

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ МУЛЬТИДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ВХОДНЫМ КАСКАДОМ

Манжула В.Г.¹, Прокопенко Н.Н.¹

¹ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса», Шахты, Россия (346500, г. Шахты, ул. Шевченко, д. 147), e-mail: mail@sssu.ru

Существенным недостатком дифференциальных операционных усилителей с неуправляемой сигналом активной нагрузкой является повышенное значение систематической составляющей напряжения смещения нуля, зависящее от погрешности передачи по току применяемого токового зеркала. Особенно существенной эта погрешность получается при использовании в качестве токового зеркала простейших, но наиболее высокочастотных схмотехнических решений. Предложенная в работе обобщенная структура обеспечивает уменьшение абсолютного значения напряжения смещения нуля, а также его температурного и радиационного дрейфа при использовании в схеме токовых зеркал, имеющих коэффициент передачи по току, не равный единице. Результаты компьютерного моделирования в среде PSpice на моделях интегральных транзисторов ФГУП НПП «Пульсар» показали достоинства разработанной структуры в сравнении с классической. Приведена схмотехническая реализация предлагаемой структуры на базе компонентов аналогового базового матричного кристалла АБМК_1_3.

Ключевые слова: модель, операционный усилитель, напряжение смещения нуля, мультидифференциальный входной каскад, базовый матричный кристалл.

PRECISION OPERATIONAL AMPLIFIER WITH INTEGRATED MULTIDIFFERENTIAL INPUT STAGE

Manzhula V.G.¹, Prokopenko N.N.¹

¹The South Russian state university of economy and service, Shahty, Russia (346500, Shahty, Shevchenko str., 147) mail@sssu.ru

A major shortcoming of the differential operational amplifier with an unmanaged signal active load is increased value of the systematic component of the voltage offset, depending on the error in the transfer of current used current mirror. Particularly significant this error is obtained by using as simple current mirror, but the most high-circuit solutions. Proposed in the generalized structure provides a reduction of the absolute value of the voltage offset, as well as its temperature and radiation drift using current mirrors in the circuit with current transfer ratio is not equal to one. The results of computer simulation in PSpice model-integrated transistors "Pulsar" showed dignity developed structure in comparison with the classical. Schematic structure of the implementation of the proposed component-based analog base ABMC_1_3 crystal matrix presented in the paper.

Keywords: model, an operational amplifier, voltage offset, multidifferential input stage, the base matrix crystal.

Введение

В качестве устройств предварительной обработки информации в современной измерительной и радиоэлектронной аппаратуре используются дифференциальные операционные усилители (ОУ) с неуправляемой сигналом активной нагрузкой (токовым зеркалом), обеспечивающей непосредственное управление буферным усилителем. Такие ОУ имеют одноканальную структуру передачи по цепи общей отрицательной обратной связи, характеризуются меньшими фазовыми искажениями сигнала, более высокими показателями, характеризующими устойчивость ОУ, но до сих пор находили применение только в устройствах с низкими требованиями к стабильности нулевого уровня. Существенным недостатком таких ОУ является то, что они имеют повышенное значение систематической составляющей напряжения смещения нуля ($U_{см}$), зависящей от погрешности передачи по

току применяемого токового зеркала. Особенно существенной эта погрешность получается при использовании в качестве токового зеркала простейших, но наиболее высокочастотных схемотехнических решений, для которых $K_i \neq 1$.

Анализ и разработка обобщенной архитектуры ОУ

Типичным представителем такого класса ОУ является схема (рисунок 1), представленная в патенте [6], имеющая в качестве цепи нагрузки входных транзисторов

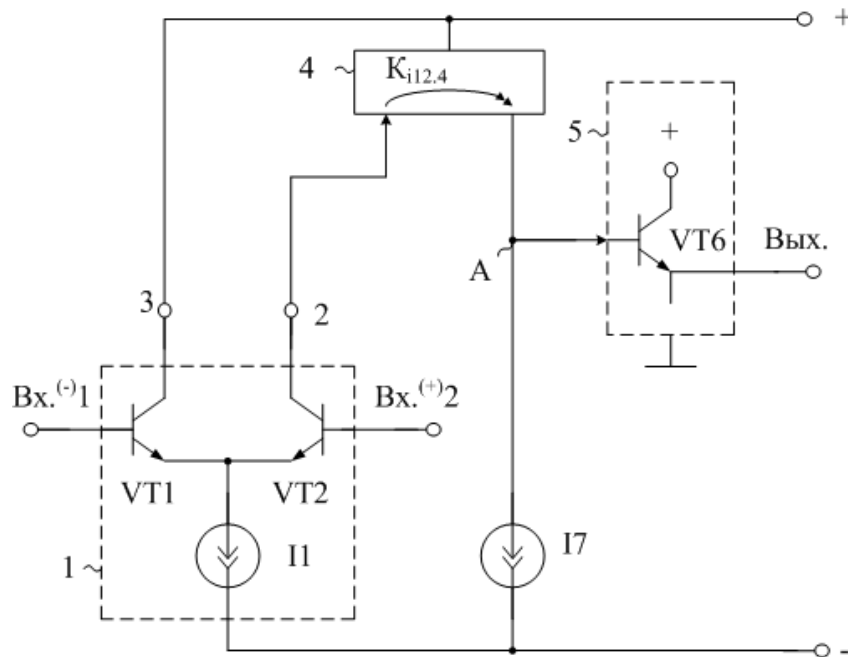


Рисунок 1 – Классический операционный усилитель с неуправляемой сигналом активной нагрузкой

токовые зеркала с несимметричным включением (по отношению к входному каскаду). Схема включает: входной дифференциальный каскад - 1 (VT1, VT2, I1), с первым - 2 и вторым - 3 токовыми выходами; токовое зеркало - 4; буферный усилитель - 5, с входным транзистором VT6; источник тока I7.

На рисунке 2 представлена обобщенная схема предлагаемого операционного усилителя [1].

Основная задача, решаемая в предлагаемом ОУ, состоит в уменьшении абсолютного значения $U_{см}$, а также его температурного и радиационного дрейфа при использовании в схеме токовых зеркал, имеющих коэффициент передачи по току, не равный единице $K_i \neq 1$. Такое значение K_i характерно для многих классических токовых зеркал [2-4].

В схему введены второй дифференциальный каскад - 10 (VT23, VT24, I25); токовое зеркало - 12; цепи согласования - 15, 16, 17.

Включение дополнительной цепи согласования потенциалов 15 способствует симметрированию режимов работы первого входного дифференциального каскада, повышению стабильности $U_{см}$. В качестве цепи согласования потенциалов 15 могут использоваться резистивно-диодные делители напряжения питания, каскадные усилители и т.п.

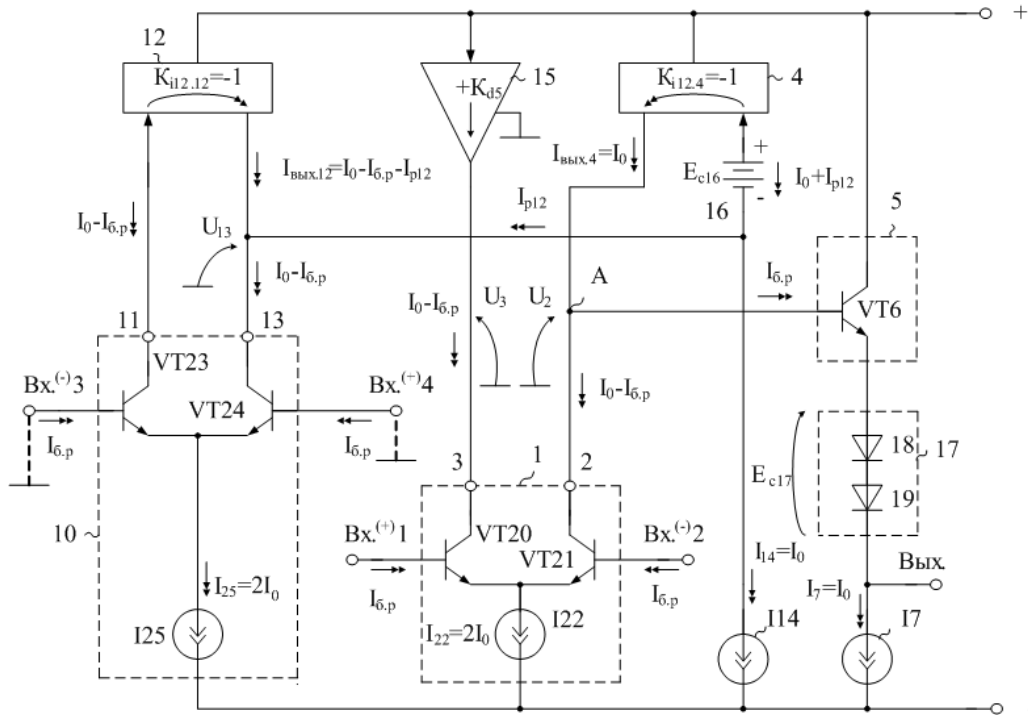


Рисунок 2 – Обобщенная схема предлагаемого прецизионного операционного усилителя

Введение второй 16 и третьей 17 цепей согласования потенциалов позволяет еще более снизить $U_{см}$ и сформировать заданную амплитуду выходного напряжения ОУ.

В ряде случаев в заявляемом ОУ могут использоваться входы второго входного дифференциального каскада, что позволяет реализовать на его основе так называемые мультидифференциальные ОУ, имеющие большие перспективы применения в микросхемотехнике [5].

Рассмотрим факторы, определяющие систематическую составляющую напряжения смещения нуля ($U_{см}$) в схеме на рисунке 2, т.е. зависящие от схемотехники ОУ.

Если величины источников тока I_{22} и I_{25} первого и второго входных дифференциальных каскадов равны $2I_0$, а источников тока I_7 и I_{14} – величине I_0 , то токи коллекторов транзисторов VT20, VT21, VT23, VT24 первого и второго входных дифференциальных каскадов определяются соотношениями:

$$I_{к20} = I_{к21} = I_{к23} = I_{к24} = I_0 - I_{6,p}, \quad (1)$$

где $I_{\text{б.р}} = I_0 / \beta_i$ - ток базы n-p-n транзистора при токе эмиттера $I_3 = I_0$, β_i - коэффициент усиления по току базы i -го транзистора.

Поэтому выходной ток токового зеркала 12 определяется как

$$I_{\text{вых.12}} = I_0 - I_{\text{б.р}} - I_{\text{р12}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{р12}}$ - разность токов на выходе и входе второго 12 токового зеркала.

Токи на входе и выходе первого 4 токового зеркала равны суммам следующих токов

$$I_{\text{вх.4}} = I_0 + I_{\text{р12}}, \quad (3)$$

$$I_{\text{вых.4}} = I_0 + I_{\text{р12}} - I_{\text{р1}}. \quad (4)$$

Так как токовые зеркала 4 и 12 выполнены с использованием идентичных схемотехнических решений, то их токи ошибки одинаковы ($I_{\text{р12}} = I_{\text{р4}}$). Следовательно, выходной ток токового зеркала 4

$$I_{\text{вых.4}} = I_0. \quad (5)$$

Поэтому разность токов в узле «А» при его коротком замыкании на эквипотенциальную общую шину равна нулю:

$$I_{\Sigma} = I_{\text{вых.4}} - I_{\text{к2}} - I_{\text{б6}} = I_0 - (I_0 - I_{\text{б.р}}) - I_{\text{б.р}} = 0. \quad (6)$$

Таким образом, в предлагаемом ОУ при выполнении условия (6) уменьшается систематическая составляющая $U_{\text{см}}$, обусловленная конечной величиной β транзисторов и его радиационной (или температурной) зависимостью. Как следствие, это уменьшает $U_{\text{см}}$, так как разностный ток I_{Σ} в узле «А» создает $U_{\text{см}}$, зависящее от крутизны S преобразования входного дифференциального напряжения $u_{\text{вх}}$ в выходной ток узла «А»:

$$S = \frac{i_{\Sigma}}{u_{\text{вх}}} = \frac{1}{r_{320} + r_{321}}, \quad (7)$$

где $r_{320} = r_{321}$ - сопротивления эмиттерных переходов входных транзисторов VT20 и VT21 первого входного дифференциального каскада.

Поэтому для схемы на рисунке 2

$$U_{\text{см}} \approx I_{\Sigma}(r_{320} + r_{321}) = I_{\Sigma} \left(\frac{2\varphi_{\text{T}}}{I_0} \right) \approx 0, \quad (8)$$

где $\varphi_{\text{T}} = \frac{kT}{q}$ - температурный потенциал (k – постоянная Больцмана, T – температура,

q – заряд электрона) при $T=300^{\circ}\text{K}$ $\varphi_{\text{T}} \approx 25\text{мВ}$.

В классическом ОУ $I_{\Sigma} \neq 0$, поэтому здесь систематическая составляющая $U_{\text{см}}$ получается как минимум на порядок больше, чем в предлагаемой схеме.

Моделирование

На рисунке 3 показаны схемы классического (рисунок 3а) и предлагаемого (рисунок 3б) ОУ в среде компьютерного моделирования PSpice на моделях интегральных транзисторов ФГУП НПП «Пульсар» [5].

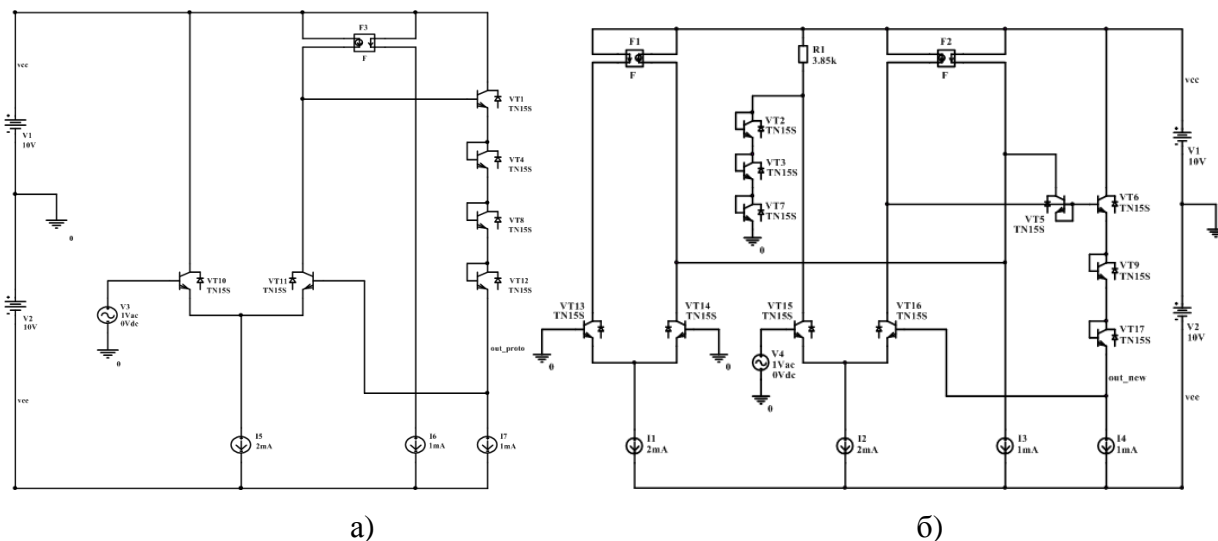


Рисунок 3 - Схемы классического (а) и предлагаемого (б) ОУ в среде компьютерного моделирования PSpice на моделях интегральных транзисторов ФГУП НПП «Пульсар»

На рисунке 4 приведены температурные зависимости напряжения смещения нуля сравниваемых схем (рисунок 3).

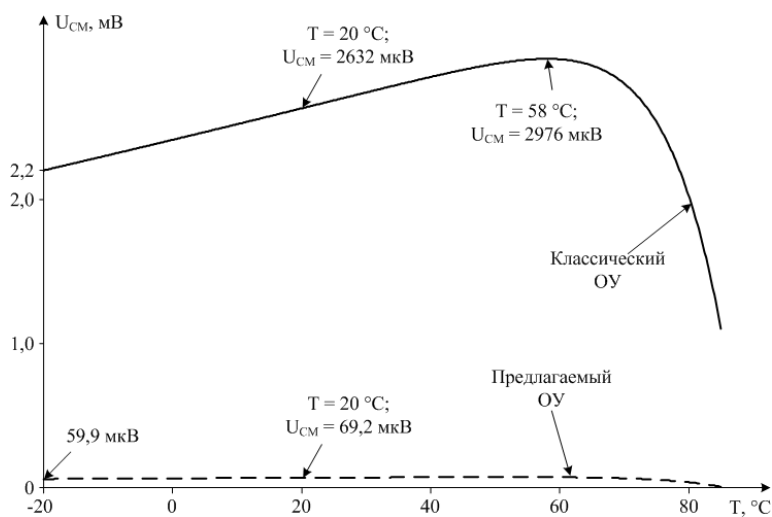


Рисунок 4 Температурные зависимости напряжения смещения нуля классического и предлагаемого ОУ

Результаты компьютерного моделирования (рисунок 4) схем, представленных на рисунке 3, подтверждают приведенные выше теоретические выводы. Несмотря на существенное уменьшение β транзисторов, предлагаемый ОУ и в этих условиях имеет меньшее напряжение смещения нуля, чем классический ОУ.

Реализация

На рисунке 5 представлена принципиальная электрическая схема мультидифференциального ОУ, построенная на базе компонентов аналогового базового матричного кристалла АБМК_1_3.

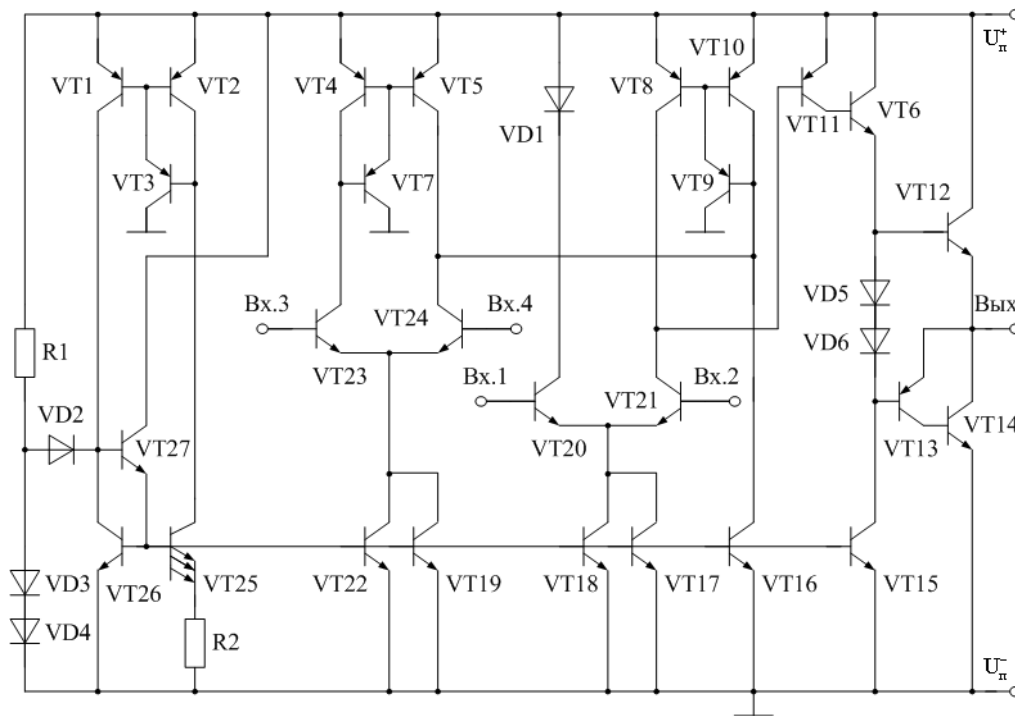


Рисунок 5 Принципиальная электрическая схема мультидифференциального ОУ на базе компонентов АБМК_1_3

Элементам обобщенной схемы прецизионного ОУ (рисунок 2) соответствуют следующие элементы принципиальной схемы (рисунок 5): первый входной дифференциальный каскад 1 – VT20, VT21, VT17, VT18; второй входной дифференциальный каскад 10 – VT23, VT24, VT19, VT22; токовое зеркало 4 – VT8-VT10; токовое зеркало 12 – VT1-VT3; буферный усилитель 5 и цепь согласования 17 – VT6, VT11-VT14, VD5, VD6; цепь запуска – VD2-VD4, R1; узел задания статического режима – VT1-VT3, VT25-VT27, R2 а также источники тока I7 – VT15, I14 – VT16.

Величина тока I_0 , протекающего в коллекторах транзисторов VT1, VT2, VT26, VT25, VT15-VT19, VT22, определяется соотношением:

$$I_0 = \frac{2\varphi_T}{R_2} \ln\left(\frac{S_{26}}{S_{25}}\right), \quad (9)$$

где S_{26}/S_{25} – отношение площадей эмиттерных переходов транзисторов VT26 и VT25.

Таким образом, разработанный прецизионный мультидифференциальный ОУ имеет высокие качественные показатели, среди которых необходимо выделить большой

статический коэффициент усиления и коэффициент ослабления синфазного сигнала, широкий диапазон рабочих частот и низкий уровень э.д.с. смещения нуля. Предложенная обобщенная схема мультидифференциального ОУ изменяет подход к построению измерительных (инструментальных) средств для достаточно широкого класса инженерных приложений, а разработанная принципиальная схема может использоваться в качестве IP-модуля современных систем на кристалле.

Список литературы

1. Дифференциальный усилитель : пат. 2400925 Рос. Федерация : МПК H03F 3/45 / В.Г. Манжула, Н.Н. Прокопенко, С.А. Морозов; заявитель и патентообладатель Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса. № 2009141035/07 ; заявл. 05.11.2009 ; опубл. 27.09.2010, Бюл. № 27.
2. Манжула В.Г. Функционально интегрированная микроэлектронная система защиты на основе быстродействующего датчика температуры // Датчики и системы. – 2012. – № 7. – С. 18-22.
3. Манжула В.Г. Модели, методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза избыточных смешанных СФ-блоков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – Т. 115. – № 2. – С. 79-87.
4. Манжула В.Г. Моделирование системного уровня процесса обработки информации при синтезе аналоговых сложных функциональных блоков // Системы управления и информационные технологии. – 2010. – № 3 (41). – С. 36-40.
5. Манжула В.Г. Исключение структурной, функциональной и схемотехнической избыточности при синтезе аналоговых систем в корпусе // Научно-технический вестник Поволжья. - 2011. - № 2. - С. 123-127.
6. Patent US 4.415.868, fig.3. Current U.S. Class: 330/294 ; 330/107 One and one half pole audio power amplifier frequency compensation / Gross; William H.: Assignee National Semiconductor Corporation (Santa Clara, CA). - November 15, 1983.

Рецензенты:

Марчук Владимир Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектронные системы», ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», г. Шахты.

Божич Владимир Иванович, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Информационные системы и радиотехника», ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», г. Шахты.