

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

(часть 3)

Сергей Лозицкий (г. Брянск)

В третьей части статьи продолжено рассмотрение особенностей и проблем макромоделей ОУ, даны методики их тестирования и описаны способы устранения ошибок при моделировании прикладных схем. Статья ориентирована на специалистов, занимающихся практической разработкой автоматики, электроники, измерительной техники.

НАПРЯЖЕНИЯ НАСЫЩЕНИЯ ВЫХОДА ММ ОУ

Результаты тестирования ММ ОУ в схеме на рис. 22 позволяют построить графики зависимостей напряжений $V_{SAT M}$, $V_{SAT P}$ насыщения выхода ОУ от его тока нагрузки I_{OUT} .

Треть напряжения питания V_s приложена к входам ОУ DA1 в такой полярности, при которой он находится в состоянии положительного насыщения выхода. ОУ DA2 находится в состоянии отрицательного насыщения выхода. Токи, протекающие через выходы ОУ DA1 и DA2, равны текущей величине тока I_{OUT} источника

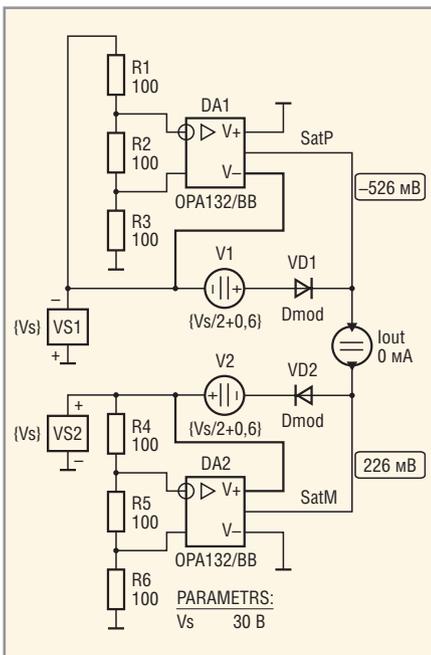


Рис. 22. Схема тестирования напряжений насыщения выхода ММ ОУ

I_{OUT} . Напряжение $V_{SAT P}$ положительного насыщения выхода ОУ равно абсолютной величине узлового напряжения $V(SatP)$, а напряжение отрицательного насыщения $V_{SAT M}$ – величине узлового напряжения $V(SatM)$. Если ток источника I_{OUT} превышает предельные величины вытекающего $I_{OUT LIM \leftarrow}$ и вытекающего $I_{OUT LIM \rightarrow}$ токов выхода ОУ (токов короткого замыкания выхода ОУ), то без принятия специальных мер узловые напряжения $V(SatP)$ и $V(SatM)$ неограниченно возрастают. Для исключения этой нежелательной ситуации используются ограничители напряжения, реализованные на компонентах VD1, VD2, V1, V2, которые ограничивают выходные напряжения ОУ на уровнях, приблизительно равных половине напряжения источника питания V_s .

Графики зависимостей напряжений $V_{SAT M}$, $V_{SAT P}$ от тока I_{OUT} классической ММ Бойля OPA132/BB, пост-

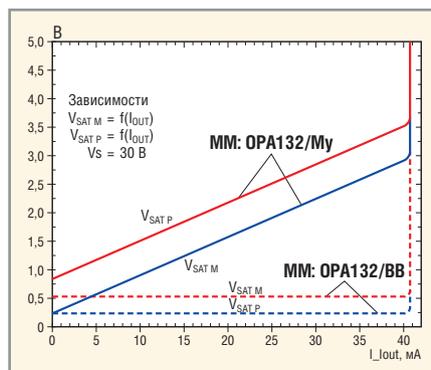


Рис. 23. Характеристики насыщения выхода двух ММ ОУ OPA132

роенные по результатам анализа схемы рис. 22 в режиме DC Sweep при вариации тока источника I_{OUT} в диапазоне значений 0...40 мА с приращением 0,01 мА, изображены на рис. 23 (кривые с меткой ММ OPA132/BB).

На рис. 24 изображены характеристики насыщения реального ОУ OPA132, заимствованные из datasheet (www.ti.com).

Из сравнения результатов тестирования ММ с характеристиками реального ОУ следует, что ММ Бойля моделирует напряжение насыщения выхода ОУ при нулевом токе нагрузки, а также эффект ограничения выходного тока ОУ. Основной недостаток ММ Бойля заключается в том, что она не моделирует увеличение напряжений $V_{SAT M}$, $V_{SAT P}$ при изменении тока нагрузки ОУ от нуля до величины $I_{OUT LIM \leftarrow}$ и/или $I_{OUT LIM \rightarrow}$. Напряжения насыщения выхода ОУ и его ММ при токе нагрузки 40 мА отличаются на 2...3 В. Из сказанного следует, что в случае использования ММ Бойля достоверность результатов моделирования напряжения насыщения выхода ОУ при значительных токах нагрузки оказывается весьма низкой. Следует подчеркнуть, что особая опасность заключается в неоправданно оптимистичных вели-

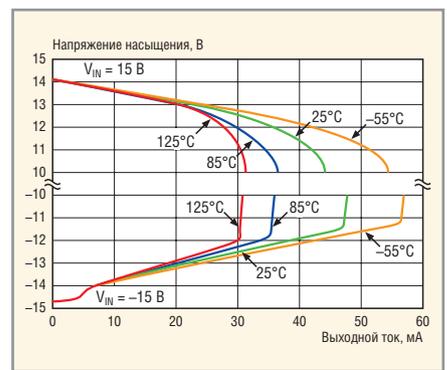


Рис. 24. Характеристики насыщения выхода реального ОУ OPA132

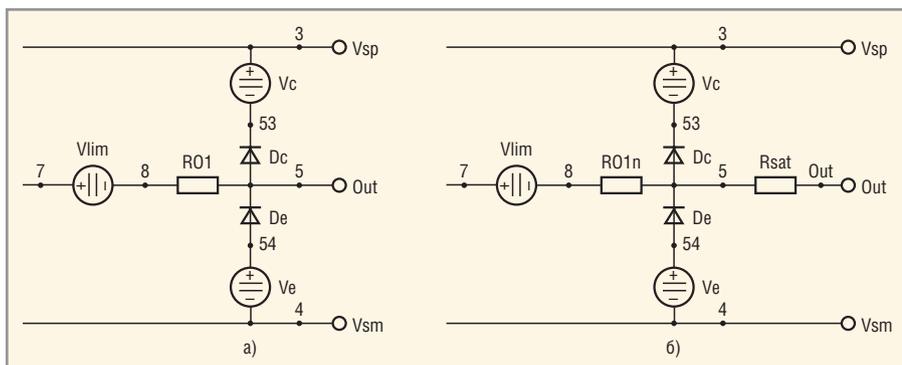


Рис. 25. Фрагмент схемы выходного каскада исходной (а) и доработанной (б) ММ Бойля

чинах напряжений $V_{SAT M}$, $V_{SAT P}$ ММ Бойля, поскольку ошибки моделирования верхней границы динамического диапазона практических схем остаются незамеченными пользователем. Возникает вопрос: можно ли улучшить ситуацию? К счастью, да. На рис. 23 кривые с меткой OPA132/My – это графики зависимостей напряжений $V_{SAT M}$, $V_{SAT P}$ от тока I_{OUT} доработанной ММ Бойля ОУ OPA132. Очевидно, что эти кривые значительно лучше соответствуют характеристикам насыщения выхода реального ОУ.

На рис. 25а изображён фрагмент схемы выходного каскада исходной ММ OPA132/BB (www.ti.com), а на рис. 25б – доработанной ММ OPA132/My.

Доработка заключается в добавлении в схему ММ дополнительного резистора R_{sat} и изменении сопротивления $RO1$. Сопротивление резистора R_{sat} рассчитывается по формуле:

$$R_{sat} = \frac{\Delta V_{SAT OPA}}{\Delta I_{OUT OPA}}$$

где: $\Delta V_{SAT OPA}$ – приращение напряжения насыщения выходного напряжения реального ОУ при изменении его выходного тока на величину $\Delta I_{OUT OPA}$.

Для того чтобы в результате доработки ММ не изменилось её выход-

ное сопротивление на малом сигнале, необходимо сопротивление резистора $RO1n$ рассчитывать по формуле:

$$RO1n = RO1 - R_{sat} \quad (4)$$

Следует заметить, что если в результате расчёта по формуле (4) величина резистора $RO1n$ оказывается отрицательной, то именно эту (отрицательную) величину необходимо использовать в описании доработанной ММ. Для преобразования ММ OPA132/BB в ММ OPA132/My необходимо в описании первой из них внести следующие коррективы:

```
.SUBCKT OPA132/My 1 2 3 4 Out
* ;old Pins: 1 2 3 4 5
.....
*RO1      8      5      20
      ;My Remark
RO1n      8      5      -
47.5      ;My Correction
Rosat     5      Out    67.5
      ;My Addition
.....
VC        3      53     DC
1.50      ;My Correction.
*Old Value=1.20
.....
.ENDS OPA132/My
```

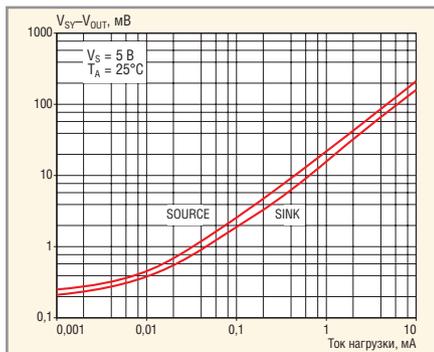


Рис. 27. Характеристики насыщения Rail-to-Rail ОУ AD8605

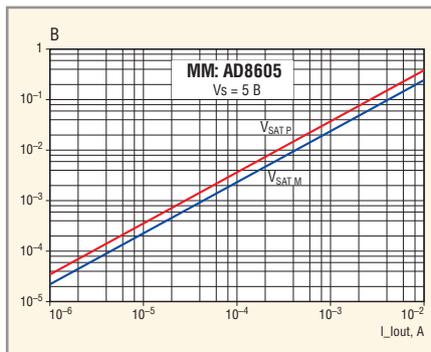


Рис. 28. Характеристики насыщения ММ ОУ AD8605

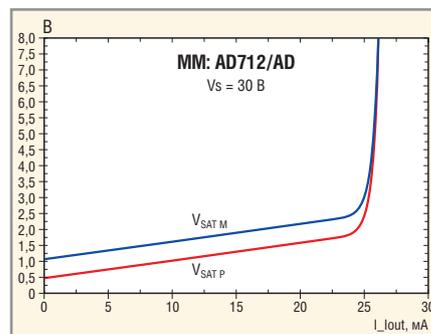


Рис. 26. Характеристики насыщения ММ AD712/AD

ММ более реалистично моделирует ограничение выходного тока ОУ (см. рис. 26).

На рис. 27 изображены характеристики насыщения Rail-to-Rail ОУ AD8605, заимствованные из data-sheet (www.analog.com), а на рис. 28 – результаты тестирования ММ AD8605.

Кривые насыщения ММ и реального ОУ заметно различаются только при крайне малых токах нагрузки. Однако это едва ли можно считать серьёзным недостатком ММ, поскольку при малых токах нагрузки ОУ (меньших 10 мкА) напряжения насыщения ММ и реального ОУ отличаются на доли милливольт.

А теперь рассмотрим пример казуистического результата тестирования, который является следствием ошибки, допущенной разработчиком ММ ОУ. На рис. 29 изображены графики, построенные по результатам тестирования ММ AD743/AD.

Из этих графиков следует, что при токе нагрузки $I_{OUT} = 7,2$ мА напряжение $V_{SAT P}$ изменяет знак! При нулевом токе нагрузки напряжение $V_{SAT P}$ равно $-0,65$ В. Это означает, что выходное напряжение ММ ОУ на $0,65$ В больше напряжения питания ММ.

Совершенно очевидно, что выходное напряжение реального ОУ, рабо-

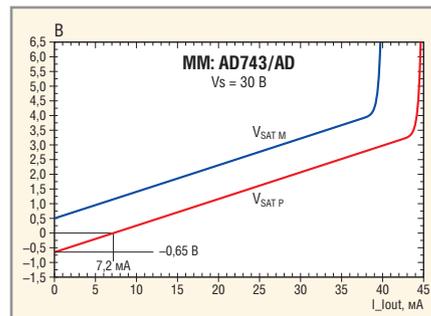


Рис. 29. Результаты тестирования ММ, некорректно моделирующей характеристики насыщения ОУ

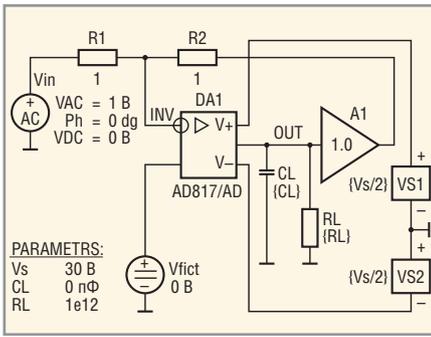


Рис. 30. Схема тестирования параметров ММ ОУ, зависящих от частоты входного дифференциального сигнала

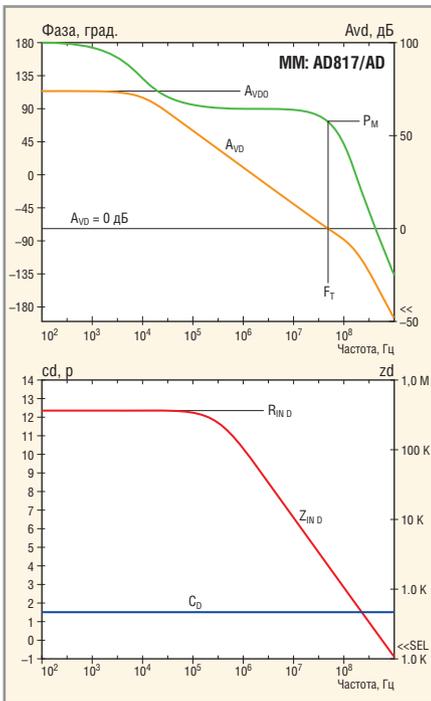


Рис. 31. Результаты тестирования ММ AD817/AD в схеме рис. 30

тающего в режиме холостого выхода, ни при каких обстоятельствах не может выходить за границы размаха питающих напряжений. Нам в очередной раз предстоит заняться корректировкой описания ММ. Найдите в описании ММ AD743/AD фрагмент:

```
v1 99 13 DC 187.5E-3
D1 12 13 DX
V2 14 50 DC 1.3375
```

и приведите его к следующему виду:

```
v1 99 13 DC 2.034 ;My
*Correction. Old Value=187.5E-3
D1 12 13 DX
V2 14 50 DC 2.234 ;My
*Correction. Old Value=1.3375
```

Теперь осуществите тестирование доработанной ММ и сравните его ре-

зультаты с рис. 29 и данными datasheet. Следует заметить, что рассмотренные недостатки ММ AD743/AD в той или иной мере присущи также ММ AD8041a/AD, LM358/STM, LM358/NS и некоторым другим.

Линейные параметры ММ ОУ, зависящие от частоты входного дифференциального сигнала

Схема тестирования, изображённая на рис. 30, позволяет получить исчерпывающую информацию о зависимости параметров линейризованной схемы замещения ОУ от частоты входного дифференциального сигнала.

Схема тестирования представляет собой инвертор напряжения, в котором выход ОУ DA1 «развязан» от цепи ОС (резисторы R1, R2) идеальным буфером с единичным коэффициентом передачи. Использование глобальных параметров RL, CL позволяет варьировать величины активной и ёмкостной составляющих нагрузки ОУ DA1 в процессе многовариантного анализа схемы. Источник нулевого напряжения V_{fict} (фиктивный источник напряжения) используется в качестве датчика тока, протекающего через неинвертирующий вход ОУ DA1. Совершенно очевидно, что потенциал неинвертирующего входа ОУ DA1 равен нулю и, следовательно, коэффициент A_{VD} усиления дифференциального сигнала этого ОУ равен отношению узловых напряжений $V(OUT)$ и $V(INV)$. Для построения графиков ЛАЧХ и ФЧХ коэффициента усиления дифференциального сигнала тестируемого ОУ необходимо на экран Probe вывести трассы, задаваемые выражениями: $DB(V(OUT)/V(INV))$ и $P(-V(OUT)/V(INV))$. Однако практика тестирования ММ ОУ показала, что вместо трассы $P(-V(OUT)/V(INV))$ удобнее использовать трассу $P(V(OUT)/V(INV))$, которая является графиком зависимости запаса устойчивости по фазе операционной схемы от величины её коэффициента усиления шума G_N [2]. Дифференциальное входное сопротивление $Z_{IN D}$ тестируемой ММ ОУ равно отношению напряжения узла INV к току, протекающему через неинвертирующий вход ОУ DA1 и фиктивный источник напряжения V_{fict} . Для построения графика зависимости $Z_{IN D}$ от частоты не-

обходимо на экран Probe вывести трассу $V(INV)/I(V_{fict})$. Следует заметить, что токи, протекающие через инвертирующий и неинвертирующий входы ОУ DA1, различаются на величину $0,5V(INV)/Z_{cm}$, и поэтому при определении Z_D нельзя ссылаться на ток инвертирующего входа ОУ. Несложный анализ показывает, что для построения графика зависимости дифференциальной входной ёмкости C_D тестируемой ММ от частоты необходимо на экран Probe вывести трассу $IMG(I(V_{fict})/V(INV))/(\pi \times \text{Frequency})$. На рис. 31 изображены графики рассмотренных зависимостей, построенные по результатам тестирования ММ ОУ AD817.

Частота F_T единичного усиления ММ ОУ численно равна X-координате курсора, позиционированного в точку трассы $dB(V(OUT)/V(INV))$ с нулевой ординатой (команда поиска: $sle(0)$). Теперь для определения величины P_M запаса устойчивости тестируемой ММ по фазе достаточно нажатием комбинации клавиш «Ctrl + →» переключить курсор на трассу $P(V(OUT)/V(INV))$ и считать величину его Y-координаты. Для определения приблизительных величин усиления A_{VDO} и входного сопротивления R_D ММ ОУ на постоянном токе необходимо считать Y-координату курсора, позиционированного в начало трасс $dB(V(OUT)/V(INV))$ и $V(INV)/I(V_{fict})$ соответственно. Если частота начальной точки трассы и частота полюса, на которой соответствующая кривая претерпевает излом, разнесены на декаду и более, то погрешности определения величин A_{VDO} и R_D не превышают 0,043 дБ (0,05%), и ими можно пренебречь. Следует заметить, что для упрощения и ускорения процедуры вывода на экран Probe графиков рассмотренных зависимостей можно использовать следующие макросы [3, 4]:

```
Pi2=6.28318531
Avd_dB=dB(V(OUT)/V(INV));
*Frequency Response OPA
Phase_opa=P(V(OUT)/V(INV)); Phase
*Response OPA
Zin_opa=V(INV)/I(Vfict); Zin OPA
Cd_in_opa=IMG(I(Vfict)/V(INV))/(
+(pi2*Frequency); Cd Input OPA
```

Иногда изготовитель указывает в datasheet не частоту F_T единичного усиления ОУ, а величину произведе-

ния «усиление × частота» (GBP или GBW) на некоторой фиксированной частоте F . В таких случаях целесообразно выводить на экран дисплея трассу $V(OUT) \times \text{Frequency}$, которая является графиком зависимости GBP от текущей частоты. Ордината курсора, позиционированного в точку трассы с абсциссой F , численно равна величине GBP тестируемой ММ ОУ на этой частоте. На верхнем графике рис. 32 изображена зависимость GBP от частоты, полученная в результате тестирования ММ ОУ LT1022, а на нижнем графике – классическая ЛАЧХ этой ММ.

В datasheet (www.linear.com) указывается, что ОУ LT1022 имеет типовую величину GBP = 8 МГц на частоте 1 МГц. Эти данные хорошо согласуются с результатами тестирования. Заметим, что поскольку $A_{VD}(F_T) = 1$, всегда выполняется условие $GBP(F_T) = F_T$.

В настоящее время выпускается достаточно большое количество так называемых недокомпенсированных ОУ (AD848, LF357, LM6165, ОРА37 и др.), устойчивость которых изготовитель гарантирует только в тех схемах включения, в которых коэффициент G_N усиления шума [2] превышает некоторую предельную величину. В паспортных данных таких ОУ указывается предельная (минимальная) величина G_N и соответствующая ей величина P_{MGN} запаса устойчивости по фазе. Для определения величины P_{MGN} тестируемой ММ недокомпенсированного ОУ необходимо:

- вывести на экран дисплея трассы $V(OUT)/V(INV)$ и $P(V(OUT)/V(INV))$;
- позиционировать курсор в точку трассы $V(OUT)/V(INV)$ с ординатой G_N ;
- «переключить» курсор с трассы $V(OUT)/V(INV)$ на трассу $P(V(OUT)/V(INV))$;
- в окне Probe Cursor считать Y-координату курсора, которая численно равна искомой величине P_{MGN} .

Впрочем, более наглядное представление о запасе устойчивости прикладной операционной схемы, в которой используется недокомпенсированный ОУ, даёт график зависимости запаса устойчивости по фазе этой схемы от величины её коэффициента усиления шума G_N (см. рис. 33).

Для построения этого графика необходимо:

- вывести на экран Probe трассу, определяемую макросом Phase_or;
- дважды щёлкнуть указателем мыши по X-оси графика, и в открывшемся окне Axis Settings на вкладке X Axis указателем мыши нажать кнопку Axis Variable;
- в открывшемся окне X Axis Variable в строке Trace Expression набрать выражение $V(OUT)/V(INV)$ и закрыть открытые окна нажатием кнопки ОК.

Из рис. 33 следует, что ММ AD848/AD при усилении $G_N = 5$ (минимальная величина усиления, оговариваемая в datasheet) имеет запас устойчивости по фазе $P_{MGN} = 56,59^\circ$ и находится на грани самовозбуждения при усилении $G_N = 1,346$.

В datasheet величины A_{VDO} , F_T и P_M часто нормируются при определённых величинах сопротивления и ёмкости нагрузки ОУ. Объясняется это тем, что испытательное оборудование, используемое в процессе тестирования реальных ОУ, имеет конечные величины активной и ёмкостной составляющих входного сопротивления. Очевидно, что величины A_{VDO} Z_{load} , F_T Z_{load} и P_M Z_{load} , полученные в результате тестирования нагруженного ОУ, зависят от величины выходного сопротивления ОУ. Это существенно запутывает ситуацию и создаёт предпосылки для ошибок, заключающихся в том, что влияние выходного сопротивления ОУ на его параметры может быть учтено дважды. Если ОУ с выходным сопротивлением R_{OUT} нагружен на сопротивление R_L , то в результате его тестирования будет получена следующая величина коэффициента усиления на постоянном токе:

$$A_{VDO RL} = \frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} A_{VDO}$$

Величина коэффициента усиления нагруженного ОУ $A_{VDO RL}$ отличается от истинной величины коэффициента усиления ОУ A_{VDO} , работающего в режиме холостого хода выхода, в $R_L/(R_L + R_{OUT})$ раз. В результате подключение к выходу ОУ ёмкости в его передаточной функции $A_{VD}(S)$ появляется дополнительный высокочастотный полюс [2], что вызывает уменьшение величин P_M и F_T . Из сказанного следует, что ММ ОУ, параметры которого нормируются в datasheet при оговорённых величинах R_L и CL , необходимо тестировать дважды: один раз при $R_L = \infty$, $CL = 0$ (в режиме холос-

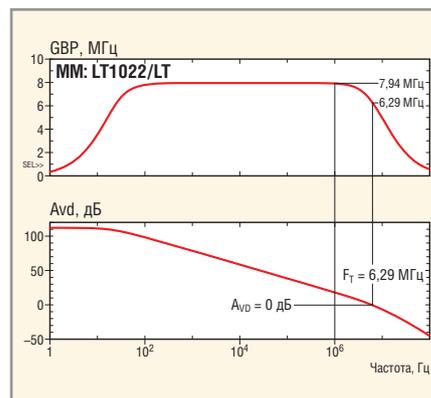


Рис. 32. Результаты тестирования АЧХ ММ LT1022/LT

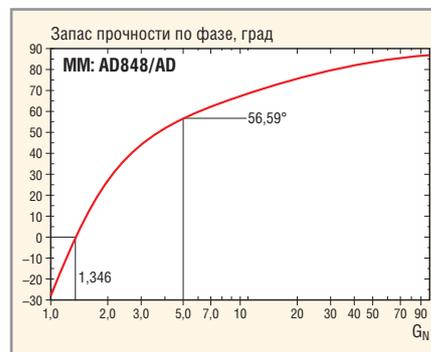


Рис. 33. Зависимость запаса устойчивости схемы от её коэффициента усиления шума G_N

того выхода ОУ) для определения истинных величин A_{VDO} , F_T и P_M и второй раз – при величинах R_L , CL , указанных в datasheet, для построения графиков и определения величин A_{VDO} Z_{load} , F_T Z_{load} и P_M Z_{load} , которые позволяют сделать выводы о степени соответствия параметров ММ и реального ОУ. Получить более полное представление о влиянии нагрузки ММ ОУ на её параметры позволяют графики параметрических зависимостей, построенные по результатам многовариантного анализа схемы при вариации величин параметров CL и RL .

Зависимость A_{VDO} от сопротивления RL нагрузки ярко выражена у Rail-to-Rail Output ОУ, поскольку они имеют высокое выходное сопротивление [1]. На верхнем графике рис. 34 изображена параметрическая зависимость A_{VDO} (трасса вывода: YatXstart(Avd_dB)) от сопротивления нагрузки RL , построенная по результатам многовариантного анализа ММ CMOS Rail-to-Rail ОУ AD8515.

Вариация RL в диапазоне значений от 100 Ом до 1 МОм вызывает изменение величины A_{VDO} на 63,7 дБ (более чем в 1500 раз). Параметрические зависимости запаса устойчивости по фазе и частоты единичного усиления

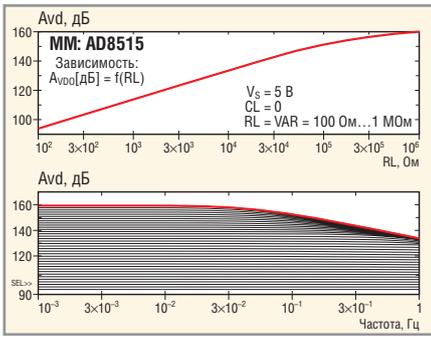


Рис. 34. Зависимость усиления MM AD8515 на постоянном токе от сопротивления нагрузки RL

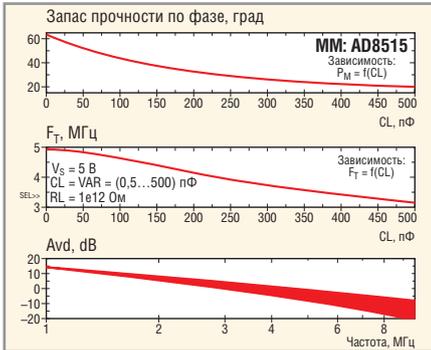


Рис. 35. Зависимости параметров PM и FT MM AD8515 от ёмкости нагрузки

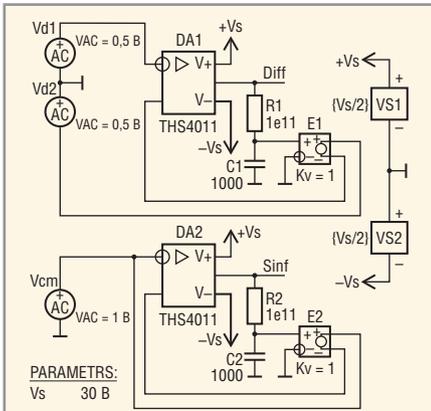


Рис. 36. Схема тестирования параметров MM OУ, зависящих от частоты синфазного входного сигнала

MM AD8515 от CL (трассы вывода: PhaseMarginOPA(Avd_dB,Phase_opa) и XatYequal_0(Avd_dB)), изображённые на рис. 35, наглядно показывают, что ёмкость нагрузки негативно влияет на основные частотные параметры MM OУ.

Детально вопросы использования параметрических зависимостей рассматриваются ниже. Здесь же только отметим, что при построении графиков рассмотренных параметрических зависимостей были использованы нестандартные (отсутствующие в файле pspice.prb) целевые функции [3, 4], которые описываются следующим образом:

```

*****
*
XatYequal_0(1) = x1
*
*Find the value X where Y is 0
*
**Arg1** magnitude trace in dB
* Usage:
*   XatYequal_0(<trace name>)
*
{
    1|Search forward level (0)
!1;
}
*****
*
PhaseMarginOPA(1,2) = y2
*
*Find the value of the phase
*second trace at the same X value
*where the dB magnitude first
*trace crosses 0.
*Usage:
*PhaseMarginOPA(<dB magnitude
*trace>, <phase trace>)
*
{
*Search for where the magnitude
*is 0 dB
    1|Search forward level (0)
!1;
*Find the phase where
*the magnitude is 0 dB
    2|Search forward xval (x1)
!2;
}
*****
*
YatXstart(1)=y1
*
*Find the value Y for start
*point trace
*
*Usage: YatXstart(<trace name>)
{
    1|Search forward x value
(0%) !1;
}
*****
*

```

Целевая функция XatYequal_0(<trace name>) численно равна X-координате точки трассы, в которой она первый раз пересекает нулевой уровень. Целевая функция YatXstart(<trace name>) равна Y-координате стартовой (самой левой) точки трассы. Функция PhaseMarginOPA(<dB magnitude trace>, <phase trace>) получена в результате незначительной модификации стандартной целевой функ-

ции PhaseMargin. Обратите внимание (см. рис. 34 и 35) на использование макросов в качестве фактических параметров целевых функций.

ПАРАМЕТРЫ MM OУ, ЗАВИСЯЩИЕ ОТ ЧАСТОТЫ СИНФАЗНОГО ВХОДНОГО СИГНАЛА

Коэффициент ослабления (подавления) синфазного сигнала (КОСС) OУ равен отношению коэффициентов усиления дифференциального и синфазного сигналов:

$$CMRR[дБ] = 20 \lg \frac{A_{VD}}{A_{CM}} \quad (5)$$

Построить график зависимости КОСС от частоты тестируемой MM OУ позволяет схема, изображённая на рис. 36.

За счёт действия на постоянном токе 100-% отрицательной ОС, охватывающей OУ DA1 через резистор R1 и управляемый источник E1, величина постоянного напряжения на выходе этого OУ не превышает величины его напряжения смещения. Резистор R1 и конденсатор C1 образуют однополюсной фильтр низкой частоты, который блокирует действие ОС на переменном токе. Этот фильтр имеет чрезвычайно низкую частоту среза (частота полюса равна $1,6 \times 10^{-15}$ Гц, а постоянная времени фильтра превышает 3 миллиона лет (!)), и поэтому глубина ОС на частотах, превышающих 10^{-6} Гц, пренебрежимо мала. Из сказанного следует, что в представляющем практический интерес частотном диапазоне выполняются следующие условия:

- дифференциальное напряжение $V_{D DA1}$, прикладываемое между входами OУ DA1, равно разности напряжений источников V_{d1}, V_{d2} ;
- синфазное входное напряжение $V_{CM DA1}$ OУ равно полусумме напряжений источников V_{d1}, V_{d2} .

Итак:

$$V_{D DA1} = V_{d2} - V_{d1} = 0,5 - 0,5 = -1 \text{ В},$$

$$V_{CM DA1} = 0,5(V_{d2} + V_{d1}) = 0,5(-0,5 + 0,5) = 0.$$

Часть схемы, реализованная на OУ DA2 и связанных с ним компонентах, отличается от рассмотренной части схемы только тем, что на оба входа OУ DA2 от источника V_{cm} поступают одинаковые напряжения с уровнем 1 В и,

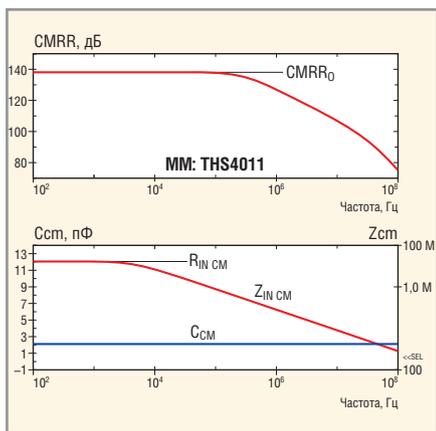


Рис. 37. Результаты тестирования ММ THS4011 в схеме рис. 36

следовательно, выполняются следующие условия:

$$V_{D DA2} = 0, \\ V_{CM DA2} = 1 \text{ В.}$$

Очевидно, что выходное напряжение $V(\text{Diff})$ ОУ DA1, на входы которого поступает *только* дифференциальный сигнал с уровнем 1 В, численно равно коэффициенту A_{VD} усиления дифференциального сигнала тестируемым ОУ. Также совер-

шенно очевидно, что выходное напряжение $V(\text{Sinf})$ ОУ DA2, на входы которого поступает *только* синфазный сигнал с уровнем 1 В, численно равно коэффициенту A_{CM} усиления синфазного сигнала тестируемым ОУ. Из формулы (5) следует, что для построения графика зависимости модуля КОСС от частоты достаточно на экран Probe вывести трассу $DB(V(\text{Diff})/V(\text{Sinf}))$. Синфазная составляющая входного сопротивления Z_{CM} тестируемого ОУ равна отношению напряжения источника V_{cm} к току, протекающему через этот источник. Для построения графика зависимости модуля Z_{CM} от частоты на экран Probe достаточно вывести трассу $1/I(V_{cm})$. Несложный анализ показывает, что для построения графика зависимости синфазной входной ёмкости C_{CM} от частоты на экран Probe необходимо вывести трассу $IMG(-I(V_{cm})) / (\pi^2 \times \text{Frequency})$.

На рис. 37 изображены графики всех рассмотренных зависимостей, построенные по результатам тестирования ММ высокоскоростного ОУ THS4011 (www.ti.com).

Следует заметить, что график зависимости КОСС от частоты ММ весьма существенно отличается от соответствующего графика в datasheet (ММ имеет слишком оптимистичные параметры в части КОСС).

Продолжение следует

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 Design-Lab. 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.



Программируемые источники питания – МОЩЬ И ИНТЕЛЛЕКТ

Серия ZUP

Серия Genesys™

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™

Наивысшее значение удельной мощности в конструктиве 1U!

- Выходная мощность 750/1500 Вт
- Встроенный интерфейс RS-232/485 (GPIB IEEE488/488.2 SCPI по заказу)
- Выходные напряжения до 600 В, ток нагрузки до 200 А
- Конфигурирование посредством внешнего напряжения/тока и ПО
- Драйверы LabView и LabWindows
- Монтаж в конструктив высотой 1U

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