

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем проектирования в микроэлектронике  
Российской академии наук (ИППМ РАН)

Библиотека схемотехнических решений

Быстродействующий операционный усилитель с дифференцирующей цепью  
коррекции: модификация ОУ- SR №4

Прокопенко Н.Н., [prokopenko@sssu.ru](mailto:prokopenko@sssu.ru), Бугакова А.В., Бутырлагин Н.В.  
Научно-исследовательская лаборатория проблем проектирования в  
экстремальной микроэлектронике ИППМ РАН и Донского государственного  
технического университета (г. Ростов-на-Дону)

1. Области применения ОУ-SR №4

Предназначен для работы в быстродействующих аналоговых и аналого-  
цифровых устройствах систем связи, автоматики и приборостроения, в том числе  
в структуре «система на кристалле» (СНК).

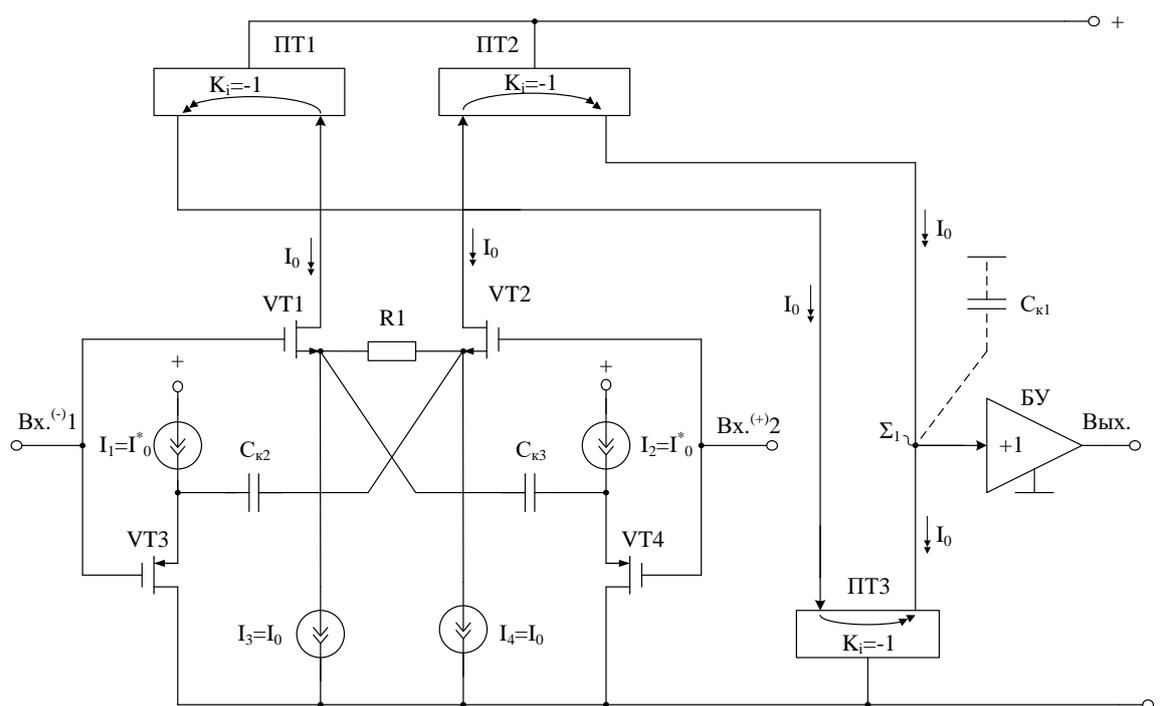


Рис. 1. Быстродействующий КМОП ОУ

Практическая реализация архитектуры рис. 1 может быть осуществлена в рамках различных технологий: tsmc (BiCMOS), SiGe (IHP, Германия), NHGRACE SoI (кремний на изоляторе), HCMS8D, H10-CMOS090\_LP (АО «Микрон», г. Зеленоград), ЗКБТ (BiJFet-биполярно-полевой техпроцесс, АО «Интеграл», г. Минск), комплементарный биполярный техпроцесс (АО «НПП Пульсар», г. Москва) и др.

## 2. Текстовое описание схемы рис. 1

Схема ОУ рис.1 включает:

- входной dual-input-stage (VT1-VT4),
- промежуточный каскад на основе токовых зеркал ПТ1, ПТ2, ПТ3
- источники тока ( $I_1, I_2, I_3, I_4$ ), устанавливающие статический режим,
- буферный усилитель (БУ),
- интегрирующую цепь коррекции  $C_{к1}$ ,
- дифференцирующие цепи коррекции  $C_{к2}, C_{к3}$ .

Интегрирующая емкость коррекции  $C_{к1}$  обеспечивает заданный запас устойчивости ОУ по фазе. Дифференцирующие конденсаторы  $C_{к2}, C_{к3}$  повышают быстродействие ОУ в режиме большого сигнала при работе входных транзисторов в режиме микротоков и практически не влияют на малосигнальную частоту единичного усиления ОУ ( $f_1$ ).

Статический режим КМОП ОУ рис. 1 устанавливается источниками тока  $I_1, I_2, I_3$  и  $I_4$ , которые могут изменяться в широких пределах (единицы микроампер – единицы миллиампер). Это существенно влияет на максимальную скорость нарастания выходного напряжения ОУ (SR), которая достигает наибольших значений в сильноточном режиме VT1-VT4. При миллиамперных токах истока (1-5 мА) КМОП VT1-VT4 эффективность применения цепей коррекции  $C_{к2}, C_{к3}$  уменьшается.

Разомкнутый коэффициент усиления по напряжению ОУ рис. 1 определяется эквивалентным сопротивлением в высокоимпедансном узле  $\Sigma 1$  и существенно зависит от выходного сопротивления токовых зеркал ПТ2 и ПТ3. В качестве токовых зеркал ПТ1, ПТ2, ПТ3 могут применяться более 50 известных схемотехнических решений [1], что обеспечивает получение численных значений  $K_u$  в широком диапазоне (до 120 дБ). Рациональный выбор токовых зеркал – один из важных этапов проектирования и оптимизации схемы ОУ.

В качестве буферного усилителя (БУ) могут применяться более 30 вариантов схем, отличающихся друг от друга энергетическими и динамическими параметрами.

Таким образом, схема рис. 1 – это некоторая обобщенная схема ОУ, в рамках которой для основных КМОП технологических процессов можно реализовать десятки частных вариантов ОУ, отличающихся друг от друга схемотехникой БУ, ПТ1-ПТ3 [1], и, как следствие, динамическими параметрами.

В этой связи компьютерное моделирование обобщенной структурной схемы рис. 1 с идеальными токовыми зеркалами, БУ и источниками тока  $I_1, I_2$  позволяет определить предельные параметры широкого класса практических вариантов построения ОУ с архитектурой рис. 1, к которым необходимо стремиться.

### 3. Компьютерное моделирование ОУ рис. 1

В частном случае схема ОУ рис. 1 исследовалась в среде Orcad 9.2 на моделях КМОП транзисторов tsmc\_035\_t65.

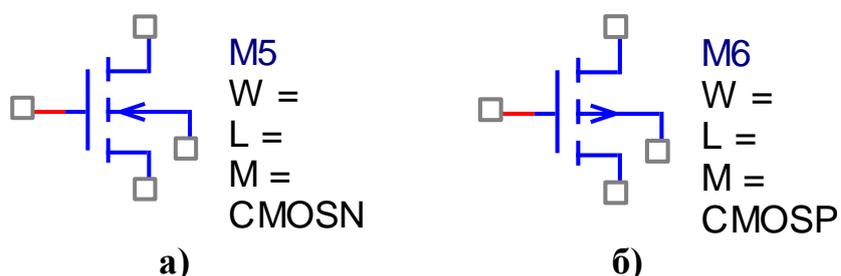


Рис. 2 Графическое изображение КМОП транзисторов tsmc\_035\_t65 с n- и p-каналами

На рис. 3 показана схема КМОП ОУ в среде Orcad.

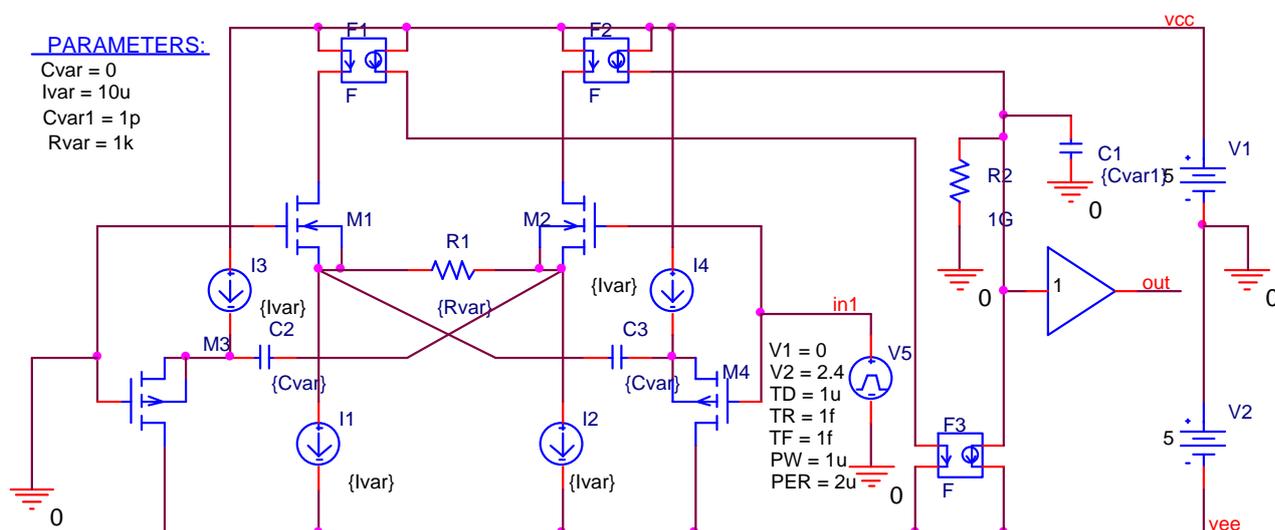


Рис. 3 КМОП ОУ рис. 1 в среде Orcad 9.2 на моделях транзисторов tsmc\_035\_t65

### 4. Ожидаемые параметры и характеристики ОУ

Компьютерное моделирование влияния  $C_{k2}$  на переходные процессы в КМОП ОУ рис. 3 при работе его входного каскада (DIS) в микрорежиме ( $I_1=I_2=I_3=I_4=10\mu\text{кА}$ ,  $R_1=1\text{кОм}$ ,  $R_2=R_{\text{var}}=1\text{ГОм}$ ,  $C_1=1\text{пФ}$ ,  $C_2=C_3=C_{k2}=C_{k3}=C_{\text{var}}=0..50\text{пФ}$ ) иллюстрируют графики рис. 4.

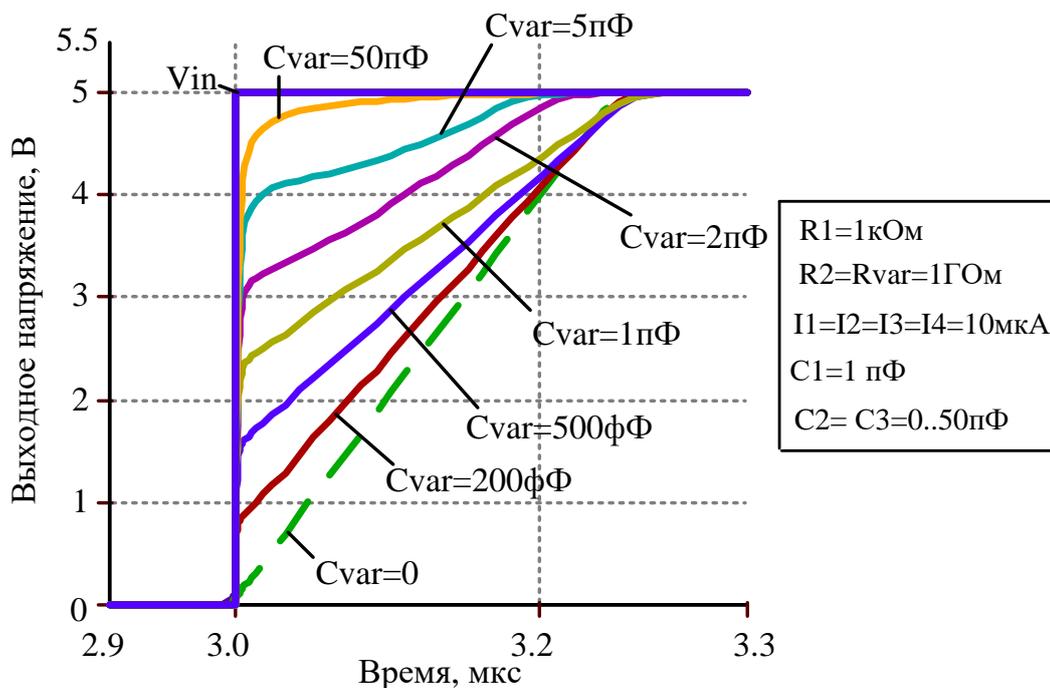


Рис. 4 Переходные процессы в КМОП ОУ рис. 3: передний фронт

Зависимости максимальной скорости нарастания выходного напряжения (SR) от значений ёмкости  $C_{к1}=C_1=200\text{ф}\cdot 1\text{пФ}$ , при  $R_1=1\text{кОм}$ ,  $R_2=R_{\text{var}}=1\text{ГОм}$ ,  $I_1=I_2=I_3=I_4=10\text{мкА}$  и разных значениях ёмкостей  $C_2=C_3=C_{к2}=C_{к3}=C_{\text{var}}=0..50\text{пФ}$ , полученные из графиков рис. 4, представлены в табл. 1.

Табл. 1 Зависимость SR от ёмкости конденсатора  $C_1=200\text{ф}\cdot 1\text{пФ}$  при разных конденсаторах  $C_{к2}=C_{к3}=0\div 50\text{пФ}$

Ёмкость коррекции $C_{к2}=C_{к3}$ , пФ	SR, В/мкс (при $C_{к1}=1\text{пФ}$ )	SR, В/мкс (при $C_{к1}=200\text{фФ}$ )
0	19,77	90,9
0,2	18,6	95
0,5	19,93	130,71
1	23,62	173,16
2	50,44	449,43
5	272,1	1481,48
50	909	3333,3

Моделирование показало, что быстродействие рассматриваемого КМОП ОУ при отсутствии дифференцирующей цепи коррекции ( $C_{к2}=C_{к3}=0$ ) пропорционально статическим токам  $I_1=I_2=I_3=I_4$ . В то же время в микрорежиме VT1-VT4 скорость нарастания при  $C_{к2}=C_{к3}=0$  существенно уменьшается. Главная причина этого эффекта [2] – уменьшение на один-два порядка напряжения ограничения ( $U_{\text{гр}}$ ) драйвера ёмкости коррекции, включающего VT1-VT4, токовые зеркала ПТ1-ПТ3, которая оказывает доминирующее влияние на SR, т.к.  $SR \approx 2\pi f_1 U_{\text{гр}}$ , где  $f_1$  – малосигнальная частота единичного усиления

скорректированного ОУ,  $U_{гр}$  – напряжение ограничения проходной характеристики драйвера емкости коррекции (ДСк).

Анализ табл. 1 и рис. 4 показывает, что  $C_{к2}$ ,  $C_{к3}$  могут существенно повысить быстродействие ОУ (2-45 раз). При этом переходный процесс (рис. 4) имеет два явно выраженных участка – «крутой» и «пологий». Если максимальную скорость нарастания ОУ рассчитывать по формуле [2], которая усредняет численные значения SR с двумя участками переходного процесса, то положительный эффект от применения  $C_{к2}$ ,  $C_{к3}$  может быть найден из уравнения  $SR \approx 0,9U_{out}/t_{уст}$ , где  $t_{уст}$  – время установления переходного процесса на уровне  $0,9U_{out}$ ,  $U_{out}$  – установившееся значение выходного напряжения.

Если SR рассчитывать как максимальную производную выходного напряжения ОУ (не обращая внимания на "пологий" участок переходного процесса), то численные значения SR с  $C_{к2}$ ,  $C_{к3}$  будут существенно выше.

Таким образом, компьютерное моделирование показывает, что при статических токах входных транзисторов КМОП ОУ рис.1 на уровне 10 мкА применение дифференцирующих цепей коррекции ( $C_{к2}$ ,  $C_{к3}$ ) обеспечивает увеличение SR в 2-45 раз.

При этом, дифференцирующие цепи  $C_{к2}$ ,  $C_{к3}$  оказываются неэффективными в сильноточных режимах входного каскада (DIS), т.к. в этом случае диапазон активной работы DIS составляет единицы вольт. Этого достаточно для получения высоких значений SR и без применения  $C_{к2}$ ,  $C_{к3}$ .

Компьютерное моделирование схемы ОУ рис. 3 при  $C_{к1}=1$  пФ, эквивалентном сопротивлении высокоимпедансного узла  $R_i=1$  ГОм,  $R1=1$ кОм,  $C2=C3=0$  показывает, что предельный разомкнутый коэффициент усиления  $K_u$  равен 122 дБ, а верхняя граничная частота (по уровню -3дБ) – 156 Гц. В конкретных схемах данные параметры существенно зависят от свойств токовых зеркал ПТ1, ПТ2, ПТ3 [1].

## 5. Параметры оптимизации

Практический интерес представляет определение оптимальных значений  $C_{к1}$ ,  $C_{к2}$ ,  $C_{к3}$  и статических токов входного каскада  $I_1=I_2=I_3=I_4$  при заданных ограничениях на максимальную скорость нарастания выходного напряжения ОУ, разомкнутый коэффициент усиления, запас устойчивости по фазе, энергопотребление, ослабление синфазных сигналов, геометрию транзисторов, схемотехнику токовых зеркал (более 50 модификаций [1]) и буферного усилителя (более 30 модификаций) и т.п.

## 6. Netlist в Spice (рис.3)

```
1: source OP_AMP
2: I_I4      VCC N26626 DC {Ivar}
3: M_M4      VEE IN1 N26626 N26626 CMOSP
4: + L=0.35u
5: + W=10u
6: + M=1
7: X_F2      VCC N87736 VCC N67628 SCHEMATIC1_F2
8: C_C2      N00905 N42388 {Cvar}
9: M_M2      N87736 IN1 N42388 N42388 CMOSN
10: + L=0.35u
11: + W=10u
12: + M=1
13: V_V1      VCC 0 5
14: C_C3      N60997 N26626 {Cvar}
15: V_V2      0 VEE 5
16: X_F3      N100796 VEE N67628 VEE SCHEMATIC1_F3
17: R_R2      0 N67628 1G
18: V_V5      IN1 0 AC 1
19: +PULSE 0 5 1u 1f 1f 1u 2u
20: C_C1      0 N67628 {Cvar1}
21: M_M1      N68765 OUT N60997 N60997 CMOSN
22: + L=0.35u
23: + W=10u
24: + M=1
25: I_I1      N60997 VEE DC {Ivar}
26: E_GAIN1   OUT 0 VALUE {1 * V(N67628)}
27: X_F1      VCC N68765 VCC N100796 SCHEMATIC1_F1
28: I_I3      VCC N00905 DC {Ivar}
29: R_R1      N60997 N42388 {Rvar}
30: I_I2      N42388 VEE DC {Ivar}
31: M_M3      VEE OUT N00905 N00905 CMOSP
32: + L=0.35u
33: + W=10u
34: + M=1
35: .PARAM Cvar=0 Rvar=1k Ivar=10u Cvar1=1p
36: .subckt SCHEMATIC1_F2 1 2 3 4
37: F_F2      3 4 VF_F2 1
38: VF_F2     1 2 0V
39: .ends SCHEMATIC1_F2
40: .subckt SCHEMATIC1_F3 1 2 3 4
41: F_F3      3 4 VF_F3 1
42: VF_F3     1 2 0V
```

```
43: .ends SCHEMATIC1_F3
44: .subckt SCHEMATIC1_F1 1 2 3 4
45: F_F1      3 4 VF_F1 1
46: VF_F1    1 2 0V
47: .ends SCHEMATIC1_F1
```

Разработка выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122)

#### Список литературы:

1. Прокопенко Н.Н., Титов А.Е., Бутырлагин Н.В. Токовые зеркала для проектирования КМОП аналоговых микросхем: основные модификации (ТЗ №1-№ 36) [Электронный ресурс] // Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН: [сайт]. [2018]. URL: <http://www.ippm.ru/data/eljrnal/paper/J4.pdf> (дата обращения: 17.04.2018)
2. Прокопенко, Н.Н. Архитектура и схемотехника быстродействующих операционных усилителей: монография / Н.Н. Прокопенко, А.С. Будяков. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2006. – 231 с. ISBN 5-93834-261-9