

Инструментальные и мультидифференциальные усилители датчиковых систем на основе новой микросхемы базового структурного кристалла МН2ХА010

О.В. Дворников¹, Н.Н. Прокопенко², А.В. Бугакова², А.А. Игнашин²

¹ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»
(ОАО «МНИПИ»), oleg_dvornikov@tut.by

²Донской государственный технический университет, prokopenko@sssu.ru

Аннотация — Рассмотрены особенности проектирования мультидифференциальных и инструментальных усилителей (ИУ), а также схем их включения в аналоговых интерфейсах датчиковых систем, реализованных на микросхеме базового структурного кристалла (БСК) МН2ХА010. Микросхему МН2ХА010 рекомендуется использовать для создания многоканальных радиационно-стойких интегральных схем, ориентированных на работу с основными модификациями мостовых, оптических, пьезоэлектрических и других датчиков. Приведены перспективные, в том числе оригинальные варианты построения ИУ на основе БСК – многоканального сумматора-мультиплектора аналоговых сигналов, ИУ с оценкой производной измеряемой величины, широкополосного ИУ с канальными фильтрами низких частот и др.

Ключевые слова — инструментальный усилитель, мультидифференциальный операционный усилитель, базовый структурный кристалл, интерфейс датчиков, датчиковые системы, радиационная стойкость, аналоговые интегральные схемы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Мультидифференциальные операционные усилители (МОУ) относятся к одному из приоритетных направлений развития схемотехники инструментальных усилителей для датчиковых систем [1]-[7]. Они позволяют реализовать уникальные интерфейсы, создание которых на основе классических операционных усилителей (ОУ) либо невозможно, либо связано с большими энергетическими и элементными затратами. В настоящее время в мире серийно выпускается более 30 модификаций МОУ, которые находят применение в различных аналоговых процессорах и достаточно эффективно используются для преобразования электрических сигналов датчиков различной физической природы.

Одним из экономически целесообразных способов малосерийного производства интегральных схем (ИС), в том числе радиационно-стойких, является применение базовых матричных кристаллов (БМК) и БСК [8]. В «арсенале» разработчиков датчиковых систем и радиоэлектронной аппаратуры различного функционального назначения сегодня имеется более 30 аналоговых

и аналого-цифровых БМК и БСК, в том числе 6 российского производства [8].

Целью настоящей статьи является рассмотрение перспективных и новых вариантов включения мультидифференциальных и инструментальных усилителей на основе активных компонентов микросхемы МН2ХА010.

II. ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ МУЛЬТИДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Многоканальный МОУ реализуется на базе трансимпедансных ОТА-усилителей и повторителей напряжения VF1 (VF2) БСК МН2ХА010 в соответствии с рис. 1.

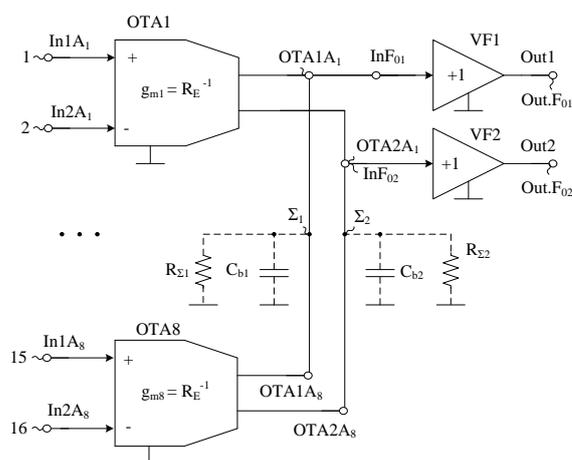


Рис. 1. МОУ на базе восьми ОТА-усилителей БСК

Новый БСК МН2ХА010 (основной разработчик – ОАО «МНИПИ» (г. Минск) при участии Донского государственного технического университета и «Института ядерных проблем» Белорусского государственного университета) удачно дополняет существующие микроэлектронные изделия данного класса, прежде всего обеспечением радиационной стойкости ИС. БСК содержит 6 функциональных ячеек с аналоговыми IP-модулями, необходимыми для обработки сигналов основных типов датчиков, а также активными и пас-

сивными элементами. Микросхема МН2ХА010, выпускаемая ОАО «Интеграл» (г. Минск) с 2016 г., позволяет создавать наиболее распространенные прецизионные интерфейсы датчиковых систем. Проектирование ИС на БСК выполняется на уровне СФ-блоков.

На практике количество входных портов МОУ (входных дифференциальных каскадов, ДК) может изменяться разработчиком в диапазоне от двух до восьми (рис. 2).

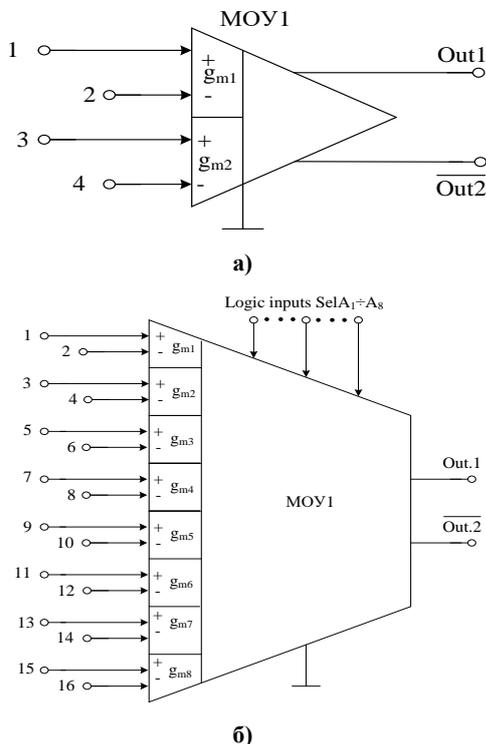


Рис. 2. Условные обозначения МОУ с двумя (а) и восемью (б) входными портами

Каждый из ОТА-усилителей БСК (функциональная ячейка ФЯ2, 16 шт.) включает также блок электропитания I_{PTAT} (рис. 3), который имеет логический вход SelA для включения или выключения соответствующего входного порта МОУ (перевода схемы ОТА-усилителя в режим малого токопотребления).

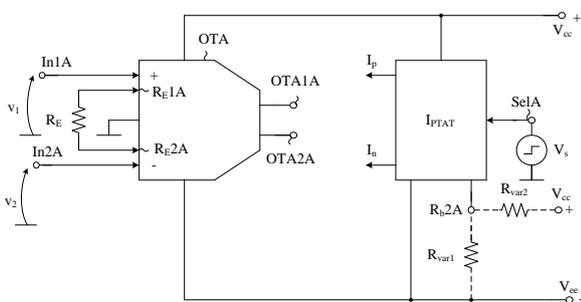


Рис. 3. ОТА-усилитель с управляемым блоком установления его статического режима I_{PTAT}

Коэффициент преобразования ОТА-усилителя (проводимость передачи g_{mi} МОУ) определяется со-

противлением резистора $R_E \approx g_{mi}^{-1}$ между выводами R_{E1A} и R_{E2A} (рис. 3).

На базе БСК МН2ХА010 возможно построение многих архитектур МОУ [1]-[7], в том числе МОУ с парафазным выходом, имеющих до восьми входных дифференциальных портов (рис. 2б). Причем, неиспользуемые порты МОУ можно выключать логическими сигналами SelA₁-A₈. Это существенно расширяет возможности проектирования конкретных аналоговых интерфейсов, позволяет более эффективно использовать реконфигурируемые МОУ на БСК в аналоговых процессорах [9, 10].

III. МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СУММАТОР-МУЛЬТИПЛЕКСОР ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ БЕЗ РЕЗИСТОРОВ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Алгебраическое сложение нескольких потенциальных сигналов на основе классических ОУ требует использования сравнительно большого числа прецизионных резисторов. Для решения задач суммирования $N=2,3,4,\dots$ входных напряжений (рис. 4) возможно использование МОУ с большим числом входных портов (рис. 2 б).

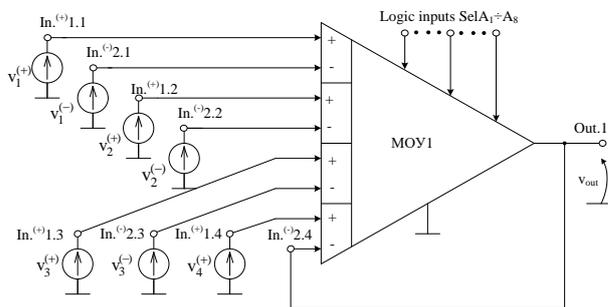


Рис. 4. Пример построения аналогового сумматора-мультиплексора семи напряжений на МОУ с четырьмя входными портами

Такое включение активных элементов БСК МН2ХА010 позволяет также обеспечить его работу в режиме мультиплексора до 15 входных напряжений, в том числе семи дифференциальных сигналов.

Сумматор на рис. 4 может работать в двух основных режимах. Первый режим – режим мультиплексора, при котором внешнее цифровое управляющее устройство формирует цифровые сигналы SelA₁-A₈, при которых обеспечивается последовательное во времени включение только одного из N входных дифференциальных каскадов МОУ. При этом, выходное напряжение сумматора на момент включения i-го входного ДК, равно его входному дифференциальному напряжению.

Важно заметить, что в схеме рис. 4 происходит формирование выходного напряжения, пропорционального входному дифференциальному напряжению в течении всего отрезка времени, в пределах которого i-й входной дифференциальный каскад находится во включенном состоянии.

Примеры построения интерфейсов на основе БСК с тремя входными портами МОУ

Второй режим работы сумматора рис. 4 – прецизионное алгебраическое суммирование избранных входных напряжений. Это обеспечивается включением (на заданный отрезок времени) избранного количества входных дифференциальных каскадов (входных портов МОУ) по цифровым входам SelA₁-A₈.

Так, например, если «включены» первый и третий входные дифференциальные каскады МОУ, то выходное напряжение сумматора (при петлевом усилении $T \gg 1$)

$$V_{\text{вых}} \approx v_1^{(+)} - v_1^{(-)} + v_3^{(+)} - v_3^{(-)} .$$

При других сочетаниях «включенных» входных ДК в схеме рис. 4 обеспечивается алгебраическое суммирование других входных напряжений.

Таким образом, сумматор-мультиплексор рис. 4 на базе БСК МН2ХА010 является многофункциональным программируемым аналоговым процессором, который обеспечивает:

- алгебраическое суммирование заданных цифровыми входами SelA1-A8 входных дифференциальных и недифференциальных напряжений;
- мультиплексирование только дифференциальных сигналов;
- неинвертирующее или инвертирующее мультиплексирование входных недифференциальных напряжений;
- мультиплексирование входных дифференциальных и недифференциальных сигналов.

Известные мультиплексоры и сумматоры аналоговых сигналов таким одновременным набором свойств не обладают.

Следует заметить, что все указанные выше качества реализуются только в том случае, если каждый из входных дифференциальных каскадов имеет широкий диапазон активной (линейной) работы [2], что обеспечивается соответствующим выбором резистора R_E в схемах ОТА-усилителей БСК (рис. 3).

IV. РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЕ МОУ

Мультидифференциальные операционные усилители данного класса позволяют реализовать широкий спектр коэффициентов передачи (K_G) [9] (например, $K_G = 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 10, 20, \dots$). Коммутируя с помощью логических входов SelA_i входные порты МОУ, а также изменяя на этапе проектирования сопротивление $R_E = g_{mi}^{-1}$ (рис. 3), можно на основе микросхемы МН2ХА010 реализовать практически любые заданные значения K_G (как положительные, так и отрицательные) без применения резисторов общей отрицательной обратной связи ($K_G = +0.5, -0.5, +1, -1, +1.5, -1.5, +2, -3, +4, -10, +10, +12, -15, +20$ и др.). Примеры построения неинвертирующих усилителей для случая, когда используется только три из восьми возможных входных портов МОУ (рис. 2 б), приведены в таблице 1. Здесь можно выбирать $R_1=0, R_2=\infty$.

Схемы соединения входов МОУ	
	<p>Неинвертирующий усилитель с коэффициентом передачи $K_G=3$ по входу In. (+)1</p>
	<p>Неинвертирующий усилитель с коэффициентом передачи $K_G \geq 0.5$</p>
	<p>Неинвертирующий усилитель с коэффициентом передачи $K_G \geq 2$</p>
	<p>Неинвертирующий усилитель с коэффициентом передачи $K_G \geq 1.5$</p>

Аналогично, за счет коммутации входов МОУ, могут быть реализованы инвертирующие усилители. Использование всех восьми портов МОУ на основе БСК МН2ХА010, а также введение (в случае необходимости) резисторов общей отрицательной обратной связи (R_1, R_2), не влияющих на входные сопротивления

МОУ, позволяет получить практически любые заданные значения модуля K_G в диапазоне до $K_{Gmax} \leq 0.01-0.1$ Т.

V. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ ДЛЯ РАБОТЫ С МОСТОВЫМИ СХЕМАМИ ВКЛЮЧЕНИЯ ДАТЧИКОВ

Мостовое включение сенсоров наиболее популярно в измерительной технике. Для преобразования сигнала измерительной диагонали моста могут применяться инструментальные усилители, реализуемые на основе IP-модулей микросхемы МН2ХА010.

A. Инструментальный усилитель с оценкой производной входного сигнала

Разработанная в [11] схема ИУ рис. 5 обеспечивает (при её реализации на БСК) не только высокую точность измерения физической величины x , анализ которой для конкретного схемотехнического решения дан в [11], но и позволяет получить оценку её производной \dot{x} . Это значительно расширяет области применения ИУ, в том числе в адаптивных системах автоматического управления.

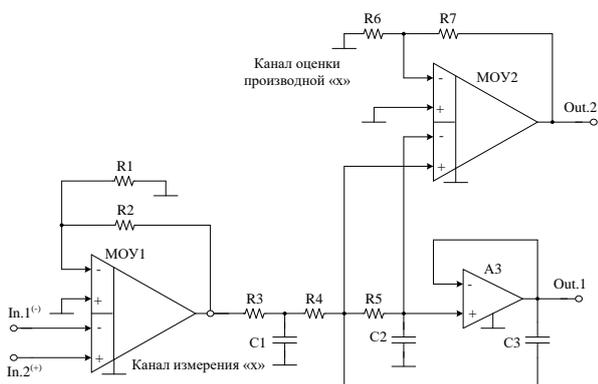


Рис. 5. Инструментальный усилитель с оценкой производной дифференциального сигнала на базе БСК

B. Инструментальный усилитель с фильтром нижних частот (ФНЧ)

Представленная на рис. 6 схема ИУ [12] имеет идентичные ФНЧ в каждом канале усиления, которые включаются между выходами МОУ1 (A1) и входами сумматора A2 (МОУ2). Особенность ИУ рис. 6 – трехкаскадная дифференциальная архитектура (A1, ФНЧ1, ФНЧ2, A2). Это позволяет обеспечить обработку дифференциальных сигналов вплоть до выхода Out.Σ. Благодаря такому решению и уникальным свойствам дифференциальных сигналов уменьшается синфазный шум и помехи, увеличивается в два раза динамический диапазон, снижается уровень второй гармоники. За счет соответствующего выбора параметров ФНЧ формируется заданный частотный диапазон ИУ, фильтруются высокочастотные дифференциальные шумы [12].

Такое построение ИУ не ухудшает также его напряжение смещения нуля ($U_{см}$). Это связано с уменьшением влияния входных токов повторителей ЭП1, ЭП1* на $U_{см}$, которые создают на резистивных элементах ФНЧ ($R5, R5^*, R6, R6^*, R7, R7^*$) статические напряжения ошибки. Однако данная погрешность не

приводится ко входу ИУ за счет высокого коэффициента ослабления входного синфазного сигнала ($K_{ос.сф}$) входных каскадов в МОУ2 (A2).

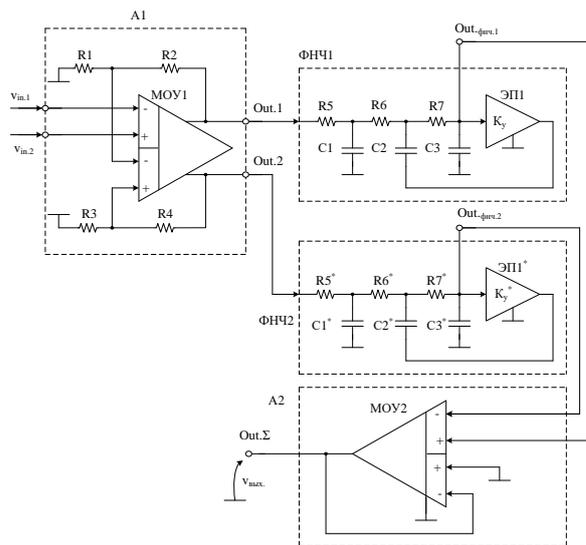


Рис. 6. ФНЧ в структуре ИУ на базе БСК

Причем, схемы ФНЧ в ИУ рис. 6 характеризуются низкой чувствительностью к нестабильности параметров резисторов и конденсаторов, оценка которой дана в [12].

C. Инструментальный усилитель с расширенным частотным диапазоном

Введение цепей собственной компенсации паразитных постоянных времени МОУ в схеме ИУ рис. 7 [13] при её реализации на БСК позволяет расширить диапазон его рабочих частот в 3÷5 раз (в сравнении со случаем, когда конденсатор цепи компенсации $C1=0$).

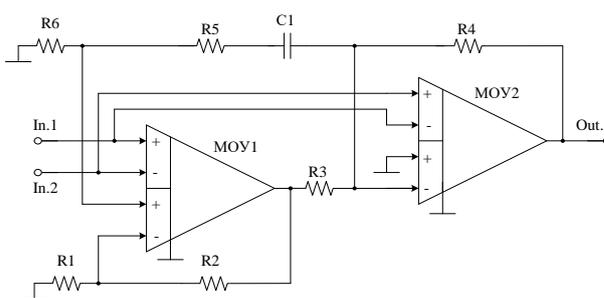


Рис. 7. ИУ с собственной компенсацией на базе БСК

Такой ИУ при коэффициенте передачи $K_G=10$ имеет верхнюю граничную частоту $f_b=3$ МГц, $K_{ос.сф}>120$ дБ, напряжение смещения нуля $U_{см}<27$ мкВ при потоке нейтронов до $5 \cdot 10^{13}$ н/см² и дозе радиации до 1 Мрад [13].

D. Инструментальные усилители на основе МОУ с парафазным выходом

Наличие в МОУ на основе БСК МН2ХА010 (рис. 2б) двух противофазных выходов, также существенно расширяет возможности их использования в аналоговых интерфейсах, в том числе активных RC-

фильтрах, ограничителях спектра, драйверов дифференциальных линий связи и т.п. (рис. 8) [1, 14, 15].

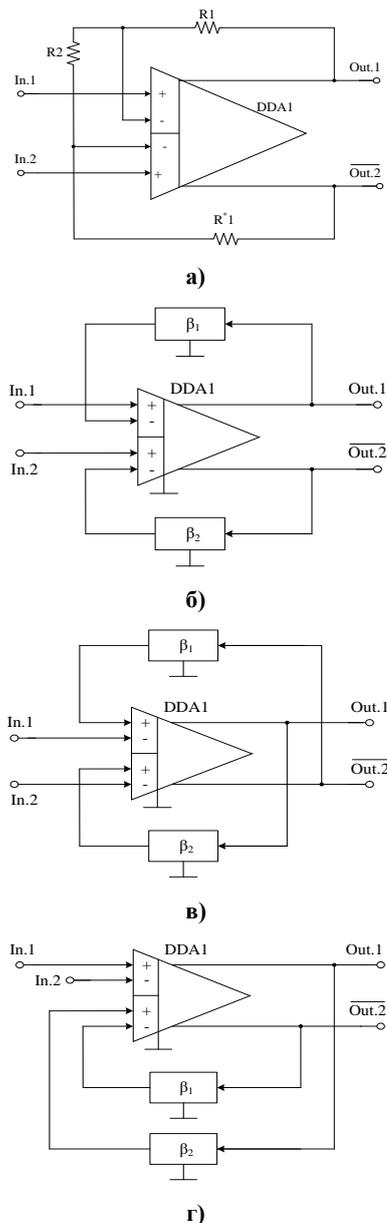


Рис. 8. Основные варианты включения МОУ с парафазным выходом и двумя входными портами

Четырехполюсники отрицательной обратной связи (β) в схемах рис. 8 могут содержать как активные, так и реактивные компоненты, что позволяет сформировать заданный частотный диапазон работы ИУ.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена краткая информация о новой микросхеме базового структурного кристалла МН2ХА010, ориентированной на применение в датчиковых системах различного назначения.

Приведены перспективные, в том числе оригинальные варианты построения ИУ на основе БСК МН2ХА010 – многофункционального сумматора

мультиплексора аналоговых сигналов, ИУ с оценкой производной измеряемой величины, широкополосного ИУ с канальными фильтрами низких частот, ИУ с расширенным частотным диапазоном и др.

В структуре БСК МН2ХА010 используются апробированные и сертифицированные аналоговые IP-модули, что позволяет оценить радиационную стойкость создаваемой радиоэлектронной аппаратуры на начальных этапах ее проектирования.

Результаты успешных радиационных испытаний аналоговых блоков, близких по схемотехнике к компонентам БСК МН2ХА010, позволяют утверждать, что конкретные микросхемы, создаваемые за счет межсоединений IP-модулей БСК, решающие конкретные задачи аналогового преобразования сигналов, будут радиационно-стойкими при воздействии флюенса электронов $3 \cdot 10^{14}$ эл/см² с энергией 4 МэВ и поглощенной дозе 3 Мрад гамма-излучения ⁶⁰Со.

Наличие в базовом структурном кристалле МН2ХА010 достаточно большого количества заранее сформированных активных компонентов может стать основой для проектирования радиационно-стойких мультидифференциальных и инструментальных усилителей на их основе для аналоговых процессоров и преобразователей электрических сигналов датчиков различной физической природы.

ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Alzahr H., Ismail M., A CMOS fully balanced differential difference amplifier and its applications // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing. 2001. V. 48, № 6, P. 614-620. doi: 10.1109/APEDE.2014.6958224
- [2] Прокопенко Н.Н., Бутырлагин Н.В., Пахомов И.В. Основные параметры и уравнения базовых схем включения мультидифференциальных операционных усилителей с высокоимпедансным узлом // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2014. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. М.: ИППМ РАН, 2014. Часть III. С. 111-116.
- [3] Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. The main connection circuits of the radiation-hardened differential difference amplifier based on the bipolar and field effect technological process // Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), 2014 12th International Conference, Novosibirsk, 2014, pp. 29-34. doi: 10.1109/82.943332
- [4] Singh B., Singh A. K., Senani R. A new universal biquad filter using differential difference amplifiers and its practical realization // Journal of Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2013. V. 75, P. 293-297. doi: 10.1007/s10470-013-0048-4
- [5] Lim S.I., Choi I.S., Lee H.H. Biochemical Sensor Interface Circuits with Differential Difference Amplifier // IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. 2012. P. 176-179. doi: 10.1109/APCCAS.2012.6419000

- [6] Kumngern M. Voltage-controlled floating resistor using differential difference amplifier // 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Bandung, 2011, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICEEI.2011.6021811
- [7] Simonetti A., Trifiletti A. An improved common-mode feedback loop for the differential-difference amplifier // NORCHIP, 2011, Lund, 2011. doi: 10.1109/NORCHIP.2011.6163991
- [8] Дворников О., Чеховский В., Дятлов В., Прокопенко Н. Применение структурных кристаллов для создания интерфейсов датчиков // Современная электроника, 2014. № 1. С. 32–37.
- [9] Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Butyrlagin N.V., Pakhomov I.V. The Reconfigurable Radiation-Hardened Differential Difference Operational Amplifier and its Main Connection Circuits in Sensor Systems // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015), Batumi, Georgia. 2015. P. 237-240.
- [10] Freier R., Braun S., Koenig A., Reconfigurable Precision Instrumentation Amplifier for Universal Sensor Interface // Sensors and Measuring Systems 2014; 17. ITG/GMA Symposium; Proceedings of, Nuremberg, Germany. 2014. P. 1-5.
- [11] Крутччинский С.Г., Прокопенко Н.Н., Свизев Г.А., Титов А.Е. Пат. 2541723 РФ, МПК8 G01D 5/12 Прецизионный аналого-цифровой интерфейс для работы с резистивными микро- и наносенсорами. № 2013142394/28; Заявл. 17.09.2013; Оpubл. 20.02.15. Бюл. № 5. 24 с.
- [12] Прокопенко Н.Н., Крутччинский С.Г., Титов А.Е. Пат. 2519032 РФ, МПК8 H03F 3/45 Инструментальный усилитель. № 2012154311/08; Заявл. 14.12.2012; Оpubл. 10.06.2014. Бюл. № 16. 27с.
- [13] Крутччинский С.Г., Титов А.Е. Оптимизация структур инструментальных усилителей с мультидифференциальными операционными усилителями // Сб. трудов «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014» / Под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. ИПИМ РАН, М., 2014. Ч. III. С. 9-14.
- [14] Hagleitner C., Lange D., Hierlemann A., Brand O., Baltes H. CMOS single-chip gas detection system comprising capacitive, calorimetric and mass-sensitive microsensors // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2002. V. 37, № 12, P. 1867-1878. doi: 10.1109/JSSC.2002.804359
- [15] Hiroto I. e.a. Amplifier circuit: pat. 1083655 EP. № EP20000119379; Date of filing. 11.09.2000; Date of publ. 10.06.2014, Bulletin. № 16. 27p.

Instrumentation and Differential Difference Amplifiers of Sensor Systems Based on the New Microcircuit of the Structured Array MH2XA010

O.V. Dvornikov¹, N.N. Prokopenko², A.V. Bugakova², A.A. Ignashin²

¹Minsk Research Instrument-Making Institute (MRIMI), oleg_dvornikov@tut.by

²Don State Technical University, prokopenko@sssu.ru

Keywords — instrumentation amplifier, differential difference operation amplifier, structured array, sensor interface, sensor systems, radiation hardness, analog integrated circuits.

ABSTRACT

The differential difference amplifiers (DDA) belong to one of the preferred directions of instrumentation amplifiers circuitry development for sensor systems [1]-[7]. They allow implementing unique interfaces on the base of classical operational amplifiers (OA), the creation of which is impossible, or it is connected with big power and component consumption. Nowadays, more than 30 modifications of DDAs are produced in lots all over the world. They are applied in various analog processors and are used effectively for electrical signals conversion of sensors of different physical nature.

One of the economically attractive methods of limited production of integrated circuits (IC), including radiation-hardened ones, is application of array chips (AC) and structured arrays (SA) [8]. The designers of sensor systems and communications-electronics equipment in various

functional areas have more than 30 analog and analog-digital ACs and SAs, including 6 circuits, which are produced in Russia [8].

The new SA MH2XA010 (the main designer is “MRIMI” with the participation of Don State Technical University and “Research Institute for Nuclear Problems” of Belorussian State University) successfully complements the existing microelectronic products of this class, mainly by providing radiation hardness of ICs. The SA has 6 functional cells with analog IP-modules, which are necessary for signal operating of the main sensor types, and also with active and passive elements. The microcircuit MH2XA010, produced by OJSC “Integral” (Minsk, the Republic of Belarus) since 2016, allows creating the most widely used precision interfaces of sensor systems. The designing of ICs, based on SAs, is carried out at the level of IO-blocks.

The aim of this article is to consider the advanced and new variants of connection of the differential difference and instrumentation amplifiers to sensor systems based on the active components of microcircuit MH2XA010.

It is recommended to apply the chip MH2XA010 for creation of multichannel radiation-hardened integrated circuits, oriented at work with the main modifications of bridge, optical, piezoelectric and other sensors. The advanced, and also unconventional variants of construction of IAs, based on SA, – the multichannel adder-multiplexer of analog signals, IA with estimation of measurand derivative, wideband IA with channel low-pass filters and others are given.

In practice, designer can change the number of input ports of DDA from one to eight.

Each of OTAs of SA (the functional cell FC2, 16 pieces) also includes power supply I_{PTAT} , which has logical input SelA for connection or disconnection of the corresponding input port of DDA (putting the circuit of OTA in current saving mode).

It is possible to construct practically all modifications of DDA on the base of SA MH2XA010 [1]-[7], including DDAs with paraphase output with up to eight input differential ports. Besides, the unused ports of DDA can be disconnected by logical signals SelA₁-A₈. It extends significantly the possibilities of designing of the definite analog interfaces. It also makes it possible to use the principle of reconfigurable DDAs in analog processors more effectively [9, 10].

The architecture of the multichannel adder-multiplexer of the potential signals without resistors of the feedback is suggested. The algebraic addition of a big number of steady signals on the base of classical OAs requires the use of a large number of precision resistors. It is possible to use DDA based on SA MH2XA010 with a big number of input ports to solve the tasks of some input voltages adding. Such connection of SA MH2XA010 also allows providing its operation in the mode of multiplexer of up to 15 input voltages, including seven differential signals. Besides, the connection and disconnection of the required channel is provided by the logical signals, fed into each logical input SelA of DDA.

The adder of the analog signals, suggested in the article, can operate in two main modes. The first mode is a mode of multiplexer, where the external digital loop controller forms digital signals SelA1-A8, and the subsequent in time connection of only one of N input differential stages of DDA is provided. Besides, at the moment of connection of the i-th input differential stage (DS) the output voltage of the adder is equal to its input differential voltage.

It's important to note, that the output differential voltage, which is proportional to the input differential voltage, is formed in the circuit of the adder during the whole period of time, in the range of which the i-th input DS is switched on.

The second operation mode of the adder is a precision algebraic addition of the chosen input voltages. It is provided due to the connection of the chosen quantity of the input differential stages at the digital inputs SelA₁-A₈.

Thus, the adder-multiplexer, based on SA, considered in this article, is a multifunctional programmable analog processor, which provides:

- algebraic addition of input differential and non-differential signals, preset by digital inputs SelA1-A8 of DDA;
- multiplexing of only differential signals;
- noninverting or inverting multiplexing of input non-differential voltages;
- multiplexing of input differential and non-differential signals.

The well-known multiplexers and adders of the analog signals don't have this feature.

We should note, that all mentioned above qualities are realized, only if each of input differential stages has a wide range of active operation [2]. It is provided by the corresponding choice of the resistor R_E in the circuits of OTAs of AS MH2XA010.

The reconfigurable differential difference operational amplifiers allow realizing a wide range of transfer ratios without resistors of the negative feedback [9]. When commuting the input ports of DDA on SA MH2XA010 with the help of logic inputs SelAi, and also changing the resistance R_E between the inputs of OTAs of SA at the stage designing, it is possible to realize practically any preset values of transfer ratios (both positive and negative) on the base of the chip MH2XA010 without resistors of common negative feedback.

Analogically, the inverting amplifiers can be realized due to the commutation of the inputs of DDA.

The bridge connection of sensors are most popular in measuring technique. The instrumentation amplifiers realized due to the IP-module connections of the microcircuit MH2XA010 can be used to convert the signals of the measuring bridge diagonal.

The circuit of IA [11], designed by the authors of this article, provides (when it is realized on SA) not only high measurement accuracy of the physical magnitude x , but also the estimation of its derivative \dot{x} . This extends significantly the areas of application of this IA, including the adaptive systems of automatic control.

The architecture of the instrumentation amplifier with low-pass filter (LPF) is considered. The circuit of IA [12], suggested by the authors of this article, allows connecting LPF to each of amplification channels and forming the preset frequency range of IA. Such construction of IA decreases error from the offset voltage because of the resistive elements of LPF due to the high common-mode rejection ratio in the input stages of the output DDA. Besides, LPF are characterized by low sensitivity to the parameter instability of resistors and capacitors [12].

The architecture of the instrumentation amplifier with the extended frequency range is given. Insertion of inherent compensation circuits of parasitic time constants of DDA to the circuit of instrumentation amplifier on SA

MH2XA010 [13] allows extending its bandwidth by a factor of 3÷5 times.

The presence of two antiphase outputs in DDA based on SA also extends significantly the possibilities of their use in the analog interfaces, including active RC-filters, range stops, etc [1, 14, 15]. The main connection circuits of DDA of this class are given. Thus, the presented article gives brief information about the new microcircuit of the structured array MH2XA010, oriented on various applications in the sensor systems.

The advanced, and also unconventional variants of construction of IAs, based on SA MH2XA010, – the multifunctional adder-multiplexer of analog signals, IA with estimation of the measurand derivative, wideband IA with channel low-pass filters and others are given.

The tested and certified analog IP-modules are used in the structure of SA MH2XA010; it makes it possible to estimate the hardness of the created communication electronics equipment at the initial stages of its designing.

The results of the successful radiation tests of the analog blocks, similar in microcircuitry to the components of SA MH2XA010, allow confirming that the particular microcircuits, created due to the interconnection wirings of IP-modules of SA, solving the specific tasks of the analog signal converter, will be radiation-hardened under the influence of fluence of the electrons of $3 \cdot 10^{14}$ e/cm² with energy of 4 MeV and absorbed dose of 3 Mrad of gamma-rays ⁶⁰Co.

The presence of a big number of the preliminary formed active components in SA MH2XA010 can become the base for designing radiation-hardened differential difference operational amplifiers and instrumentation amplifiers on its base for analog processors and converters of electric signals of sensors of various physical natures.

SUPPORT

The research was carried out at the expense of the Grant of the Russian Science Foundation (project № 16-19-00122)

REFERENCES

[1] Alzahr H., Ismail M. A CMOS fully balanced differential difference amplifier and its applications. In *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, 2001, vol. 48, no. 6, pp. 614-620. DOI: 10.1109/82.943332

[2] Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Pakhomov I.V. The Main Parameters and Equations of Basic Connection Circuits of Differential Difference Op Amps with Highimpedance Node. *Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic System Development*, Part 3, IPPM RAS, Moscow, 2015, pp. 29-30 (in Russian).

[3] Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. The main connection circuits of the radia-

tion-hardened differential difference amplifier based on the bipolar and field effect technological process. *Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, 2014 12th International Conference, Novosibirsk, 2014, pp. 29-34 (in Russian). DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040870

[4] Singh B., Singh A. K., Senani R. A new universal biquad filter using differential difference amplifiers and its practical realization. *Journal of Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2013, vol. 75, pp. 293-297. doi: 10.1007/s10470-013-0048-4

[5] Lim S.I., Choi I.S., Lee H.H. Biochemical Sensor Interface Circuits with Differential Difference Amplifier. *Circuits and Systems (APCCAS)*, 2012 IEEE Asia Pacific Conference, Kaohsiung, 2012, pp. 176-179. doi: 10.1109/APCCAS.2012.6419000

[6] Kungern M. Voltage-controlled floating resistor using differential difference amplifier // *2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, Bandung, 2011, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICEEI.2011.6021811

[7] Simonetti A., Trifiletti A. An improved common-mode feedback loop for the differential-difference amplifier // *NORCHIP*, 2011, Lund, 2011. doi: 10.1109/NORCHIP.2011.6163991

[8] Dvornikov O., Chehovskij V., Djatlov V., Prokopenko N. Primenenie strukturnykh kristallov dlja sozdaniya interfeisov datchikov. *Sovremennyya elektronika*, 2014, no. 1, pp. 32–37 (in Russian).

[9] Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Butyrlagin N.V., Pakhomov I.V. The Reconfigurable Radiation-Hardened Differential Difference Operational Amplifier and its Main Connection Circuits in Sensor Systems. *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015)*, Batumi, Georgia, 2015, pp. 237-240 (in Russian).

[10] Freier R., Braun S., Koenig A., Reconfigurable Precision Instrumentation Amplifier for Universal Sensor Interface. *Sensors and Measuring Systems 2014; 17. ITG/GMA Symposium; Proceedings of*, Nuremberg, Germany, 2014, pp. 1-5.

[11] Krutchinskiy S.G. e.a. Precizionnyj analogo-cifrovoy interfejs dlja raboty s rezistivnymi mikro- i nanosensormi - Precision analogue-digital interface for working with resistive micro- and nanospheres. Patent RF, no. 2541723, 2015 (In Russian).

[12] Prokopenko N.N. e.a. Instrumental'nyj usilitel' - Instrumentation amplifiers. Patent RF, no. 2519032, 2014 (In Russian).

[13] Krutchinsky S.G., Titov A.E. Optimizatsiya struktur instrumental'nykh usiliteley s mul'tidifferentsial'nymi operatsionnymi usiliteliami. Sbornik trudov «Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem», Moscow, IPPM RAN, 2014, Part III, pp. 9-14 (in Russian).

[14] Hagleitner C., Lange D., Hierlemann A., Brand O., Baltes H. CMOS single-chip gas detection system comprising capacitive, calorimetric and mass-sensitive microsensors. In *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2002, vol. 37, no. 12, pp. 1867-1878. DOI: 10.1109/JSSC.2002.804359

[15] Hiroto I. e.a. Amplifier circuit. Patent EP, no. 1083655, 2007.