

Прецизионные аналоговые интерфейсы на базе двух мультидифференциальных операционных усилителей

**С.Г. Крутччинский, А.Е. Титов, А.И. Серебряков,
А.И. Гавлицкий, Е.А. Семенищев, И.В. Пахомов**

Создание аналоговых и аналого-цифровых интерфейсов смешанных систем на кристалле (СнК), ориентированных на взаимодействие с чувствительными элементами мостового типа всегда предполагает применение инструментальных усилителей (ИУ), выполняющих функции подавления синфазного сигнала и усиление дифференциального напряжения. Как правило, такой ИУ реализуется на базе классической схемы, состоящей из трех операционных усилителей и семи прецизионных резисторов. Именно поэтому даже при использовании строго идентичных операционных усилителей (ОУ) минимальное значение коэффициента передачи синфазного напряжения определяется точностью реализации резистивных элементов. Так, для прецизионных технологий ($\Theta_R = 0.01\%$ дБ) $K_{сн} = -31$ дБ, что явно недостаточно для построения даже неprecизионных датчиков. Именно поэтому при производстве соответствующих сложно-функциональных (СФ) блоков СнК в вариантах система в корпусе (SiP) и система на подложке (SoP) используется специальная функциональная настройка, направленная на достижение требуемых качественных показателей ($K_{сн} = -54$ дБ). Кроме этого, потребляемая мощность таких ИУ достаточно велика.

Именно поэтому поиск альтернативных вариантов решения аналогичной задачи для смешанных СнК в любом из вариантов их технологической реализации приобретает важное практическое значение.

Для решения указанной выше проблемы в [1] с помощью эффективных схемотехнических решений, основанных на введении дополнительных функциональных обратных связей, направленных на минимизацию $K_{сн}$ [2, 3, 4], создан относительно новый класс активных элементов – мультидифференциальных ОУ (МОУ), которые и могут явиться основой

схемотехники таких ИУ. Следует отметить, что коэффициент ослабления синфазного сигнала разработанных МОУ практически не зависит от точности реализации резистивных элементов. Структура и условное обозначение МОУ показано на рис. 1. Этот активный элемент состоит из двух дифференциальных (ДК), одного промежуточного (ПК) и одного выходного (ВК) каскадов. Для построения инструментального усилителя на базе такого МОУ достаточно ввести глубокую отрицательную обратную связь (рис. 2), поэтому устройство в отличие от классического аналога будет характеризоваться небольшим потребляемым током. Предельное значение коэффициента передачи синфазного напряжения

$$K_{сн} = K_{осн} \cdot K_{\delta} \quad (1)$$

в таком ИУ определяется реализуемым коэффициентом усиления

$$K_{\delta} = 1 + \frac{R}{r} \quad (2)$$

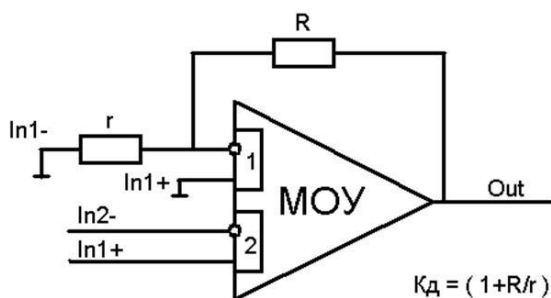


Рис. 1. – Структура и условное обозначение МОУ

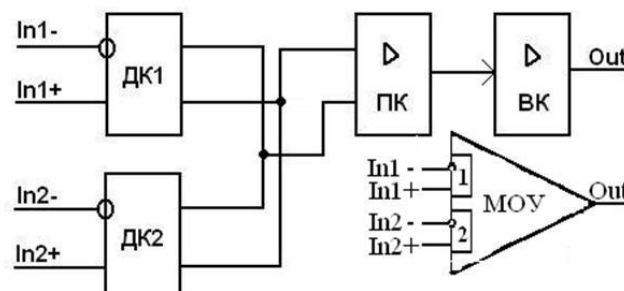


Рис. 2. – Инструментальный усилитель на одном МОУ

Напряжение дрейфа нуля ИУ ($U_{др}$) здесь также прямо пропорционально реализуемому дифференциальному коэффициенту усиления:

$$U_{др} = E_{см} \cdot K_{\delta} \quad (3)$$

эта взаимосвязь параметров и определяет область применения такого инструментального усилителя. Действительно в классической схеме влияние дифференциального коэффициента усиления на $U_{др}$ и $K_{сн}$ значительно меньше. Однако, наличие в структуре ДК1 компенсирующих обратных

связей предварительно обеспечивает глубокое ослабление синфазного напряжения, а взаимосвязь режимов работы динамических нагрузок в структуре МОУ [5] позволяют обеспечить низкое значение $E_{см}$ [1]. Указанные особенности схемотехники МОУ позволяют увеличить достижимый дифференциальный коэффициент усиления при сохранении относительно высоких требований к $U_{др}$ и $K_{сн}$. Однако работа таких схем при воздействии жестких дестабилизирующих факторов связана с достаточно существенным ухудшением этих параметров [6]. Поэтому поиск альтернативных методов решения задачи схемотехнического проектирования остается актуальной задачей при условии дискретного (на единицу) увеличения числа используемых активных элементов.

В [7] предложено решение задачи структурного синтеза инструментальных усилителей на базе указанных выше МОУ. Сформулированный в этой работе подход показывает, что решение общей задачи синтеза схем с МОУ связано с синтезом некоторой матрицы **B**, устанавливающей допустимые связи между активными элементами рис. 3.

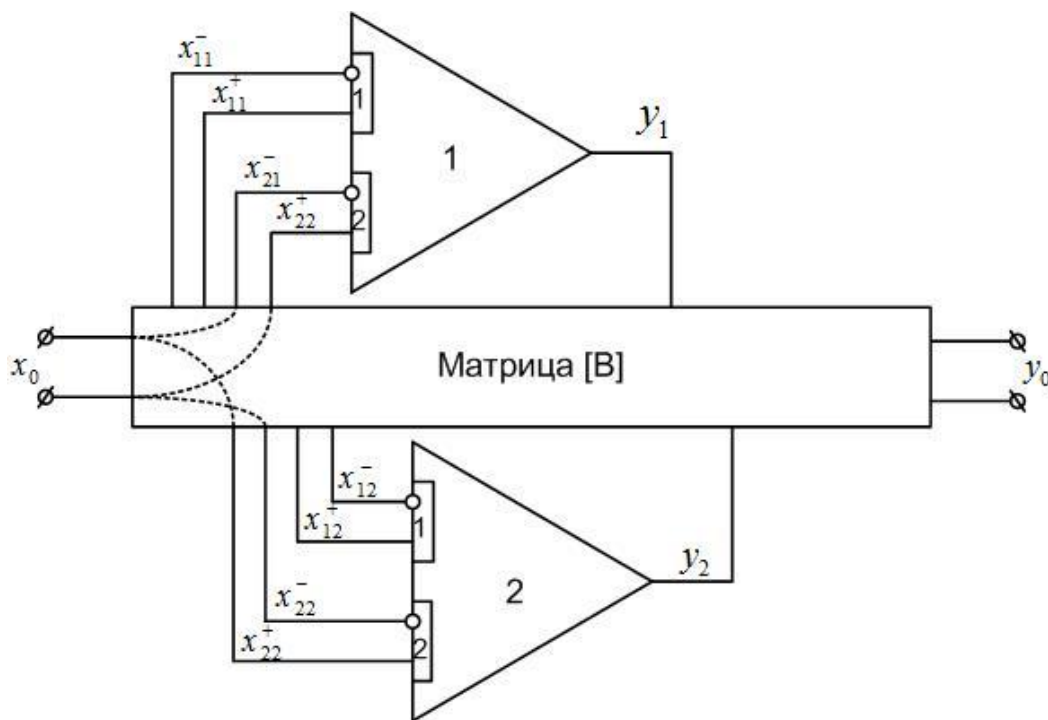


Рис. 3. – Обобщенная структура на базе двух МОУ

Отметим, что источник входного дифференциального сигнала x_0 должен действовать непосредственно на каналы 2 как первого, так и второго мультидифференциального операционного усилителя.

Синтез инструментального усилителя на базе двух МОУ базируется на поиске компонентов матрицы \mathbf{B} с учетом возможности параметрической минимизации дрейфа нуля схемы (U_{dp}) и коэффициента передачи синфазного сигнала ($K_{сн}$).

Если вторые каналы МОУ использовать только для подключения источников входного сигнала (взаимодействия с чувствительными элементами системы), то $\mathbf{B}_2 = 0$, и, следовательно, матрица

$$\mathbf{B}_1^- - \mathbf{B}_1^+ = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

будет полностью отображать возможную связь активных элементов схемы. В этом случае дрейф нуля на выходе первого (y_{1dp}) и второго (y_{2dp}) МОУ

$$y_{1dp} = \frac{b_{22}(e_{11} + e_{21}K_{21}/K_{11}) - b_{21}(e_{12} + e_{22}K_{22}/K_{12})}{b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}}, \quad (5)$$

$$y_{2dp} = \frac{b_{11}(e_{12} + e_{22}K_{22}/K_{12}) - b_{12}(e_{11} + e_{21}K_{21}/K_{11})}{b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}}, \quad (6)$$

где e_{ji} – ЭДС смещения j -го канала i -го МОУ, K_{ji} – коэффициенты усиления j -го канала i -го МОУ.

При условии, что

$$\mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_2^+ - \mathbf{A}_2^- = [a_1K_{21}/K_{11} - a_2K_{22}/K_{12}]^T, \quad (7)$$

следуют дифференциальные коэффициенты усиления

$$K_{o1} = \frac{b_{22}a_1K_{21}/K_{11} - b_{21}a_2K_{22}/K_{12}}{b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}}, \quad (8)$$

$$K_{o2} = \frac{b_{11}a_2K_{22}/K_{12} - b_{12}a_1K_{21}/K_{11}}{b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}}. \quad (9)$$

Для обеспечения низкой параметрической чувствительности этих

коэффициентов необходимо исключить разностные члены в этих соотношениях. Для этого достаточно выполнить условия

$$b_{12} \vee b_{21} = 0 \quad a_1 \vee a_2 = -1, \quad (10)$$

которые можно конкретизировать

$$b_{12} = 0, \quad a_1 = 1, \quad a_2 = -1, \quad \mathbf{A}_2^+ = [1 \ 0]^T - [0 \ 1]^T. \quad (11)$$

Отметим, что их альтернатива связана только с заменой индексов (номеров МОУ). В этом случае соотношения (5) и (6) конкретизируются

$$y_{1op} = \frac{1}{b_{11}} \cdot (e_{11} + e_{21} K_{21}/K_{11}) - \frac{b_{21}}{b_{11} b_{22}} \cdot (e_{12} + e_{22} K_{22}/K_{12}), \quad (12)$$

$$y_{2op} = \frac{1}{b_{22}} \cdot (e_{12} + e_{22} K_{22}/K_{12}). \quad (13)$$

Как следует из соотношения (12) в потенциальной структуре схемы возможна взаимная компенсация влияния ЭДС смещения МОУ. Причем это свойство присуще выходу первого МОУ и, как видно из (13), не распространяется на выход второго усилителя. В этой связи выходом инструментального усилителя является y_1 , при этом его дифференциальный коэффициент передачи имеет следующий вид

$$K_{o1} = \frac{b_{22} K_{21}/K_{11} + b_{21} K_{22}/K_{12}}{b_{11} b_{22}} \quad (14)$$

и сохраняет потенциально низкую параметрическую чувствительность. Необходимо отметить, что указанное выше свойство взаимной компенсации распространяется и на коэффициент передачи синфазного напряжения

$$K_{сн1} = \frac{1}{b_{11}} \cdot \delta_{21} \cdot \frac{K_{21}}{K_{11}} - \frac{b_{21}}{b_{11} b_{22}} \cdot \delta_{22} \cdot \frac{K_{22}}{K_{12}}, \quad (15)$$

при сохранении его на выходе второго МОУ

$$K_{сн2} = \frac{1}{b_{22}} \cdot \delta_{22} \cdot \frac{K_{22}}{K_{12}}, \quad (16)$$

причем $K_{оссиji} = \delta_{ji}^{-1} = (1 - K_{ji}^- / K_{ji}^+)^{-1}$ – коэффициент ослабления синфазного сигнала каждого i -го активного элемента, K_{ji}^- , K_{ji}^+ – коэффициенты

усиления j -го канала i -го МОУ для инвертирующего (-) и неинвертирующего (+) входов.

В этом можно убедиться конкретизацией следующих из (4) соотношений

$$K_{ch1} = \frac{b_{22} \delta_{21} K_{21}/K_{11} - b_{21} \delta_{22} K_{22}/K_{12}}{b_{11} b_{22} - b_{12} b_{21}}, \quad (17)$$

$$K_{ch2} = \frac{b_{11} \delta_{22} K_{22}/K_{12} - b_{12} \delta_{21} K_{21}/K_{11}}{b_{11} b_{22} - b_{12} b_{21}} \quad (18)$$

при выполнении оговоренного выше условия (11).

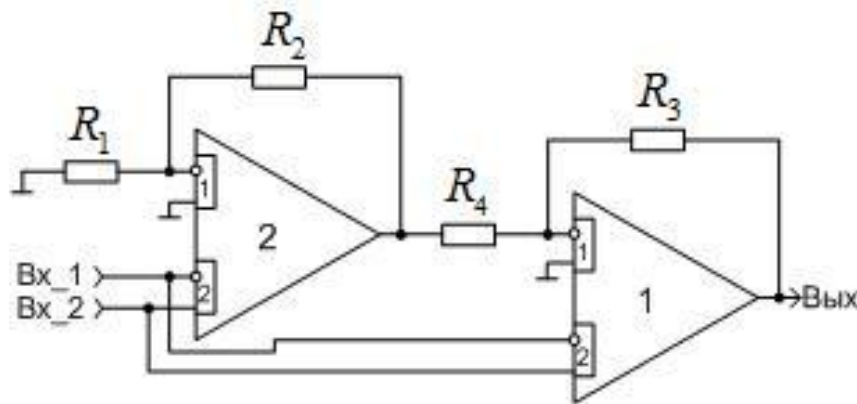


Рис. 4. – Упрощенная принципиальная схема инструментального усилителя

Принципиальная схема полученного инструментального усилителя приведена на рис. 4. Здесь компоненты матрицы (4) реализованы следующим образом

$$b_{11} = \beta_1 = \frac{R_4}{R_3 + R_4}, \quad b_{21} = 1 - \beta_1 = \frac{R_3}{R_3 + R_4}, \quad b_{22} = \beta_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (19)$$

Поэтому, как следует из соотношений (12), (13)

$$y_{1op} = \frac{1}{\beta_1} \cdot (e_{11} + e_{21} K_{21}/K_{11}) - \frac{(1 - \beta_1)}{\beta_1 \beta_2} \cdot (e_{12} + e_{22} K_{22}/K_{12}), \quad (20)$$

$$y_{2op} = \frac{1}{\beta_2} \cdot (e_{12} + e_{22} K_{22}/K_{12}). \quad (21)$$

Таким образом, при использовании идентичных МОУ выполнение параметрического условия

$$\beta_2 = (1 - \beta_1), \quad (22)$$

минимизирует дрейф нуля схемы. При этом, как видно из (14) и (15)

$$K_{o1} = \frac{1}{\beta_1} \cdot \left(\frac{K_{22}}{K_{12}} + \frac{K_{21}}{K_{11}} \right), \quad (23)$$

$$K_{сн1} = \frac{1}{\beta_1} \cdot \left(\delta_{21} \cdot \frac{K_{21}}{K_{11}} - \delta_{22} \cdot \frac{K_{22}}{K_{12}} \right), \quad (24)$$

что в конечном итоге сохраняет низкую параметрическую чувствительность K_{o1} и уменьшение коэффициента передачи синфазного напряжения.

Для демонстрации эффективности, предложенных в данной работе теоретических принципов построения инструментальных усилителей, сравним качественные показатели принципиальных схем рис. 1 и рис. 4 в случае использования идентичных МОУ (статический коэффициент усиления $\mu=48,7$ дБ, коэффициент передачи синфазного напряжения $K_{сн}=-80$ дБ, частота единичного усиления $f_1=9,2$ МГц, ЭДС смещения $E_{см}=1$ мВ) при условии реализации ими $K_o=20$ дБ. Результаты моделирования этих принципиальных схемы в среде PSpice сведены в таблицу №1.

Таблица №1

Параметры инструментальных усилителей на базе МОУ

ПАРАМЕТРЫ СХЕМА	ВОЗДЕЙСТВИЕ	K_o , дБ	$f_{гр-д}$, МГц	$K_{сн}$, дБ	$f_{гр-сн}$, кГц	$U_{др}$, мВ
Рис. 1	нормальные условия	20,000	3,028	-67	430	9,8
	$T = -40^\circ C$	20,006	3,190	-64	461	9,1
	$T = +85^\circ C$	19,997	2,872	-68	416	8
Рис. 2	нормальные условия	20,000	1,540	-120	226	0,007
	$T = -40^\circ C$	20,005	1,624	-120	180	0,009
	$T = +85^\circ C$	19,996	1,463	-120	235	0,006

Примечание: K_o – дифференциальный коэффициент усиления, $f_{гр-д}$ – граничная частота K_o , $K_{сн}$ – коэффициент передачи синфазного напряжения, $f_{гр-сн}$ – граничная частота $K_{сн}$, $U_{др}$ – напряжение дрейфа нуля усилителя, напряжение источников питания ± 5 В, токи потребления ± 7 мВ.

Таким образом, при температурном воздействии от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ в схеме на одном МОУ:

- дифференциальный коэффициент усиления изменяет свое значение не более чем на $\delta_{K_o} = \pm 0,03\%$,
- реализуемый коэффициент передачи синфазного напряжения усилителя составляет -64дБ ,
- напряжение дрейфа нуля $U_{op} = 9,8\text{мВ}$.

Для минимизации напряжения дрейфа нуля U_{op} и уменьшения коэффициента передачи синфазного напряжения $K_{сн}$, необходимо, как показано выше, использовать структуру рис. 4. Выбор численных значений элементов схемы для реализуемого $K_o = 20\text{дБ}$ ($R_2 = R_4 = 2,5\text{кОм}$, $R_1 = R_3 = 10\text{кОм}$) осуществляется в рамках выполнения условия (22) и дополнительных технологических ограничений на допустимые численные значения резистивных элементов [8, 9, 10].

Полученные результаты (табл. №1) показывают, что предложенный инструментальный усилитель имеет более высокие качественные показатели по сравнению аналогом на одном МОУ:

- дифференциальный коэффициент усиления изменяет свое значение не более чем на $\delta_{K_o} = \pm 0,025\%$,
- реализуемый коэффициент передачи синфазного напряжения усилителя составляет -120дБ ,
- напряжение дрейфа нуля не превышает 9мкВ .

Именно эти параметры и расширяют возможную область практического использования инструментальных усилителей.

Полученные результаты проектирования инструментальных усилителей на двух МОУ позволяют существенно уменьшить как напряжение дрейфа нуля схемы, так и ее коэффициент передачи синфазного напряжения. В практическом отношении это позволяет решить важную задачу построения прецизионных аналоговых интерфейсов для мостовых

резистивных датчиков, функционирующих в широком температурном диапазоне, а также использовать многоразрядные АЦП с существенно более низким опорным напряжением.

Статья подготовлена при выполнении гранта 14.В37.21.0781 по теме «Разработка архитектурных, технологических и схемотехнических основ проектирования специализированных микросхем для обработки сигналов фотоприемников нового поколения и мостовых резистивных датчиков» в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы»

Литература:

1. Крутччинский С.Г., Титов А.Е. Мультидифференциальный ОУ в режиме инструментального усилителя [Текст] // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2010. – №3 (101). – С. 200-204.

2. Крутччинский С.Г., Нефедова А.В. Структурная оптимизация дифференциальных каскадов [Текст] // Известия ЮФУ. Технические науки, 2008. – №7. – С. 41-48.

3. Krutchinsky S.G., Titov A.E., Tsibin M.S. Structural optimization of differential stage operational amplifiers // International Conference on Signal and Electronic System (ICSES'10). Poland: Institute of Electronics, Silesian University of technology, 2010. – P.253-257.

4. Krutchinsky S.G., Titov A.E., Svizev G.A. Symmetrical Differential Stages on CMOS Transistors with Circuits of Self-Compensation and Cancellation // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2012). Kharkov, Ukraine, 2012. – P. 241-244.

5. Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Будяков П.С. Способ повышения стабильности нуля аналоговых микросхем с высокоимпедансным узлом в условиях температурных и радиационных воздействий [Текст] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных схем – 2010. Сборник

трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского, 2010. – С. 295-300.

6. Крутчинский С.Г., Исанин А.С., Прокопенко Н.Н., Манжула В.Г. Радиационно-стойкий измерительный усилитель на базе мультидифференциальных входных каскадов [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1045> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

7. Крутчинский С.Г., Титов А.Е. Структурный синтез инструментальных усилителей на базе мультидифференциальных операционных усилителей (МОУ) [Текст] // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Актуальные проблемы производства и потребления электроэнергии», 2009. – С. 72-81.

8. Дворников О.В. Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Часть 2. Базовые схемотехнические решения АБМК 1-3 // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных схем – 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского, 2010. – С. 283-288.

9. О.В. Дворников, Чеховский В.А., В.Л. Дятлов, Прокопенко Н.Н., Старченко Е.И. Микросхема многоканального операционного усилителя и электрометрического повторителя на радиационно-стойком базовом матричном кристалле «АБМК-1.3» [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013, №1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1557> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

10. Н.Н. Прокопенко, О.В. Дворников, С.Г. Крутчинский. Элементная база радиационно-стойких информационно-измерительных систем. ФГБОУ ВПО «Южно-Рос. гос. ун-т. экономики и сервиса». – Шахты : ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2011. – 208 с.