

4. Крутччинский С.Г., Старченко Е.И., Гавлицкий А.И., Малышев И.В. Квадратурные модуляторы для технологического процесса SGB25VD. Опыт практической разработки // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2008. Сборник научных трудов / Под общ. ред. А.Л. Стемповского. – М.: ИППМ РАН, 2008. – С. 313-317.
5. Христич В.В. Синтез активных фильтров с низкой параметрической чувствительностью. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 186 с.
6. Крутччинский С.Г., Титов А.Е., Цыбин М.С. Входные каскады дифференциальных и мультидифференциальных операционных усилителей с высоким ослаблением синфазного напряжения // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2010: Сборник трудов / Под общ. ред. академика А.Л. Стемповского. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 537-542.
7. Справочник по расчету и проектированию ARC-схем / Под ред. А.А. Ланнэ. – М.: Радио и связь, 1984.
8. Крутччинский С.Г., Структурный синтез в аналоговой микросхемотехнике. – Шахты: ЮРГУЭС, 2010. – 260 с.
9. www.ihp-microelectronics.com.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Прокопенко.

Свизев Виктор Альбертович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: pfdp@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел.: 89045082271; кафедра систем автоматического управления; магистрант.

Svizev Victor Albertovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: pfdp@mail.ru; 44, Nekrasovsky Taganrog, 347928, Russia; phone: +79045082271; the department of automatic control systems; magistrand.

УДК 621.375

А.И. Серебряков, Н.Н. Прокопенко, Н.В. Бутырлагин

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ И МУЛЬТИДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ В ЭЛЕМЕНТНОМ БАЗИСЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКОГО ТЕХПРОЦЕССА АБМК_1.5*

Статья посвящена обобщению и дальнейшему развитию схемотехники операционных усилителей (ОУ) на основе радиационно-стойкого техпроцесса аналогового базового матричного кристалла АБМК_1.5 (ОАО «Интеграл», г. Минск, Белоруссия). Рассматриваются архитектуры ОУ, которые реализуются на основе ВЛТ-JFET-транзисторов и несимметричных дифференциальных каскадов без источников опорного тока (НДК). Самостоятельно схемы НДК не обеспечивают эффективную компенсацию напряжения смещения нуля ($E_{см}$) и его дрейфа ($e_{см}$). Показано что, если НДК имеет повышенную, но достаточно стабильную величину $E_{см}$, то устранить этот недостаток можно структурными методами. Получены условия минимизации дрейфа напряжения смещения нуля $e_{см}$ ОУ, обусловленного влиянием температуры и радиации. Исследуется неустойчивость нулевого уровня пяти модификаций ОУ с учетом влияния их вспомогательных функциональных узлов (токовых зеркал). Предлагаемые схемотехнические решения ориентированы на использование в качестве IP-модулей микроэлектронных «систем в корпусе» устройств автоматики и вычислительной техники.

Мультидифференциальный операционный усилитель; несимметричный дифференциальный каскад; напряжение смещения нуля; «система в корпусе».

* Подготовлено в рамках Госзадания № 2014/38-2014 г. Минобрнауки РФ.

A.I. Serebryakov, N.N. Prokopenko, N.V. Butyrlagin

**DIFFERENTIAL AND DIFFERENTIAL DIFFERENCE AMPLIFIERS
IN THE RADIATION-RESISTANT ELEMENT BASIS OF PROCESS
TECHNOLOGY ABMK_1.5**

Article is devoted to the synthesis and further development of circuit design of operational amplifiers (op-amp) based on radiation-resistant process technology, analog base crystal matrix ABMK_1.5 ("Integral", Minsk, Belarus). Considered architecture op-amp which are realized based on BJT-JFET-transistors and asymmetric differential stages without reference current sources (As-DS). As-DS independently circuits do not provide effective compensation offset voltage (E_{offset}) and its drift (e_{offset}). Shown that if the As-DS has increased, but rather stable value – E_{offset} , then you can eliminate this drawback by structural methods. Conditions are obtained to minimize drift offset voltage op-amp e_{offset} due to the influence of temperature and radiation. Also explores the instability zero level five modifications op-amp with the influence their subsidiary functional units (current mirror). The proposed circuit solutions targeted for use as an IP-microelectronic modules "system in package" automation devices and computers.

Multidifferential operational amplifier; differential difference amplifier; unsymmetrical differential stage; offset voltage; "system in package".

Введение. Широкое применение классического дифференциального каскада (ДК) в аналоговой микросхемотехнике обусловлено, прежде всего, замечательным свойством его структуры – взаимной компенсацией температурных и радиационных эффектов, связанных с дрейфом характеристик идентичных входных транзисторов [1].

При создании различных электронных устройств автоматики и вычислительной техники на основе радиационно-стойких аналоговых базовых матричных кристаллов АБМК_1.3, АБМК_1.4, АБМК_1.5 [2], работающих в жестких условиях эксплуатации, возникает проблема синтеза ДК при ограничениях на качество и типы активных компонентов, реализуемых в технологическом процессе АБМК.

В работах [3, 4] показано, что достаточно перспективным для многих электронных схем рассматриваемого класса являются несимметричные входные ДК на основе п-р-п-биполярных (ВJT) и р-канальных полевых (JFET) транзисторов, которые не требуют источников опорного тока для установления статического режима. Это позволяет синтезировать нетрадиционные схемотехнические решения ОУ [5], аналоговых перемножителей сигналов [6], источников опорного напряжения [7], буферных усилителей с высоким входным сопротивлением [5], мультидифференциальных ОУ [5, 8, 9, 10, 11] и т.п.

Следует отметить, что несимметричный дифференциальный усилитель (НДУ) [3,4] может иметь широкий диапазон активной работы [1], что положительно сказывается на быстродействии и свойствах достаточно перспективных мультидифференциальных ОУ [5, 8, 9, 10, 11] для техпроцесса АБМК.

Самостоятельно схемы несимметричных ДК не обеспечивают эффективную компенсацию напряжения смещения нуля ($E_{см}$) и его дрейфа ($e_{см}$) [1]. Если несимметричный дифференциальный усилитель имеет повышенную, но детерминированную (не случайную) нестабильность $e_{см}$, то устранить этот недостаток можно структурными методами.

Настоящая статья посвящена обобщению и дальнейшему развитию схемотехники ОУ на основе радиационно-стойкого техпроцесса АБМК [2]. При этом исследуется нестабильность нулевого уровня с учетом влияния вспомогательных функциональных узлов ОУ.

Постановка задачи. На рис. 1–5 приведены функциональные схемы ОУ, имеющих взаимную компенсацию дрейфовых параметров двух несимметричных дифференциальных усилителей (НДУ). Один из них (НДУ1) – обеспечивает усиление сигнала, второй (НДУ2) – создает цепь параметрической компенсации температурных и радиационных эффектов. Это его главное назначение. Если НДУ1 и НДУ2 идентичны, а применяемые в схемах повторители тока ПТ1 (ПТ2) имеют единичные коэффициенты усиления по току, то, несмотря на нестабильность статического режима НДУ1, результирующие параметры по дрейфу усилительных структур (рис. 1–5) могут быть не хуже, чем у классического параллельно-балансного каскада [1].

В качестве НДУ2 должны использоваться дифференциальные усилители, допускающие непосредственное соединение входов V_{x^*1} и V_{x^*2} без нарушения статического режима. В общем случае НДУ1 (НДУ2) имеют основной (3) и вспомогательный (3*) выходы, характеризующиеся высокими значениями выходных сопротивлений (R_{i1} , R_{i2}) и имеющие некоторую проводимость передачи к соответствующим выходам $y_{21.1} \approx y_{21.2}$.

Входы вспомогательного НДУ2 могут также использоваться как дополнительные входные узлы в мультидифференциальных входных ОУ [5], а также для включения цепей регулировки E_{cm} и его температурного дрейфа e_{cm} , введения корректирующих сигналов и т.п. Это значительно расширяет области применения балансных усилителей рассматриваемого класса.

Замечательной особенностью ОУ на рис. 1–5 является их способность к самоустановлению нулевых значений регулярной составляющей e_{cm} без каких-либо дополнительных настроек и балансировок.

Рассмотрим условия минимизации дрейфа нулевого уровня в усилителях (рис. 1–5), полагая, что НДУ1 и НДУ2 в данных схемах имеют некоторые значения напряжений смещения нуля e_{cm1} и e_{cm2} :

$$e_{cm.i} = \frac{dE_{cm.i}}{dT} \cdot \Delta T, \quad (1)$$

а автономные (дрейфовые) параметры повторителей тока ПТ1 – ПТ2 характеризуются потенциальными ($e_{пт1}$, $e_{пт2}$) и токовыми ($j_{пт1}$, $j_{пт2}$) составляющими [1]. Причем влиянием параметра $e_{пт}$ на e_{cm} , характеризующего смещение входной характеристики ПТ, во многих случаях можно пренебречь. Для высококачественных типовых повторителей тока [1] на биполярных транзисторах:

$$j_{nm} \approx 2j_n = \frac{2K_\alpha}{\beta T} \Delta T + 2 \Delta I_{кб.0}, \quad (2)$$

где $K_\alpha = 1,5 \div 3$ – поправочный коэффициент; β – коэффициент усиления по току базы выходного транзистора ПТ; T – температура в градусах Кельвина и ее приращение (ΔT); $\Delta I_{кб.0}$ – температурное приращение обратного тока коллекторного р-п-перехода выходного транзистора ПТ.

Радиационные изменения автономных параметров транзисторов можно оценить с учетом результатов работы [12].

На рис. 1 представлена схема ОУ на основе последовательного включения несимметричных дифференциальных каскадов НДУ1 и НДУ2.

Практическая реализация структуры (рис. 1) только на биполярных транзисторах затруднена. Применение полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом в каскадах НДУ1 и НДУ2 позволяет выполнить условия получения минимального дрейфа э.д.с. смещения нуля ОУ:

$$e_{см.Σ} = e_{см.1} - \frac{y_{21.2}}{y_{21.1}} \cdot e_{см.2}, \quad (3)$$

где $y_{21.1}$ ($y_{21.2}$) – крутизна преобразования входного дифференциального напряжения НДУ1 (НДУ2) в его выходной ток.

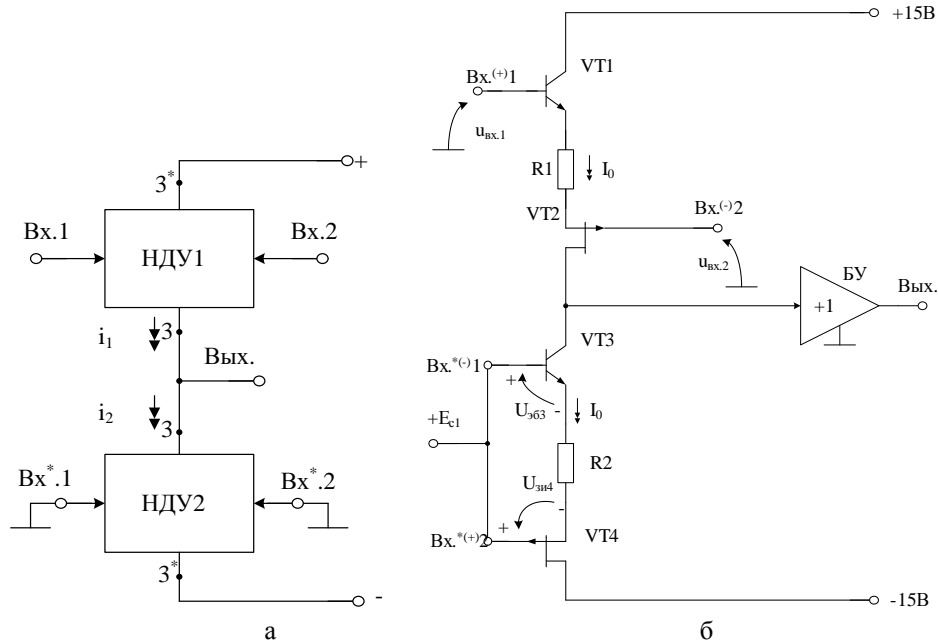


Рис. 1. ОУ на основе последовательно-балансного каскада

При одинаковых значениях $e_{см.1} = e_{см.2}$ и $y_{21.1} = y_{21.2}$ в схеме (рис. 1) обеспечивается компенсация температурной и радиационной нестабильности $e_{см}$ несимметричных НДУ1 и НДУ2.

Уравнение для дрейфа Э.Д.С. смещения нуля другой модификации ОУ на основе двух НДУ и инвертирующего повторителя тока ПТ1 (рис. 2) имеет вид

$$e_{см.1} - \frac{y_{21.2}}{y_{21.1} K_{i.1}} \cdot e_{см.2} - \frac{j_{ПТ1}}{y_{21.1} K_{i.1}}, \quad (4)$$

где $K_{i.1} \approx 1$ – коэффициент усиления по току инвертирующего повторителя ПТ1.

Условие компенсации дрейфа нуля в данной схеме при $e_{см1} = e_{см2}$:

$$y_{21.2} = y_{21.1} K_{i.1}. \quad (5)$$

Перспективный операционный усилитель на основе двух инвертирующих повторителей тока ПТ1-ПТ2 (рис. 3) имеет широкий диапазон изменения выходного напряжения. Его основная особенность – более высокая степень симметрии на переменном токе. При этом суммарное напряжение смещения нуля ОУ определяется формулой

$$e_{см.1} - \frac{y_{21.2} K_{i.1}}{y_{21.1} K_{i.2}} \cdot e_{см.2} + \frac{j_{ПТ2} - j_{ПТ1}}{y_{21.1} K_{i.2}}. \quad (6)$$

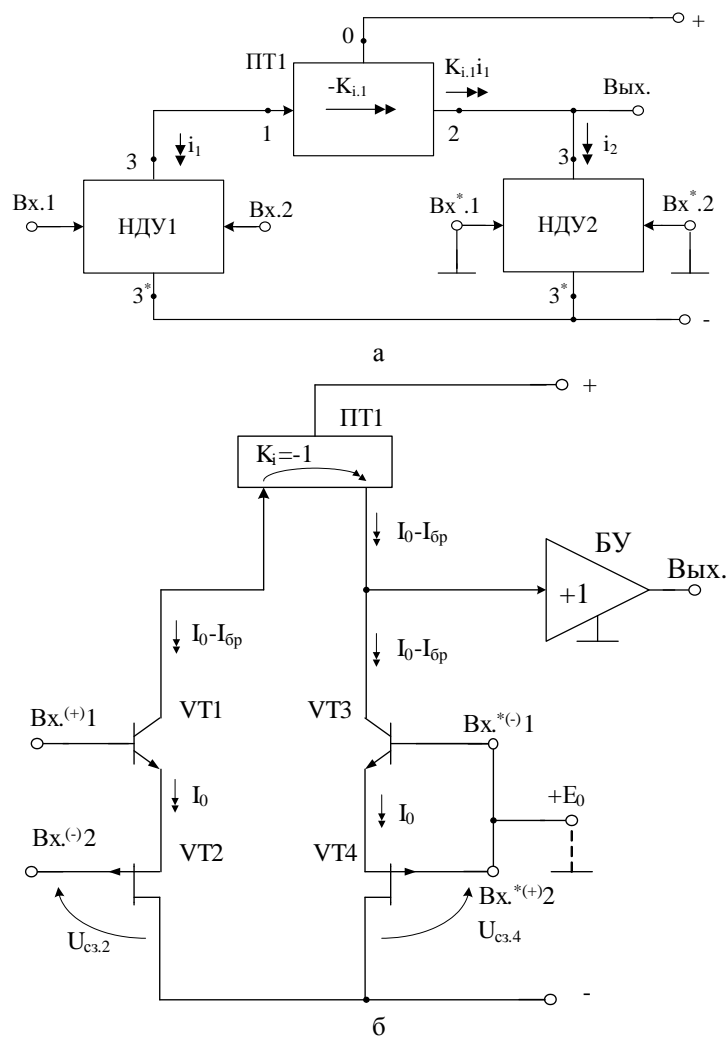


Рис. 2. Операционный усилитель на основе инвертирующего повторителя тока ПТ1

Операционный усилитель на рис. 4 использует более сложный «двухканальный» повторитель тока ПТ1. Дрейф его напряжения смещения нуля:

$$e_{см.1} - \frac{K_{i.2} y_{21.2}}{K_{i.1} y_{21.1}} e_{см.2} - \frac{j_{ПТ1}}{y_{21.1} K_{i.1}}. \tag{7}$$

В схеме ОУ рис. 5 применяются неинвертирующие каскодные повторители тока ПТ1, ПТ2. Как следствие, он имеет более широкий частотный диапазон и характеризуется следующим нулевым уровнем:

$$e_{см.1} - \frac{K_{i.2} y_{21.2}}{K_{i.1} y_{21.1}} e_{см.2} + \frac{j_{ПТ2} - j_{ПТ1}}{y_{21.1} K_{i.1}}. \tag{8}$$

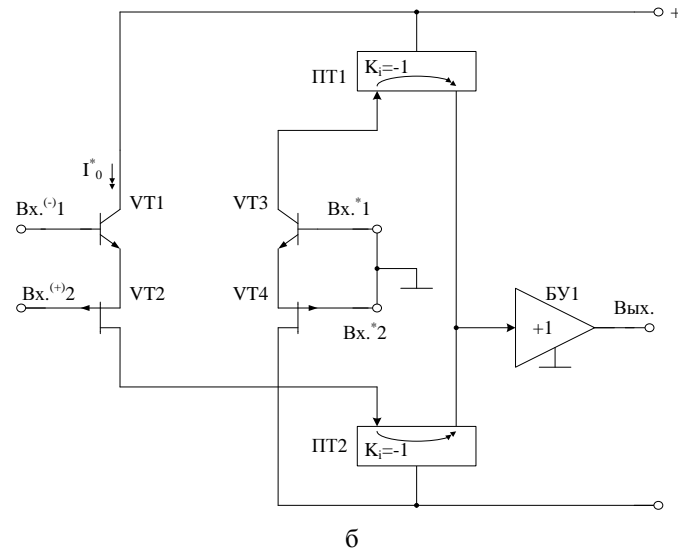
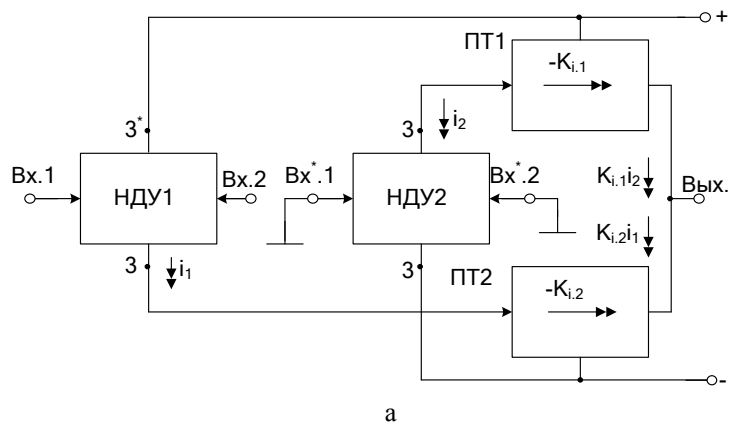
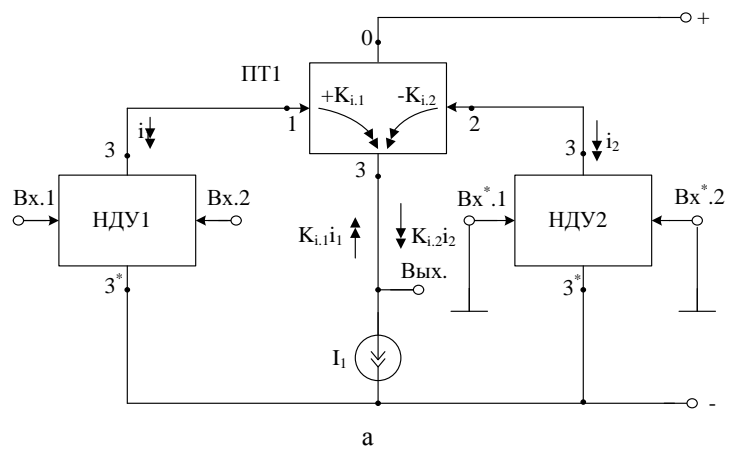


Рис. 3. ОУ на основе двух инвертирующих повторителей тока ПИТ1-ПИТ2



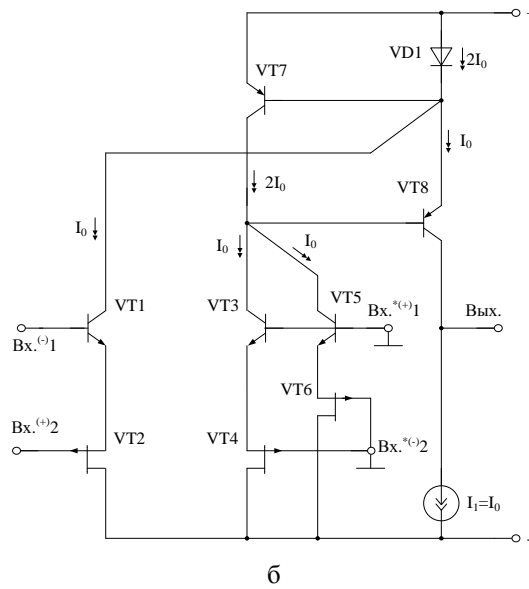


Рис. 4. ОУ на основе двухканального повторителя тока ПТТ

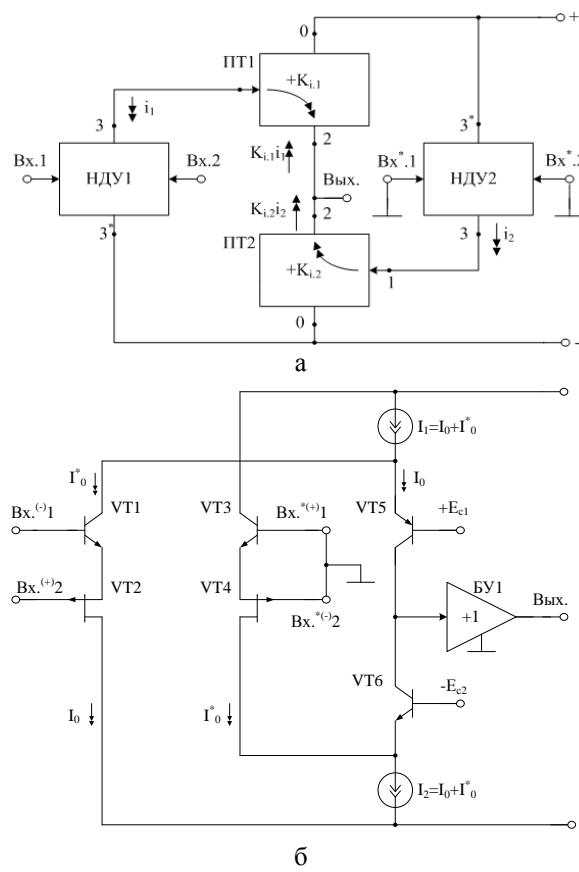


Рис. 5. ОУ на основе каскадных неинвертирующих повторителей тока ПТТ1-ПТТ2

Если в данной схеме обеспечить $K_{i,2}y_{21,2} = K_{i,1}y_{21,1}$, то систематическая составляющая нестабильности напряжения смещения нуля ОУ будет иметь минимальное значение.

Заключение

1. Разработаны альтернативные архитектуры операционных усилителей на основе несимметричных дифференциальных каскадов, которые (так же, как и классический параллельно-балансный усилитель) характеризуются наличием эффекта взаимной компенсации влияния автономных параметров применяемых активных элементов на статический режим. Это дает разработчикам электронных устройств автоматики дополнительную степень свободы при построении аналоговых устройств с высокой стабильностью нулевого уровня.

2. Решена одна из задач современной микроэлектроники – построение дифференциальных и мультидифференциальных усилителей без источников опорного тока на ВJT- и JFET-транзисторах техпроцесса АБМК 1.5. Это расширяет представления схемотехников о методах построения радиационно-стойких аналоговых микросхем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анисимов В.И., Капитонов М.В., Прокопенко Н.Н., Соколов Ю.М. Операционные усилители с непосредственной связью каскадов. – Л., 1979. – 148 с.
2. Прокопенко Н.Н., Дворников О.В., Крутчинский С.Г. Элементная база радиационно-стойких информационно-измерительных систем: Монография / Под общ. ред. Н.Н. Прокопенко. – Шахты: ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2011. – 208 с.
3. Прокопенко Н.Н., Ковбасюк Н.В. Схемотехника широкополосных усилителей в расширенном базисе n-p-n биполярных и r-канальных полевых транзисторов // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: Сборник материалов Международного научно-практического семинара. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2002. – С. 94-105.
4. Прокопенко Н.Н., Будяков А.С., Сергеев А.И. Дифференциальные каскады на основе полевых и биполярных транзисторов // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: Сб. материалов IV Международного научно-практического семинара / Под ред. Н.Н. Прокопенко. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2005. – С. 84-87.
5. Каталог разработок Российско-Белорусского центра аналоговой микросхемотехники / Редкол.: Н.Н. Прокопенко, С.Г. Крутчинский, Е.И. Старченко и др. / Под ред. Н.Н. Прокопенко. – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2010. – 479 с.
6. Prokopenko N.N., Serebryakov A.I., Konev D.N. The BiFET-Technology Voltage Analog Multipliers Based on the Radiation Resistant ABMC «Integral» // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2009). Proceedings. – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter&Student Branch, Russia, Tomsk, March 27-28, 2009. – P. 244-248.
7. Старченко Е.И. Радиационно-стойкий температурно-стабильный источник опорного напряжения отрицательной полярности // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: Материалы научно-технической конференции. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2013. – С. 185-186.
8. Крутчинский С.Г., Цыбин М.С., Титов А.Е. Входные каскады дифференциальных и мультидифференциальных операционных усилителей с высоким ослаблением синфазного напряжения // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010. Сборник трудов / Под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 537-542.
9. Крутчинский С.Г., Титов А.Е. Мультидифференциальный операционный усилитель в режиме инструментального усилителя // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2010. – № 3 (101). – С. 200-203.
10. Прокопенко Н.Н., Будяков А.С., Хорунжий А.В. Нелинейные режимы в мультидифференциальных операционных усилителях // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2008: Сборник научных трудов III Всероссийской научно-технической конференции / Под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. – М.: Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, 2008. – С. 340-343.

11. *Säckinger E., Guggenbühl W.* A versatile building block: the CMOS differential difference amplifier // IEEE Journal of Solid State Circuits. – April 1987. – Vol. SC-22, №. 2. – P. 287-294.
12. *Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Серебряков А.И.* Автономные параметры транзисторов базового матричного кристалла АБМК_1_3 в условиях радиационных и температурных воздействий // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2012: Сборник трудов / Под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. – М.: ИППМ РАН, 2012. – С. 294-297.

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

Серебряков Александр Игоревич – Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ; e-mail: sashaag@mail.ru; 346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147; тел.: +79034346279; кафедра информационных систем и радиотехники; аспирант.

Прокопенко Николай Николаевич – e-mail: prokopenko@sssu.ru; тел.: +79185182266; кафедра информационных систем и радиотехники; д.т.н.; профессор.

Бутырлагин Николай Владимирович – e-mail: nbutyrlagin@mail.ru; тел.: +79034320799; кафедра информационных систем и радиотехники; аспирант.

Serebryakov Alexander Igorevich – Institute of service and business (branch) Don State Technical University; e-mail: sashaag@mail.ru; 147, Shevchenko, Shakhty, 346500, Russia, phone: +79185056136; the department information systems and radio engineering; postgraduate student.

Prokopenko Nikolay Nikolaevich – e-mail: prokopenko@sssu.ru; phone: +79185182266; the department information systems and radio engineering; dr. of eng. sc.; professor.

Butyrlagin Nikolay Vladimirovich – e-mail: nbutyrlagin@mail.ru; phone: +79034320799; the department information systems and radio engineering; postgraduate student.

УДК 621.372

Н.В. Гудкова, Е.А. Жебрун

ПРЕЦИЗИОННОЕ УСТРОЙСТВО ПОДАВЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОМЕХ В РЕЧЕВЫХ СИГНАЛАХ

В контексте задач цифровой обработки сигналов рассмотрены принципы адаптивной очистки речевых сигналов от периодического зашумления. Приведены примеры алгоритмов фильтрации помехи с источником эталонного сигнала и без источника. Рассмотрены их особенности. Предлагается новый подход, призванный повысить качество фильтрации речевых сигналов от аддитивной периодической помехи на длительном интервале времени для случая, когда нет источника эталонного сигнала помехи. На базе этого подхода разработано одноканальное устройство адаптивной фильтрации, которое имеет ряд преимуществ в сравнении с существующими на сегодняшний день решениями. За счёт особенностей структуры устройства достигается увеличение производительности при практически полном сохранении качества исходного речевого сигнала. Алгоритм адаптации использует математический аппарат оптимальной фильтрации по методу наименьших квадратов (LMS). Система включает в себя адаптивный трансверсальный фильтр, анализатор спектра и блок узкополосных адаптивных режекторных фильтров, которые способны без искажений подавлять узкую полосу сигнала на заданной частоте с минимальными затратами вычислительных ресурсов. Анализатор спектра использует быстрое преобразование Фурье.

Цифровая обработка сигналов (ЦОС); адаптивная фильтрация; периодическая помеха; быстрое преобразование Фурье (БПФ).