



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-52-60>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.375, 681.782.52

ВЛИЯНИЕ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ АНАЛОГОВЫХ КОМПОНЕНТОВ БАЗОВОГО МАТРИЧНОГО КРИСТАЛЛА МН2ХА030

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

¹Минский 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, Российская Федерация)

Поступила в редакцию 8 февраля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Для уменьшения стоимости, времени проектирования и испытаний радиационно-стойких аналоговых интегральных микросхем часто применяют базовые структурные и базовые матричные кристаллы. Одним из таких базовых матричных кристаллов является МН2ХА030, использующий в качестве активных элементов биполярные и полевые транзисторы, управляемые *p-n*-переходом. Целью статьи является оценка влияния проникающей радиации на статические параметры операционного усилителя ОАmp2 и компараторов АDComp1 и АDComp3, изготовленных на базовом матричном кристалле МН2ХА030. Приведены результаты измерений основных параметров аналоговых компонентов после воздействия гамма-квантов ⁶⁰Со с поглощенной дозой до 700 крад и флюенса быстрых электронов до $2,9 \cdot 10^{15}$ эл./см² с энергией 6 МэВ. Как следует из результатов измерений, операционный усилитель ОАmp2 обеспечивает удовлетворительный уровень основных статических параметров (входной ток, напряжение смещения нуля, коэффициент усиления напряжения) при флюенсе быстрых электронов до $3,7 \cdot 10^{14}$ эл./см² с энергией 6 МэВ. При флюенсе быстрых электронов больше 10^{15} эл./см² происходит спад коэффициента усиления напряжения и рост напряжения смещения нуля. Последнее может быть вызвано уменьшением эффективности встроенной в операционный усилитель обратной связи по синфазному сигналу при значительном спаде коэффициента усиления базового тока биполярных транзисторов. Все изученные аналоговые компоненты обеспечивают удовлетворительный уровень основных статических параметров при флюенсе быстрых электронов до $3,7 \cdot 10^{14}$ эл./см² с энергией 6 МэВ и поглощенной дозе гамма-квантов ⁶⁰Со не менее 700 крад. Предполагается, что стойкость ОАmp2, АDComp1, АDComp3 к воздействию гамма-квантов ⁶⁰Со существенно выше и требует дальнейшего изучения. Разработанные аналоговые компоненты могут найти применение в устройствах считывания сигналов, необходимых в аналоговых интерфейсах датчиков космического приборостроения и ядерной электроники.

Ключевые слова: операционный усилитель, компаратор, базовый матричный кристалл, радиационная стойкость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Галкин Я.Д., Прокопенко Н.Н. Влияние проникающей радиации на параметры аналоговых компонентов базового матричного кристалла МН2ХА030. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 52-60.

IONIZING RADIATION INFLUENCE ON PARAMETERS OF ANALOG COMPONENTS OF THE MASTER SLICE ARRAY MH2XA030

OLEG V. DVORNIKOV¹, VLADIMIR A. TCHEKHOVSKI², VALIANTSIN L. DZIATLAU²,
YAROSLAV D. GALKIN^{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 8 February 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Structured arrays and master slice arrays are often used to reduce cost, design and test time for radiation hardened analog integrated circuits. One of such master slice arrays is MH2XA030, which uses bipolar and junction field-effect transistors. The purpose of this article is to estimate the effect of ionizing radiation on the parameters of the operational amplifier OAmpl2 and comparators ADComp1 and ADComp3 created on the MH2XA030 master slice array. The results of measurements of analog components after exposure to ⁶⁰Co gamma quanta with an absorbed dose of up to 700 krad and a fast electron fluence of up to $2.9 \cdot 10^{15}$ el./cm² with an energy of 6 MeV are presented. The OAmpl2 operational amplifier provides a satisfactory level of basic static parameters (input current, offset voltage, voltage gain) at a fast electron fluence of up to $3.7 \cdot 10^{14}$ el./cm² with an energy of 6 MeV. There is a decrease in the voltage gain and an increase in the offset voltage at electron fluence of greater than 10^{15} el./cm². The latter can be caused by a decrease in the efficiency of the common-mode signal feedback integrated into operational amplifier with a significant drop in current gain of bipolar transistors. All considered analog components provide a satisfactory level of basic static parameters at a fast electron fluence of up to $3.7 \cdot 10^{14}$ el./cm² with an energy of 6 MeV and an absorbed dose of ⁶⁰Co gamma quanta of at least 700 krad. It is assumed that resistance of OAmpl2, ADComp1, ADComp3 to the action of ⁶⁰Co gamma quanta is significantly higher and requires further research. The developed analog components can be used in signal reading devices required in front-end of sensors for space instrumentation and nuclear electronics.

Keywords: operational amplifier, comparator, master slice array, radiation hardness.

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

For citation. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L., Galkin Y.D., Prokopenko N.N. Ionizing radiation influence on parameters of analog components of the master slice array MH2XA030. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 52-60.

Введение

Специализированные аналоговые интегральные микросхемы (ИМС), сохраняющие свою работоспособность при воздействии проникающей радиации, необходимы в ряде областей науки и техники. Однако их разработка, изготовление и особенно сертификация требуют больших временных и материальных затрат. Для устранения данных недостатков рационально разрабатывать такие ИМС на базовых матричных кристаллах (БМК) и базовых структурных кристаллах (БСК). Основные элементы БМК и БСК проходят ряд испытаний на этапе разработки, включая испытания на стойкость к воздействию проникающей радиации, положительные результаты которых распространяются на все изделия, создаваемые на этих базовых кристаллах.

В связи с вышеперечисленным был разработан БСК МН2ХА010 [1–3], позволяющий создавать аналоговые микроэлектронные устройства, у которых при воздействии проникающей радиации, а именно гамма-квантов ⁶⁰Со с поглощенной дозой до 3 Мрад и флюенса быстрых электронов до $3 \cdot 10^{14}$ эл./см² с энергией 4 МэВ, основные параметры остаются в пределах норм,

установленных для диапазона рабочих температур [4, 5], т.е. такие изделия являются радиационно-стойкими.

Однако при апробации ряда аналоговых ИМС, выполненных на БСК МН2ХА010, были выявлены особенности, затрудняющие его применение, а именно: высокое напряжение смещения нуля (V_{OFF}) операционного усилителя (ОУ), не превышающее 5 мВ в нормальных условиях; избыточное быстродействие ОУ (частота единичного усиления около 200 МГц) и компаратора (задержка менее 5 нс), обусловленное, в том числе, большим током потребления (I_{CC}).

Для устранения указанных ограничений был создан БМК МН2ХА030. В этом БМК конструкции интегральных элементов и технологический маршрут их изготовления такой же, как в БСК МН2ХА010, но площади эмиттерных переходов транзисторов почти в 2 раза меньше, схемы аналоговых компонентов модифицированы и существенно уменьшен ток потребления [6, 7].

Целью статьи является рассмотрение изменения статических параметров ОУ ОАmp2, компараторов напряжений АDComp1 и АDComp3, созданных на БМК МН2ХА030, при воздействии проникающей радиации и их сравнение с параметрами компонентов БСК МН2ХА010.

Методика проведения эксперимента

Электрические схемы ОУ ОАmp2, компараторов АDComp1, АDComp3, а также их функционирование и особенности выбора режима работы подробно рассмотрены в [4–7]. Обратим внимание на то, что при анализе результатов радиационных исследований необходимо учитывать следующие отличия ОАmp2, АDComp1, АDComp3 от ОУ и компараторов БСК:

- рабочие токи транзисторов в ОАmp2 почти в 2 раза меньше, чем в ОУ БСК, хотя плотность эмиттерного тока осталась без изменений. Кроме того, ОАmp2 имеет парафазный выход и дифференциальный каскад (ДК), осуществляющий отрицательную обратную связь (ОС) по синфазному сигналу для уменьшения влияния технологического разброса параметров интегральных элементов и внешних воздействующих факторов на V_{OFF} ;

- оба компаратора реализованы на полупроводниковых резисторах и *n-p-n*-транзисторах БМК, имеющих высокую радиационную стойкость. Компараторы включают три ДК, причем выходной ДК имеет «открытый» коллектор;

- уменьшение потребляемой мощности в АDComp1, АDComp3 обеспечено снижением минимально допустимого напряжения питания до ± 3 В благодаря замене сдвига уровня на стабилитронах на цепи последовательно соединенных прямосмещенных *p-n*-переходов и уменьшению эмиттерных токов всех транзисторов;

- в АDComp1, АDComp3 предусмотрена возможность регулировки внешним резистором максимального выходного тока;

- ток потребления АDComp3 существенно уменьшен по сравнению с АDComp1.

Полупроводниковые пластины с экспериментальными образцами БМК были изготовлены в ОАО «Интеграл», кристаллы собраны в 48-выводные метало-керамические корпуса Н16.48-1ВН.

Облучение образцов гамма-квантами ^{60}Co осуществлялось на установке «Исследователь» [8] при температуре около 300 К, электронами – на установке У003 со следующими характеристиками: номинальная энергия электронов 6 МэВ, плотность потока электронов $(2\div 8) \cdot 10^{11}$ эл·см⁻²·с⁻¹. Все образцы при воздействии проникающей радиации были с закороченными выводами.

Воздействие быстрых электронов на кремниевые биполярные транзисторы приводит главным образом к образованию дефектов смещения, а генерация положительного заряда в окисле незначительна. Поэтому воздействие быстрых электронов целесообразно описывать величиной флюенса электронов (F_E) с указанием их энергии (E_E). Используя разработанный метод прогнозирования радиационной стойкости ИМС [9], по результатам, полученным для быстрых электронов, можно оценить стойкость биполярных транзисторов и схем к нейтронам

и протонам. Так, флюенс электронов с $E_E = 6$ МэВ вызовет в биполярных транзисторах такие же дефекты смещения, как флюенс нейтронов $F_N = 0,378 \cdot F_E$ с энергией $E_N = 1,5$ МэВ.

Схемы включения ОУ и компараторов, выражения для определения параметров приведены на рис. 1, а, б, в.

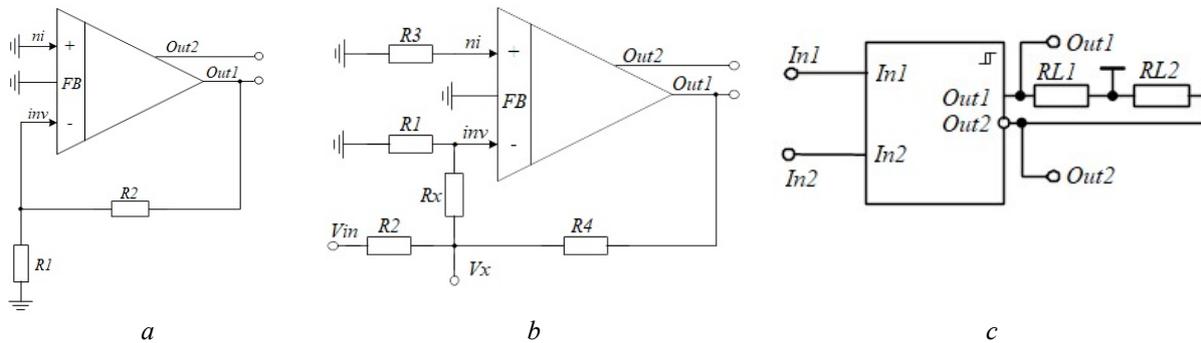


Рис. 1. Схемы включения: а – ОУ при определении I_{CC} и V_{OFF} . $R1 = 100$ Ом, $R2 = 30$ кОм, $V_{OFF} = -V_{OUT1}/(R2/R1+1)$; б – ОУ при определении K_V , $R1 = R3 = 100$ Ом, $R2 = R4 = 10$ кОм, $R_x = 20$ кОм, $K_V = (R_x/R1) \cdot (V_{OUT1}/V_x)$; в – компараторы при измерениях. $RL1 = RL2 = 100$ Ом

Fig. 1. Connection diagrams: а – op-amp when defining I_{CC} and V_{OFF} . $R1 = 100$ Ohm, $R2 = 30$ kOhm, $V_{OFF} = -V_{OUT1}/(R2/R1+1)$; б – op-amp when determining K_V , $R1 = R3 = 100$ Ohm, $R2 = R4 = 10$ kOhm, $R_x = 20$ kOhm, $K_V = (R_x/R1) \cdot (V_{OUT1}/V_x)$; в – comparators for measurements, $RL1 = RL2 = 100$ Ohm

Измерения компараторов проводились по схеме включения, показанной на рис. 1, в, следующим образом:

1. От прибора Agilent 33250A подают напряжение $V_{IN1} = 300$ мВ и $V_{IN2} = 100$ мВ и регистрируют ток потребления I_{CC} по выводу V_{CC} мультиметром Agilent 34401A.

2. От прибора Agilent 33250A подают напряжение $V_{IN1} = 300$ мВ и $V_{IN2} = 100$ мВ и регистрируют мультиметром Agilent 34401A токи, протекающие через входы $In1$ (I_{IH}) и $In2$ (I_{IL}). Подают напряжение $V_{IN1} = 100$ мВ и $V_{IN2} = 300$ мВ и регистрируют токи, протекающие через входы $In1$ (I_{IH}) и $In2$ (I_{IL}). Рассчитывают входной ток по входу $In1$ как $I_{INP1} = 0,5(I_{IH}+I_{IL})$, по входу $In2$ – как $I_{INP2} = 0,5(I_{IH}+I_{IL})$.

3. От прибора Agilent 33250A подают напряжение $V_{IN1} = 300$ мВ и $V_{IN2} = 100$ мВ, регистрируют мультиметром Agilent 34401A напряжение V_{OUT1} и рассчитывают $I_{OMAX1} = -V_{OUT1}/RL1$, затем подают $V_{IN1} = 100$ мВ и $V_{IN2} = 300$ мВ, регистрируют напряжение V_{OUT2} и рассчитывают $I_{OMAX2} = -V_{OUT2}/RL2$.

4. От прибора Agilent 33250A подают напряжение $V_{IN1} = V_{CM} = 100$ мВ и импульс прямоугольного напряжения V_{IN2} с базовой линией $V_B = V_{CM} - 100$ мВ и амплитудой $V_A = V_{OD} + 100$ мВ. Изменяя параметр сигнала V_{OD} , регистрируют осциллографом Agilent MSO 6052A появление выходного импульса V_{OUT2} . Чувствительность компаратора $S = V_{OD}$ при появлении выходного импульса V_{OUT2} .

Результаты и их обсуждение

Основные результаты измерений приведены на рис. 2–10. Зависимости для компаратора ADComp1 ниже не показаны. Качественно они подобны таким же зависимостям для ADComp3, а так как эмиттерные токи транзисторов ADComp1 больше, то радиационное изменение его параметров меньше.

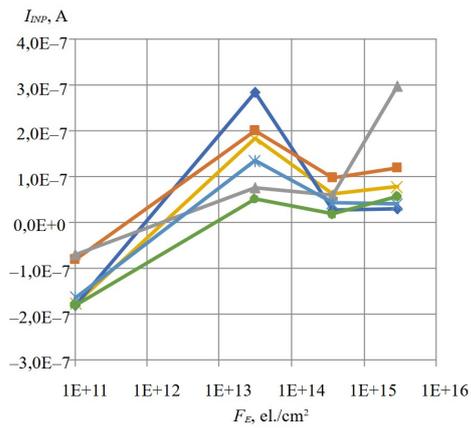


Рис. 2. Зависимость входного тока I_{INP} разных образцов OAmP2 от флюенса электронов
Fig. 2. Dependence of the input current I_{INP} of different OAmP2 samples on the electron fluence

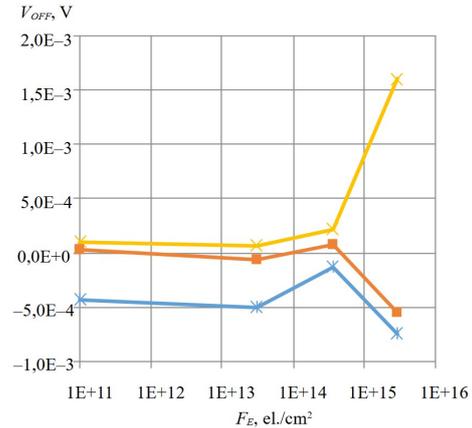


Рис. 3. Зависимость напряжения смещения нуля V_{OFF} разных образцов OAmP2 от флюенса электронов
Fig. 3. The dependence of the offset voltage V_{OFF} of different OAmP2 samples on the electron fluence

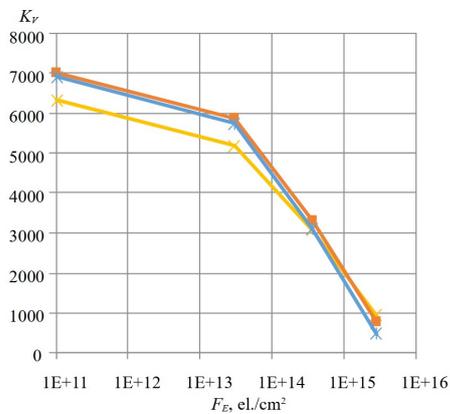


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления напряжения K_V разных образцов OAmP2 от флюенса электронов
Fig. 4. Dependence of the voltage gain K_V of different OAmP2 samples on the electron fluence

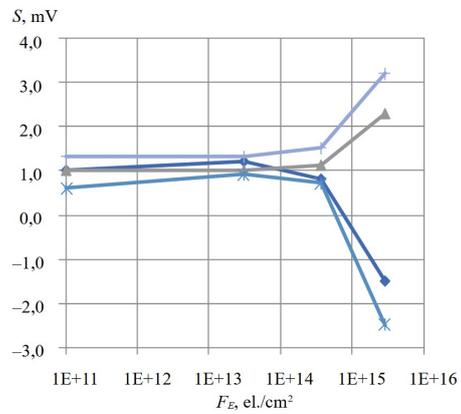


Рис. 5. Зависимость чувствительности S разных образцов ADComp3 от флюенса электронов
Fig. 5. Dependence of the sensitivity S (minimum input overdrive voltage) of different ADComp3 samples on the electron fluence

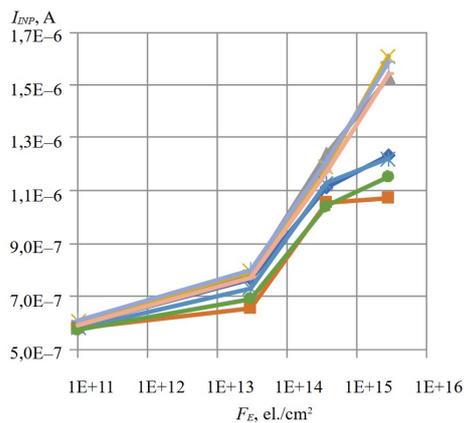


Рис. 6. Зависимость входного тока I_{INP} разных образцов ADComp3 от флюенса электронов
Fig. 6. Dependence of the input current I_{INP} of different ADComp3 samples on the electron fluence

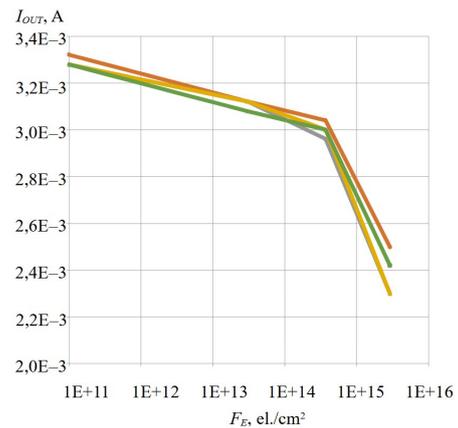


Рис. 7. Зависимость максимального выходного тока разных образцов ADComp3 от флюенса электронов
Fig. 7. Dependence of the maximum output current of different ADComp3 samples on the electron fluence

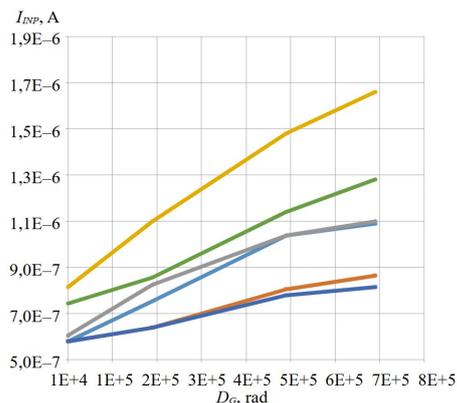


Рис. 8. Зависимость входного тока I_{INP} разных образцов ADComp3 от поглощенной дозы гамма-квантов

Fig. 8. Dependence of the input current I_{INP} of different ADComp3 samples on the absorbed dose of gamma quanta

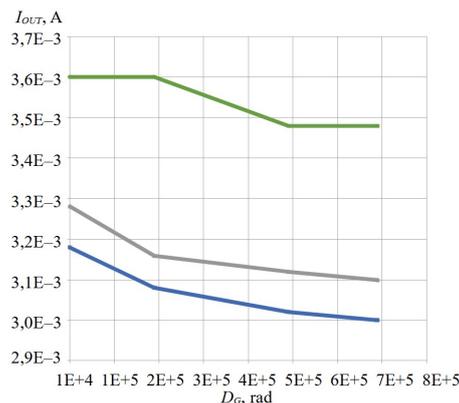


Рис. 9. Зависимость максимального выходного тока разных образцов ADComp3 от поглощенной дозы гамма-квантов

Fig. 9. Dependence of the maximum output current of different ADComp3 samples on the absorbed dose of gamma quanta

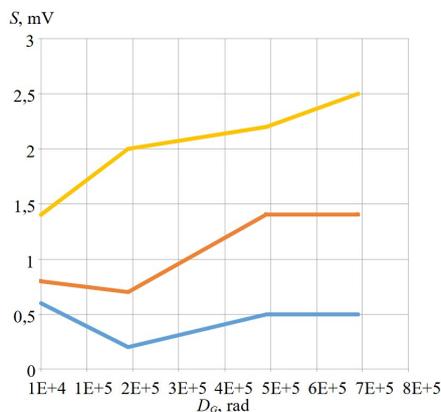


Рис. 10. Зависимость чувствительности S разных образцов ADComp3 от поглощенной дозы гамма-квантов

Fig. 10. Dependence of the sensitivity S (minimum input overdrive voltage) of different ADComp3 samples on the absorbed dose of gamma quanta

Анализ экспериментальных данных и рис. 4–10 позволяет сделать следующие выводы:

1. Ток потребления OАmp2 меньше, чем у ОУ БСК в 1,74 раза. Произведение коэффициента усиления на полосу пропускания (*Gain Bandwidth Product, GBP*) для OАmp2 – $GBP \approx 27$ МГц, что в 7,4 раза меньше чем у ОУ БСК ($GBP \approx 200$ МГц). Относительно высокое быстродействие ОУ БСК обусловлено тем, что он не полностью частотно компенсирован и работает без самовозбуждения при усилении больше 10. OАmp2 является более универсальным ОУ и работает без самовозбуждения при усилении, равном 2 и более, а его $GBP \approx 27$ МГц вполне достаточно для большинства аналоговых устройств.

2. Топология ОУ БСК разработана с учетом правил проектирования полностью заказных аналоговых ИМС [10].

ОУ OАmp2 реализован на БМК. Топология макроячейки БМК имеет универсальный характер и не предназначена для минимизации напряжения смещения нуля. Однако проведенные измерения показали малое напряжение смещения нуля OАmp2 и, следовательно, высокую эффективность работы ОС по синфазному сигналу. Для ОУ БСК среднее значение $V_{OFF} = -1,21$ мВ при существующем разбросе от минус 1,67 мВ до 0,21 мВ. Для ОУ OАmp2 среднее значение $V_{OFF} = 0,11$ мВ.

3. Меньшие эмиттерные токи транзисторов OАmp2 и приблизительное равенство коэффициентов усиления базового тока β *n-p-n*- и *p-n-p*-транзисторов в микрорежиме обеспечивают существенно меньшее среднее значение входного тока $I_{INP} = -1,125$ мкА по сравнению с ОУ БСК ($I_{INP} = 4,65$ мкА).

4. Компаратор ADComp3 имеет чувствительность в 3 раза лучше и входной ток почти в 2 раза меньше, чем компаратор БСК, хотя задержка распространения сигнала ADComp3 существенно больше.

5. ОУ OAmpl2 обеспечивает удовлетворительный уровень основных статических параметров (I_{INP} , V_{OFF} , K_V) при флюенсе быстрых электронов $F_E < 3,7 \cdot 10^{14}$ эл./см² с энергией 6 МэВ. При $F_E > 10^{15}$ эл./см² происходит спад K_V и рост V_{OFF} . Последнее может быть вызвано уменьшением эффективности ОС по синфазному сигналу при значительном спаде β биполярных транзисторов. Радиационное изменение I_{INP} , V_{OFF} , K_V OAmpl2 не хуже, чем ОУ БСК.

6. Чувствительность компаратора ADComp3 при $F_E < 3,7 \cdot 10^{14}$ эл./см² и $D_G < 700$ крад слабо зависит от уровня ПР.

7. Зависимости входного и выходного тока от F_E и D_G у ADComp3 и компаратора БСК схожи. Преимуществом ADComp3 является возможность увеличения I_{OMAX} за счет изменения сопротивления внешнего резистора. Следовательно, компаратор ADComp3 является радиационно-стойким при $F_E < 3,7 \cdot 10^{14}$ эл./см² и $D_G < 700$ крад.

Заключение

Для создания радиационно-стойких микросхем на БМК МН2ХА030 разработаны ОУ OAmpl2 и компараторы ADComp1, ADComp3. Преимуществом OAmpl2 по сравнению с ОУ типовых базовых матричных кристаллов является парафазный выходной сигнал и малое напряжение смещения нуля, обеспечиваемое встроенной ОС по синфазному сигналу.

К особенностям ADComp1, ADComp3 можно отнести высокую чувствительность и возможность изменения максимального выходного тока внешним резистором.

Все созданные аналоговые компоненты обеспечивают удовлетворительный уровень основных статических параметров при флюенсе быстрых электронов $F_E < 3,7 \cdot 10^{14}$ эл./см² с энергией 6 МэВ и поглощенной дозе гамма-квантов ⁶⁰Со не менее 700 крад.

С точки зрения авторов, стойкость OAmpl2, ADComp1, ADComp3 к воздействию гамма-квантов ⁶⁰Со существенно выше и требует дальнейшего изучения.

Список литературы

1. Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Бутырлагин Н.В., Бугакова А.В. Перспективы применения новых микросхем базового матричного и базового структурного кристаллов в датчиковых системах. *Труды СПИИРАН*. 2016;2(45):157-171.
2. Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Пахомов И.В., Бутырлагин Н.В., Бугакова А.В. Проектирование радиационно-стойких аналоговых процессоров и преобразователей сигналов датчиков на основе базового структурного кристалла МН2ХА010. *Радиотехника*. 2016;2:107-113.
3. Dvornikov O.V., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N., Chekhovskii V.A. Configurable Structured Array for Fabrication of Radiation-Hardened Analog Interfaces. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2017;62(10):1193-1199. DOI: 10.1134/S1064226917090078.
4. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors. *Russian Microelectronics*. 2016;45(1):54-62. DOI: 10.1134/S1063739716010030.
5. Дворников О.В., Дятлов В. Л., Прокопенко Н. Н., Чеховский В. А., Пахомов И.В., Бугакова А.В. Статические параметры компараторов и зарядочувствительных усилителей базового структурного кристалла МН2ХА010 при воздействии гамма-излучения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017;2(23):38-46.
6. Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Прокопенко Н.Н., Будяков П.С. Проектирование компараторов напряжений на базе элементов радиационно-стойкого низкотемпературного BiJFET базового матричного кристалла МН2ХА030. *Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем*. 2018;4:10-16. DOI: 10.31114/2078-7707-2018-4-10-16.
7. Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. BiJfet Array Chip МН2ХА030 – a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits. *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EexPolytech)*. 2018;13-17. DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564415.

8. Бельков М.В., Бушева С.В., ред.: Шумилина А.Г. *Справочник центров коллективного пользования уникальным научным оборудованием и приборами*. № 7. Минск: БелИСА; 2017.
9. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L., Bogatyrev YU.V., Lastovski S.B. Forecasting of bipolar integrated circuits hardness for various kinds of penetrating radiations. *2013 23rd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"*. 2013;2:925-927.
10. Абрамов И.И., Дворников О.В. *Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем*. Минск: Академия управления при Президенте Республики Беларусь; 2006.

References

1. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. [Prospects for the use of new microcircuits of the master slice and base structural array in sensor systems]. *Trudy SPIIRAN*. 2016;2(45):157-171. (In Russ.)
2. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Pahomov I.V., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. [Design of radiation-hardened analog processors and sensor signal converters based on the master slice array MH2XA010]. *Radiotekhnika*. 2016;2:107-113. (In Russ.)
3. Dvornikov O.V., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N., Chekhovskii V.A. Configurable Structured Array for Fabrication of Radiation-Hardened Analog Interfaces. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2017;62(10):1193-1199. DOI: 10.1134/S1064226917090078.
4. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dzatlau V.L., Prokopenko N.N. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors. *Russian Microelectronics*. 2016;45(1):54-62. DOI: 10.1134/S1063739716010030.
5. Dvornikov O.V., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N., Chehovskiy V.A., Pahomov I.V., Bugakova A.V. [Static parameters of comparators and charge-sensitive amplifiers of the master slice array MH2XA010 when gamma radiation exposed to]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost*. 2017;2(23):38-46. (In Russ.)
6. Dvornikov O.V., Chehovskiy V.A., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N., Budyakov P.S. [Design of voltage comparators based on elements of radiation-hardened low-temperature BiJFET master slice array MH2XA030]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem*. 2018;4:10-16. DOI: 10.31114/2078-7707-2018-4-10-16. (In Russ.)
7. Dvornikov O.V., Dzatlau V.L., Tchekhovskiy V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. 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)*. 2018;13-17. DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564415.
8. Belkov M.V., Busheva S.V., red.: Shumilina A.G. [Directory of centers for the collective use of unique scientific equipment and instruments]. № 7. Minsk: BelISA; 2017. (In Russ.)
9. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L., Bogatyrev YU.V., Lastovski S.B. Forecasting of bipolar integrated circuits hardness for various kinds of penetrating radiations. *2013 23rd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"*. 2013;2:925-927.
10. Abramov I.I., Dvornikov O.V. [Designing analog microcircuits for precision measuring systems]. Minsk: Academy of Public Administration under the aegis of the President of the Republic of Belarus; 2006. (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. выполнил измерение параметров.

Галкин Я.Д. участвовал в разработке операционного усилителя и компараторов на базовом матричном кристалле MH2XA030, выполнял измерение параметров и анализ полученных результатов.

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

Authors' contribution

Dvornikov O.V. analyzed the current state of the problem, formulated the goals and objectives of the research and acted as a scientific supervision.

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

Dziatlau V.L. performed measurement of parameters.

Galkin Ya.D. participated in the development of an operational amplifier and comparators on the MH2XA030 master slice array, carried out measurement of parameters and analysis of the results obtained.

Prokopenko N.N. participated in the development of the 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., исполняющий обязанности заведующего лабораторией «Электронные методы и средства эксперимента» НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Дятлов В.Л., научный сотрудник лаборатории «Электронные методы и средства эксперимента» НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Галкин Я.Д., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, младший научный сотрудник лаборатории «Электронные методы и средства 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.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-25-725-07-75;
e-mail: galkinyaroslav@gmail.com
Галкин Ярослав Денисович

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., Acting Laboratory Manager at the “Electronic methods and experiment means” Laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Dziatlau V.L., Research Scientist at the “Electronic methods and experiment means” Laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Galkin Y.D., Postgraduate student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Junior Researcher at the “Electronic methods and experiment means” Laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

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

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-25-725-07-75;
e-mail: galkinyaroslav@gmail.com
Galkin Yaroslav Denisovich