{SAT P}$  – напряжение насыщения выхода ММ ОУ относительно положительного напряжения  $V_{SP}$  питания;
- $Z_{IN CM}$  – модуль синфазной составляющей входного сопротивления;
- $Z_{IN D}$  – модуль дифференциальной составляющей входного сопротивления;
- $Z_{OUT}$  – модуль выходного сопротивления.

Условные обозначения величин, определяющих условия тестирования ММ ОУ:

- $C_L$  – ёмкость нагрузки тестируемой ММ ОУ;
- $G_N$  – коэффициент усиления шума [2] схемы тестирования;
- $R_L$  – активное сопротивление нагрузки тестируемой ММ ОУ;

- $I_{OUT}$  – выходной ток ММ ОУ;
- TEMP – температура окружающей среды (моделируемой схемы);
- $V_{CM}$  – уровень синфазного напряжения на входах ММ ОУ;
- $V_D$  – уровень дифференциального входного напряжения (разность напряжений неинвертирующего и инвертирующего входов ММ ОУ);
- $V_S$  – размах питающих напряжений  $V_{SP}$  и  $V_{SM}$ :  $V_S = V_{SP} - V_{SM}$ .

Теперь уместно кратко напомнить об особенностях тестирования ОУ в различных режимах анализа. На постоянном токе (режим DC Sweep, Bias Point Detail) и во временной области (режим Transient) анализируется нелинейная схема замещения ОУ. Результаты анализа нелинейной схемы замещения ОУ существенно зависят от уровня входного испытательного сигнала. Свойства нелинейной схемы ММ ОУ определяются большим количеством параметров и графических зависимостей. В частотной области (в режиме AC Sweep) анализируется линейризованная схема ММ ОУ, которая существенно проще полной (нелинейной) схемы замещения ОУ. Функциональная схема линейризованной ММ ОУ изображена на рис. 1.

Поведение ММ ОУ в частотной области не зависит от уровней входных сигналов и полностью характеризуется следующим набором параметров:

- $A_{VD}(S)$  – коэффициент усиления дифференциального входного сигнала;
- CMRR(S) – коэффициент подавления синфазного входного сигнала;
- $Z_D(S)$  – дифференциальная составляющая входного сопротивления;
- $Z_{CM}(S)$  – синфазная составляющая входного сопротивления;
- $Z_{OUT}(S)$  – выходное сопротивление.

Ниже показано, что для получения достаточно полной информации о параметрах тестируемой ММ необходимо проанализировать её поведение в одиннадцати различных схемах включения и вывести на экран Probe несколько десятков графиков. Это требует значительного времени. Практика показала, что для минимизации затрат времени на тестирование ММ ОУ необходимо выполнять следующие рекомендации.

Все файлы, относящиеся к каждой из схем тестирования, необходимо хранить в отдельных папках, имею-

щих содержательные имена. Фрагмент структуры «файлового хозяйства» автора изображен на рис. 2.

При выводе результатов анализа схемы тестирования в наглядной графической форме много времени затрачивается на задание конфигурации (атрибутов) экрана Probe: количества окон (Plots) и Y-осей в каждом из них, выражений (Trace Expressions), определяющих трассы вывода, масштабов (линейный или логарифмический) осей и т.п. Для того чтобы эту трудоёмкую процедуру не осуществлять всякий раз при тестировании каждой новой ММ ОУ, атрибуты экрана Probe для каждого из режимов анализа (DC Sweep, AC Sweep, Transient) необходимо сохранить при помощи команды Display Control [3, 4]. Для сохранения текущей конфигурации экрана необходимо:

- последовательно выбрать опции меню Window и Display Control...;
- в строке New Name открывшегося окна Display Control набрать имя сохраняемой конфигурации экрана Probe (используйте содержательные имена сохраняемых конфигураций экрана, например, Bode Plot Avd and Phase Margin);
- последовательно щёлкнуть указателем мыши на кнопках Save и Close.

После выполнения указанных действий окно Display Control закрывается, а атрибуты экрана Probe автоматически записываются в файл с именем текущей схемы и расширением prb. Для восстановления сохранённой конфигурации экрана достаточно:

- последовательно выбрать опции меню Window и Display Control...;
- из списка доступных конфигураций экрана, индицируемых на вкладке Displays, выбрать имя ранее сохранённой конфигурации (имя выбранной конфигурации дублируется в строке New Name) и щёлкнуть указателем мыши по кнопке Restore.

После выполнения указанных действий окно Display Control закрывается, и на восстановленный экран Probe выводятся результаты последнего моделирования тестируемой схемы.

Для получения численных величин параметров тестируемой ММ ОУ часто требуется точно позиционировать (устанавливать) электронные

курсоры Probe в точки трассы с заданными величинами X- или Y-координаты. С помощью мыши и клавиатуры точно установить курсор в точку с заданными координатами обычно не удаётся. Точное позиционирование курсора осуществляйте с помощью команд поиска (Search Commands) точки трассы, отвечающей определённым условиям [3, 4]. Для точной установки первого курсора в точку графика с заданной X-координатой необходимо:

- нажатием клавиши Home установить первый курсор в самую левую точку видимой на экране части графика;
- набрать комбинацию «горячих» клавишей Ctrl+Shift+S или курсором мыши щёлкнуть на иконке с изображением бинокля;
- в открывшемся окне Search Command набрать команду «SXV (численное\_значение\_X)»;
- выбором в окне Search Command опции Cursor To Move 1 указать, что должен позиционироваться первый курсор, и щёлкнуть указателем мыши на кнопке ОК или нажать клавишу Enter.

После выполнения указанных действий первый курсор перемещается в точку графика с заданной величиной X-координаты. Процедура позиционирования курсора в точку трассы с заданной величиной Y-координаты осуществляется аналогично с той лишь разницей, что вместо команды поиска «SXV (численное\_значение\_X)» необходимо использовать команду «SLE (численное\_значение\_Y)». Полный перечень, синтаксис и особенности использования Search Command детально рассмотрены в [3].

В процессе тестирования ММ ОУ часто требуется перемещать (переключать) курсор с одной трассы экрана Probe на другую без изменения его X-координаты. В дальнейшем для выполнения указания «переключить курсор с трассы А на трассу В» используйте следующие комбинации «горячих» клавиш Probe:

- переключение первого курсора на предыдущую (следующую) трассу: Ctrl + ← (Ctrl + →);
- переключение второго курсора на предыдущую (следующую) трассу: Ctrl + Shift + ← (Ctrl + Shift + →).

Практика показала, что выполненные рассмотренных рекомендаций

позволяет существенно ускорить процесс тестирования ММ ОУ.

Наибольших затрат времени требует многовариантный анализ схемы тестирования. Время анализа, разумеется, зависит от производительности компьютера. Указанное ниже суммарное машинное время (величина переменной Total Job Time, которая выводится в последней строке OUTFайла) анализа некоторых схем тестирования получено на компьютере AMD Athlon(tm) XP 2000+; 1,66 ГГц; 256 Мб ОЗУ.

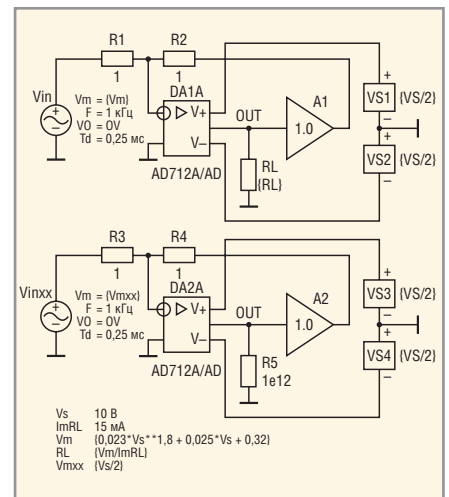
**Токи потребления  $I_Q$ ,  $I_{SP}$ ,  $I_{SM}$**

Схема тестирования, изображённая на рис. 3, позволяет получить зависимость статической составляющей  $I_Q$  тока потребления ММ ОУ от размаха  $V_S$  питающих напряжений  $V_{SP}$ ,  $V_{SM}$ , а также дать ответы на следующие вопросы:

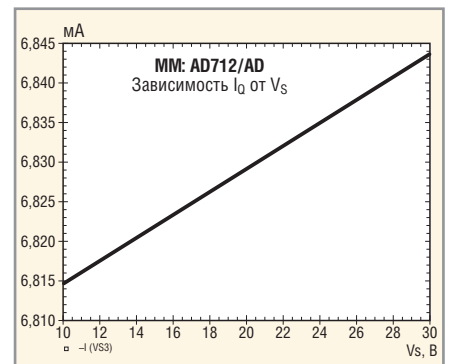
- моделирует ли ММ ОУ динамику токов потребления  $I_{SP}$ ,  $I_{SM}$ ?
- корректно ли ММ ОУ моделирует токи потребления  $I_{SP}$ ,  $I_{SM}$  в случае ограничения выходного напряжения ОУ?

Зависимость  $I_Q$  от  $V_S$  (см. рис. 4) строится по результатам анализа схемы рис. 3 в режиме DC Sweep. Диапазон свипирования глобального параметра  $V_S$  необходимо выбирать с учётом допустимого диапазона изменения питающего напряжения ОУ конкретного типа. На дисплей выводится трасса:  $-I(VS3)$ .

В Datasheet [www.analog.com] на ОУ AD712 указывается, что при напряжении питания  $\pm 15$  В типовая величина статического тока потребления (Quiescent Current) равна 5 мА. В одном корпусе ИМС AD712 размещено два усилителя (Dual OPA), и в этой связи возникает вопрос: в Datasheet указан ток потребления одного ОУ или суммарный? К счастью, развеять возникшие сомнения нетрудно, поскольку из Datasheet следует, что ИМС AD711, AD712 и AD713 составляют одно семейство и различаются количеством ОУ, размещённых на кристалле (соответственно один, два и четыре ОУ). Из Datasheet на ИМС AD711 и AD713 следует, что при  $V_S = \pm 15$  В токи потребления  $I_{Q AD711} = 2,5$  мА и  $I_{Q AD713} = 10$  мА. Теперь совершенно очевидно, что в Datasheet рассмотренного семейства ИМС указан суммарный ток потребления



**Рис. 3. Схема тестирования токов потребления ММ ОУ**



**Рис. 4. Зависимость статического тока потребления ММ AD712/AD от размаха питающих напряжений**

всех ОУ. Также совершенно очевидно, что ММ AD712/AD должна моделировать ток, потребляемый только одним ОУ, т.е. при  $V_S = \pm 15$  В ток потребления ММ в идеальном случае должен быть равным 2,5 мА. Значительное расхождение результатов тестирования ММ с Datasheet является следствием ошибки, допущенной разработчиком ММ. К счастью, эту ошибку легко исправить. Анализ схемы ММ показал, что точная калибровка желаемой величины тока  $I_Q$  осуществляется с помощью источника постоянного тока ISY, включенного между шинами питания. Найдите в описании ММ AD712/AD строку

```
ISY 99 50 -95E-3
```

и откорректируйте её следующим образом:

```
ISY 99 50 -97.544E-3 ;My correction. Old Value=-95E-3
```

Протестируйте доработанную ММ, чтобы убедиться в том, что при

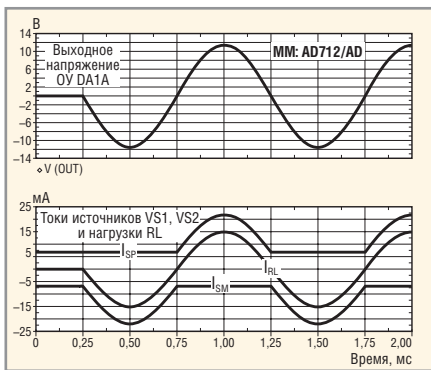


Рис. 5. Пример корректного моделирования MM ОУ динамики тока потребления

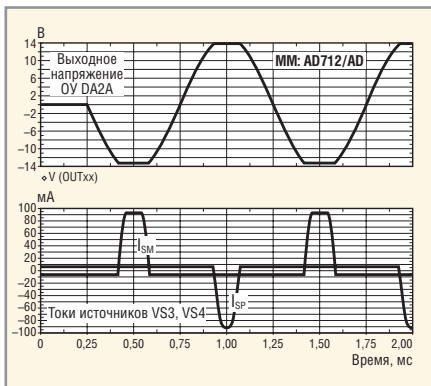


Рис. 6. Пример некорректного моделирования MM ОУ тока потребления при ограничении выходного напряжения

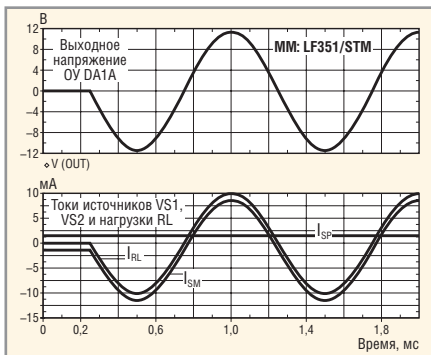


Рис. 7. Пример некорректного моделирования MM ОУ динамики тока потребления

$V_S = 10$  В и  $V_S = 30$  В она потребляет токи, равные соответственно 2,47 и 2,50 мА.

Определить факт моделирования динамики тока потребления позво-

Таблица 1. Зависимость амплитуды сигнала источника  $V_m$  от размаха питающих напряжений

Размах питающих напряжений $V_S$ , В	Амплитуда $V_m$ входного сигнала, В	Разность напряжений $V_{sp}$ и $V_m$ , В
3,0	0,56	0,94
5,0	0,86	1,64
10	2,02	2,98
30	11,55	3,45

ляют графики токов  $I_{SP}$ ,  $I_{SM}$  (см. рис. 5), построенные по результатам анализа схемы рис. 3 в режиме Transient. На дисплей выводятся трассы:  $-I(VS1)$ ,  $I(VS2)$  и  $I(R3)$ . Для большей наглядности и исключения неконтролируемого ограничения выходного напряжения ОУ DA1A на верхнем графике рис. 5 выводится трасса  $V(OUT)$  выходного напряжения этого ОУ.

В [1] отмечается, что некоторые MM неправильно моделируют токи потребления в том случае, когда ОУ работает в режиме ограничения выходного напряжения. Выявить указанный недостаток тестируемой MM позволяют временные диаграммы выходного напряжения (трасса  $V(OUTxx)$ ) ОУ DA2A и токов его потребления (трассы  $-I(VS3)$ ,  $I(VS4)$ ), изображённые на рис. 6.

На временных диаграммах (см. рис. 6) хорошо видно, что весьма значительные всплески токов потребления  $I_{SP}$ ,  $I_{SM}$  MM AD712/AD имеются только на тех временных интервалах, когда происходит ограничение соответствующей полуволны выходного напряжения ОУ DA2A. Обратите внимание на то, что при ограничении выходного напряжения ОУ DA2A ток соответствующего источника питания  $VS3$ ,  $VS4$  меняет знак (изменяет своё обычное направление). Совершенно очевидно, что токи потребления реального ОУ в принципе не могут изменять свои направления. Итак, результаты анализа показывают, что MM AD712/AD некорректно моделирует токи потребления в случае ограничения выходного напряжения ОУ. Причины возникновения этого недостатка, присущего целому ряду MM, а также варианты доработки схем замещения ОУ, устраняющие этот недостаток, рассмотрены в статье [1].

Питающие напряжения и максимальные токи нагрузки современных ОУ изменяются в достаточно широких пределах, и поэтому целесообразно задавать их величины с помощью параметров  $V_S$  (размах питающих напряжений) и  $I_{mRL}$  (амплитуда тока нагрузки). При этом величины амплитуды  $V_m$  напряжения источника  $V_{in}$  входного сигнала и сопротивления  $R_L$  нагрузки рассчитываются автоматически по формулам, определённым с помощью директивы PARAMS. Для ряда

наиболее часто используемых напряжений питания в табл. 1 указаны величины амплитуды  $V_m$  входного синусоидального сигнала, автоматически получаемые в результате расчёта по формуле.

При тестировании MM Rail-to-Rail ОУ в режиме холостого хода выхода для достижения уверенного ограничения выходного сигнала необходимо величину амплитуды источника сигнала  $V_{inxx}$  увеличить на 1...2 В, то есть задать величину его атрибута  $V_m$ , например, следующим образом:

$$V_m = \{V_{inxx} + 1.5\}.$$

Если протестировать в схеме рис. 3 классическую MM Бойля, например ОРА130/BB (burr\_brn.lib), то можно убедиться, что токи её потребления не зависят от тока  $I_{RL}$ , протекающего через нагрузку. Примером некорректного моделирования динамики токов потребления являются MM ОУ фирмы STMicroelectronics [www.st.com]. Сказанное наглядно иллюстрируют временные диаграммы (см. рис. 7), полученные в результате тестирования MM LF351/STM.

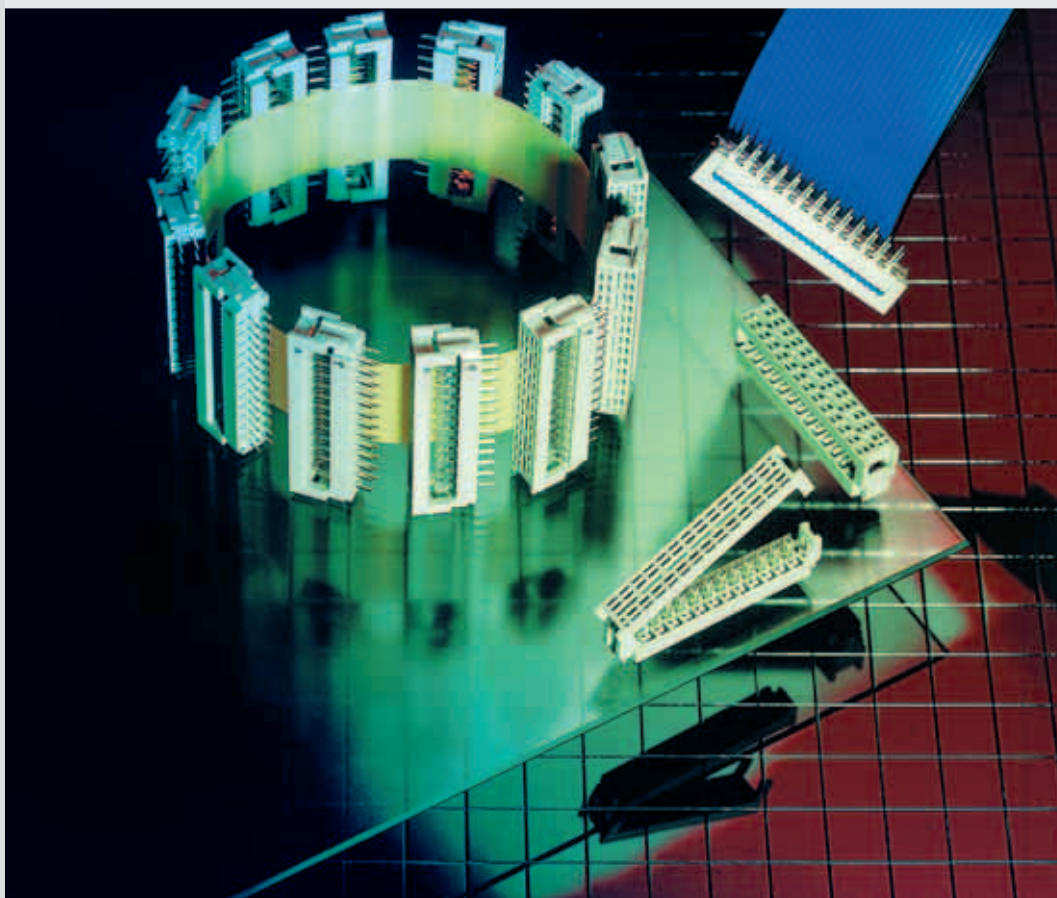
Из рис. 7 следует, что ток  $I_{SP}$ , протекающий через источник  $V_{S1}$  положительного напряжения питания, не зависит от тока  $I_{RL}$  нагрузки, а ток  $I_{SM}$  источника  $V_{S2}$  отрицательного напряжения питания является переменным (!), что, конечно же, не соответствует действительности.

Продолжение следует.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лоцицкий С. Эволюция SPICE-совместимых макромоделей операционных усилителей. Современная электроника. 2005. №№ 4–6.
2. Лоцицкий 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.

# Соединители и электротехнические компоненты



**B BULGIN**

**CONEC**

**Switchcraft**

*Grayhill*

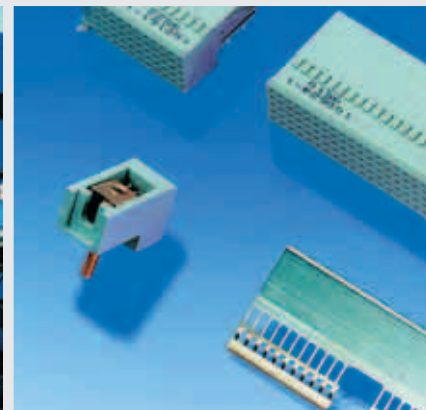
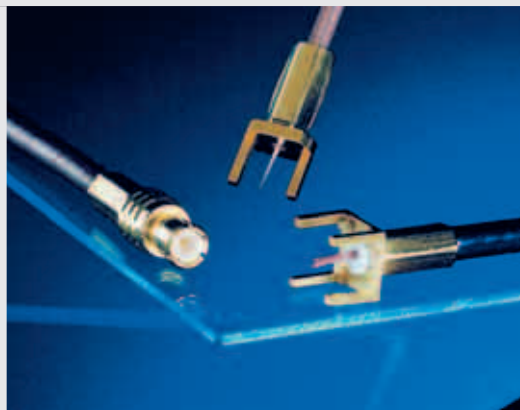
**OMRON**

*tyco* **AMP**  
Electronics



Безупречный контакт в любых условиях!

- Весь ассортимент разъёмов и компонентов коммутации от мировых производителей
- Электромеханические и твердотельные реле от компании Omron
- Технические консультации
- Комплексные поставки
- Создание склада для постоянных клиентов



**PROSOFT**<sup>®</sup>

**ПРОСОФТ — АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА**

Телефон: (495) 234-0636 • E-mail: [info@prochip.ru](mailto:info@prochip.ru) • Web: [www.prochip.ru](http://www.prochip.ru)