

Применение этих МОУ в структуре рис. 3 позволило реализовать ФНЧ, амплитудно-частотная характеристика которого показана на (см. рис. 4) (кривые В). Здесь же показана АЧХ ФНЧ в полосе пропускания в сравнении с соответствующей характеристикой фильтра рис. 2 (кривые А). Отметим, что идеальный фильтр характеризуется равномерностью АЧХ в 0,1дБ. Как видно из графиков, неравномерность АЧХ с применением МОУ уменьшилась почти в 2 раза, а также усилилось подавление сигнала за полосой пропускания фильтра. Следует отметить, что эффективность компенсирующих обратных связей напрямую зависит от ширины полосы пропускания фильтра. Так, для полосы пропускания в 40 МГц неравномерность АЧХ за счет цепей компенсации уменьшится в 10 раз.

Таким образом, совокупность схемотехнических решений новых типов активных элементов и свойств структуры лестничных ФНЧ обеспечивает создание прецизионных ограничителей спектра с расширенным диапазоном частот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коротков А.С.* Микроэлектронные аналоговые фильтры на преобразователях импеданса. – СПб.: Наука, 1999. – 416 с.
2. *Крутчинский С.Г.* Основы схемотехнического проектирования активных фильтров ВЧ- и СВЧ-диапазонов // Сборник трудов ВНТК «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем». – 2008. – С. 348-353.
3. *Крутчинский С.Г. Старченко Е.И.* Мультидифференциальные операционные усилители и прецизионная микросхемотехника // Сборник трудов МНПС «Проблемы современной аналоговой микросистемотехники». – 2003. – С. 125-137.
4. *Krutchinskiy S.G., Tsibin M.S., Titov A.E.* Common-mode signal minimization in differential stage. EWDTS-2010, St.Petersburg, Russia, 2006. – P. 242-245.

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

Золотарев Антон Владимирович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: lined@mail.ru; 347900, г. Таганрог, 3-я линия, 91; тел.: 88634371773; магистрант.

Zolotarev Anton Vladimirovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: lined@mail.ru; 91, 3rd line, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634371773; magister.

УДК 621.372

Г.А. Свизев

ЭКОНОМИЧНЫЕ АНАЛОГОВЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ СМЕШАННЫХ СнК И СвК

Сформулированы комплексные требования к экономичным сенсорным интерфейсам нового поколения, ориентированным на взаимодействие с современными прецизионными датчиками. Обоснована перспективность и показана возможность интеграции интерфейсов в смешанные СнК и СвК для локальных систем управления и диагностики. Освещены структурные и схемотехнические подходы, обеспечивающие удовлетворение предъявленных к интерфейсам требований. Представлены результаты моделирования разработки.

Прецизионный экономичный КМОП аналоговый сенсорный интерфейс; смешанные СнК и СвК; МЭМС, прецизионный широкополосный мультидифференциальный ОУ; ограничитель спектра; оценка производных.

G.A. Svizev

ENERGY-EFFICIENT ANALOG CONDITIONERS OF PRECISION SENSORS FOR MIXED SOC AND SiP

The comprehensive requirements for new generation of energy-effective sensor conditioners, focused on the interaction with the modern high-precision sensors are given. The perspectiveness and the possibility of interface integration in mixed-signal SoC and SiP for local control and diagnostic systems are substantiated. Structural and circuit approaches for meeting the presented to interface requirements are highlighted. The results of modeling are given.

Precision energy-efficient CMOS analog sensor conditioner; mixed-signal SoC and SiP, MEMS; precision wideband multidifferential OA; spectrum limiter; derivative estimation.

Как известно, любая система управления, диагностики или сбора данных начинается с чувствительных элементов, преобразующих некоторые физические величины в электрические сигналы. Их первичную обработку осуществляет аналоговая часть сенсорного интерфейса интеллектуального датчика. Тенденция развития таких устройств и современных микроэлектронных систем в общем направлена на их реализацию в виде смешанных (аналого-цифровых) систем на кристалле (СнК) или в корпусе (СвК) и требует пересмотра многих структурных и схемотехнических принципов их построения. Появление высокоточных датчиков на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) обуславливает повышенные требования к сенсорным интерфейсам не только по метрологическим показателям, но также по экономичности и надежности. Кроме того, многие задачи управления и диагностики связаны с оценкой производной измеряемой величины в реальном времени. Анализ литературы показывает, что такие интерфейсы не выпускаются, а исследования в этой области только начинаются.

Постановка задачи. Подавляющее большинство цифровых вычислительных ядер при отсутствии высоких требований к помехоустойчивости и радиационной стойкости создается в рамках КМОП-базиса, что обуславливается сравнительной дешевизной производства, энергоэкономичностью и простотой схемотехники. Сохранение этих достоинств при создании смешанных СнК требует реализации их аналоговых частей также в КМОП-базисе. Учитывая это, особый интерес представляют субмикронные кремний-германиевые (*SiGe*) техпроцессы (например, семейство *SGB25*), сочетающие в базовом (КМОП) уровне аналоговые и цифровые транзисторы и имеющие опцию создания гетеропереходов, позволяющую при необходимости синтезировать специализированные (например, СВЧ) биполярные и БиКМОП-модули и интегрировать их в уже разработанные на базовом уровне СнК.

Таким образом, возникает необходимость развития аналоговой КМОП-микросхемотехники [1–3] и создания на ее основе активных элементов, обеспечивающих необходимое качество преобразований. Основной целью работы является синтез аналоговой части прецизионного сенсорного интерфейса, удовлетворяющего указанным выше требованиям.

Инструментальный усилитель на базе мультидифференциального ОУ.

Точность интерфейса определяется в первую очередь возможностями его инструментального усилителя (ИУ). Улучшение его ключевых параметров достигается благодаря новым структурным и схемотехническим подходам. Реализация ИУ на базе нового класса активных элементов [4] – мультидифференциальных операционных усилителей (МОУ) – вместо классической схемы ИУ обеспечивает не только более высокое подавление синфазного напряжения, но также исключает необходимость применения дорогостоящих технологий создания прецизионных резисторов и уменьшает расход элементов и, соответственно, энергопотребление усилителя практически в 3 раза. Предложенные структурные способы [5] минимизации

ции ЭДС смещения обеспечивают экстремально низкий и термостабильный дрейф нуля. Кроме того, использованы методы [1–3] повышения коэффициента усиления и частотных характеристик КМОП-структур, также улучшающие удельные показатели энергопотребления схемы. Разработка выполнена в рамках КМОП-базиса дешёвого техпроцесса *SGB25VD*. Ее основные параметры, полученные в результате моделирования в среде *Cadence Virtuoso*, представлены в табл. 1. Операционные усилители (ОУ) с аналогичными показателями получаются при исключении второго канала преобразования во входном каскаде МОУ.

Таблица 1

Основные параметры мультидифференциального ОУ в режиме ИУ

μ , дБ	f_1 , МГц	$v_{фр}$, В/мкс	$K_{оссн}$, дБ	$f_{гр.оссн}$, кГц	$E_{см}$, мкВ	$\alpha_{E_{см}}$, мкВ/град	$U_{вых.мах}$, В	$U_{п.ном}$, В	I_0 , мА
125	130	30	190	3,8	0,04	0,0015	$\pm 2,8$	± 5	6

Примечание: μ – статический коэффициент усиления, f_1 – частота единичного усиления, $v_{фр}$ – скорость нарастания фронта, $K_{оссн}$ – коэффициент ослабления синфазного напряжения, $f_{гр.оссн}$ – граничная частота $K_{оссн}$, $E_{см}$ – ЭДС смещения, $\alpha_{E_{см}}$ – температурный коэффициент $E_{см}$, $U_{вых.мах}$ – максимальное выходное напряжение, $U_{п.ном}$ – номинальное напряжение питания, I_0 – потребляемый ток.

Аналоговый интерфейс. На основе представленного МОУ разработан прецизионный сенсорный интерфейс (рис. 1). Выходные сигналы измерительного моста чувствительного элемента (ЧЭ) поступают на входы первого канала МОУ1. Его дифференциальный коэффициент усиления, дрейф нуля и коэффициент передачи синфазного напряжения определяются соответственно соотношениями

$$K_d = 1 + \frac{R_4}{r_4}, \quad U_{др} = E_{см} K_d, \quad K_{сн} = \frac{K_d}{K_{оссн}}, \quad (1)$$

где $E_{см}$, $K_{оссн}$ – параметры МОУ (табл. 1).

Фильтр нижних частот (ФНЧ) третьего порядка с повторителем на выходе (элементы $R_1 - R_3$, $C_1 - C_3$, ОУ2) ограничивает спектр выходного сигнала, что повышает точность последующего аналого-цифрового преобразования (АЦП) за счёт подавления помех в окрестности тактовой частоты АЦП. Таким образом, с учетом широкополосности и высокого коэффициента усиления МОУ1 (табл. 1) амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) тракта измерения определяется передаточной функцией ФНЧ третьего порядка

$$F_{\Phi}(p) = \frac{a_0}{p^3 + p^2 a_2 + p a_1 + a_0}, \quad (2)$$

коэффициенты которой

$$a_2 = \frac{g_1 + g_2}{C_1} + \frac{g_2 + g_3}{C_2}, \quad a_1 = \frac{g_1(g_2 + g_3) + g_2 g_3}{C_1 C_2} + \frac{g_2 g_3}{C_2 C_3}, \quad a_0 = \frac{g_1 g_2 g_3}{C_1 C_2 C_3},$$

$$g_1 = 1/R_1, \quad g_2 = 1/R_2, \quad g_3 = 1/R_3$$

характеризуются низкой (≤ 1) элементной чувствительностью к нестабильности параметров резисторов и конденсаторов. Для реализации небольшой ($< 1/2^{n+1}$, где n – разрядность АЦП) неравномерности АЧХ в полосе пропускания при любой аппроксимирующей функции добротность полюса оказывается незначительной, поэтому можно использовать дополнительные параметрические условия:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R, \quad C_1 = C_3 = C, \quad C_2 = hC. \quad (3)$$

Тогда

$$a_2 = \frac{2(h+1)}{RCh}, \quad a_1 = \frac{4}{R^2C^2h}, \quad a_0 = \frac{1}{R^3C^3h}, \quad (4)$$

что с точностью до отношений номиналов однотипных элементов соответствует структуре лестничного фильтра. Коэффициенты передаточной функции (2) следуют из решения аппроксимационной задачи по критерию точности преобразования сигнала в полосе пропускания – минимума амплитудной или фазовой ошибки.

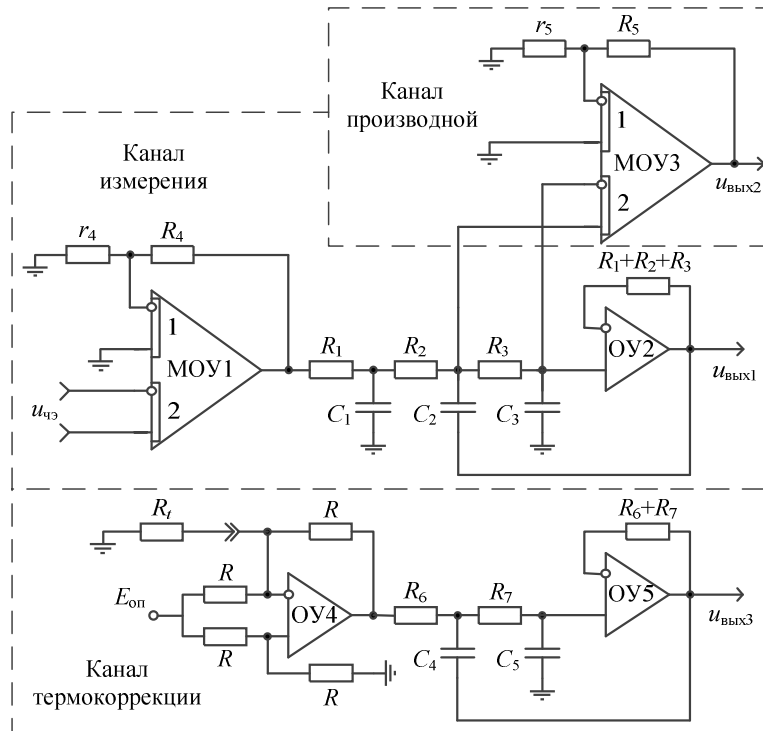


Рис. 1. Принципиальная схема аналогового интерфейса

Указанные свойства такого ФНЧ связаны с увеличением влияния частоты единичного усиления (f_1) ОУ2, поэтому для сохранения низкой чувствительности АЧХ в полосе пропускания необходимо выполнить условие

$$f_1 \gg f_{гр} \cdot 2h^2, \quad (5)$$

где $f_{гр}$ – граничная частота полосы пропускания ограничителя спектра. Для современных схемотехнических решений ОУ такое ограничение не является жестким.

Точность реализации АЧХ в полосе пропускания связана с нестабильностью пассивных элементов ФНЧ и соответствующей интегральной (среднеквадратической) чувствительностью. Учитывая, что в диапазоне рабочих частот сенсорного интерфейса такая чувствительность возрастает по мере приближения к $f_{гр}$, целесообразно уменьшать эффективность использования полосы пропускания. Так, в диапазоне $0 \leq f \leq f_{гр}/h$ общая стабильность оказывается максимальной при использовании резисторов и конденсаторов соответствующего класса точности.

Разработанный ограничитель спектра в диапазоне частот $0 \leq 25$ кГц обеспечивает точность преобразования 12 bit. Получаемую АЧХ канала измерения (рис. 2) следует учитывать для рационального выбора тактовой частоты АЦП.

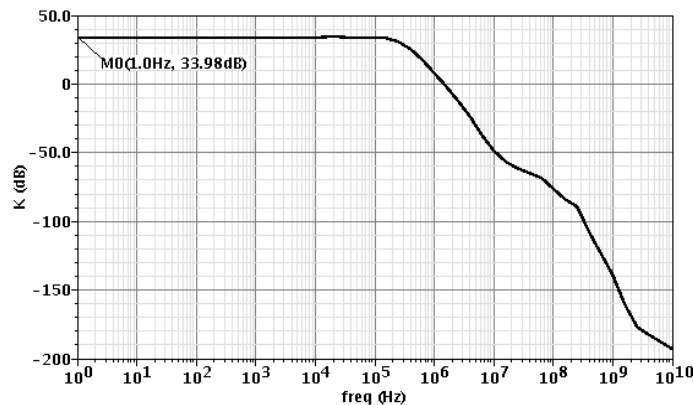


Рис. 2. АЧХ канала измерения в широком диапазоне частот

Таким образом, в диапазоне рабочих частот датчика выходной сигнал интерфейса с заданной неравномерностью АЧХ определяется выражением

$$u_{\text{вых1}} = (1 + R_4/r_4)u_{\text{чз}}, \quad (6)$$

где $u_{\text{чз}}$ – дифференциальное напряжение чувствительного элемента.

Вычитание сигналов на интегрирующей цепи (R_3, C_3) с помощью МОУЗ позволяет получать оценку производной сигнала датчика с высокой точностью, что является отличительной чертой интерфейса

$$u_{\text{вых2}} = \frac{\partial u_{\text{вых1}}}{\partial t} k\tau_3, \quad (7)$$

где $k = 1 + R_5/r$, $\tau_3 = R_3C_3$.

Для компенсации влияния изменения температуры на результаты измерений в интерфейс включен канал термокоррекции

$$u_{\text{вых3}} = E_{\text{оп}} \frac{R/(2R_{t0})}{1 + \alpha_R \Delta t}, \quad (8)$$

где R_{t0} – сопротивление терморезистора при $\Delta t = 0$, α_R – его температурный коэффициент.

Важным дополнительным преимуществом использования мультидифференциального ОУ является возможность включения в его цепь обратной связи резистивной R - $2R$ -матрицы, задающей дифференциальный коэффициент усиления и позволяющей проводить аналоговую линеаризацию и термокоррекцию всего тракта измерения

$$K_{\text{д}} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{2^i} \right)^{-1} + 1, \quad (9)$$

где α_i – состояние коммутаторов матрицы R - $2R$.

Моделирование интерфейса проводилось в среде *Cadence Virtuoso*. За аналог для сравнения принят прецизионный сенсорный интерфейс *PGA309* фирмы *Texas Instruments*, являющейся мировым лидером в производстве прецизионной электроники. Как видно из табл. 2, по ключевым показателям разработка качественно (на порядки) превосходит аналог.

Таблица 2

Сравнение интерфейса с аналогом по ключевым показателям

	K_d	$f_{гр}$, кГц	$K_{сн}$, дБ	$E_{см}$, мкВ	$\alpha_{E_{см}}$, мкВ/град	$v_{фр}$, В/мкс	N_1 , <i>bit</i>	N_2 , <i>bit</i>	$E_{п}$, В
Разработка	50	25	-158*	0,04	0,0015	30	12	8	± 5
PGA309	–	–	-56	3	0,2	0,5	–	–	–

Примечание: K_d – дифференциальный коэффициент усиления, $f_{гр}$ – верхняя граница полосы пропускания, $K_{сн}$ – коэффициент передачи синфазного напряжения, $E_{см}$ – ЭДС смещения каналов измерения величины и ее производной, $\alpha_{E_{см}}$ – температурный коэффициент $E_{см}$, $v_{фр}$ – скорость нарастания фронта, N_1 , N_2 – точность измерения величины и ее производной соответственно, $E_{п}$ – напряжение питания;

* при $K_d = 50$.

Новые структурные и схемотехнические подходы позволяют синтезировать для КМОП-базиса широкополосный инструментальный усилитель с высоким коэффициентом ослабления синфазного напряжения (190 дБ), экстремально низким (0,04 мкВ) и термостабильным (0,0015 мкВ/град.) ЭДС смещения и потенциально уменьшенным энергопотреблением. На основе этого усилителя разработан аналоговый сенсорный интерфейс, обеспечивающий измерение физических величин на пределе точности современных прецизионных датчиков (12 *bit*). Отличительной особенностью интерфейса является возможность аналоговой оценки производной сигнала датчика с высокой (8 *bit*) точностью. Исключение прецизионных технологий и использование КМОП-базиса дешевого техпроцесса *SGB25VD* обеспечивают возможность интеграции интерфейса в смешанные СнК и СвК. По ключевым показателям разработка качественно превосходит зарубежные аналоги. Совокупность указанных фактов позволяет выпускать микросхемы на территории Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крутинский С.Г., Жебрун Е.А., Золотарев А.В., Свизев Г.А. Повышение коэффициента усиления каскадов на КМОП-транзисторах цепями собственной компенсации // VIII Международный научно-практический семинар «Проблемы современной аналоговой микросхемотехники». – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2011. – С. 47-58.
2. Крутинский С.Г., Жебрун Е.А., Золотарев А.В., Свизев Г.А. Расширение диапазона рабочих частот каскадов на КМОП-транзисторах // VIII Международный научно-практический семинар «Проблемы современной аналоговой микросхемотехники». – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2011. – С. 59-72.
3. Крутинский С.Г., Жебрун Е.А., Золотарев А.В., Свизев Г.А. Высокочастотная коррекция КМОП-усилителей // VIII Международный научно-практический семинар «Проблемы современной аналоговой микросхемотехники». – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2011. – С. 73-87.
4. Крутинский С.Г., Старченко Е.И. Мультидифференциальные операционные усилители и прецизионная микросхемотехника // Международный научно-технический журнал «Электроника и связь». – 2004. – № 20. – С. 37-45.
5. Свизев Г.А. Экономичные КМОП-сенсорные интерфейсы интеллектуальных датчиков // Сборник конкурсных научно-исследовательских работ магистрантов, аспирантов и молодых ученых в области стратегического партнерства вузов и предприятий радиоэлектронного комплекса. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – С. 292-297.

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

Свизев Григорий Альбертович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: grits1989@mail.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 22; тел.: +79526036933; магистрант.

Svizev Grigory Albertovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: grits1989@mail.ru; 22, Chekhova street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79526036933; magister.

УДК 621.372

А.Е. Титов

РАДИАЦИОННО СТОЙКИЙ ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ НА БАЗЕ МОУ

Проектирование радиационно стойких инструментальных усилителей требует применение не только радиационно стойких технологий производства, но и эффективных схемотехнических решений, направленных на стабилизацию работы устройства в условиях радиационного воздействия – потока нейтронов, дозы радиации и температуры. В работе представлены результаты проектирования для техники аналогового базового матричного кристалла АБМК радиационно стойкого инструментального усилителя на базе структурно оптимизированных мультидифференциальных операционных усилителей и результаты его моделирования в среде PSpice.

Радиационно стойкий инструментальный усилитель; минимальный дрейф нуля; коэффициент ослабления синфазного сигнал; радиация; поток нейтронов.

A.E. Titov

RADIATION-RESISTANT TWO-CHANNEL INSTRUMENTATION AMPLIFIER ON THE BASE MOA

Design of radiation-resistant instrumentation amplifiers requires application not only radiation-resistant technologies, but also effective circuit decisions directed on stabilization of work of the device in the radiating influence conditions – neutron flux, radiation dose, temperature. In work results of designing of the radiation-resistant instrumentation amplifier on the base multidifferential operational amplifiers for techniques analogue base matrix chip ABMC and results of modeling in the PSpice environment are presented.

Radiation-resistant instrumentation amplifier; the minimum zero drift; CMRR; radiation; neutron flux.

Создание радиационно-стойких аналоговых и аналого-цифровых интерфейсов (АИ и АЦИ) смешанных систем в корпусе (СвК), ориентированных на взаимодействие с чувствительными элементами (сенсорами) мостового типа всегда предполагает применение инструментальных усилителей (ИУ) как с фиксированными, так и управляемыми параметрами, выполняющих функции подавления синфазного сигнала и усиление дифференциального напряжения. Эти устройства являются основой как для аналоговых портов, так и для целого класса сложн-функциональных блоков (СФ-блоков) СвК. Как с экономической, так и с технической точек зрения такие СФ-блоки в виде полупроводниковых кристаллов целесообразно ориентировать на технику соответствующих аналоговых базовых матричных кристаллов (АБМК), среди которых детальную апробацию на целом классе ИС прошел биполярно-полевой АБМК [1]. Оригинальная топология макрофраг-