

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры: расчет и реализация. – М.: Мир, 1982. – 452 с.
2. Турулин И.И. Управляемые цифровые фильтры / Технолог. ин-тут. Южн. федерал. ун-тета. – Таганрог, 2009. – 260 с. Библиогр. 22 назв. Рус. Деп. в ВИНТИ 18.06.09. №383-В2009.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.Н. Долгов.

Турулин Игорь Ильич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: turulin59@gmail.com.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371638.

Кафедра автоматизированных систем научных исследований и экспериментов; профессор.

Булгакова Юлия Ивановна

E-mail: sunshine_yu@mail.ru.

Тел.: 88634673641.

Аспирантка.

Turulin Igor' Il'ich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: turulin59@gmail.com.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371638.

The Department of Automated Research Systems; Professor.

Bulgakova Uyliya Ivanovna

E-mail: sunshine_yu@mail.ru.

Phone: +78634673641.

Postgraduate Student.

УДК 621.37

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

**МЕТОДЫ ВЗАИМНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ТОКОВЫХ
АВТОНОМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРОВ НА НУЛЕВОЙ
УРОВЕНЬ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ**

Рассматривается задача синтеза структурных и принципиальных схем аналоговых устройств (операционных усилителей, непрерывных стабилизаторов, компараторов напряжения и т.п.), имеющих малый нулевой уровень (Uсм), и его дрейф в условиях температурных и радиационных воздействий. При этом за основу для модернизации приняты хорошо известные схемы базовых аналоговых микросхем, в которые по сформулированным ниже правилам вводится некоторая структурная избыточность, обеспечивающая уменьшение Uсм и его дрейф на один-два порядка.

Радиация; температура; напряжение смещения нуля; операционный усилитель; компенсация; аналоговая микросхема.

N.N. Prokopenko, A.I. Serebryakov, P.S. Budyakov

METHODS OF MUTUAL COMPENSATION OF THE INFLUENCE OF CURRENT AUTONOMOUS PARAMETERS OF TRANSISTORS ON A ZERO-LEVEL ANALOG CIRCUITS

The problem of synthesis, of structural and schematics of analog devices (operational amplifiers, continuous stabilizers, voltage comparators, etc.) with small zero-level (offset voltage, Uov), and its drift in temperature and radiation effects. At the same time as the basis for the modernization of the scheme adopted by well-known basic analog circuits, in which by the rules set forth below, we introduce some structural redundancy, which provides a decrease Uov and its Effect on one or two orders of magnitude.

Radiation; temperature; offset voltage; operational amplifier; compensation; analog microcircuit.

Введение. Радиационное и температурное воздействия изменяют напряжение эмиттер-база ($U_{эб}$), обратный ток коллекторного перехода $I_{кб}$ и коэффициент усиления по току базы (β) транзисторов, влияющих на напряжение смещения нуля операционных усилителей, компараторов и др. АМ.

Для минимизации первой систематической составляющей $U_{см.}$, обусловленной дрейфом $U_{эб}$, применяются хорошо известные параллельно-балансные схемы дифференциальных каскадов.

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

Автономные параметры транзисторов в условиях радиационных и температурных воздействий. Для определения в диапазоне температурных и радиационных воздействий схемных функций аналоговых устройств, содержащих многополюсные элементы, необходимо оценить их автономные параметры [2]:

$$E_{wr} = E_{wr}^0 + \Delta E_{wr}; J_{ws} = J_{ws}^0 + \Delta J_{ws}, \quad (1)$$

где $E_{wr}^0 = U_r^0 - (\sum z_{ri} I_i^0 + \sum \mu_{rj} U_j^0)$; $J_{ws}^0 = I_s^0 - (\sum B_{si} I_i^0 + \sum y_{sj} U_j^0)$; $y_{ri} = \frac{\partial I_s}{\partial U_j}$,

$$\Delta E_{wr} = \sum_k \left. \frac{\partial U_r}{\partial \varepsilon_k} \right|_{X_0, \varepsilon_k} (\varepsilon_k - \varepsilon_k^0), B_{si} = \frac{\partial I_s}{\partial I_i}, \mu_{ri} = \frac{\partial U_r}{\partial I_j}, \Delta J_{ws} = \sum_k \left. \frac{\partial I_r}{\partial \varepsilon_k} \right|_{X_0, \varepsilon_k} (\varepsilon_k - \varepsilon_k^0),$$

$$z_{ri} = \frac{\partial U_r}{\partial I_i},$$

где E_{wr}^0, J_{ws}^0 – постоянные составляющие автономных параметров E_{wr}, J_{ws} ; $\varepsilon_k^0, \varepsilon_k$ – внешние возмущающие факторы; $\Delta E_{wr}, \Delta J_{ws}$ – отклонение автономных параметров; U_i, I_i – переменные, характеризующие каждый вход многополюсного элемента [2].

Уравнения транзистора как автономного четырехполюсника (рис. 1) для системы h-параметров в схеме с общей базой имеют вид

$$u_1 = h_{11} i_1 + h_{12} u_2 + e_h^* + e_h, \quad i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} u_2 + j_h^* + j_h, \quad (2)$$

где e_h, j_h – автономные параметры транзистора, учитывающие влияние температуры на статический режим; e_h^*, j_h^* – автономные параметры транзистора, характеризующие влияние радиации.

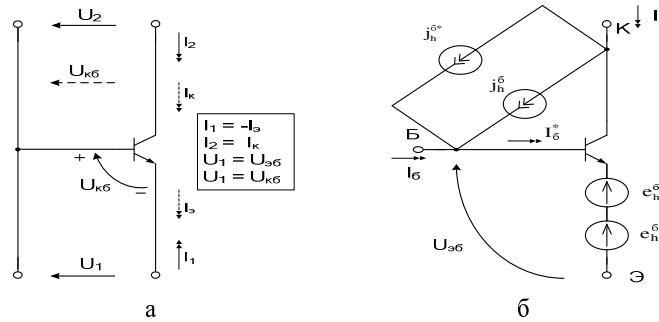


Рис. 1. Транзистор как автономный четырёхполюсник (а) и его эквивалентная схема с учетом автономных параметров $j_h^{\text{эб}}$ и $e_h^{\text{эб}}$ (б)

Причём:

$$e_h = \left. \frac{\partial U_1}{\partial T} \right|_{\substack{I_1 = I_{1p} \\ T = T_p}} ; \quad j_h = \left. \frac{\partial I_2}{\partial T} \right|_{\substack{I_1 = I_{1p} \\ T = T_p}} .$$

Для схемы включения n-p-n-транзистора с общей базой численные значения автономных параметров $e_h^{\text{эб}}$ и $j_h^{\text{эб}}$ можно найти по формулам

$$e_h^{\text{эб}} \approx \frac{U_{go} - U_{\text{эб}}}{T} \Delta T ,$$

$$j_h^{\text{эб}} = \Delta\alpha \cdot I_{\text{э,р}} + \Delta I_{\text{кб,о}} \approx \frac{I_{\text{э,р}}}{\beta T} \Delta T + I_{\text{кб,о}} e^{c \cdot \Delta T} ,$$

где U_{go} – ширина запрещенной зоны (для кремния $U_{go}=1,2$ В); $T, \Delta T$ – температура окружающей среды и её изменение; c – температурный коэффициент; $I_{\text{кб,о}}$ – обратный ток коллекторного перехода; $\Delta\alpha = \frac{K\alpha}{\beta T} \cdot \Delta T \approx K\alpha(1-\alpha)\Delta T$; $K\alpha = 1 \div 2$ – постоянная транзистора; $\beta(\alpha)$ – коэффициент усиления по току базы (эмиттера).

Для определения численных значений $j_h^{*\text{эб}}$ и $e_h^{*\text{эб}}$ необходимы радиационные испытания транзисторов или их компьютерные модели.

Особенности архитектуры прецизионного операционного усилителя с несимметричным включением входного каскада. Как показано в [1], одно из условий минимизации напряжения смещения нуля в ОУ с высокоимпедансным узлом «А» является минимизация разностного тока $I_p \approx 0$ при $u_{\text{вх}} = 0$, который выражается через коэффициенты токовой асимметрии (I_p, k_{p4}, k_{n4}) функциональных узлов:

$$I_p = I_{\text{вых.1}} - I_2^0 - x_p I_{\text{б,р}} , \tag{3}$$

или после преобразований

$$I_p = (\kappa_{p4} - m_p + \xi_{p1} - x_p) I_{\bar{o},p} + (\kappa_{n4} + \xi_{n1} - m_n) I_{\bar{o},n}. \quad (4)$$

Если учесть, что $\kappa_{p4} = 0,5\xi_{p0} - 1$, $\kappa_{n4} = 0,5\xi_{n0}$, то условие минимизации смещения нуля ОУ с архитектурой рис. 2 можно представить в виде

$$\begin{cases} 0,5\xi_{p0} + \xi_{p1} = m_p + x_p + 1, \\ 0,5\xi_{n0} + \xi_{n1} = m_n. \end{cases} \quad (5)$$

Данная система уравнений является основой проектирования прецизионного ОУ с архитектурой рис. 2,б.

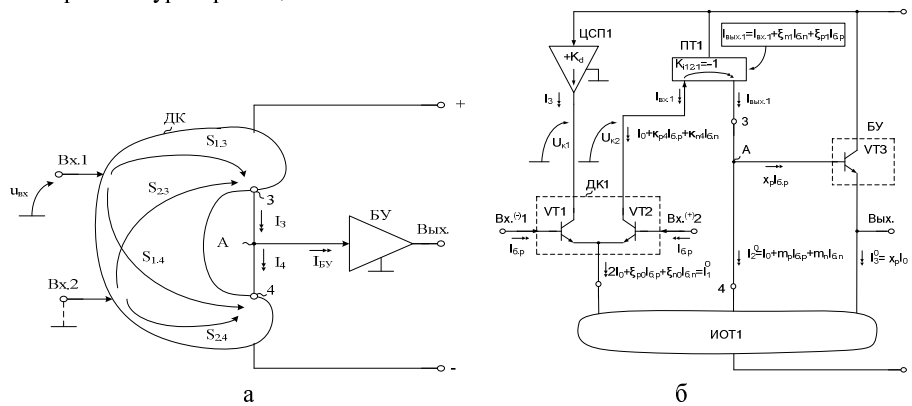


Рис. 2. Обобщенная схема операционного усилителя с высокоимпедансным узлом «А» (а), архитектура прецизионного ОУ с несимметричным включением входного ДК1 (б)

Для практического построения разных модификаций ОУ необходимо располагать базой данных о коэффициентах асимметрии основных функциональных узлов ОУ – токовых зеркал, буферных усилителей, дифференциальных каскадов, источников опорного тока.

Способы введения слабой токовой асимметрии в базовых функциональных узлах прецизионных аналоговых микросхем. Уменьшение напряжения смещения нуля ($U_{см}$) в архитектуре рис. 2 связано, прежде всего, с созданием условий, при которых в высокоимпедансном узле «А» обеспечивается взаимная компенсация токов в соответствии с уравнениями (4) или (5). Практически это означает, что функциональные узлы ОУ, образующие подсистемы ДК и БУ (токовые зеркала, источники опорного тока, входные дифференциальные каскады, эмиттерные повторители и т.д.), должны иметь ту или иную, соответствующую (4) или (5), токовую асимметрию.

Токовое зеркало. Идеальное токовое зеркало (рис. 3) обеспечивает точное повторение входного тока $I_{вх}$ в широком диапазоне напряжений питания E_n^+ .

Практически выходной ток $I_{вых.1}$ реального токового зеркала ПТ1 отличается от $I_{вх}$ на $I_{см}$:

$$I_{вых.1} = I_{вх.1} + \xi_{n1} I_{\bar{o},n} + \xi_{p1} I_{\bar{o},p} = I_{вх.1} + I_{см},$$

где ξ_{n1}, ξ_{p1} – коэффициенты пропорциональности, принимающие потенциальные или относительные значения; $I_{\bar{o},n}, I_{\bar{o},p}$ – токи базы р-п-р и п-р-п основных транзисторов токового зеркала (ПТ1) при токе эмиттера $I_{э} = I_0$; $I_{см} = \xi_{n1} I_{\bar{o},n} + \xi_{p1} I_{\bar{o},p}$ –

ток смещения нуля проходной характеристики ПТ1. В [3] приводится база данных ПТ, включающая как известные, так и новые схемотехнические решения.

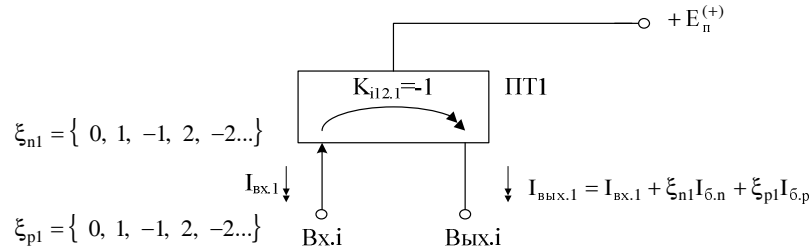


Рис. 3. Токовое зеркало со смещением нуля проходной характеристики

Дифференциальный каскад. В общем случае асимметрия входного дифференциального каскада учитывается в уравнениях его статических выходных токов рис. 4 коэффициентами $k_{p3}, k_{n3}, k_{p4}, k_{n4}$, ненулевые значения которых указывают на отличие I_3 и I_4 от некоторых идеальных значений I_0 .

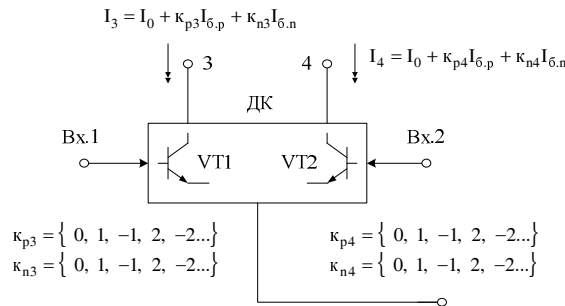


Рис. 4. Дифференциальные каскады со слабой токовой асимметрией

Буферный усилитель. Входные токовые координаты буферных усилителей рис. 5 определяют условие минимизации $U_{см}$ операционных усилителей с высокоимпедансным узлом.

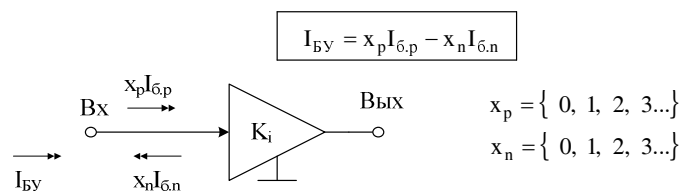


Рис. 5. Обобщенный буферный усилитель с двумя составляющими входных токов

Поэтому при синтезе практических схем необходимо иметь базу данных об их основных параметрах x_p, x_n .

Источник опорного тока. Для формирования заданного уровня токовой асимметрии дифференциальных каскадов и токовых зеркал в ряде случаев необходимо специальное построение источников опорного тока (ИОТ), задающих их статический режим (рис. 6).

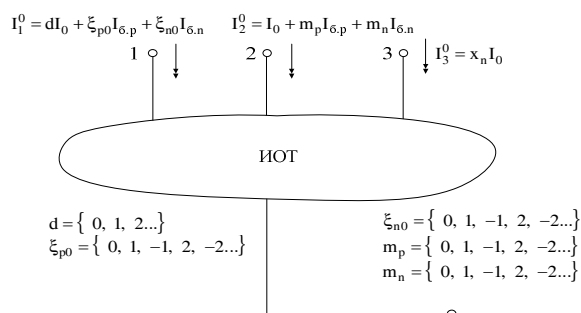


Рис. 6. Источник опорных токов со слабой токовой асимметрией

Кроме того, в качестве ИОТ с заданным смещением нуля относительно идеального значения I_0 могут применяться токовые зеркала.

Компьютерное моделирование ОУ с повышенной стабильностью нулевого уровня. На рис. 7,а показана архитектура несимметричного прецизионного ОУ в среде компьютерного моделирования PSpice на моделях интегральных транзисторов ФГУП НПП «Пульсар», а на рис. 8,9 показаны результаты моделирования схемы рис. 7,а.

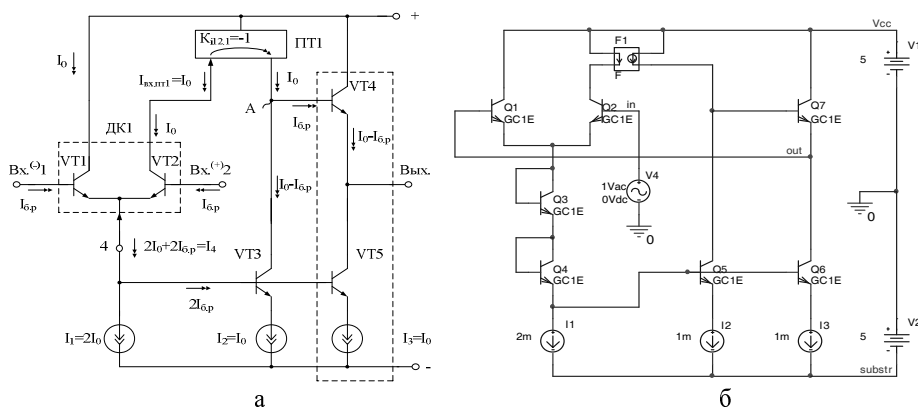


Рис. 7. Практическая реализация архитектуры прецизионного ОУ с несимметричным включением входного ДК1 (а), схема ОУ в среде компьютерного моделирования PSpice на моделях АБМК «Интеграл» (б)

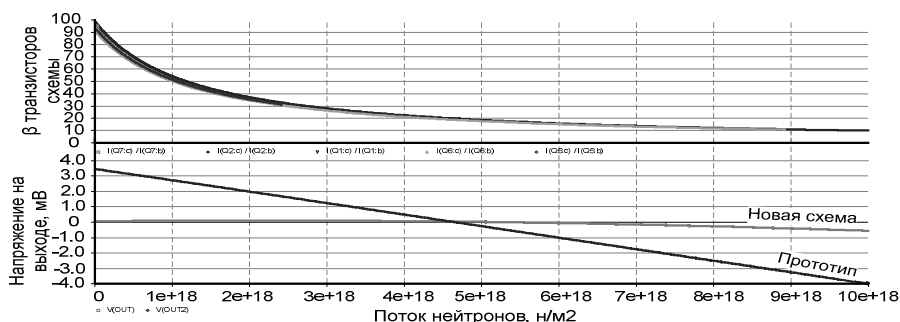


Рис. 8. Зависимость напряжения смещения нуля $U_{см}$ (нижний график) и β транзисторов схемы (верхний график) от потока нейтронов, сравниваемых схем ОУ

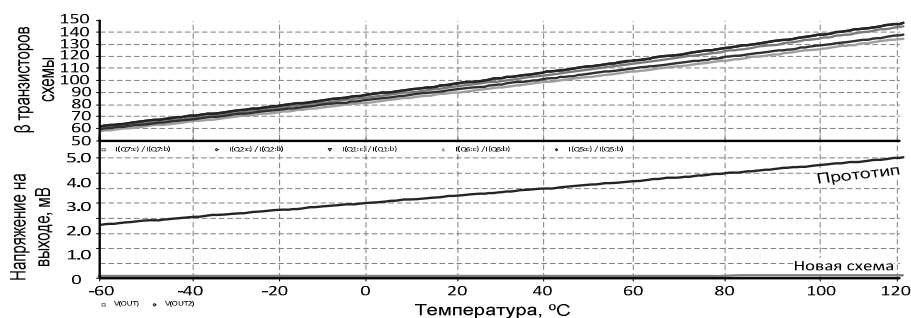


Рис. 9. Зависимость выходного напряжения смещения $U_{см}$ (нижний график), и β транзисторов схемы (верхний график) от температуры

Графики рис. 8 и 9 показывают, что, несмотря на существенные изменения β транзисторов вследствие радиационных и температурных воздействий, предлагаемый ОУ имеет малое напряжение смещения нуля.

Замечательная особенность предлагаемой схемы – низкая чувствительность напряжения смещения нуля ($U_{см}$) к одновременному изменению под действием температуры или радиации токов $I_1' = I_2' + I_3' = 2I_0$, устанавливающих статический режим транзисторов ОУ.

Выводы. 1. Решена задача синтеза структурных и принципиальных схем аналоговых микросхем с высокоимпедансным узлом, имеющих малый нулевой уровень ($U_{см}$) в условиях температурных и радиационных воздействий.

2. 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 прецизионных ОУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Будяков П.С. Способ повышения стабильности нуля аналоговых микросхем с высокоимпедансным узлом в условиях температурных и радиационных воздействий // Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» МЭС-2010. – М., <http://www.mes-conference.ru/>
2. Анисимов В.И. Топологический расчет электронных схем. – Л., 1977. – 240 с.
3. Теоретические основы собственной и взаимной компенсации импедансов и их практические приложения в прецизионных аналоговых микросхемах для систем управления, технической диагностики и телекоммуникаций нового поколения. Отчет по НИР (промежуточ.): ЮРГУЭС-23.09ФЦП / Южно-Российский гос. ун-т экономики и сервиса (ЮРГУЭС); рук. Прокопенко Н.Н.; исполн.: Божич В.И., Крутччинский С.Г., Манжула В.Г. и др. – Шахты: ЮРГУЭС, 2010. – Ч. 2. – 708 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Крутччинский.

Прокопенко Николай Николаевич

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса.

Е-mail: prokopenko@sssu.ru.

346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147.

Тел.: 88636222037.

Ректор Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса; профессор.

Серебряков Александр Игоревич

E-mail: sashaag@mail.ru.

Тел.: +79034346279.

Аспирант.

Будяков Петр Сергеевич

E-mail: budyakovp@gmail.com.

Тел.: +79185187649.

Студент.

Prokopenko Nikolay Nikolaevich

South Russia State University of Economics and Service.

E-mail: prokopenko@sssu.ru.

147, Shevchenko Street, Shakhty, 346500, Russia.

Phone: +78636222037.

The Rector of the South-Russian State University of Economy and Service; Professor.

Serebryakov Alexander Igorevich

E-mail: sashaag@mail.ru.

Phone: +79034346279.

Postgraduate Student.

Budyakov Peter Sergeevich

E-mail: budyakovp@gmail.com.

Phone: +79185187649.

Student.

УДК 621.375

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

**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ПО
НАПРЯЖЕНИЮ КЛАССИЧЕСКОГО КАСКАДА С ОБЩЕЙ БАЗОЙ В
АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМАХ С НИЗКОВОЛЬТНЫМ ПИТАНИЕМ**

Проводится анализ архитектурных, схемотехнических и технологических ограничений на коэффициент усиления по напряжению (K_v) каскада с общей базой. Рассматриваются методы повышения K_v , основанные на принципах собственной компенсации доминирующих импедансов. Рассмотренные особенности построения цепей компенсации показывают, что такое схемотехническое решение достаточно перспективно в аналоговых микросхемах на основе SiGe-технологических процессов.

Каскад с общей базой; коэффициент усиления по напряжению; SiGe-технологии.

N.N. Prokopenko, P.S. Budyakov, A.I. Serebryakov

**METHODS OF INCREASING VOLTAGE GAIN OF CLASSICAL STAGE
WITH A COMMON BASE IN ANALOG IC WITH LOW-VOLTAGE SUPPLY**

The analysis the architecture, circuit design and technological limitations on the voltage gain (K_v) of stage with a common base. Consider methods to increase K_v , based on the principles of self compensation of the dominant impedance. Considered design features chains of compensation show that this circuit solution quite promising in analog chips, based on SiGe processes.

Cascade with a common base; voltage gain; SiGe-technology.

Введение. В современной микросхемотехнике используются не более 10–15 базовых функциональных узлов, определяющих качественные показатели достаточно широкого класса микроэлектронных изделий. В этой связи большой практический интерес представляет оценка предельных возможностей по величине ко-