

УДК 621.375  
doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-2

## КОММУТИРУЕМЫЙ МУЛЬТИДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

С. В. Федоров

Уфимский университет науки и технологий (филиал в г. Кумертау),  
Кумертау, Республика Башкортостан, Россия  
proinfosystem@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Целью данного исследования является проектирование усилителя, позволяющего осуществлять дифференциальное преобразование нескольких входных напряжений с возможностью их мультиплексирования, а также обладающего более низким напряжением смещения нуля и высоким коэффициентом ослабления синфазного сигнала, чем в операционных и инструментальных усилителях. *Материалы и методы.* Рассмотрены методы преобразования сигналов датчиков в многоканальных измерительных системах. Недостатками данных методов является использование операционных усилителей, которые не обеспечивают дифференциального преобразования нескольких входных напряжений, что требует наличие аналогового мультиплексора для переключения каналов. Операционные усилители также обладают невысокими собственными параметрами. Многоканальные измерительные системы на их основе требуют наличия внешних элементов, влияющих на ее качественные показатели. *Результаты.* В качестве решения по устранению данных недостатков разработана схема мультидифференциального операционного усилителя с идентичными входными дифференциальными каскадами и возможностью их коммутации для подключения и отключения входных сигналов. *Выводы.* Моделирование схемы в среде Multisim обеспечило получение передаточных характеристик для дифференциального и синфазного режимов мультидифференциального усилителя. Анализ полученных результатов показывает, что разработанный мультидифференциальный усилитель обладает более качественными собственными параметрами, чем существующие операционные и инструментальные усилители, а также позволяет исключить внешние элементы схемы, влияющих на ее качественные показатели. Отличием данной схемы от существующих мультидифференциальных усилителей является возможность коммутации входных дифференциальных сигналов датчиков, что исключает использование аналогового мультиплексора для переключения каналов.

**Ключевые слова:** многоканальная измерительная система, операционный усилитель, коммутируемый мультидифференциальный операционный усилитель, коэффициент ослабления синфазного входного напряжения, напряжение смещения нуля, инструментальный усилитель

**Для цитирования:** Федоров С. В. Коммутируемый мультидифференциальный операционный усилитель для многоканальной измерительной системы // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 14–21. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-2

## A SWITCHED MULTIDIFFERENTIAL OPERATIONAL AMPLIFIER FOR A MULTICHANNEL MEASURING SYSTEM

S.V. Fedorov

Ufa University of Science and Technology (Kumertau Branch), Kumertau, Republic of Bashkortostan, Russia  
proinfosystem@gmail.com

**Abstract.** *Background.* The purpose of this study is to design an amplifier that allows differential conversion of several input voltages with the possibility of multiplexing them, as well as having a lower zero offset voltage and a high common-mode attenuation coefficient than in operational and instrumental amplifiers. *Materials and methods.* Methods of converting sensor signals in multichannel measuring systems are considered. The disadvantages of these methods are the use of operational amplifiers that do not provide differential conversion of several input voltages, which requires an analog multiplexer to switch channels. Operational amplifiers do not have high intrinsic parameters. Multichannel measurement systems based on them require the presence of external elements that affect its quality indicators. *Results.* As a solution to eliminate these shortcomings, a scheme of a multidifferential operational amplifier with identical input differential stages

and the possibility of switching them to connect and disconnect input signals has been developed. *Conclusions.* The simulation of the circuit in the Multisim environment provided the transmission characteristics for the differential and common-mode modes of a multidifferential amplifier. The analysis of the obtained results shows that the developed multidifferential amplifier has better intrinsic parameters than existing operational and instrumental amplifiers, and also allows you to exclude external elements of the circuit that affect its quality indicators. The difference between this scheme and existing multidifferential amplifiers is the possibility of switching the input differential signals of the sensors. Thus, it eliminates the use of an analog multiplexer for channel switching.

**Keywords:** multichannel measuring system, operational amplifier, switched multidifferential operational amplifier, common-mode input voltage attenuation coefficient, zero offset voltage, instrumental amplifier

**For citation:** Fedorov S.V. A switched multidifferential operational amplifier for a multichannel measuring system. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1):14–21. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-2

### Введение

На сегодняшний день при изучении процессов, происходящих в различных объектах с распределенными параметрами, используются современные компьютерные системы. Такие системы предполагают применение множества быстродействующих высокоточных датчиков, находящихся на объекте. На основании параметров, полученных с этих датчиков при проведении исследований, составляется информация о характере протекающих процессов. На основании данной информации происходит формирование алгоритмов управления объектом. Данный процесс исследования происходит с помощью многоканальных систем сбора данных. Функциями данных систем являются [1]:

- 1) выработка сигналов датчиков;
- 2) мультиплексирование сигналов датчиков;
- 3) нормирование сигналов;
- 4) аналого-цифровое преобразование;
- 5) цифровая фильтрация сигналов;
- 6) линеаризация статических характеристик датчиков;
- 7) калибровка измерительных каналов.

### Материалы и методы

На сегодняшний день при создании многоканальных систем сбора сигналов датчиков используется два типа схем. Первый вариант приведен на рис. 1.

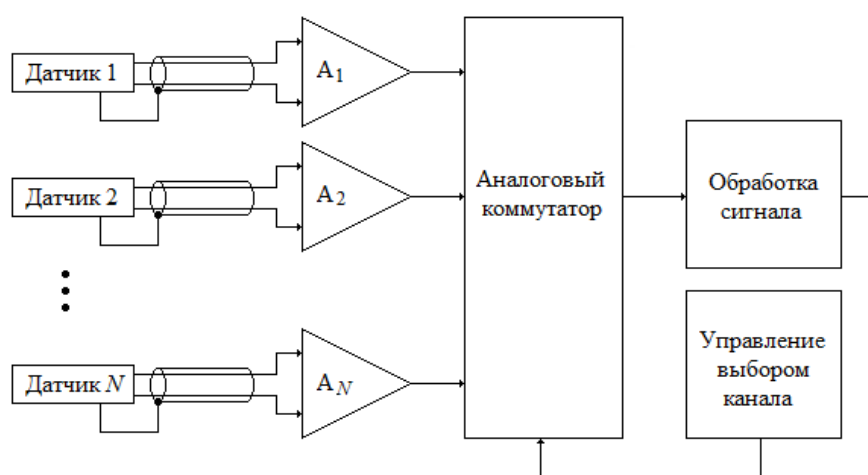


Рис. 1. Многоканальная система сбора сигналов датчиков с предварительным усилением

В данной системе используются несколько усилителей, которые устанавливаются непосредственно после датчиков. Для каждого датчика задается определенный коэффициент усиления усилителя.

Другим вариантом, применяемым при создании многоканальных измерительных систем, является система сбора сигналов датчиков с масштабным усилением (рис. 2).



Рис. 2. Многоканальная система сбора сигналов датчиков с масштабным усилением

Особенностью данной системы является подключение аналогового коммутатора (мультиплексора) непосредственно к датчикам. Таким образом, с помощью системы управления происходит подключение конкретного датчика к единому усилителю. Одновременно с этим система управления задает коэффициент усиления усилителя.

Недостатком приведенных выше систем является использование операционных усилителей (ОУ). Операционный усилитель не обеспечивает дифференциальное преобразование нескольких входных сигналов, что требует наличия аналогового мультиплексора для переключения каналов.

Помимо этого, операционные усилители обладают относительно невысокими собственными качественными параметрами, такими как коэффициент ослабления синфазного сигнала, напряжение смещения нуля. Задание коэффициента усиления с помощью внешних резисторов приводит к ухудшению качественных параметров всей схемы вследствие рассогласования данных резисторов.

Попытки решения данной проблемы привели к появлению инструментальных усилителей (ИУ) (рис. 3).

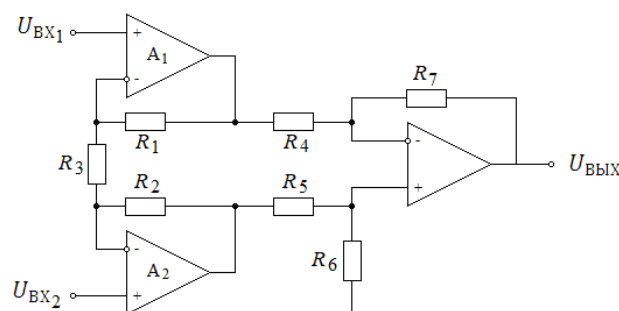


Рис. 3. Схема инструментального усилителя на трех ОУ

Однако использование более сложной структуры ИУ привело к следующим недостаткам [2, 3]:

1. Коэффициент усиления синфазного сигнала ( $K_{сф}$ ) инструментального усилителя (рис. 3) определяется точностью резисторов  $R_4$ – $R_7$ :

$$K_{сф} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{сф}},$$

$$K_{сф} = \frac{R_6}{R_5 + R_6} \left( 1 + \frac{R_7}{R_4} \right) - \frac{R_7}{R_4} = \frac{R_6 - \frac{R_5 R_7}{R_4}}{R_5 + R_6}.$$

2. Влияние активных элементов  $A_1$ ,  $A_2$  на коэффициенты усиления синфазного сигнала [4].
3. Синфазные выходные напряжения усилителей  $A_1$  и  $A_2$  зависят от точности сопротивлений резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  [5, 6].

ИУ также не позволяет осуществлять непосредственное дифференциальное преобразование нескольких входных напряжений.

На основании вышеизложенного целью исследования является проектирование усилителя, позволяющего осуществлять дифференциальное преобразование нескольких входных сигналов с возможностью их мультиплексирования, а также обладающего более низким напряжением смещения нуля и высоким коэффициентом ослабления синфазного сигнала, чем в ОУ и ИУ, независимыми от внешней схемы.

Решением данной проблемы в части достижения внутренних высоких показателей качества является использование вместо традиционных ОУ и ИУ новейших разработок в области усилителей, таких как мультидифференциальные операционные усилители (МОУ). Отличием МОУ от ОУ является наличие в их структуре нескольких входных дифференциальных каскадов.

На рис. 4 показана схема включения МОУ в структуру классического измерительного моста с резистивными сенсорами некоторой физической величины.

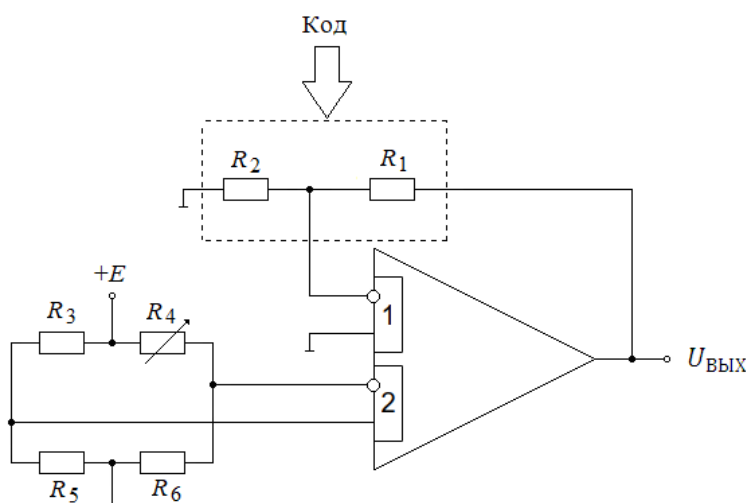


Рис. 4. Измерительный мост с мультидифференциальным преобразователем

Преимуществами использования МОУ в измерительных системах являются [7]:

1. Возможность исключения из обратной связи резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ . Если принять  $R_1 = 0$ ,  $R_2 = \infty$ , то коэффициент усиления МОУ будет равен единице.
2. Цифровое управление коэффициентом усиления с помощью включения вместо резистора  $R_2$  классической матрицы « $R-2R$ », коммутируемой с помощью КМОП ключей [8].
3. Напряжение смещения нуля в МОУ существенно ниже, чем в ОУ и ИУ.
4. Коэффициент ослабления синфазного сигнала в МОУ имеет более высокое значение по сравнению с ОУ [9–11].
5. Простота увеличения числа каналов путем добавления необходимого количества дифференциальных каскадов.

Хотя МОУ обладает возможностью дифференциального преобразования нескольких входных сигналов, но при этом в нем нет возможности мультиплексирования данных сигналов. Выходной сигнал МОУ представляет собой сумму входных дифференциальных сигналов [9, 12]. В связи с этим встает вопрос разработки коммутируемого МОУ для многоканальной системы сбора сигналов датчиков.

На основании ОУ КР140УД1 был спроектирован и исследован коммутируемый мультидифференциальный операционный усилитель с тремя идентичными входными дифференциальными каскадами. Электрическая схема данного МОУ приведена на рис. 5.

Для подключения сигнала с какого-либо датчика на входе каждого дифференциального каскада установлены идентичные аналоговые коммутаторы  $DD$ . Схема коммутатора аналоговых сигналов  $DD$  представлена на рис. 6. Коммутатор имеет вход и выход сигнала, а также вход разрешения прохождения сигнала  $EI$ . Он имеет два управляемых ключа  $S1$  и  $S2$ . Когда значение управляющего сигнала  $EI = 1$ , ключ  $S1$  замыкается, а ключ  $S2$  размыкается и сигнал со входа подключается к выходу. Если  $EI = 0$ , то ключ  $S1$  размыкается, а ключ  $S2$  замыкается и входной сигнал отключается, а выход заземляется.

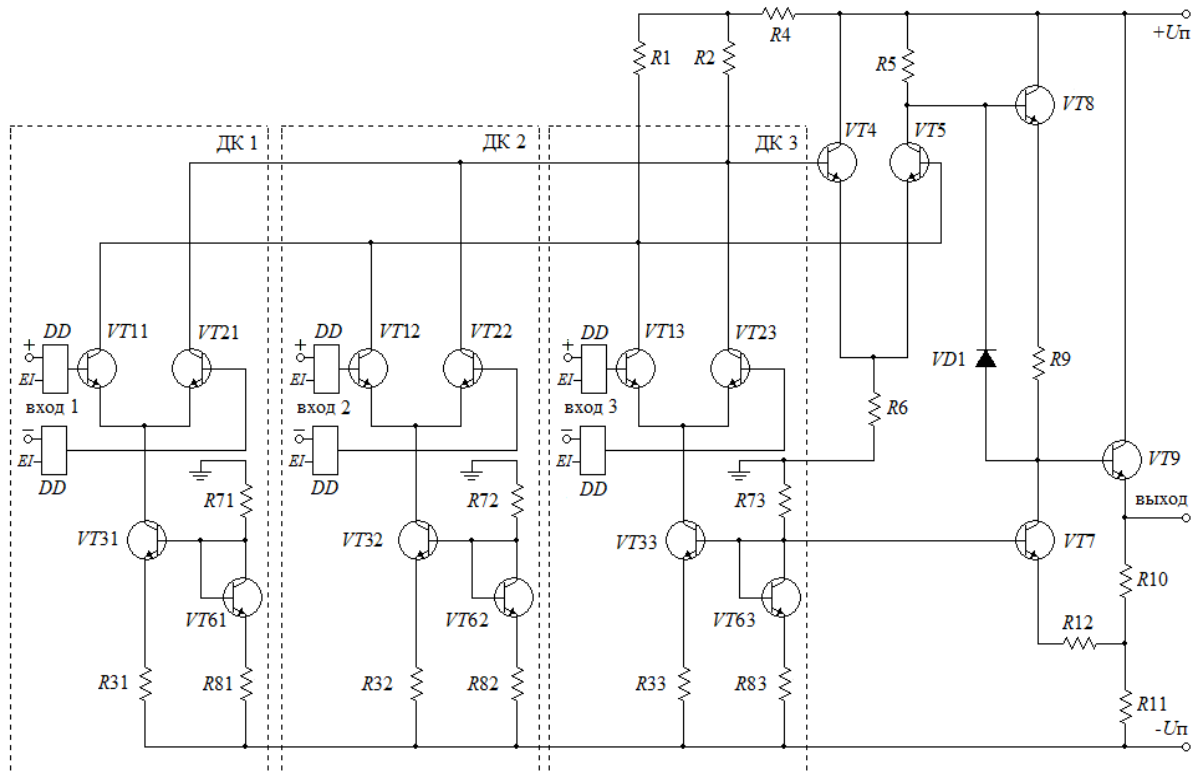


Рис. 5. Схема мультидифференциального операционного усилителя с тремя входными дифференциальными каскадами – ДК 1, ДК 2, ДК 3

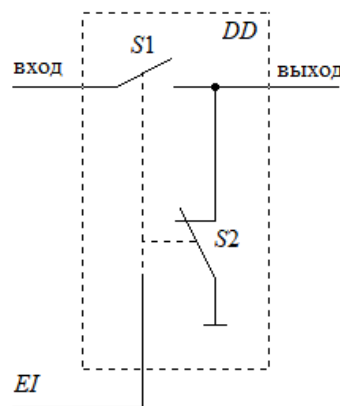


Рис. 6. Схема коммутатора аналоговых сигналов

### Результаты

Моделирование схемы коммутируемого мультидифференциального операционного усилителя производилось в среде *Multisim 14.0*. В процессе исследования были изучены дифференциальный и синфазный режимы мультидифференциального усилителя. Для каждого входного каскада были определены передаточные характеристики (рис. 7). Передаточная характеристика для дифференциального режима работы МОУ представлена на рис. 7,а, где  $U_{in}$  – дифференциальное напряжение на входе,  $U_{out}$  – напряжение на выходе МОУ. Передаточная характеристика для синфазного режима работы МОУ представлена на рис. 7,б, где  $U_{in sn}$  – синфазное напряжение на входе МОУ,  $U_{out sn}$  – напряжение на выходе.

Значения коэффициентов усиления синфазного ( $K_{сф}$ ) и дифференциального ( $K_{д}$ ) сигналов получаются исходя из графиков:

$$K_{д} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{д}} = 1100, \quad K_{сф} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{сф}} = 0,000059.$$

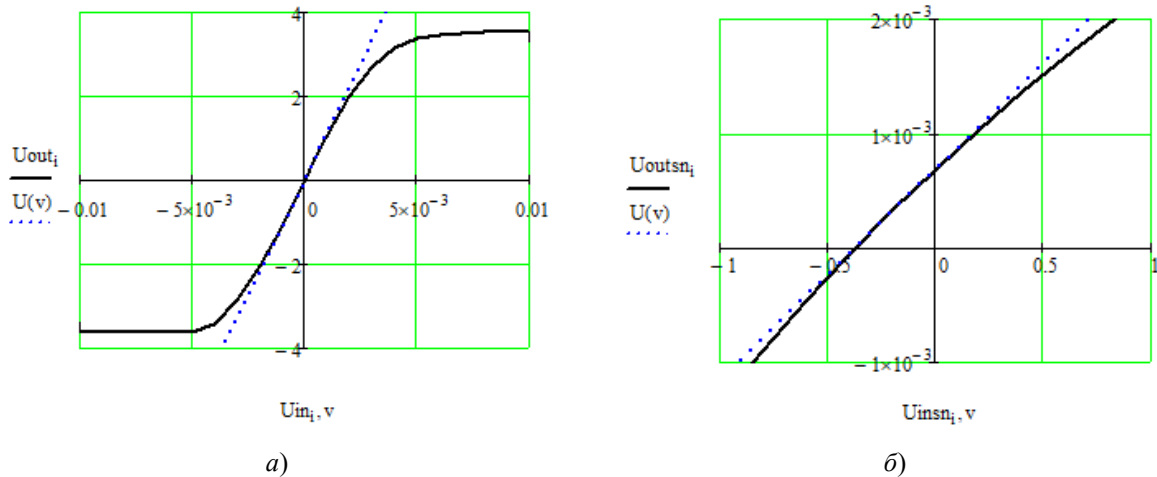


Рис. 7. Передаточная характеристика для дифференциального (а) и синфазного (б) режимов

В результате коэффициент ослабления синфазного сигнала ( $K_{ОСС}$ ) принимает следующее значение:

$$K_{ОСС} = 20 \log \left( \frac{K_{Д}}{K_{СФ}} \right) = 115,5 \text{ дБ.}$$

Напряжение смещения нуля МОУ составило  $\pm 0,645 \text{ мкВ}$ .

**Обсуждение**

Анализ полученных результатов показывает, что разработанный МОУ обладает более качественными собственными параметрами, чем существующие ОУ и ИУ. Для подтверждения данного факта в качестве сравнения в табл. 1 приведены параметры разработанного коммутируемого МОУ с современным инструментальным усилителем производства компании *Texas Instruments* – *INA333* и прецизионным ОУ 140УД17.

Таблица 1

Сравнение параметров усилителей

Параметры усилителя	Коммутируемый МОУ	Инструментальный усилитель <i>INA333</i>	ОУ 140УД17
1. Напряжение смещения нуля	$\pm 0,645 \text{ мкВ}$	25 мкВ	25 мкВ
2. Коэффициент ослабления синфазного входного напряжения	$\geq 115 \text{ дБ}$	100 дБ	110 дБ

В отличие от существующих МОУ разработанная схема позволяет осуществлять коммутацию входных дифференциальных сигналов датчиков. На рис. 8 показана схема включения коммутируемого МОУ в многоканальной мостовой измерительной системе.

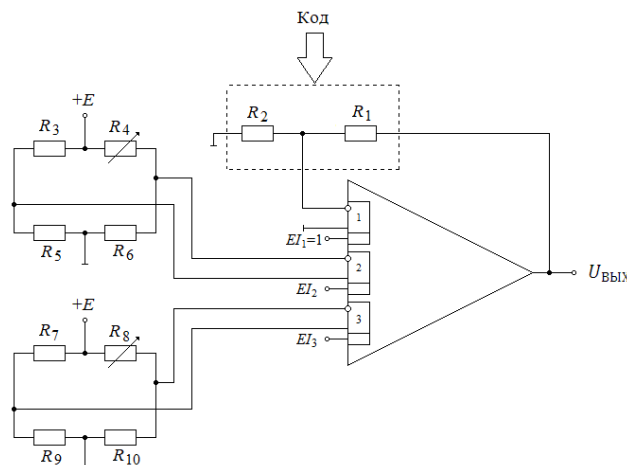


Рис. 8. Коммутируемый МОУ в многоканальной мостовой измерительной системе

### Заключение

В результате проведенных исследований была разработана схема коммутируемого мультидифференциального операционного усилителя для многоканальной измерительной системы.

Преимуществом использования разработанного усилителя от классических ОУ и ИУ являются более качественные собственные параметры МОУ, а также исключение внешних элементов схемы, влияющих на ее качественные показатели.

Отличием данной схемы от существующих МОУ является возможность коммутации входных дифференциальных сигналов датчиков. Таким образом, исключается использование аналогового мультиплексора для переключения каналов.

### Список литературы

1. Дьякова А. А., Мазур А. В., Ковальчук Д. А., Пушкин А. А. Многоканальная система сбора и обработки информации на базе контроллера ADuC7061 // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. 2014. № 17. С. 66–71.
2. Пахомов И. В. Мультидифференциальные операционные усилители напряжений и токов с активной отрицательной обратной связью : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05. Ростов-на-Дону, 2017. 208 с.
3. Bielek D., Senani R., Biolkova V., Kolka Z. Active Elements for Analog Signal Processing: Classification, Review, and New Proposals // Radioengineering. 2008. Vol. 17, № 4. P. 15–32.
4. Titov A. E., Prokopenko N. N., Pakhomov I. V. The Design Features of Low-Temperature Radiation-Hardened Instrumentation Amplifiers and Sensor Interfaces // Proceedings of the 2016 IEEE 19th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS) (April 20–22, 2016, Košice, Slovakia). 2016. P. 186–189.
5. Крутччинский С. Г. Структурный синтез в аналоговой микросхемотехнике : монография. Шахты : ЮРГУЭС, 2010. 260 с.
6. Krutchinsky S. G., Titov A. E. Structure synthesis and optimization of instrumental amplifiers based on DDAs // Radiotekhnika under the total. 2015. Vol. 2. P. 98–106.
7. Прокопенко Н. Н., Бутырлагин Н. В., Бугакова А. В., Игнашин А. А. Многоканальный радиационно-стойкий инструментальный усилитель для датчиковых систем и аналоговых интерфейсов ответственного применения // Глобальная ядерная безопасность. 2016. № 1. С. 76–86.
8. Крутччинский С. Г., Титов А. Е. Мультидифференциальный операционный усилитель в режиме инструментального усилителя // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2010. № 3. С. 200–203.
9. Крутччинский С. Г., Титов А. Е. Оптимизация структур инструментальных усилителей с мультидифференциальными операционными усилителями // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2014. № 3. С. 9–14.
10. Zhu L., Zhou Z., Wang W. [et al.]. A High CMRR Differential Difference Amplifier Employing Combined Input Pairs for Neural Signal Recordings // IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems. 2023. Sep 4. P. 99.
11. Mejía-Chávez P., Sánchez-García J. C., Velázquez-López J. Differential difference amplifier FGMOS for electrocardiogram signal acquisition // 8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (Merida City, Mexico, 2011). 2011. P. 1–5.
12. Федоров С. В. Структурный синтез схем инструментальных усилителей на основе мультидифференциальных операционных усилителей // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. № 2. С. 29–35.

### References

1. D'yakova A.A., Mazur A.V., Koval'chuk D.A., Pushkin A.A. Multichannel information collection and processing system based on the ADuC7061 controller. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh i biznesprotsessov = Automation of technological and business processes*. 2014;(17):66–71. (In Russ.)
2. Pakhomov I.V. *Multidifferential operational voltage and current amplifiers with active negative feedback*. PhD dissertation: 05.13.05. Rostov-on-Don, 2017:208. (In Russ.)
3. Bielek D., Senani R., Biolkova V., Kolka Z. Active Elements for Analog Signal Processing: Classification, Review, and New Proposals. *Radioengineering*. 2008;17(4):15–32.
4. Titov A.E., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V. The Design Features of Low-Temperature Radiation-Hardened Instrumentation Amplifiers and Sensor Interfaces. *Proceedings of the 2016 IEEE 19th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS) (April 20–22, 2016, Košice, Slovakia)*. 2016:186–189.
5. Krutchinskiy S.G. *Strukturnyy sintez v analogovoy mikroskhemotekhnike: monografiya = Structural synthesis in analog microcircuit engineering : monograph*. Shakhty: YuRGUES, 2010:260. (In Russ.)

6. Krutchinsky S.G., Titov A.E. Structure synthesis and optimization of instrumental amplifiers based on DDAs. *Radiotekhnika under the total*. 2015;2:98–106.
7. Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V., Ignashin A.A. Multichannel radiation-resistant instrumental amplifier for sensor systems and analog interfaces of domestic use. *Global'naya yadernaya bezopasnost' = Global nuclear safety*. 2016;(1):76–86. (In Russ.)
8. Krutchinskiy S.G., Titov A.E. A multidifferential operational amplifier in the mode of an instrumental amplifier. *Nauchno-tekhnichestkie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie = Scientific and technical bulletin of the St. Petersburg State Polytechnic University. Computer science. Telecommunications. Management*. 2010;(3):200–203. (In Russ.)
9. Krutchinskiy S.G., Titov A.E. Optimization of structures of instrumental amplifiers with multidifferential operational amplifiers. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES)*. 2014;(3):9–14. (In Russ.)
10. Zhu L., Zhou Z., Wang W. [et al.]. A High CMRR Differential Difference Amplifier Employing Combined Input Pairs for Neural Signal Recordings. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*. 2023;Sep.4:99.
11. Mejía-Chávez P., Sánchez-García J. C., Velázquez-López J. Differential difference amplifier FGMOS for electrocardiogram signal acquisition. *8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (Merida City, Mexico, 2011)*. 2011:1–5.
12. Fedorov S.V. Structural synthesis of the circuit of instrumental amplifiers based on multidifferential operational amplifiers. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technologies in design and production*. 2022;(2):29–35. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

##### **Сергей Витальевич Федоров**

кандидат технических наук, доцент кафедры  
технологии производства летательных аппаратов,  
Уфимский университет науки и технологий  
(филиал в г. Кумертау)  
(Россия, Республика Башкортостан,  
г. Кумертау, ул. Горького, 22А)  
E-mail: proinfosystem@gmail.com

##### **Sergey V. Fedorov**

Candidate of technical sciences, associate professor  
of the sub-department of aircraft  
manufacturing technology,  
Ufa University of Science and Technology  
(Kumertau Branch)  
(22A Gorkogo street, Kumertau,  
Republic of Bashkortostan, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /**

**The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 18.12.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 15.01.2024**

**Принята к публикации / Accepted 12.02.2024**