

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 №3

Прокопенко Н.Н., 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 №3

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

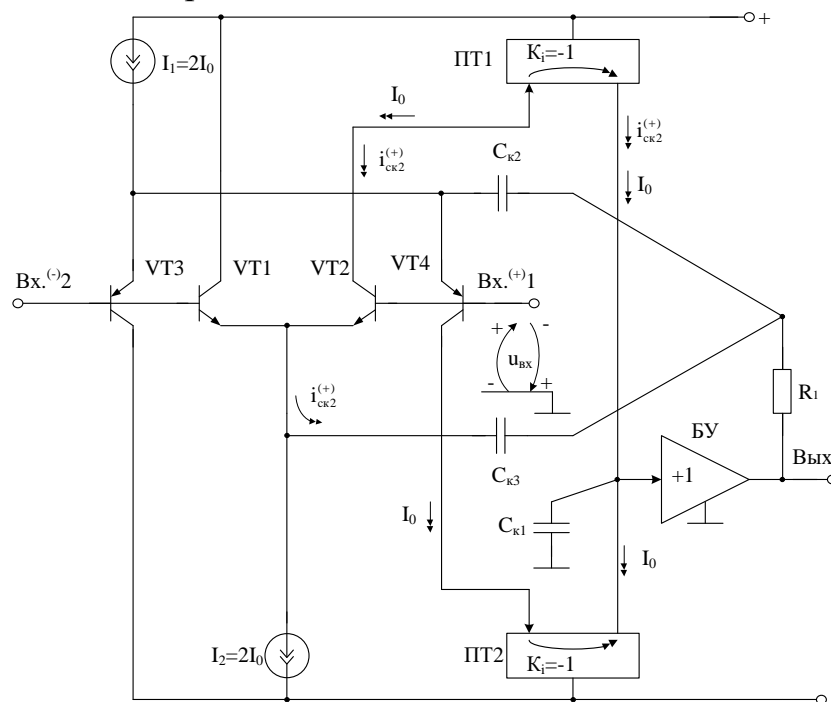


Рис. 1. Быстродействующий ОУ: вариант реализации архитектуры на биполярных транзисторах

Практическая реализация архитектуры рис. 1 может быть осуществлена в рамках различных технологий: tsmc (BiCMOS), SiGe (ИПР, 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,
- источники тока (I_1, I_2), 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 и I_2 , 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 (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 ПТ1 и ПТ2. В качестве токовых зеркал ПТ1, ПТ2 могут применяться более 50 известных схемотехнических решений [1], что обеспечивает получение численных значений K_u в широком диапазоне (до 130 дБ). Рациональный выбор токовых зеркал – один из важных этапов проектирования и оптимизации схемы ОУ.

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

Таким образом, схема рис. 1 – это некоторая обобщенная схема ОУ, в рамках которой для основных технологических процессов (ВЛТ, КМОП) можно реализовать десятки частных вариантов ОУ, отличающихся друг от друга схемотехникой БУ, токовых зеркал ПТ1-ПТ2 [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.

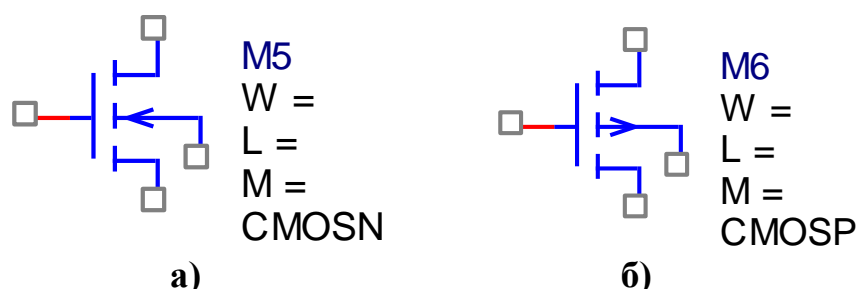


Рис. 2 Графическое изображение КМОП транзисторов tsmc_035_t65 с n- и p-каналами

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

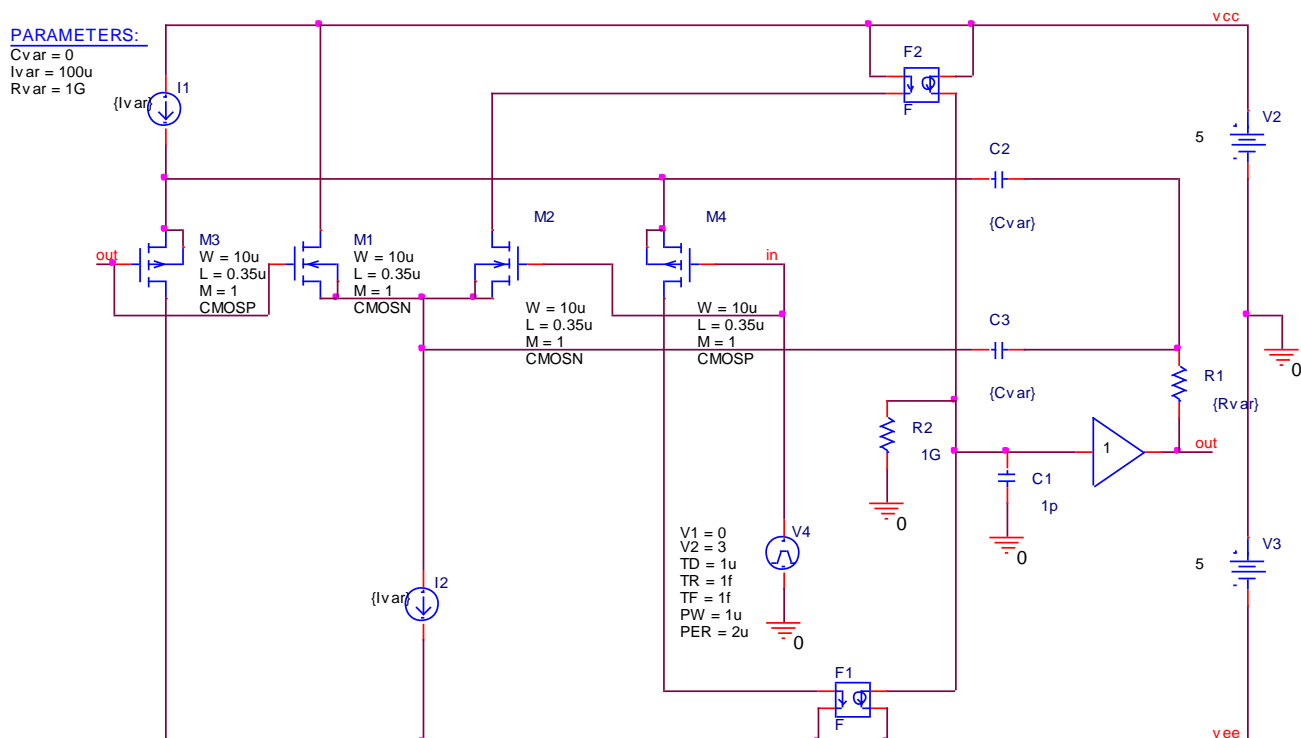


Рис. 3 КМОП ОУ рис. 1 в среде Orcad 9.2 на моделях транзисторов tsmc_035_t65

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 ($I_1=I_2=100\mu\text{A}$, $C_1=1\text{пФ}$, $C_2=C_3=0..50\text{пФ}$, $R_1=R_2=R_{\text{var}}=1\text{Гом}$) иллюстрируют графики рис. 4.

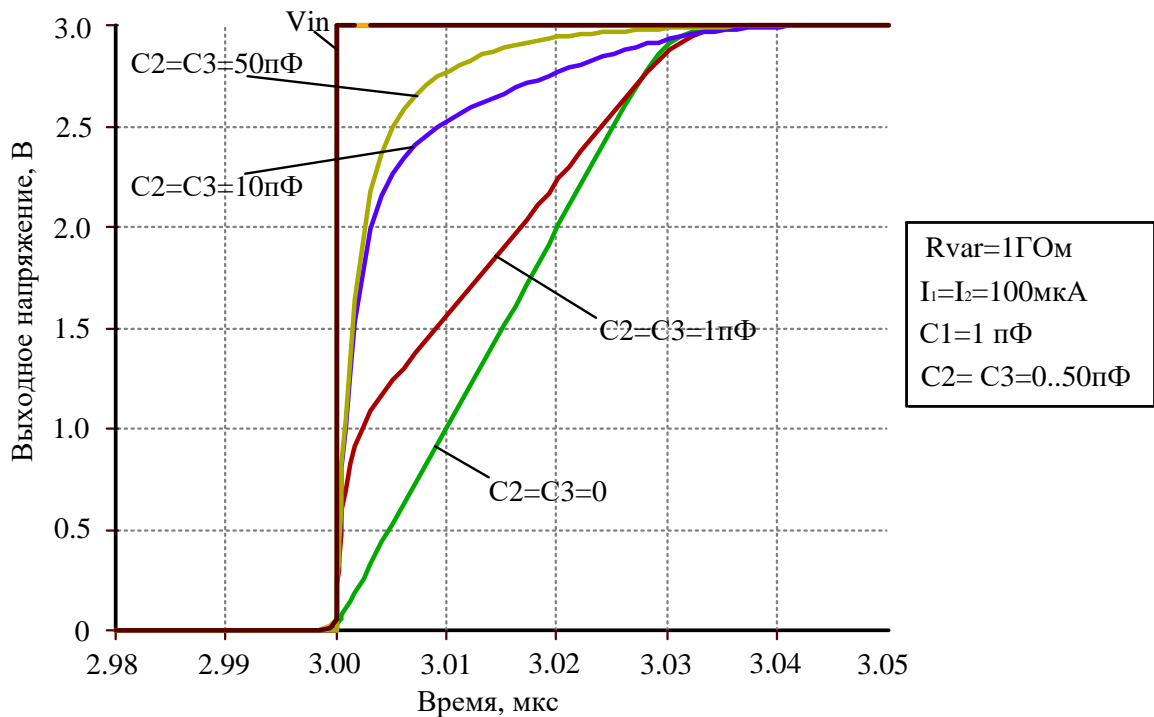


Рис. 4 Переходные процессы КМОП ОУ рис. 3: передний фронт

Зависимости максимальной скорости нарастания выходного напряжения (SR) от значений ёмкостей $C_{к2}=C_{к3}$ при $R1=R2=Rvar=1ГОм$, $I_1=I_2=100мкА$, $C_{к1}=1пФ$, полученные из графиков рис. 4, представлены в табл. 1.

Табл. 1 Зависимость SR от ёмкости дифференцирующих конденсаторов $C_{к2}=C_{к3}=0\div 50пФ$

Ёмкость коррекции $C_{к2}=C_{к3}$	SR, В/мкс
0	98,36
50пФ	307,69

Моделирование показало, что быстродействие рассматриваемого КМОП ОУ при отсутствии дифференцирующей цепи коррекции ($C_{к2}=C_{к3}=0$) пропорционально статическим токам $I_1=I_2$. 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 ($U_{гр}$) драйвера емкости коррекции, включающего входные транзисторы VT1-VT4, токовые зеркала ПТ1-ПТ2, которая оказывает доминирующее влияние на SR, т.к. $SR \approx 2\pi f_1 U_{гр}$, 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 (3 раза). 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 OU (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 КМОП входных транзисторов OU рис.1 на уровне 100 мкА применение дифференцирующих цепей коррекции ($C_{к2}$, $C_{к3}$) обеспечивает увеличение SR в 3 раза.

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 OU рис. 3 при $C_{к1}=1$ пФ, эквивалентном сопротивлении высокоимпедансного узла $R_i=1$ ГОм, $C2=C3=0$ показывает, что предельный разомкнутый коэффициент усиления K_u равен 133 дБ, а верхняя граничная частота (по уровню -3дБ) – 157 Гц. В конкретных схемах данные параметры существенно зависят от свойств токовых зеркал ПТ1, ПТ2 [1].

5. Параметры оптимизации

Практический интерес представляет определение оптимальных значений $C_{к1}$, $C_{к2}$, $C_{к3}$ и статических токов входного каскада $I_1=I_2$ при заданных ограничениях на максимальную скорость нарастания выходного напряжения OU , 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 189
2: E_GAIN1      OUT 0 VALUE {1 * V(N01393)}
3: X_F2  VCC N01514 VCC N01393 SCHEMATIC1_F2
4: C_C2    N07725 N08548 {Cvar}
5: M_M1    VCC OUT N00873 N00873 CMOSN
6: + L=0.35u
7: + W=10u
8: + M=1
9: I_I1    VCC N08548 DC {Ivar}
10: M_M2    N01514 IN N00873 N00873 CMOSN
11: + L=0.35u
```

```

12: + W=10u
13: + M=1
14: C_C3      N07725 N00873 {Cvar}
15: C_C1      0 N01393 1p
16: R_R3      0 N01393 1G
17: I_I2      N00873 VEE DC {Ivar}
18: M_M4      N01979 IN N08548 N08548 CMOSP
19: + L=0.35u
20: + W=10u
21: + M=1
22: X_F1      N01979 VEE N01393 VEE SCHEMATIC1_F1
23: V_V2      VCC 0 5
24: R_R2      OUT N07725 {Rvar}
25: M_M3      VEE OUT N08548 N08548 CMOSP
26: + L=0.35u
27: + W=10u
28: + M=1
29: V_V4      IN 0 AC 1
30: +PULSE 0 3 1u 1f 1f 1u 2u
31: V_V3      0 VEE 5
32: .PARAM Cvar=0 Rvar=1G Ivar=100u
33: .subckt SCHEMATIC1_F2 1 2 3 4
34: F_F2      3 4 VF_F2 1
35: VF_F2     1 2 0V
36: .ends SCHEMATIC1_F2
37: .subckt SCHEMATIC1_F1 1 2 3 4
38: F_F1      3 4 VF_F1 1
39: VF_F1     1 2 0V
40: .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