

Способ повышения стабильности нуля аналоговых микросхем с высокоимпедансным узлом в условиях температурных и радиационных воздействий

Н.Н. Прокопенко, А.И. Серебряков, П.С. Будяков

Проблемная лаборатория перспективных технологий и процессов ЦИПБ РАН и ЮРГУЭС, НТЦ «МикАн», prokopenko@sssu.ru, sashaag@mail.ru, budyakovp@gmail.ru

Аннотация — Предлагается концепция синтеза аналоговых микросхем с малым напряжением смещения нуля при радиационных и температурных изменениях β транзисторов.

Ключевые слова — радиация, напряжение смещения нуля, операционный усилитель, стабилизатор напряжения, аналоговая микросхема.

I. ВВЕДЕНИЕ

Реакция аналоговых микросхем (АМ) на ионизирующее излучение обусловлена, в первую очередь, зависимостью параметров их элементов от эффектов смещения и ионизации [1]. Специфика проявления радиационных эффектов того или иного типа во многом определяется схмотехническими и конструктивно-технологическими особенностями исполнения АМ.

Радиационное и температурное воздействия изменяют напряжение эмиттер-база ($U_{эб}$), обратный ток коллекторного перехода $I_{кб.0}$ и коэффициент усиления по току базы (β) транзисторов, влияющих на напряжение смещения нуля $U_{см} \approx U_{см.1} \pm U_{см.2}$.

Для минимизации первой систематической составляющей $U_{см.1}$, обусловленной дрейфом $U_{эб}$, применяются хорошо известные параллельно-балансные схемы дифференциальных каскадов (ДК), в которых обеспечивается взаимная компенсация нестабильности $U_{эб}$ двух одинаковых входных транзисторов ДК. В результате эта составляющая напряжения смещения, например, операционных усилителей (ОУ), уменьшается: $U_{см.1} \approx 0$.

Что касается второй составляющей $U_{см.2}$, зависящей от изменений β транзисторов ОУ, то для ее минимизации необходимы специальные архитектурные решения входного каскада и его выходной подсхемы, буферный усилитель (БУ) [2-7], в которых реализуются эффекты взаимной компенсации абсолютных значений токов базы и их приращений, обусловленных температурной, радиационной или режимной зависимостью параметров транзисторов.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ современных операционных усилителей с одним выходом показывает, что большинство их схем приводятся к архитектуре рис. 1, в которой можно выделить высокоимпедансный узел «А», обеспечивающий суммирование выходных токов (I_3 и I_4) обобщенного входного дифференциального каскада (ОДК) и входного тока ($I_{бу}$) выходной подсхемы (буферного усилителя, БУ):

$$I_3(\beta_{i.n}, \beta_{j.p}, I_{ij}, u_{вх}) = I_4(\beta_{к.п}, \beta_{м.р}, I_{к.м}, u_{вх}) + I_{бу}(\beta_{s.n}, \beta_{f.p}, I_{sf}), \quad (1)$$

где I_{ij} , $I_{км}$, I_{sf} – координаты источников тока, кратных опорному току I_0 , устанавливающих статический режим транзисторов схемы ОУ; $\beta_{i.n}$, $\beta_{к.п}$, $\beta_{s.n}$; $\beta_{j.p}$, $\beta_{м.р}$, $\beta_{f.p}$ – коэффициенты усиления по току базы р-п-р и п-р-п транзисторов, влияющих на токи узлов 3 (I_3), 4 (I_4) и входной ток ($I_{бу}$) буферного усилителя.

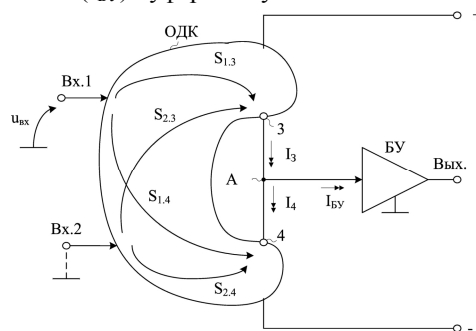


Рис. 1. Обобщенная схема ОУ с высокоимпедансным узлом «А»

Пример построения такого ОУ приведен на рис. 2.

Если в статическом режиме ($u_{вх} = 0$) сумма токов в узле «А» $I_p = I_3 - I_4 - I_{бу}$ при коротком замыкании узла «А» на эквипотенциальную общую шину не равна нулю ($I_p \neq 0$), то для компенсации статической ошибки ОУ в рабочем режиме необходимо на его дифференциальный вход (Вх.1, Вх.2) подать некоторое напряжение, соответствующее ЭДС смещения

нуля $U_{см.2} \approx S_{ДУ}^{-1} I_p$, где $S_{ДУ} = i_A / u_{вх}$ - крутизна усиления входного ОДК при коротком замыкании узла «А» на эквипотенциальную шину.

Таким образом, одним из условий синтеза архитектур ОУ с малыми значениями второй систематической составляющей ЭДС смещения нуля $U_{см.2} \approx 0$ является такое построение архитектуры и основных подсхем ОДК и БУ рис. 1, при которых во всем диапазоне внешних воздействий (температура, радиация), а также режимных изменений параметров транзисторов и их статических токов при вариациях напряжений питания будет обеспечиваться равенство $I_3 = I_4 + I_{БУ}$. Минимизация систематической составляющей $U_{см.2}$ - это «зона ответственности» схемотехников, разрабатывающих аналоговую микросхему.

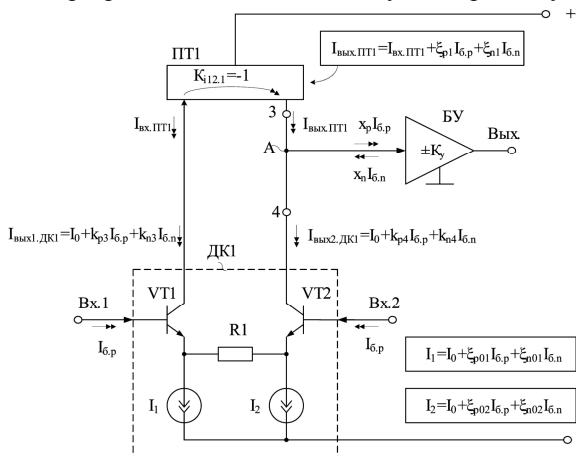


Рис. 2. Пример практической реализации ОУ на основе токового зеркала ПТ1

В дальнейшем при синтезе практических архитектур ОУ, например, рис. 2, будем считать, что каждая из подсхем ДК1, ПТ1, БУ отличается от идеальной и имеет токовые координаты, смещенные относительно «идеального» (нулевого) уровня на величины:

$$I_{см.1} = k_{p3} I_{б.р} + k_{n3} I_{б.н}, \quad (2)$$

$$I_{см.2} = k_{p4} I_{б.р} + k_{n4} I_{б.н}, \quad (3)$$

$$I_{см.ПТ1} = \xi_{p1} I_{б.р} + \xi_{n1} I_{б.н}, \quad (4)$$

$$I_{БУ} = x_n I_{б.н} + x_p I_{б.р}, \quad (5)$$

где $k_{p3}, k_{n3}, k_{p4}, k_{n4}, \xi_{p1}, \xi_{n1}, x_p, x_n$ - масштабные коэффициенты (целые числа) при токах базы р-п-р ($I_{б.н}$) и п-р-п ($I_{б.р}$) транзисторов, характеризующие смещение нулевых уровней подсхем ДК1, ПТ1 и БУ, обусловленные конечной величиной β , их температурными и радиационными изменениями (рис. 3).

В зависимости от построения функциональных узлов ДК1, ПТ1, БУ аналоговой микросхемы их смещения нуля могут быть как положительными, так и отрицательными. Поэтому коэффициенты $k_{p3}, k_{n3}, k_{p4}, k_{n4}, \xi_{p1}, \xi_{n1}, x_p, x_n$, характеризующие $I_{см.i}$, принимают как положительные, так и отрицательные значения. За

счет слабой токовой асимметрии в подсхемах ДК1, ПТ1 и БУ можно обеспечить малое результирующее смещение нуля $U_{см.2}$ в архитектуре ОУ (рис. 2), его температурный и радиационный дрейф.

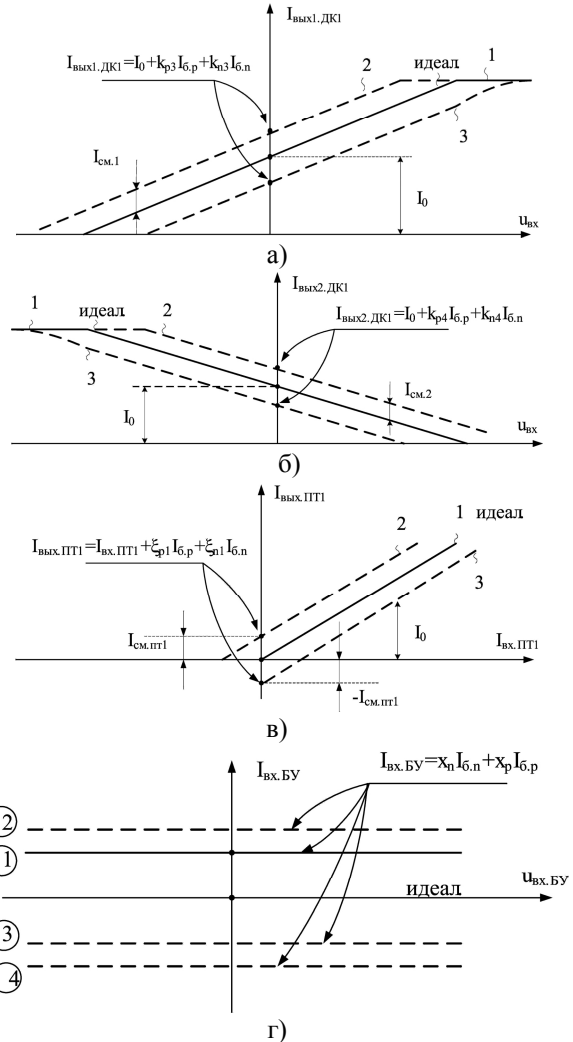


Рис. 3. Возможные варианты смещения характеристик подсхем ДК1 (а,б), ПТ1 (в), БУ(г), зависящее от численных значений и знаков масштабных коэффициентов $k_{p3}, k_{n3}, k_{p4}, k_{n4}, \xi_{p1}, \xi_{n1}, x_p, x_n$

Рассмотрим далее на конкретных примерах практические аспекты проектирования АМ, реализующих предлагаемую концепцию повышения стабильности нуля.

III. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ КАСКАДОВ С МЕСТНОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Выполнение входного каскада ОУ данного класса по схеме с местной отрицательной обратной связью (рис. 2) создает дополнительную степень свободы для введения слабой токовой асимметрии не только в подсхемах ПТ1, БУ, но и в источниках тока I_1 и I_2 входного ДК1.

Подсхемы ДК1, ПТ1, БУ в ОУ рис. 2 отличаются от идеальных и имеют токовые координаты, смещенные относительно «идеального» уровня в соответствии с уравнениями (2)-(5) и рис. 3.

Поэтому, для узла «А» рис. 2:

$$I_0 + k_{p3}I_{\bar{\sigma},p} + k_{n3}I_{\bar{\sigma},n} + \xi_{p1}I_{\bar{\sigma},p} + \xi_{n1}I_{\bar{\sigma},n} + x_n I_{\bar{\sigma},n} = x_p I_{\bar{\sigma},p} + I_0 + k_{p4}I_{\bar{\sigma},p} + k_{n4}I_{\bar{\sigma},n}. \quad (6)$$

Последнее уравнение можно представить в виде:

$$I_{\bar{\sigma},n} (k_{n3} + \xi_{n1} + x_n - k_{n4}) = I_{\bar{\sigma},p} (x_p + k_{p4} - k_{p3} - \xi_{p1}). \quad (7)$$

Таким образом, для минимизации составляющей $U_{см.2}$ необходимо синтезировать подсхемы ДК1, ПТ1, БУ, масштабные коэффициенты которых k_i , ξ_i , x_i при известных значениях токов базы $I_{\bar{\sigma},p}$ и $I_{\bar{\sigma},n}$, применяемых n-p-n и p-n-p транзисторов, удовлетворяют условиям:

$$\begin{aligned} k_{n3} + \xi_{n1} + x_n &= k_{n4}, \\ k_{p3} + \xi_{p1} &= x_p + k_{p4}. \end{aligned} \quad (8)$$

На рис.4 приведен пример синтеза такого ОУ.

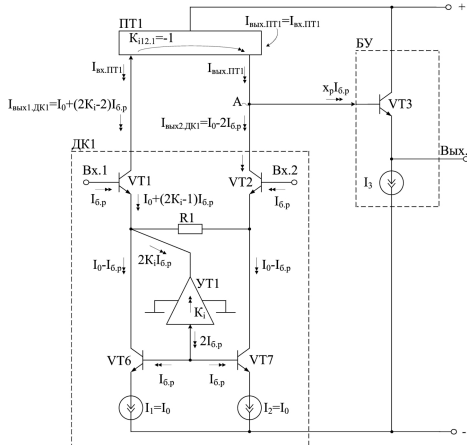


Рис. 4. Схема ОУ с малым $U_{см}$ [4]

Здесь буферный усилитель БУ реализован в виде эмиттерного повторителя на p-n-p транзисторе, следовательно, $x_n = 0$. УТ1 – биполярный транзистор. Токковое зеркало ПТ1 (например, схема Вильсона) не имеет смещения нуля проходной характеристики ($\xi_{p1} = \xi_{n1} = 0$). Статические токи двухполюсников $I_1 = I_2 = I_0$.

Таким образом, коэффициенты k_i , ξ_i , x_i подсхем ДК1, ПТ1, БУ для ОУ рис. 4 должны иметь следующие значения:

$$k_{p3} = (2K_i - 2), \quad k_{p4} = 2, \quad x_n = 0, \quad (9)$$

$$\xi_{p1} = \xi_{n1} = \xi_{p01} = \xi_{p02} = \xi_{n01} = \xi_{n02} = 0, \quad (10)$$

$$2K_i = x_p. \quad (11)$$

где K_i – коэффициент передачи усилителя тока УТ1. При этом, если $K_i = 1$, то x_p должен равняться двум ($x_p = 2$), что обеспечивается выбором $I_3 = 2I_0$.

На рис. 5 приведены температурные зависимости напряжения смещения нуля ОУ рис. 4 [4] и классического ОУ без токовой асимметрии.

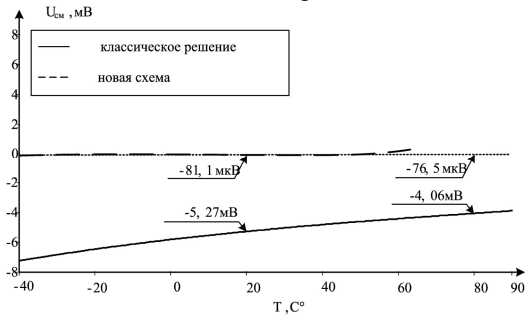


Рис. 5. Температурная зависимость $U_{см}$ сравниваемых дифференциальных каскадов

Из графиков рис. 5 следует, что напряжение смещения нуля в схеме рис. 4 более чем на порядок меньше, чем в классическом ОУ.

IV. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ С НЕСИММЕТРИЧНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ

Операционные усилители этого подкласса ранее не применялись в прецизионных аналоговых интерфейсах из-за проблем с $U_{см}$. Однако они имеют ряд неоспоримых преимуществ, например, малые фазовые искажения по неинвертирующему входу в связи с исключением передачи сигнала через токовое зеркало ПТ1 и емкость коллектор-база входного транзистора VT1 (рис. 6). Цепь согласования потенциалов (ЦСП1) решает задачу “выравнивания” статических потенциалов на коллекторах VT1, VT2, что минимизирует влияние эффекта Эрли на смещение нуля.

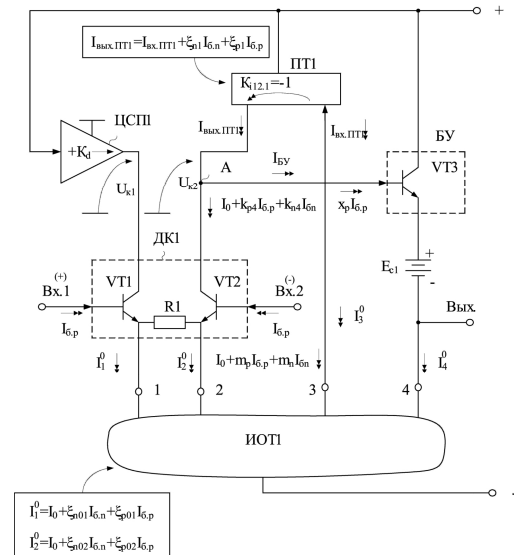


Рис. 6. Архитектура ДУ с малым $U_{см}$

Источник опорных токов ИОТ1 имеет искусственно вводимую слабую токовую асимметрию для каждого из выходов 1, 2, 3:

$$I_1^0 = I_0 + I_{см.1}, I_2^0 = I_0 + I_{см.2}, I_3^0 = I_0 + I_{см.3},$$

где $I_{см.1} = \xi_{n01}I_{б.н} + \xi_{p01}I_{б.р}$; $I_{см.2} = \xi_{n02}I_{б.н} + \xi_{p02}I_{б.р}$;

$I_{см.3} = m_p I_{б.р} + m_n I_{б.н}$; $\xi_{n,ij}$, m_i - коэффициенты пропорциональности при токах базы n-p-n ($I_{б.р}$) и p-n-p ($I_{б.н}$) транзисторов, входящих в ИОТ1.

Токовое зеркало ПТ1 характеризуется уравнением (4). Для конкретного выполнения буферного усилителя его входной ток равен $I_{вх.БУ} = x_p I_{б.р}$.

В соответствии с (1) условие взаимной компенсации токов в узле "А" и, следовательно, минимизации $U_{см.2}$ можно представить в виде равенства

$$I_{б.р}(\xi_{p1} - \xi_{p02} + m_p - x_p + 1) = I_{б.н}(\xi_{n02} - \xi_{n1} - m_n). \quad (12)$$

Учитывая, что токи базы транзисторов $I_{б.н}$ и $I_{б.р}$ при идентичных токах эмиттера, как правило, не одинаковы, можно потребовать, чтобы множители при данных токах уравнения (12) были равны нулю, т.е. выполнение условий

$$\begin{cases} \xi_{p1} + m_p + 1 = x_p + \xi_{p02} \\ \xi_{n02} = \xi_{n1} + m_n \end{cases} \quad (13)$$

Система уравнений (13) позволяет синтезировать более сотни важных практических схем ОУ с малым напряжением смещения нуля, отличающихся друг от друга построением ДК1, ПТ1, БУ, ИОТ, масштабные коэффициенты которых удовлетворяют условиям (13).

На рис.7 приведен пример синтеза ОУ со слабой токовой асимметрией. Здесь буферный усилитель БУ реализован в виде эмиттерного повторителя на n-p-n транзисторе VT5, следовательно $x_n = 0$. Токовое зеркало ПТ1 (например, схема Вильсона) не имеет смещения нуля проходной характеристики ($\xi_{p1} = \xi_{n1} = 0$).

Статические токи двухполосников $I_1 = I_2 = I_0$, т.е. $\xi_{p01} = \xi_{p02} = -1$.

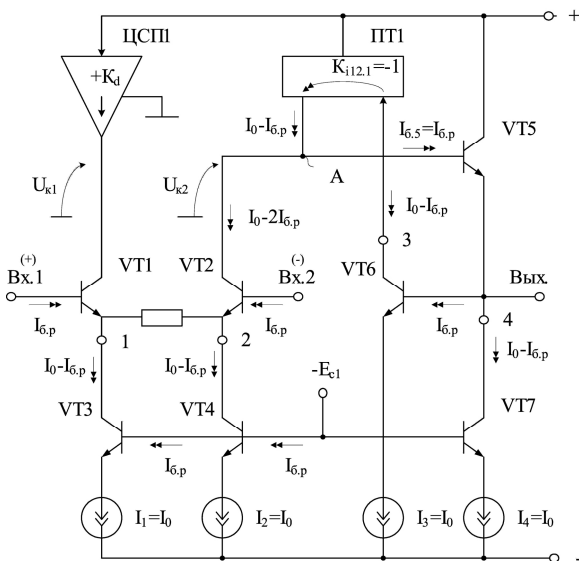


Рис. 7. Схема ДУ с архитектурой рис. 6 [5]

Таким образом, при выбранных начальных условиях коэффициенты k_i , ξ_i , x_i , m_i для подсхем ОУ рис. 6 должны удовлетворять уравнению:

$$m_p + 1 = x_p + \xi_{p02}. \quad (14)$$

Если выбрать $x_p = 1$, то m_p должно быть $m_p = -1$.

Это значение m_p обеспечивается введением транзистора VT6.

На рис. 8 приведены температурные зависимости напряжения смещения нуля ОУ рис. 7. Из графиков рис. 8 следует, что в широком диапазоне температур напряжение смещения нуля в предлагаемой схеме более чем на порядок меньше, чем в классическом ОУ.

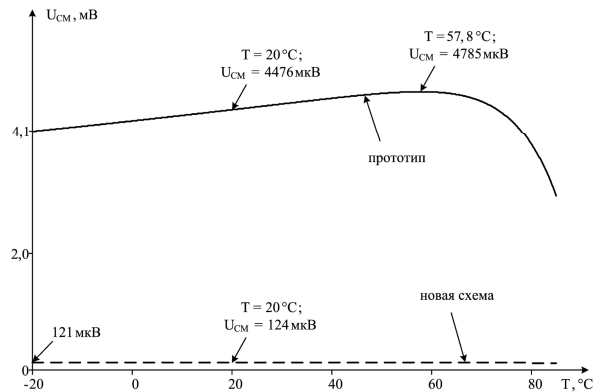


Рис. 8. Температурная зависимость $U_{см}$ сравниваемых ДУ

Приведенные на рис. 9, рис. 10 и рис. 11 схемы иллюстрируют методику синтеза прецизионных ОУ с несимметричным включением токового зеркала ПТ1 [6,7].

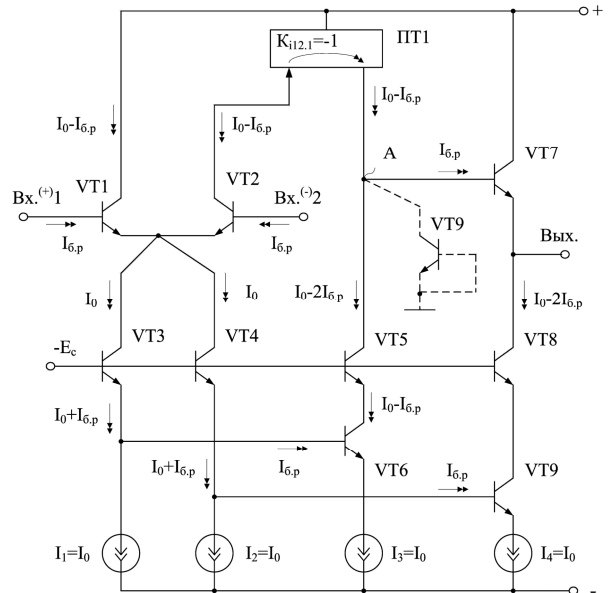


Рис. 9. Операционный усилитель с несимметричным включением ПТ1

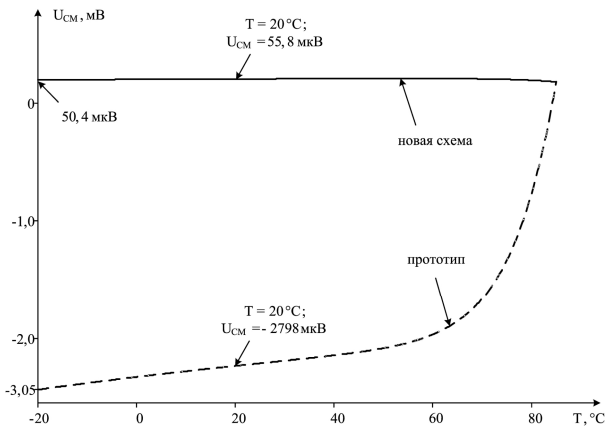


Рис. 10. Зависимость $U_{CM} = f(T)$ схемы рис. 9

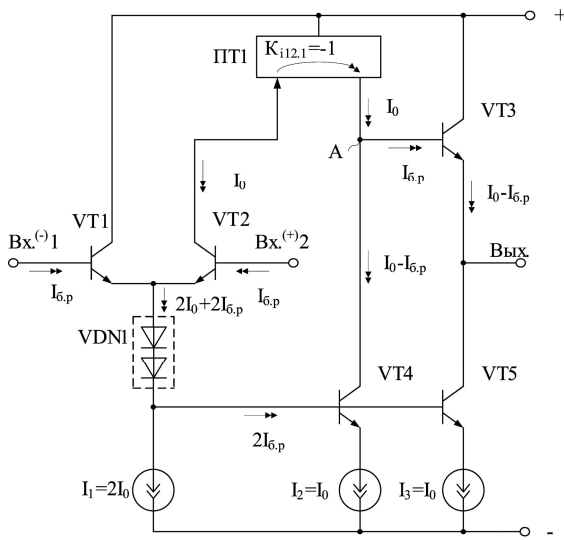


Рис. 11. Пример построения ОУ с высокой стабильностью нуля [7]

Проведенный анализ и компьютерное моделирование показывают, что ОУ с несимметричным включением токовых зеркал, которые никогда не использовались в прецизионных аналоговых микросхемах из-за проблем с температурной стабильностью U_{CM} , могут иметь при их рациональном проектировании весьма малое смещение нуля при температурных и радиационных изменениях β транзисторов.

V. КАСКОДНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Каскодные операционные усилители рис. 12 имеют значительно большее количество вариантов введения слабой токовой асимметрии для компенсации U_{CM} , которая может вводиться не только в подсхемах ПТ1, ДК1, но и в выходном каскаде ВК2 [2,3,8].

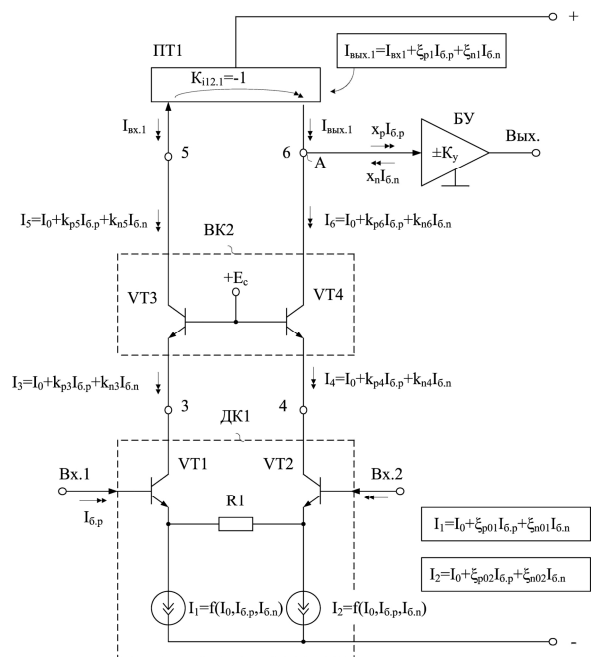


Рис. 12. Архитектура каскодных ДУ с малым U_{CM}

Каждая из подсхем ДК, ПТ1, БУ, ВК2 рис. 12 отличается от идеальной и имеет выходные токовые координаты, смещенные в соответствии с рис. 3 относительно «идеального» уровня на величины:

$$I_{CM,3} = k_{p3} I_{\delta,p} + k_{n3} I_{\delta,n}, \quad (15)$$

$$I_{CM,4} = k_{p4} I_{\delta,p} + k_{n4} I_{\delta,n}, \quad (16)$$

$$I_{CM,5} = k_{p5} I_{\delta,p} + k_{n5} I_{\delta,n}, \quad (17)$$

$$I_{CM,6} = k_{p6} I_{\delta,p} + k_{n6} I_{\delta,n}, \quad (18)$$

$$I_{CM,PT} = \xi_{p1} I_{\delta,p} + \xi_{n1} I_{\delta,n}, \quad (19)$$

$$I_{BY} = x_n I_{\delta,n} + x_p I_{\delta,p}, \quad (20)$$

где k , ξ , x – масштабные коэффициенты при токах базы $I_{\delta,n}$, $I_{\delta,p}$, характеризующие смещение нулевых уровней подсхем ДК1, ПТ1 и БУ, ВК2.

Поэтому условие компенсации $U_{CM,2}$ можно представить в виде:

$$\begin{cases} k_{n3} + k_{n5} + \xi_{n1} + x_n = k_{n6} + k_{n4} \\ x_p + k_{p6} + k_{p4} = k_{p3} + k_{p5} + \xi_{p1} \end{cases} \quad (21)$$

Таким образом, для минимизации составляющей $U_{CM,2}$ необходимо синтезировать подсхемы ДК1, ПТ1, БУ, ВК2, масштабные коэффициенты которых k , ξ , x удовлетворяют условиям (21).

Примеры построения ОУ данного подкласса, удовлетворяющих уравнениям (21), приведены на рис. 13.

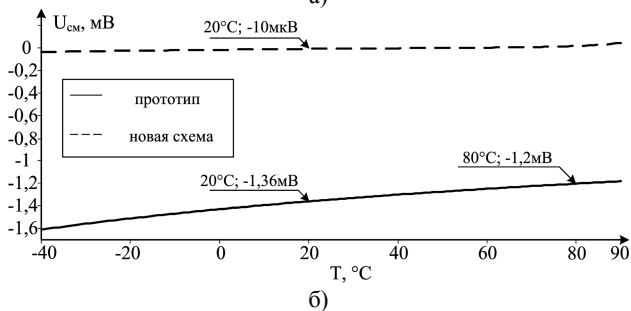
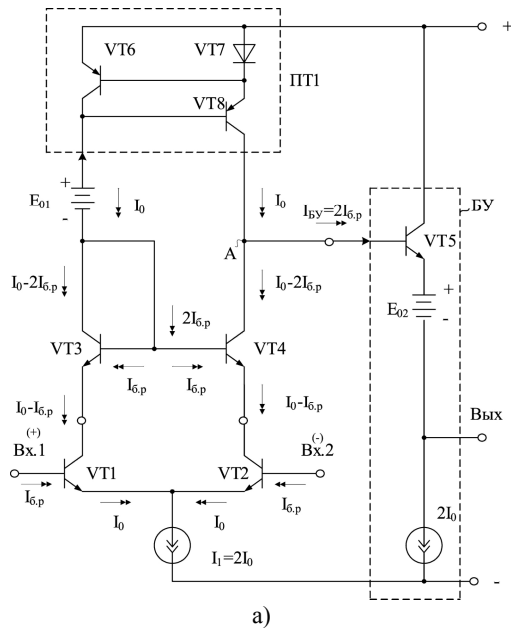


Рис. 13. Практическая схема каскодного ОУ (а) и температурная зависимость его U_{cm} (б) [8]

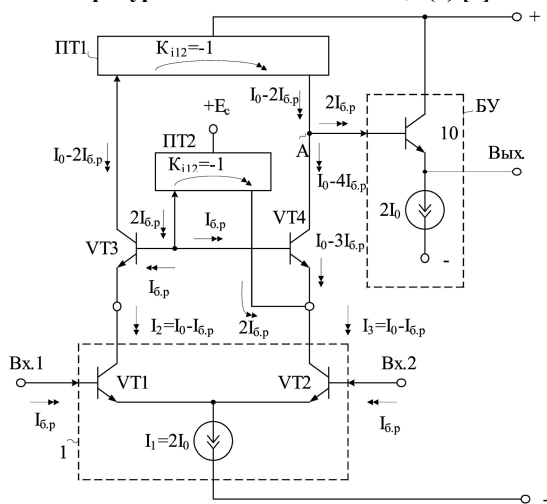


Рис. 14. Каскодный ОУ с малым U_{cm} [2]

Рассмотренный выше способ повышения стабильности нуля работает практически в любых архитектурах АМ, имеющих высокоимпедансный узел.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для минимизации систематической составляющей напряжения смещения нуля аналоговых микросхем

(АМ) нового поколения следует целенаправленно вводить по разработанным выше правилам слабую токовую асимметрию в основные функциональные узлы АМ. Это позволяет уменьшить на 1–2 порядка статическую погрешность ОУ, обусловленную конечной величиной β транзисторов и его радиационной (или температурной) зависимостью.

В связи с большим многообразием вариантов построения функциональных узлов АМ (ДК1, ПТ1, БУ, ИОТ и др.), одновременно удовлетворяющих условиям взаимной компенсации, можно синтезировать более 1000 практических схем с малым напряжением смещения нуля.

Для упрощения процедур синтеза АМ целесообразно создать базу данных для основных вариантов построения функциональных узлов, применяемых в современной микросхемотехнике, которая должна содержать информацию об их масштабных коэффициентах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Агаханян Т.М. Проектирование электронных устройств на интегральных операционных усилителях [Текст]: учебное пособие / Т.М. Агаханян. – М.: МИФИ, 2008. – 856 с.
- [2] Каскодный дифференциальный усилитель с малым напряжением смещения нуля [Текст]: заявка на патент Российской Федерации, МПК8 Н 03 F 3/45, 3/34 / Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Будяков П.С. - № 2009119631/09; заявл. 25.05.2009 (195).
- [3] Каскодный дифференциальный усилитель с малым напряжением смещения нуля [Текст]: заявка на патент Российской Федерации, МПК8 Н 03 F 3/45, 3/34 / Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Серебряков А.И. - № 2009119952/09; заявл. 26.05.2009 (194).
- [4] Дифференциальный усилитель с малым напряжением смещения нуля [Текст]: заявка на патент Российской Федерации, МПК8 Н 03 F 3/45, 3/34 / Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Будяков П.С. - № 2009120332/09; заявл. 28.05.2009. (188).
- [5] Дифференциальный операционный усилитель [Текст]: заявка на патент Российской Федерации; МПК8 Н 03 F 3/45, 3/34 / Прокопенко Н.Н., Федяшов Д.С., Серебряков А.И. - № 2009133746/09; заявл. 08.09.2009 (242)
- [6] Дифференциальный операционный усилитель [Текст]: заявка на патент Российской Федерации; МПК8 Н 03 F 3/45, 3/34. / Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Ляшов М.В. - № 2009133566/09; заявл. 07.09.2009 (241).
- [7] Каскодный дифференциальный усилитель с малым напряжением смещения нуля [Текст]: заявка на патент Российской Федерации; МПК8 Н 03 F 3/45, Н 03 F 3/34. / Прокопенко Н. Н., Серебряков А. И., Будяков П. С. - № 2009118734/09; заявл. 18.05.2009 (151).

Статья подготовлена в рамках госконтракта П507 от 05.08.2009 г. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».