

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

(часть 4)

Сергей Лоцицкий (г. Брянск)

В четвёртой части статьи подробно рассматриваются такие параметры ММ ОУ, как зависимость выходного сопротивления от частоты и максимальная скорость изменения выходного напряжения. Статья ориентирована на специалистов, занимающихся практической разработкой автоматики, электроники, измерительной техники.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ММ ОУ ОТ ЧАСТОТЫ

В спецификациях (datasheet) обычно приводится график зависимости от частоты выходного сопротивления для ОУ с разомкнутой ОС или для ОУ, включенного по схеме повторителя напряжения. Схема, изображённая на рис. 38, позволяет по результатам тестирования ММ ОУ построить график любой из этих зависимостей.

На переменном токе петля ОС ОУ DA1 разомкнута с помощью компонентов R1, C1, A2 (указанные компоненты решают ту же самую задачу, что и компоненты R1, C1, E1 в схеме на рис. 36), а ОУ DA2 охвачен стопроцентной ОС. Очевидно, что в режиме анализа AC Sweep токи с амплитудами 1 А источников I_{out1} и I_{out2} протекают через выходные зажимы ОУ

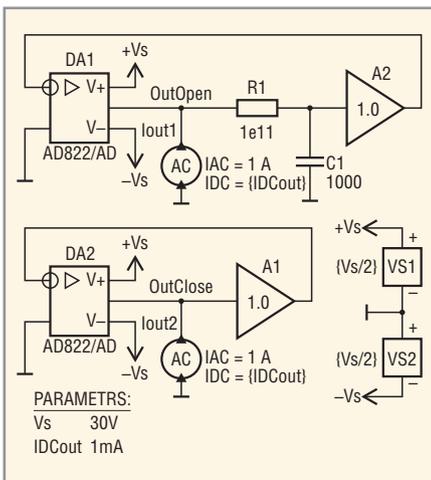


Рис. 38. Схема тестирования выходного сопротивления ММ ОУ

(DA1 и DA2 соответственно), а узловые напряжения $V(OutOpen)$ и $V(OutClose)$ численно равны выходным сопротивлениям ОУ. С помощью глобального параметра I_{DCout} задаются величины постоянных токов, протекающих через выходные зажимы ОУ DA1 и DA2. При тестировании ММ транзисторного уровня от величин указанных постоянных токов зависят параметры линейных схем замещения транзисторов выходного каскада, а следовательно, и результаты тестирования выходного сопротивления ММ транзисторного уровня. Результаты тестирования выходного сопротивления ММ транзисторного уровня THS4011 изображены на рис. 39.

ММ ОУ THS4011 тестировалась при двух значениях варьируемого параметра I_{DCout} (на нижнем графике рис. 39 кривые, соответствующие различным значениям I_{DCout} практически не различимы). Кривые верхнего и нижнего графиков рис. 39 являются прекрасной иллюстрацией к вопросу о влиянии отрицательной ОС на выходное сопротивление ОУ.

В статье [1] отмечалось, что ОУ с выходом Rail-to-Rail имеют высокое выходное сопротивление, величина которого на низких частотах может достигать сотен килоом. Сказанное подтверждают результаты тестирования ММ Rail-to-Rail Output ОУ AD822, изображённые на рис. 40.

Следует заметить, что снижение выходного сопротивления в диапазоне частот от 1 Гц до 1 кГц (верхний график) объясняется действием местной частотно-зависимой отрицательной ОС, которая охватывает выходной каскад схемы замещения ОУ AD822.

Вопросы, связанные с моделированием выходного сопротивления

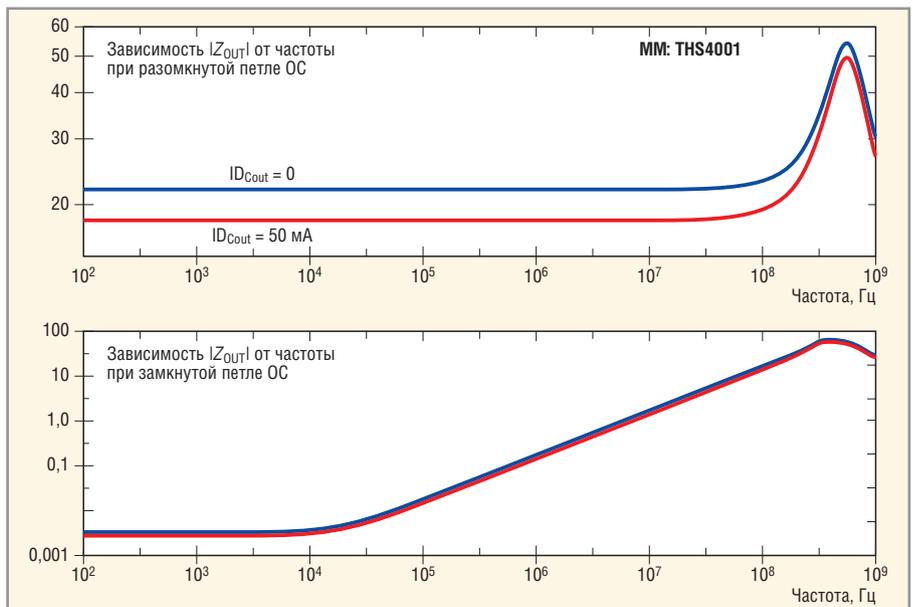


Рис. 39. Результаты тестирования выходного сопротивления ММ THS4011

ММ Бойля и классических MPZ ММ, детально рассмотрены в статье [1]. Здесь же только отметим, что выходное сопротивление этих ММ не зависит от величины постоянного тока, задаваемого параметром I_{DCout} (разумеется, если этот ток не превышает величины, при которой выходной каскад схемы замещения ОУ переходит в нелинейный режим работы).

МАКСИМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ММ ОУ

В отечественной технической литературе параметр, численно равный максимальной скорости изменения выходного напряжения ОУ, называется максимальной скоростью нарастания выходного напряжения ОУ. Следует заметить, что укоренившаяся терминология крайне неудачна, поскольку ОУ часто имеют существенно различающиеся скорости нарастания и спада выходного напряжения. Ниже используются следующая терминология и сокращения:

- $SR\uparrow$ – максимальная скорость нарастания выходного напряжения ОУ;
- $SR\downarrow$ – максимальная скорость спада выходного напряжения ОУ;
- SR – гарантированная максимальная скорость изменения выходного напряжения ОУ, равная меньшей из величин $SR\uparrow$ и $SR\downarrow$.

Более серьёзная проблема – отсутствие единой (общепринятой) методики тестирования указанного параметра. Анализ большого количества спецификаций показывает, что разные производители ОУ обычно используют различные методики измерения величины SR . Более того, часто в различных условиях тестируются разные серии ОУ, выпускаемые одной фирмой. Единственным общим моментом для всех методик тестирования параметра SR является только вид входного воздействия – перепад (скачок) напряжения.

Из сказанного следует, что схема тестирования ММ ОУ на предмет максимальной скорости изменения выходного напряжения должна обеспечивать:

- оперативное изменение конфигурации схемы (инвертирующий или неинвертирующий усилитель) и её параметров (коэффициента усиления, номиналов цепей ОС и нагрузки ОУ);

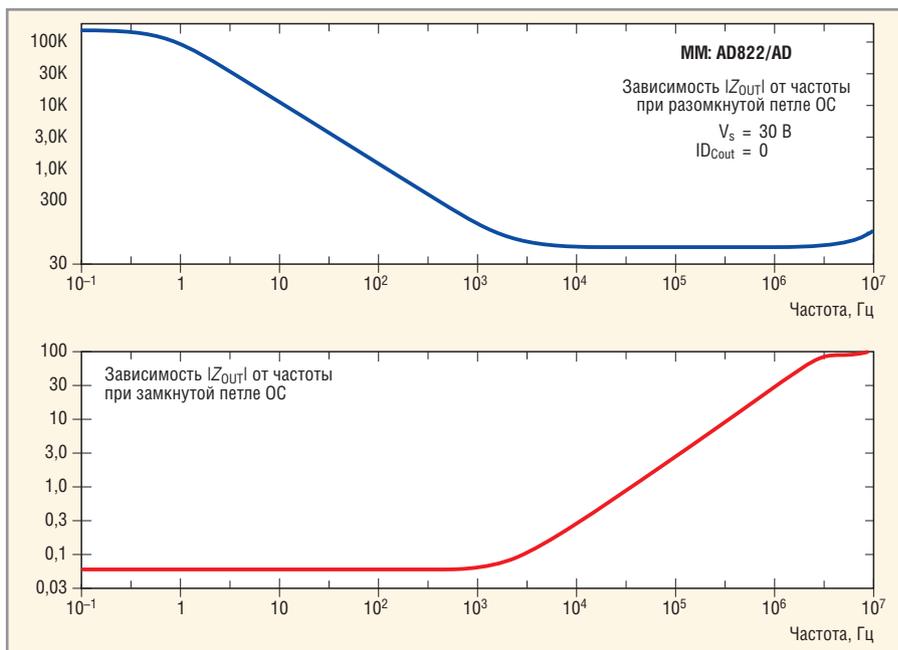


Рис. 40. Результаты тестирования выходного сопротивления ММ AD822/AD

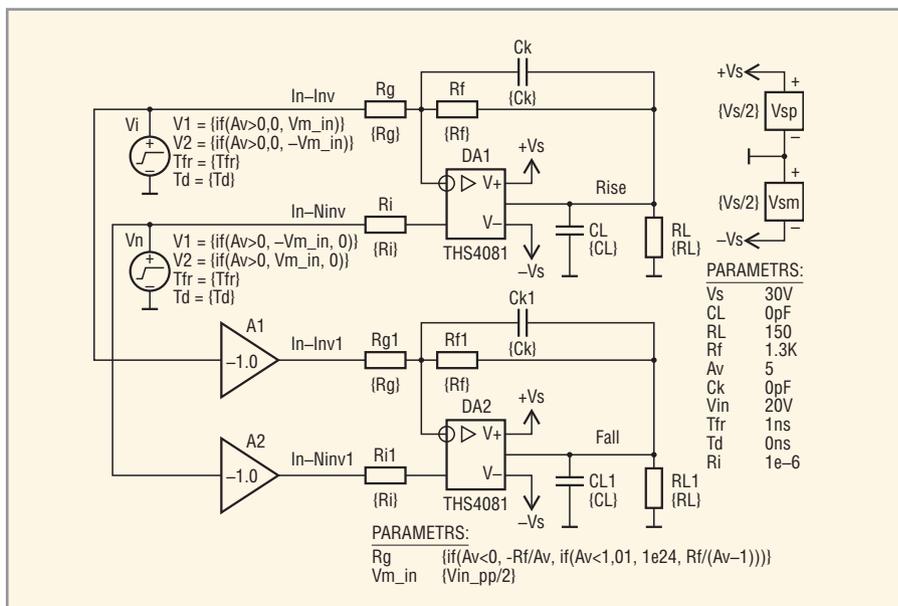


Рис. 41. Схема тестирования максимальной скорости изменения выходного напряжения ММ ОУ

- оперативное изменение параметров входного ступенчатого сигнала (величины перепада напряжения, длительности фронта);
- определение величин $SR\uparrow$ и $SR\downarrow$ по результатам одного тестирования схемы.

Перечисленным требованиям отвечает схема, изображённая на рис. 41.

Рассмотрим часть схемы, в которую входят ОУ DA1, резисторы R_g, R_f, R_i, R_L , конденсаторы C_k, CL и источник входных сигналов V_i, V_n .

Идеальный источник нулевого напряжения (фиктивный источник напряжения) формально может рассматриваться как переключатель, осуществляющая короткое замыкание двух

узлов внешней схемы, к которым подключены выводы этого источника. В схеме тестирования имеется два источника V_i и V_n входного сигнала, но один из них (за счёт использования условных выражений для определения атрибутов $V1, V2$ этих источников) всегда является фиктивным. Какой именно из этих источников является фиктивным, зависит от знака глобального параметра A_v , задающего величину коэффициента передачи усилителя. Если вы зададите положительную величину параметра A_v , то атрибуты $V1, V2$ источника V_i автоматически установятся равными нулю, а атрибуты источника V_n примут следующие значения: $V1 =$

$= -V_{in_pp}/2, V_2 = V_{in_pp}/2$. Очевидно, что в рассмотренном случае схема тестирования представляет собой неинвертирующий усилитель.

Если же вы зададите отрицательную величину параметра A_v , то картина меняется на обратную – фиктивным автоматически становится источник V_n . В этом случае схема тестирования представляет собой инвертирующий усилитель. Заметим, что в процессе тестирования схемы выходное напряжение ОУ DA1 всегда (вне зависимости от знака параметра A_v , которым определяется конфигурация схемы) изменяется от низкого уровня к более высокому, и, следовательно, напряжение узла Rise является нарастающим. На ОУ DA2 и связанных с ним компонентах реализован второй усилитель, который ничем не отличается от рассмотренного усилителя. На входы второго усилителя сигналы от источников V_i, V_n поступают через идеальные инверторы A1, A2, и поэтому напряжение на выходе ОУ DA2 в процессе тестирования схемы изменяется от высокого уровня к низкому, т.е. напряжение узла Fall является спадающим.

Источники V_i, V_n , моделирующие в режиме Transient перепад (скачок) напряжения, являются важным частным случаем стандартного источника VPULSE и описываются следующей простой MM:

```
.SUBCKT Vstep 1 2 PARAMS:
+Vstart=0 Vend=1 VDC=0 VAC=1
+Td=0 Tfr=1u
*
V 1 2 DC {VDC} AC {VAC}
+PULSE({Vstart} {Vend} {Td}
+{Tfr})
.ENDS Vstep
```

Схема тестирования имеет ещё одну маленькую хитрость – сопротивление резистора R_g в ней рассчитывается автоматически по следующей формуле:

$$R_g = \begin{cases} -\frac{R_f}{A_v}, & \text{если } A_v < 0 \\ 10^{24} \text{ Ом}, & \text{если } 0 \leq A_v < 1,01 \\ \frac{R_f}{A_v - 1}, & \text{если } A_v \geq 1,01 \end{cases}$$

Из сказанного следует, что для определения конфигурации и желаемых условий тестирования схемы пользователю достаточно задать численные значения десяти гло-

бальных параметров. Это существенно упрощает и ускоряет тестирование.

В спецификации на высокоскоростной ОУ THS4081 [www.ti.com] указывается, что типовая величина параметра SR равна 230 В/мкс при тестировании ОУ в следующих условиях: $V_s = 30 \text{ В}, V_{in_pp} = 20 \text{ В}, A_v = +5, R_L = 150 \text{ Ом}$. Номиналы цепи ОС явно не указаны, но из типовой схемы инвертора следует, что $R_f = 1,3 \text{ кОм}$. Кроме того, в спецификации указано, что параметр SR измеряется на участке изменения выходного напряжения ОУ между относительными уровнями, составляющими 25 и 75% от полного размаха выходного напряжения тестируемого ОУ. Указанные на рис. 41 величины глобальных параметров обеспечивают моделирование в схеме тестирования рассмотренных условий испытаний ОУ THS4081.

Существенно уменьшить время, необходимое для определения величин параметров $SR\uparrow$ и $SR\downarrow$ по результатам тестирования схемы, можно за счёт использования следующей целевой функции [3, 4]:

```
*****
SR_RelLevel(1,RelLevel)=
+(y4-y3)/(x4-x3)*1e-6
*
* Find the value Slew Rate [V/us]
{
1|Search forward x value (0%) !1
Search forward x value (100%) !2
Search forward /Begin/level
+(y1+RelLevel*(y2-y1)) !3
Search forward /Begin/level
+(y1+(1-RelLevel)*(y2-y1)) !4;
}
*****
```

В процессе расчёта величины целевой функции $SR_RelLevel(<Trace>, RelLevel)$ автоматически выполняются следующие действия:

- отыскивается стартовая (самая левая) точка $P1(x1,y1)$ трассы;
- отыскивается конечная (самая правая) точка $P2(x2,y2)$ трассы;
- отыскивается точка трассы $P3(x3,y3)$, Y-координата которой отвечает условию: $y3 = y1 + RelLevel(y2 - y1)$;
- отыскивается точка трассы $P4(x4,y4)$, Y-координата которой отвечает условию: $y4 = y1 + (1 - RelLevel)(y2 - y1)$;

- рассчитывается величина целевой функции:

$$SR_RelLevel(<Trace>,RelLevel) = \frac{y4 - y3}{x4 - x3} \times 10^{-6}$$

Заметим, что целевая функция возвращает величину, которая имеет общепринятую для параметра SR размерность [В/мкс].

Выполните следующие действия:

- осуществите анализ схемы тестирования в режиме Transient (параметры моделирования: Final Time = 120 ns, Step Ceiling = 100 ps);
- последовательно выберите пункты меню Tools и Options программы Probe. В открывшемся окне Probe Options активизируйте опцию Display Evaluation и закройте окно нажатием кнопки ОК;
- указателем мыши щёлкните на иконке Eval Goal Function и в открывшемся окне Evaluate Goal Functions из списка целевых функций выберите функцию $SR_RelLevel(1, RelLevel)$. В строке Trace Expression в качестве первого фактического параметра функции $SR_RelLevel$ укажите трассу V(Rise), а в качестве второго – число 0,25 (относительный отсчётный уровень), и нажмите кнопку ОК.

В результате выполнения указанных действий на экран Probe выводится график узлового напряжения V(Rise) и рассчитанная величина целевой функции $SR_RelLevel(V(Rise), 0,25)$. Повторите действия последнего пункта с единственным отличием – в качестве первого фактического параметра целевой функции укажите трассу V(Fall). Теперь вид экрана Probe должен соответствовать рис. 42.

Итак, целевая функция $SR_RelLevel$ по результатам тестирования схемы не только рассчитала искомые величины параметров $SR\uparrow = 298,89 \text{ В/мкс}$ и $SR\downarrow = -298,67 \text{ В/мкс}$, но и попутно вывела на экран Probe графики узловых напряжений $V(Rise)$ и $V(Fall)$, на которых явно указаны точки P1, P2, P3, P4, использованные в процессе вычисления функций. Следует заметить, что вывод графиков узловых напряжений $V(Rise)$ и $V(Fall)$ с явным указанием точек P1...P4 не оставляет никаких сомнений в правильности расчёта целевых функций. Отметим также, что величины параметров

SR↑, SR↓ MM ОУ и реального ОУ THS4081 отличаются на 30% (MM имеет более оптимистичные параметры).

Схема на рис. 41 позволяет воспроизвести практически любые условия тестирования параметра SR реального ОУ. Однако, к сожалению, воспользоваться этой возможностью удаётся в исключительно редких случаях. Проблема заключается в том, что в спецификации крайне редко оговариваются все условия тестирования параметра SR (схема включения ОУ, нагрузка, уровни перепада входного сигнала, отсчётные уровни выходного сигнала и т.п.). Как правило, информация об условиях тестирования либо вообще отсутствует в datasheet, либо её объём оказывается недостаточным для определения величин всех глобальных параметров схемы тестирования рис. 41 (в этом смысле детальность документирования ОУ THS4081 является редким исключением).

Другая проблема заключается в том, что сравнение величин параметров SR разных MM ОУ, полученных в одинаковых условиях тестирования, не даёт ответа на вопрос: какая из этих MM ОУ имеет более высокую скорость изменения выходного напряжения в условиях, отличных от условий тестирования? Известно [5], что максимальная скорость изменения выходного напряжения ОУ наиболее существенно зависит от величины напряжения Vd перевозбуждения его входа (дифференциального напряжения, прикладываемого между входами ОУ). Наиболее полную информацию о скорости изменения выходного напряжения ОУ дают графики зависимостей SR↑ и SR↓ от величины напряжения Vd перевозбуждения входа ОУ. Графики указанных зависимостей могут быть построены по результатам тестирования MM ОУ в схеме, изображённой на рис. 43.

Напряжение на выходе источника напряжения E1, управляемого напряжением (ИНУН), равно напряжению V_{OS} смещения ОУ DA1. Это напряжение используется для компенсации напряжений смещения ОУ DA2 и DA3 (V_{OS} через ИНУН E2 и E3 поступает на инвертирующие входы ОУ DA2 и DA3). Из сказанного следует, что ОУ DA2, DA3 по отношению к сигналам, поступающим на их входы

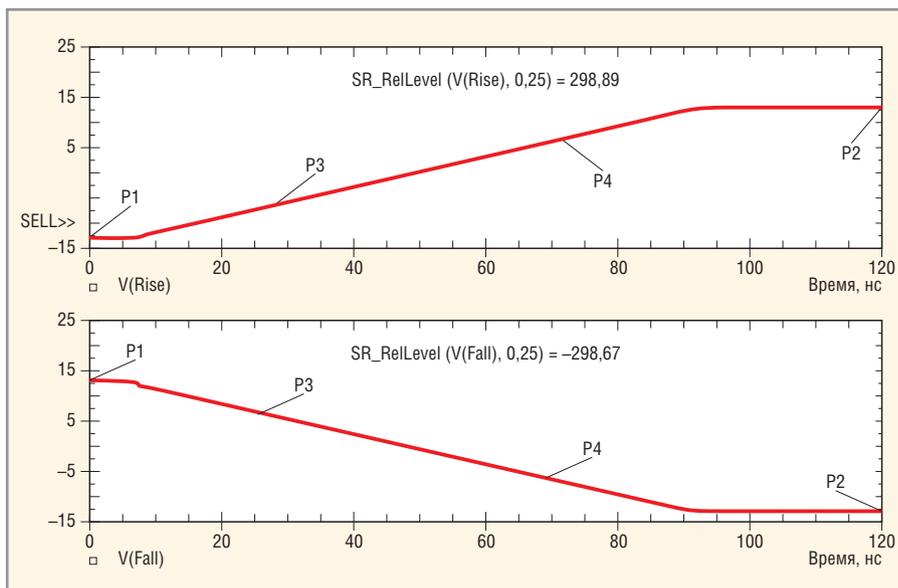


Рис. 42. Результаты тестирования параметров SR↑ и SR↓ MM THS4081

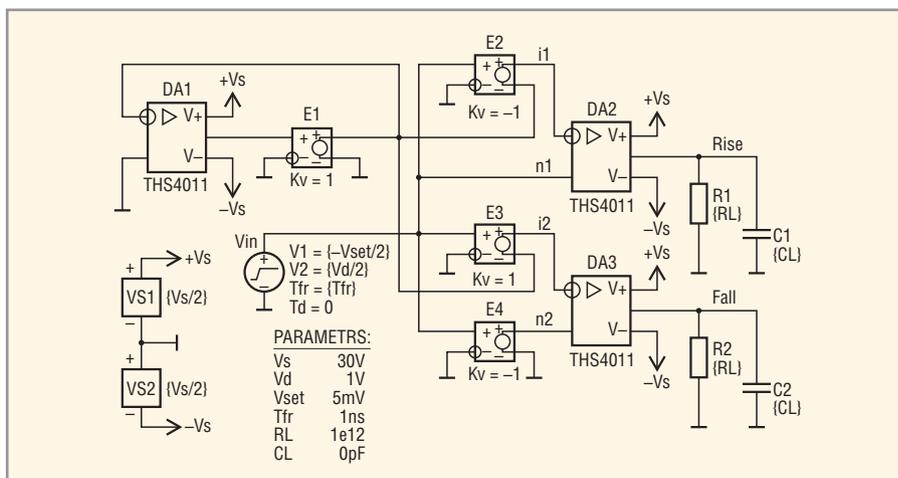


Рис. 43. Схема тестирования зависимости параметров SR↑ и SR↓ от уровня перевозбуждения входа MM ОУ

от источника Vin непосредственно и через ИНУН E2, E3, E4, имеют нулевые напряжения смещения. Так, например, если напряжение источника Vin равно нулю, то выходные напряжения ОУ DA2, DA3 (несмотря на то, что они не охвачены цепью ОС) также равны нулю. В нулевой момент времени Vin = -0,5Vset (величина напряжения Vset задаётся глобальным параметром). Параметр Vset необходимо задавать такой величины, чтобы гарантированно выполнялись условия:

$$|Vset|A_{VDO} > 0,5Vs - V_{SAT P} \quad (6)$$

$$|Vset|A_{VDO} > 0,5Vs - V_{SAT M} \quad (7)$$

где: V_{SAT P}, V_{SAT M} – напряжения насыщения выхода MM ОУ относительно положительного и отрицательного напряжений питания.

При выполнении условий (6), (7) в нулевой момент времени выходные напряжения ОУ DA2 и DA3 равны:

$$V_{OUT DA2} = V(Rise) = -0,5Vs + V_{SAT M}$$

$$V_{OUT DA3} = V(Fall) = -0,5Vs - V_{SAT P}$$

К моменту t = Tfr напряжение источника Vin возрастает до величины 0,5Vd (Vd – глобальный параметр), а входные дифференциальные напряжения ОУ DA2 и DA3 устанавливаются на уровнях V_{D DA2} = Vd и V_{D DA3} = -Vd. Начиная с момента t = Tfr уровень перевозбуждения входов ОУ DA2 и DA3 остаётся неизменным и равным величине параметра Vd, а выходные напряжения этих ОУ начинают изменяться со скоростями SR↑ и SR↓. Сказанное о работе схемы рис. 43 поясняют временные диаграммы, изображённые на рис. 44.

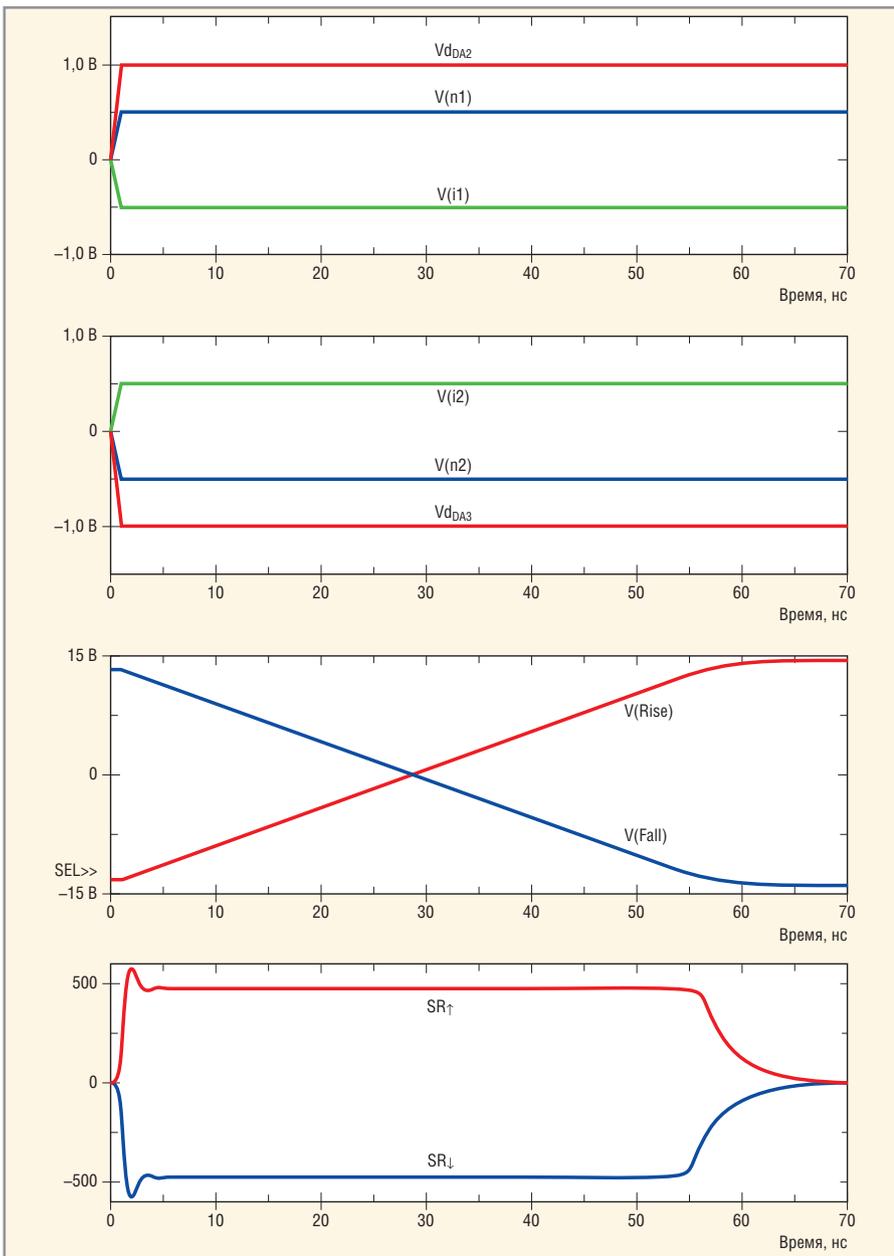


Рис. 44. Временные диаграммы, поясняющие работу схемы рис. 43

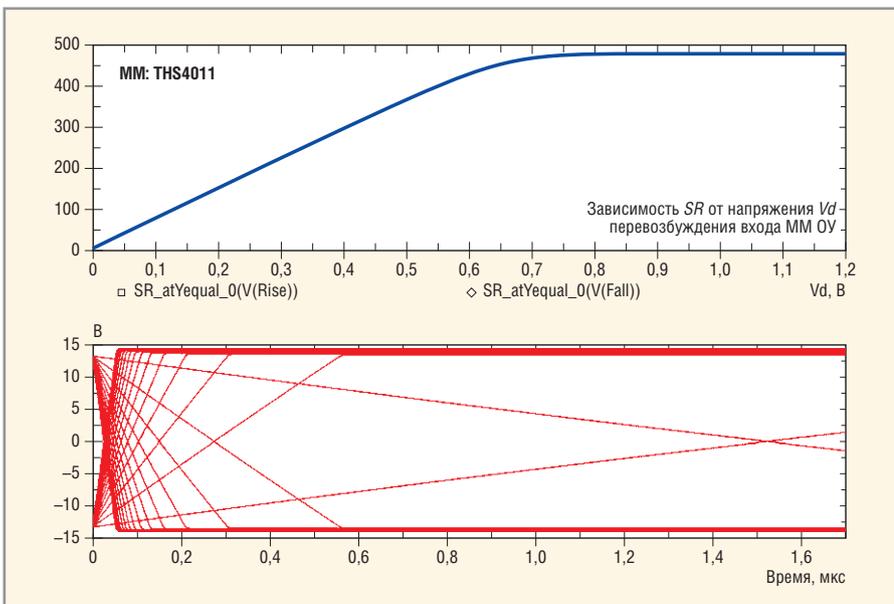


Рис. 45. Результаты тестирования зависимостей $SR\uparrow = f(Vd)$ и $SR\downarrow = f(Vd)$ MM THS4011

Производные по времени от узловых напряжений $V(Rise)$, $V(Fall)$, умноженные на коэффициент 10^{-6} (кривые на нижнем графике), численно равны скоростям нарастания $SR\uparrow$ и спада $SR\downarrow$ тестируемой ММ ОУ при заданном уровне Vd перевозбуждения входа (в нашем примере $Vd = 1$ В). Однако наша задача заключается в построении графиков зависимостей $SR\uparrow$ и $SR\downarrow$ от величины напряжения Vd перевозбуждения входа тестируемой ММ ОУ. Для решения этой задачи необходимо осуществить многовариантный анализ схемы, варьируя величину параметра Vd , и по результатам этого анализа средствами программы Probe построить параметрические зависимости $SR\uparrow = f(Vd)$ и $SR\downarrow = f(Vd)$. Для построения указанных зависимостей в принципе можно использовать рассмотренную выше целевую функцию $SR_RelLevel$. Однако в этом случае время анализа схемы необходимо выбирать таким, чтобы во всех его вариантах выходные напряжения ОУ DA2, DA3 успевали измениться от одного уровня насыщения выхода до другого (см. рис. 44). Это существенно увеличивает суммарное время многовариантного анализа схемы. Логично определять величины $SR\uparrow$ и $SR\downarrow$ в моменты, когда выходные напряжения ОУ DA2, DA3 пересекают нулевые уровни (см. рис. 44). В этом случае суммарное время анализа схемы уменьшается приблизительно в два раза. Определить величину SR в окрестностях точки, в которой выходное напряжение ОУ пересекает нулевой уровень, позволяет следующая целевая функция:

```

*****
SR_atYequal_0(1)=
+abs((y3-y2)/(x3-x2))*1e-6
*
* Find the value Slew Rate
* [V/us] where the trace is 0
{
1|Search forward level (0) !1
Search forward /Begin/
+x value (0.99*x1) !2
Search forward x value
+(1.01*x1) !3;
}
*****
    
```

Целевая функция $SR_atYequal_0$ выполняет следующие действия:

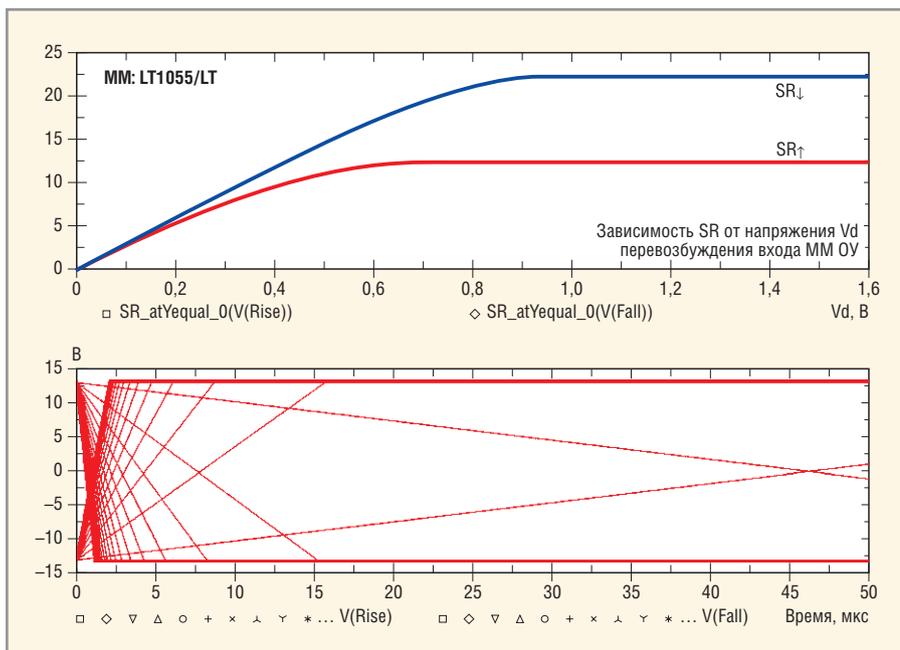


Рис. 46. Результаты тестирования зависимостей $SR_{\uparrow} = f(V_d)$ и $SR_{\downarrow} = f(V_d)$ MM LT1055/LT

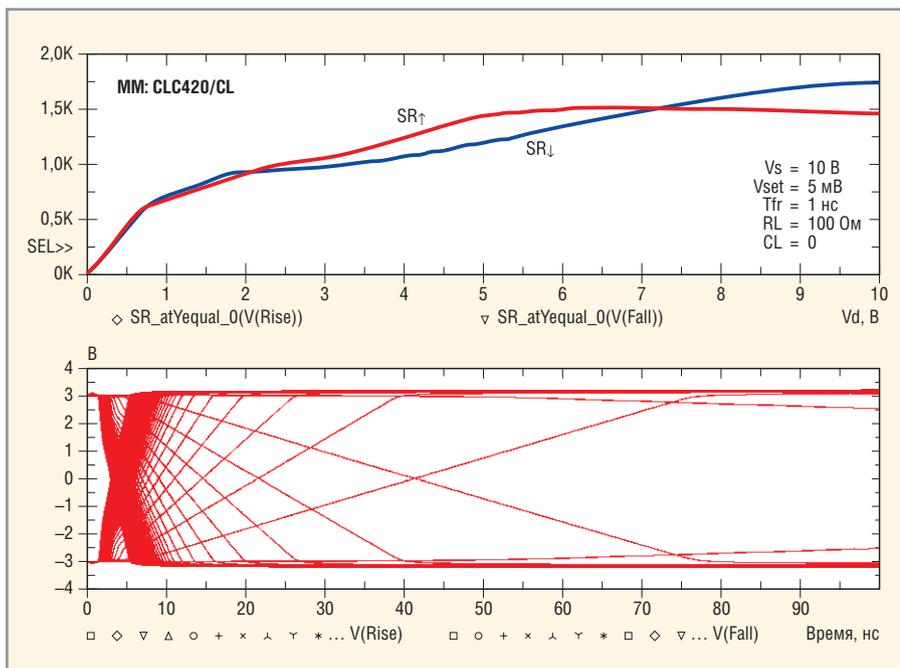


Рис. 47. Результаты тестирования зависимостей $SR_{\uparrow} = f(V_d)$ и $SR_{\downarrow} = f(V_d)$ MM CLC420/CL

1. находит точку трассы $P1(x1, y1)$, Y-координата которой отвечает условию: $y1 = 0$;
2. находит точку трассы $P2(x2, y2)$, X-координата которой отвечает условию: $x2 = 0,99x1$;
3. находит точку трассы $P3(x3, y3)$, X-координата которой отвечает условию: $x3 = 1,01x1$;
4. рассчитывает величину SR по формуле:

$$SR[\text{B/мкс}] = \left| \frac{y3 - y2}{x3 - x2} \right| \times 10^{-6}$$

Кривые зависимостей $SR_{\uparrow} = f(V_d)$ и $SR_{\downarrow} = f(V_d)$, полученные в результате

тестирования MM OY THS4011 при вариации параметра V_d в диапазоне значений от 10 мВ до 1,2 В с шагом приращения 50 мВ (величины остальных параметров указаны на рис. 43), изображены на верхнем графике рис. 45.

Заметим, что кривые параметрических зависимостей $SR_{\uparrow} = f(V_d)$ и $SR_{\downarrow} = f(V_d)$ на рис. 45 совпадают (неразличимы на графике). Это означает, что MM THS4011 не моделирует асимметрию максимальных скоростей нарастания и спада выходного напряжения OY. В схемах замещения ряда OY (LF355, LF412, LT1022,

LT1055 и др.) фирмы Linear Technology используется оригинальное схемное решение [6], позволяющее моделировать значительно различающиеся величины максимальных скоростей нарастания и спада выходного напряжения OY. На рис. 46 изображены результаты тестирования MM LT1055/LT.

У классических OY с транзисторным балансным входным каскадом [1] увеличение напряжения V_d перевозбуждения входа сопровождается ростом SR только до тех пор, пока оба транзистора входного дифференциального каскада работают в активном режиме. При некоторой предельной величине напряжения V_d один из транзисторов входного дифференциального каскада закрывается (при этом весь ток источника I_{EE} протекает через другой транзистор [1]), и дальнейшее увеличение напряжения V_d не влияет на скорость изменения выходного напряжения OY. Сказанное наглядно иллюстрируют рис. 45 и 46. Однако если OY реализован по нетрадиционной структуре «OY с токовой ОС + буфер + резистор» [1, рис. 52], то зависимость SR от напряжения перевозбуждения входа сохраняется при изменении V_d в широком диапазоне значений. На рис. 47 изображены результаты тестирования MM упрощенного транзисторного уровня OY CLC420, схемотехника которого соответствует структуре «OY с токовой ОС + буфер + резистор».

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.

