



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-5-52-60>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.375(07)

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ МУЛЬТИДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

О.В. ДВОРНИКОВ¹, В.А. ЧЕХОВСКИЙ², В.Л. ДЯТЛОВ², А.В. КУНЦ^{2,3}, Н.Н. ПРОКОПЕНКО⁴

¹ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»
(г. Минск Республика Беларусь)

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета
(г. Минск, Республика Беларусь)

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

⁴Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)

Поступила в редакцию 9 февраля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В статье рассмотрен мультидифференциальный операционный усилитель, названный ОАmp3, предназначенный для работы при температуре до минус 197 °С и разработанный на биполярных и полевых транзисторах, управляемых *p-n*-переходом, базового матричного кристалла МН2ХА030. Схемотехнические особенности ОАmp3 позволяют за счет применения различных цепей отрицательной обратной связи реализовать на одном усилителе необходимый для обработки сигнала набор функций: усиление (или преобразование ток – напряжение), фильтрацию, сдвиг постоянного уровня выходного напряжения. Выполненные измерения ОАmp3, включенного по схеме инструментального усилителя, показали, что все изготовленные изделия сохраняют свою работоспособность в диапазоне температур от минус 150 °С до 20 °С, а отдельные образцы – при минус 197 °С. Установлено, что основной причиной потери работоспособности ОАmp3 является увеличение сопротивления полупроводниковых резисторов почти в 5,4 раза при минус 197 °С по сравнению с нормальными условиями и уменьшение тока стока полевого транзистора, управляемого *p-n*-переходом. Совместно указанные факторы приводят к уменьшению тока потребления ОАmp3 почти в 31 раз при минус 180 °С по сравнению с нормальными условиями. Для уменьшения температурной зависимости тока потребления и, таким образом, сохранения работоспособности ОАmp3 при низких температурах без изменений технологического маршрута изготовления интегральных микросхем предложено заменить высокоомные полупроводниковые резисторы на «пинч-резисторы», сформированные на малосигнальном *p*-канальном полевом транзисторе, управляемом *p-n*-переходом. В статье приведена схема включения ОАmp3 в виде инструментального усилителя, методика и результаты низкотемпературных измерений экспериментальных образцов.

Ключевые слова: операционный усилитель, криогенная электроника, базовый матричный кристалл, аналоговый интерфейс датчиков.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Кунц А.В., Прокопенко Н.Н. Низкотемпературный мультидифференциальный операционный усилитель. Доклады БГУИР. 2021; 19(5): 52-60.

LOW TEMPERATURE MULTI-DIFFERENTIAL OPERATIONAL AMPLIFIER

OLEG V. DVORNIKOV¹, VLADIMIR A. TCHEKHOVSKI², VALIANTSIN L. DZIATLAU²,
ALIAKSEI V. KUNTS^{2,3}, NIKOLAY N. PROKOPENKO⁴

¹*Minsk Research Instrument-Making Institute JSC (MNIPI JSC) (Minsk, Republic of Belarus)*

²*Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)*

³*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

⁴*Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)*

Submitted 9 February 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. A multi-differential operational amplifier, called OAm3, designed for operation at temperatures up to minus 197 °C and developed on bipolar transistors and junction field-effect transistors of the master slice array MH2XA030, is considered in the article. The circuitry features of the OAm3 allow, due to the use of various negative feedback circuits, to implement a set of functions necessary for signal processing on a single amplifier: amplification (or current – voltage conversion), filtering, shift of the constant output voltage level. The performed measurements of OAm3, connected as instrumentation amplifier circuit, showed that all manufactured products retain their performance in the temperature range from minus 150 °C to 20 °C, and individual samples – at minus 197 °C. It was found that the main reason for the loss of OAm3 performance is an increase of the resistance of semiconductor resistors by almost 5.4 times at minus 197 °C compared to normal conditions and decrease in the junction field-effect transistor drain current. Together, these factors lead to decrease in the current consumption of the OAm3 by almost 31 times at minus 180 °C compared to normal conditions. To reduce the temperature dependence of the current consumption and, thus, save the OAm3 operability at low temperatures without changing the technological route of integrated circuits manufacturing, it is proposed to replace high-resistance semiconductor resistors with “pinch-resistors” formed on a small-signal *p*-junction field-effect transistor. The article presents the OAm3 connection circuit in the form of an instrumental amplifier, the method and results of low-temperature measurements of experimental samples.

Keywords: operational amplifier, cryogenic electronics, master slice array, sensor analog interface.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L., Kunts A.V., Prokopenko N.N. Low temperature multi-differential operational amplifier. Doklady BGUIR. 2021; 19(5): 52-60.

Введение

Для предварительной обработки сигналов чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков в космических аппаратах часто необходимы аналоговые интерфейсы, сохраняющие свою работоспособность при воздействии крайне низкой температуры, которая может изменяться в широком диапазоне, например, от минус 47 °C на поверхности Марса до минус 229 °C на Плутоне [1]. Такие аналоговые интерфейсы обычно должны преобразовывать сигнал ЧЭ датчика в напряжение, уменьшать уровень шумов с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ) и обеспечивать передачу сигнала по кабелю в подогреваемую часть космического аппарата для дальнейшей цифровой обработки.

В зависимости от конструкции, ЧЭ датчиков обладают малым или большим внутренним сопротивлением, при этом аналоговые интерфейсы должны содержать соответственно усилитель напряжения или преобразователь ток (заряд) – напряжение.

Выполненные работы по созданию аналоговых интерфейсов датчиков в виде гибридных и интегральных микросхем (ИМС) [2–5] позволили установить, что наилучшим сочетанием параметров характеризуются ИМС, реализованные на комплементарных полевых транзисторах, управляемых *p-n*-переходом (complementary junction field-effect transistor, CJFET) [5].

Однако относительно невысокая потребность в криогенных аналоговых микросхемах приводит к чрезмерно большим затратам на изготовление и обеспечение воспроизводимости параметров CJFET ИМС и стимулирует поиск иных способов изготовления таких изделий.

Одним из решений указанной проблемы является изучение возможности проектирования криогенных аналоговых ИМС на базовых матричных кристаллах (БМК), предназначенных для реализации аналоговых микросхем, например, на БМК МН2ХА030 [6, 7]. Причем в качестве основного компонента аналогового интерфейса целесообразно выбрать мультидифференциальный операционный усилитель (МОУ) [8], позволяющий за счет применения различных цепей отрицательной обратной связи реализовать на одном МОУ необходимый для обработки сигнала ЧЭ набор функций: усиление (или преобразование ток – напряжение), ФНЧ, сдвиг постоянного уровня выходного напряжения.

Целью статьи является рассмотрение результатов разработки на БМК МН2ХА030 МОУ, предназначенного для работы при температуре до минус 197 °С.

Методика проведения эксперимента

Для понимания методик и результатов экспериментальных исследований кратко рассмотрим особенности схемы МОУ, в которой применены схемотехнические решения, подобные низкотемпературному операционному усилителю [3].

ОАmp3 состоит из трех усилительных каскадов. В первом каскаде, выполненном по схеме перегнутого каскада с *n-p-n*-транзисторами с общей базой (ОБ), применяется суммирование токов стока двух входных дифференциальных каскадов (ДК) на JFET. Вторым усилительным каскадом является ДК на JFET с нагрузкой в виде «токового зеркала» на *n-p-n*-транзисторах. Третий усилительный каскад образует *n-p-n*-транзистор с общим эмиттером и нагрузкой в виде JFET. Выводы SW1, SW2 используются в выходном двухтактном эмиттерном повторителе для реализации схемы составного (если выводы SW1, SW2 оборваны) или обычного (если выводы SW1, SW2 соединены с OUT) биполярного транзистора. Соединение выводов SW1, SW2 с OUT уменьшает ток потребления и нагрузочную способность ОАmp3. Как показывают результаты моделирования, нагрузочная способность ОАmp3 достаточна в широком диапазоне температур, и только при температуре менее минус 150 °С необходимо разъединять SW1, SW2 с OUT.

Наиболее сильно на статические параметры криогенных аналоговых схем на биполярных транзисторах и JFET влияет значительное падение при температуре минус 197 °С коэффициента усиления базового тока β , величина которого для транзисторов БМК становится менее 3. В усилительных каскадах разработанного МОУ *n-p-n*-транзисторы применяются в основном в схеме с ОБ и «токовым зеркале», где низкотемпературное падение β незначительно влияет на статические параметры, а в выходном каскаде для увеличения нагрузочной способности применяется схема составного транзистора.

Полупроводниковые пластины с экспериментальными образцами МОУ были изготовлены в ОАО «Интеграл», а кристаллы собраны в 48-выводные металло-керамические корпуса Н16.48-1ВН. Низкотемпературные измерения проводились на установке, подробно рассмотренной в [9]. Измеряемые образцы располагались в металлическом стакане, помещаемом в жидкий азот с помощью штанги, через которую проходили соединительные кабели для подключения к измерительным приборам. Измеренные данные поступали на персональный компьютер через интерфейс стандарта RS-232. Для контроля температуры была использована термопара типа М по ГОСТ-Р 8.585–2001 (Медь/Копель), расположенная около измеряемых образцов. Температура регистрировалась по методике «компенсации холодного спая», при которой свободный конец термопары располагался в стакане с водой и плавающим льдом. Термоэлектродвижущая сила термопары фиксировалась вольтметром В7-65 и передавалась на компьютер через интерфейс RS-232.

Для измерений применялись: осциллограф ТЕК МДО3052, генератор ТЕК АFG3152С, источник питания Agilent 33250А, аттенюатор с ослаблением сигнала в 40 дБ. МОУ при измерениях был включен по схеме инструментального усилителя (ИУ), как показано на рис. 1.

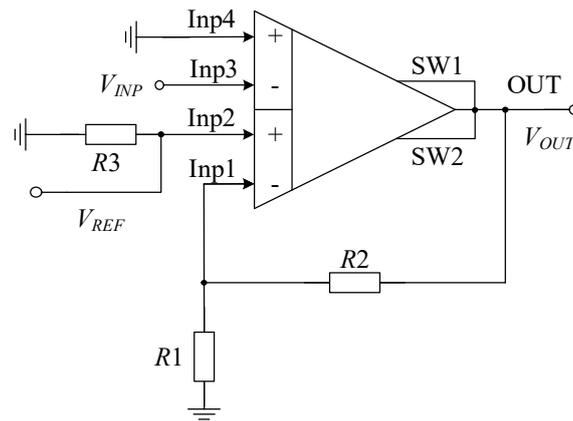


Рис. 1. Схема включения МОУ при низкотемпературных измерениях. $R_1=R_3=1,18$ кОм, $R_2=120$ кОм
Fig. 1. Connection scheme of the MOA during low-temperature measurements. $R_1=R_3=1.18$ kOhm, $R_2=120$ kOhm

Измерения выполнялись в следующей последовательности:

1. При соединенных между собой выводах SW1, SW2, OUT (рис. 1) проверялось функционирование ИУ в режиме холостого хода, без напряжения (V_{REF}) на входе Inp2 и подаче на вход Inp3 синусоидального напряжения (V_{INP}) с частотой 100 Гц и размахом (от пика до пика) 10 мВ.

2. Подавая постоянное напряжение V_{REF} , устанавливался уровень постоянного выходного напряжения ИУ около нуля, регистрировался ток потребления I_{CC} , определялся коэффициент усиления напряжения K_V как отношение выходного и входного синусоидального напряжения, рассчитывалось напряжение смещения нуля $V_{OFF} = V_{REF}/K_V$.

3. Определялось минимально допустимое входное ($V_{INP_{MIN}}$) и максимально допустимое выходное ($V_{OUT_{MAX}}$) напряжение.

4. При изменении частоты входного сигнала измерялась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), т. е. зависимость V_{OUT} от частоты при $V_{INP} = 10$ мВ.

5. Величины K_V и $V_{OUT_{MAX}}$ определялись при заданном сопротивлении нагрузки R_L , подключенной к выходу OUT.

Результаты и их обсуждение

Измерения по пп. 1–5 были выполнены для трех образцов в диапазоне температур от 25 °С до минус 197 °С. Было установлено, что все образцы сохраняют свою работоспособность до температуры минус 150 °С. Повторно проведенные измерения при разъединенных выводах SW1, SW2, OUT выявили один образец ИУ, работоспособный при минус 197 °С. Основные результаты измерений при напряжении питания ± 5 В показаны на рис. 2–6.

По-мнению авторов, все особенности параметров разработанного МОУ при низких температурах, а именно: отсутствие работоспособности некоторых образцов при минус 197 °С, слабое влияние коммутации выводов SW1, SW2 на нагрузочную способность, меньшая по сравнению с нормальными условиями полоса пропускания, несмотря на теоретическое уменьшение емкостей всех обратных смещенных $p-n$ -переходов с уменьшением температуры, обусловлены значительным уменьшением тока потребления при низких температурах.

При схемотехническом моделировании OAmr3 в LTSpice применялись Spice-модели транзисторов, удовлетворительно описывающие изменение вольт-амперных характеристик (ВАХ) до минус 197 °С. В то же время применялась типовая модель полупроводникового резистора с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), равным 0,00196, который приводит к уменьшению сопротивления при минус 197 °С на 57,5 % по сравнению с 20 °С. Однако измерения сопротивления тестового 18 кОм резистора, расположенного на кристалле БМК МН2ХА030, показали, что уменьшение сопротивления резистора происходит ориентировочно до температуры минус 60 °С, затем сопротивление резистора начинает увеличиваться, а ниже минус 120 °С начинается резкий рост, который приводит

к увеличению сопротивления в 5,4 раза при минус 197 °С по сравнению с нормальными условиями. Такая немонотонная и резкая температурная зависимость сопротивления не учитывалась при моделировании.

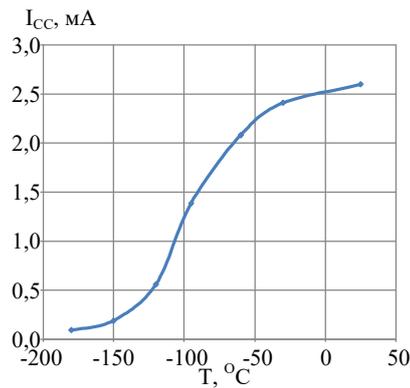


Рис. 2. Зависимость среднего значения тока потребления МОУ в режиме холостого хода от температуры
Fig. 2. Dependence of the average value of the current consumption of the MOA in the idling mode on the temperature

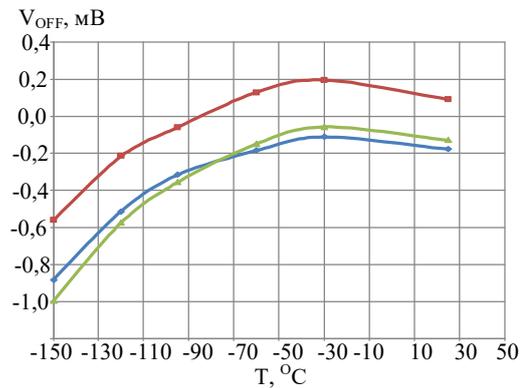


Рис. 3. Зависимость напряжения смещения нуля трех образцов МОУ от температуры
Fig. 3. Dependence of the offset voltage of three samples of MOA on the temperature

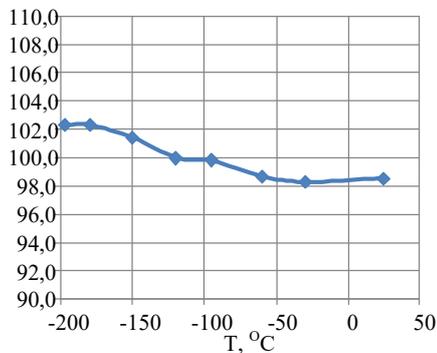


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления напряжения ИУ в режиме холостого хода от температуры для образца № 1
Fig. 4. Dependence of the voltage gain of the instrumentation amplifier in the idling mode on temperature for sample № 1

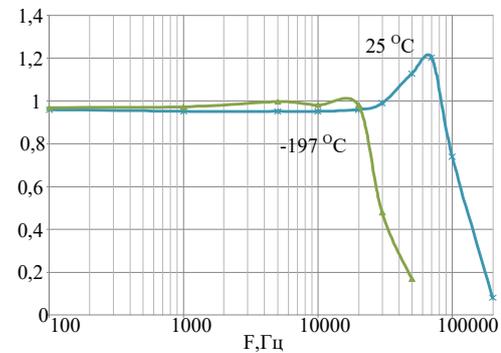


Рис. 5. АЧХ ИУ при разных температурах для образца № 1
Fig. 5. Frequency response of the instrumentation amplifier at different temperatures for sample № 1

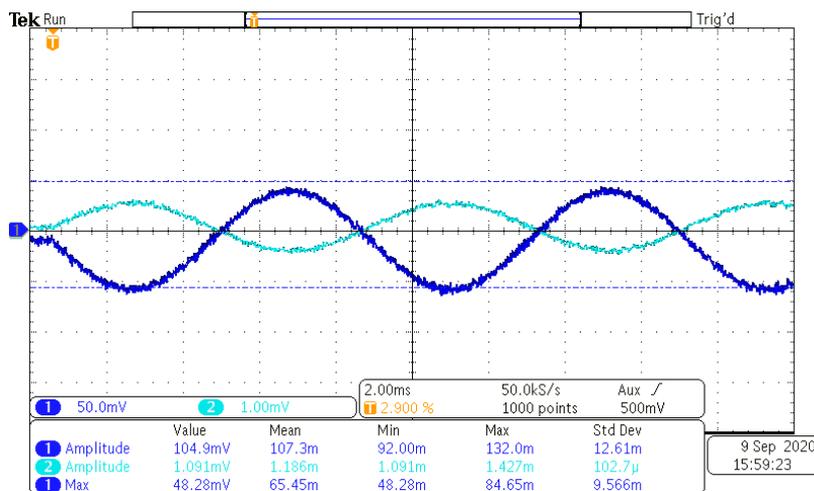


Рис. 6. Осциллограммы входного (2) и выходного (1) напряжения ИУ для образца № 1 при температуре минус 180 °С и 64-кратном усреднении выходного сигнала
Fig. 6. Oscillograms of the input (2) and output (1) voltage of the instrumentation amplifier for sample № 1 at a temperature of minus 180 °С and 64-fold averaging of the output signal

Резкое увеличение сопротивления резисторов совместно с уменьшением тока стока *p*-JFET при низких температурах приводит к падению тока потребления и потере

работоспособности образцов. Данное утверждение подтверждает сравнение результатов измерений тока потребления МОУ с моделированием, показанное на рис. 7. При моделировании с типовым ТКС ток потребления при минус 180 °С составляет около 490 мкА, что обеспечивает функционирование МОУ. При учете реального ТКС резисторов ток потребления при минус 180 °С составляет 180 мкА, при этом ток в некоторых цепях МОУ не превышает 2 мкА. Для уменьшения температурной зависимости тока потребления необходимо применять внешние или полупроводниковые резисторы с малым ТКС.

При выборе типа резисторов необходимо учитывать ряд факторов. Так, применение внешних резисторов приведет к необходимости гибридного исполнения микросхемы, существенному увеличению материальных затрат на изготовление и снижению надежности микросхемы.

Чаще всего минимальные значения ТКС полупроводниковых резисторов обеспечиваются при их формировании на сильнолегированных слоях. В то же время известные зависимости ТКС полупроводниковых резисторов от концентрации примеси приведены для температуры более минус 70 °С [10], и их справедливость при более низких температурах не очевидна. С другой стороны, применение сильнолегированных слоев для формирования высокоомных резисторов (от 40 до 100 кОм), использованных в OAmр3, приведет к неоправданному росту площади кристалла в заказных ИМС и невозможно для БМК.

По указанным причинам авторами изучена возможность применения в низкотемпературных схемах так называемых «пинч-резисторов», представляющих собой JFET с соединенными выводами затвора и истока и работающими при малом напряжении сток–исток V_{DS} в линейной области ВАХ. Конечно, «пинч-резисторы» характеризуются значительной нелинейностью ВАХ, и условие $|V_{DS}| \ll |V_{TH}|$ должно выполняться во всем температурном диапазоне.

Особенности применения полупроводниковых и «пинч-резисторов» иллюстрируют экспериментальные данные, показанные на рис. 8. Как следует из рис. 8, температурное изменение сопротивления «пинч-резистора» значительно меньше, чем полупроводникового, а влияние нелинейности ВАХ на параметры МОУ можно уменьшить за счет последовательного соединения нескольких «пинч-резисторов» и уменьшения таким образом падения напряжения на каждом из них.

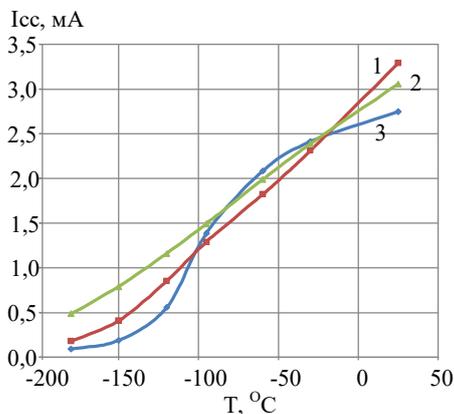


Рис. 7. Зависимость тока потребления в режиме холостого хода от температуры: 1 – моделирование с реальным ТКС; 2 – моделирование с типовым ТКС; 3 – измерения

Fig. 7. Dependence of current consumption in the idling mode on temperature: 1 – simulation with real temperature coefficient of resistance (TCR); 2 – simulation with a typical TCR; 3 – measurements

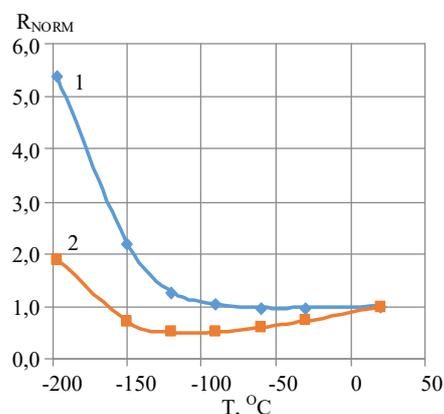


Рис. 8. Температурная зависимость сопротивления относительно его величины при 20 °С:

1 – полупроводникового резистора с сопротивлением 18 кОм; 2 – «пинч-резистора» на малосигнальном *p*-JFET

Fig. 8. Temperature dependence of resistance relative to its value at 20 °С: 1 – semiconductor resistor with a resistance of 18 kOhm; 2 – “pinch-resistor” on a small-signal *p*-JFET

Для оценки возможности применения «пинч-резисторов» при проектировании низкотемпературных схем все резисторы в схеме МОУ OAmр3 были заменены на «пинч-резисторы», причем максимальное соответствие сопротивлений в старой и новой схеме было

достигнуто за счет последовательного и параллельного соединения одних и тех же малосигнальных p -JFET в «пинч-резисторе».

На рис. 9 приведены результаты моделирования тока потребления МОУ OAmр3 с полупроводниковыми и «пинч-резисторами». Моделирование позволило установить, что применение «пинч-резисторов» обеспечило практически такой же ток потребления МОУ в нормальных условиях, как и при использовании полупроводниковых резисторов с реальным ТКС (различие не превышает 3,5 %), но увеличение тока потребления в 2,2 раза при температуре минус 180 °С, т. е. требуемый эффект увеличения тока потребления при низких температурах.

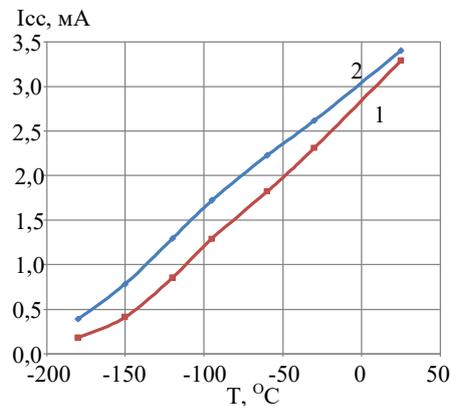


Рис. 9. Зависимость тока потребления МОУ в режиме холостого хода от температуры для различных конструкций резисторов: 1 – полупроводниковые резисторы с реальным ТКС; 2 – «пинч-резисторы»
Fig. 9. Dependence of the current consumption of the MOA in the idling mode on the temperature for various types of resistors: 1 – semiconductor resistors with real TCR; 2 – “pinch-resistors”

Заключение

Для применения в аналоговых интерфейсах датчиков космической аппаратуры на базовом матричном кристалле МН2ХА030 разработан, изготовлен и экспериментально исследован мультидифференциальный операционный усилитель OAmр3.

Выполненные измерения OAmр3, включенного по схеме инструментального усилителя, показали, что все изготовленные изделия сохраняют свою работоспособность в диапазоне температур от минус 150 °С до 20 °С, а отдельные образцы – при минус 197 °С. Установлено, что основной причиной потери работоспособности OAmр3 является увеличение сопротивления полупроводниковых резисторов почти в 5,4 раза при минус 197 °С по сравнению с нормальными условиями и уменьшение тока стока JFET.

Для уменьшения температурной зависимости тока потребления и, таким образом, сохранения работоспособности OAmр3 при низких температурах без изменений технологического маршрута изготовления микросхем предложено заменить высокоомные полупроводниковые резисторы на «пинч-резисторы», сформированные на малосигнальном p -JFET. Как показало моделирование, применение «пинч-резисторов» обеспечивает практически такой же ток потребления OAmр3 в нормальных условиях, как и при использовании полупроводниковых резисторов, и увеличение тока потребления в 2,2 раза при температуре минус 180 °С, т. е. требуемый эффект увеличения тока потребления при низких температурах.

Список литературы

1. Patterson R.L., Elbuluk M., Hammoud A. Assessment of electronics for cryogenic space exploration missions. *Cryogenics*. 2006;46(2-3):231-236.
2. Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Пахомов И.В., Игнашин А.А., Бугакова А.В. Прецизионный радиационно-стойкий VIJFET операционный усилитель для низкотемпературных аналоговых интерфейсов датчиков. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017;1(22):36-45.

3. Гулин А.И., Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Бугакова А.В. Проектирование радиационно-стойких BiJFET операционных усилителей для работы в аналоговых интерфейсах датчиков при низких температурах. *Датчики и системы*. 2017;12:3-10.
4. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V. Design of Low-Temperature DDOAs on the Elements of BiJFet Array Chip MH2XA030. *Serbian Journal Of Electrical Engineering*. June 2018;15(2):233-247.
5. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V., Maliy I.V. Cryogenic Operational Amplifier on Complementary JFETs. *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018)*, Kazan, Russia, September 14–17, 2018: 901-905.
6. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A. V., Dziatlau V.L. Basic Parameters and Characteristics of the Op-Amp Based on the BiJFet Array Chip MH2XA030 Intended for the Design of Radiation-Hardened and Cryogenic Analog ICs. *2018 14th International Scientific technical Conference On Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 44894*. Proceedings, Novosibirsk, Russia, October 2–6, 2018: 200-207. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545562.
7. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V., Dziatlau V.L. BiJFet Array Chip MH2XA030 – a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits. *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, October 22–23, 2018, St. Petersburg, Russia. DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564415. WOS:000454986000003.
8. Прокопенко Н.Н., Дворников О.В., Будяков П.С. Основные свойства, параметры и базовые схемы включения мультидифференциальных операционных усилителей с высокоимпедансным узлом. *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. 2014;2:51-62.
9. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N. The main characteristics of SiGe HBTs at low temperatures. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2016;66:87-96.
10. Зайцев Ю.В., Громов В.С., Григораш Т.С. *Полупроводниковые термоэлектрические преобразователи*. Москва: Радио и связь; 1985.

References

1. Patterson R.L., Elbuluk M., Hammoud A. Assessment of electronics for cryogenic space exploration missions. *Cryogenics*. 2006;46(2–3):231-236.
2. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Pahomov I.V., Ignashin A.A., Bugakova A.V. [Precision radiation hardened BIJFET operational amplifier for low temperature analog sensor interfaces]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost*. 2017;1(22):36-45. (in Russ.)
3. Gulin A.I., Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. [Design of radiation-resistant BiJFET operational amplifiers for operation in analog sensor interfaces at low temperatures]. *Datchiki I systemy*. 2017;12:3-10. (in Russ.)
4. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V. Design of Low-Temperature DDOAs on the Elements of BiJFet Array Chip MH2XA030. *Serbian Journal of Electrical Engineering*. June 2018;15(2):233-247.
5. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A. V., Maliy I. V. Cryogenic Operational Amplifier on Complementary JFETs. *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018)*, Kazan, Russia, September 14–17, 2018: 901-905.
6. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A. V., Dziatlau V.L. Basic Parameters and Characteristics of the Op-Amp Based on the BiJFet Array Chip MH2XA030 Intended for the Design of Radiation-Hardened and Cryogenic Analog ICs. *2018 14th International Scientific technical Conference On Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 44894*. Proceedings, Novosibirsk, Russia, October 2–6, 2018: 200-207. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545562.
7. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V., Dziatlau V.L. BiJFet Array Chip MH2XA030 – a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits. *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, October 22–23, 2018, St. Petersburg, Russia. DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564415. WOS:000454986000003.
8. Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Budyakov P.S. [Basic properties, parameters and basic circuits for switching on multi-differential operational amplifiers with a high-impedance node]. *Electronnaya technica. Seriya 2. Poluprovodnikoviye pribory*. 2014;2:51-62. (in Russ.)
9. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N. The main characteristics of SiGe HBTs at low temperatures. *Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu Ukraini «KPI». Seriya Radiotekhnika. Radioaпаратobuduvannya*. 2016;66:87-96. (in Uk.)
10. Zajcev Y.V., Gromov V.S., Grigorash T.S. [*Poluprovodnikovye termoelektricheskie preobrazovateli*]. Moscow: Radio i svyaz'; 1985. (in Russ.)

Вклад авторов

Дворников О.В. выполнил анализ современного состояния проблемы по теме работы, сформулировал цель и задачи исследований, осуществлял научное руководство.

Чеховский В.А. участвовал в разработке методик измерений параметров.

Дятлов В.Л. выполнял измерение параметров.

Кунц А.В. участвовал в разработке мультидифференциального операционного усилителя на базовом матричном кристалле МН2ХА030 и методик его измерений, выполнял измерение параметров и анализ полученных результатов.

Прокопенко Н.Н. участвовал в разработке схемы мультидифференциального операционного усилителя.

Authors' contribution

Dvornikov O.V. has analyzed the current state of the problem, formulated the goals and objectives of the work and acted as a scientific advisor.

Tchekhovski V.A. participated in the development of methods for measuring parameters.

Dziatlau V.L. performed measurement of parameters.

Kunts A.V. participated in the development of a multi-differential operational amplifier based on a master slice array МН2ХА030 and methods for its measurements, carried out the measurement of parameters and analysis of the results.

Prokopenko N.N. participated in the development of a multi-differential operational amplifier circuit.

Сведения об авторах

Дворников О.В., д.т.н., доцент, главный научный сотрудник ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт».

Чеховский В.А., заведующий лабораторией «Электронные методы и средства эксперимента» НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Дятлов В.Л., младший научный сотрудник лаборатории электронных методов и средств эксперимента НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Кунц А.В., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, младший научный сотрудник лаборатории электронных методов и средств эксперимента НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Прокопенко Н.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных систем и радиотехники Донского государственного технического университета.

Information about the authors

Dvornikov O.V., D.Sc., Associate Professor, Chief Research Scientist of Minsk Research Instrument-Making Institute JSC (MNIPI JSC).

Tchekhovski V.A., Laboratory Manager of "Electronic Methods and Experiment Means" Laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Dziatlau V.L., Junior Researcher at Electronic Methods and Experiment Means Laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Kunts A.V., Postgraduate student at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Junior Researcher at Electronic Methods and Experiment Means Laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Prokopenko N.N., D.Sc., Professor, Head of the Information Systems and Radioelectronics Department of Don State Technical University.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
tel. +375-44-726-30-92;
e-mail: serphentos.dwarf@gmail.com
Кунц Алексей Вадимович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-44-726-30-92;
e-mail: serphentos.dwarf@gmail.com
Kunts Aliaksei Vadimovich