

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.375

**ПРЕЦИЗИОННЫЙ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЙ VIJFET
ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
АНАЛОГОВЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ ДАТЧИКОВ¹**

© 2017 О.В. Дворников*, Н.Н. Прокопенко**,***, И.В. Пахомов**, А.А. Игнашин**,
А.В. Бугакова**

* ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт», Минск,
Республика Беларусь

** Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону,
Россия

*** Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Зеленоград, Московская область,
Россия

Рассмотрена оригинальная архитектура и схемотехника прецизионного ViJFet операционного усилителя (ОУ), обеспечивающего систематическую составляющую напряжения смещения нуля не более 8 мкВ в диапазоне температур $-197 \div +27^{\circ}\text{C}$, при потоке нейтронов до 10^{17} н/м² и накопленной дозе радиации до 10 кГр. Схема ОУ имеет высокую симметрию входных цепей, а также три высокоимпедансных узла, что позволяет получить разомкнутый коэффициент усиления более 80дБ. Обоснован выбор САПР и SPICE-моделей транзисторов базового матричного кристалла АБМК 1.3, которые использовались для исследования характеристик ОУ.

Ключевые слова: радиационная стойкость, криогенная температура, схемотехническое моделирование, SPICE-модели, аналоговые микросхемы, датчики, аналоговые интерфейсы, напряжение смещения нуля, поток нейтронов, накопленная доза радиации.

Поступила в редакцию: 25.02.2017

ВВЕДЕНИЕ

Радиационно-стойкие интегральные схемы (ИС) находят применение в наукоемких областях техники, в том числе, ядерной электронике, космической аппаратуре, научном приборостроении, криогенных измерительных и медицинских приборах [1–4].

Для ряда задач физики высоких энергий и космического приборостроения необходимо иметь аналоговые ИС [5–10], сохраняющие работоспособность при одновременном воздействии низких температур и проникающей радиации (ПР) [11]. Значительную роль в обеспечении такого сочетания качественных показателей отводится выбору технологического процесса, а также оригинальных схемотехнических решений, обеспечивающих минимизацию чувствительности основных параметров микросхем к воздействию дестабилизирующих факторов.

Сегодня разработка радиационно-стойких низкотемпературных микросхем значительно затруднена. Это связано с тем, что типовые САПР и многие модели интегральных элементов не обеспечивают адекватные результаты схемотехнического моделирования в данных жестких условиях эксплуатации. Для выбранного ViJFet технологического процесса [12–14] эта задача решена в работе [15], что позволяет

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122).

обеспечить моделирование предлагаемого в статье ViJFet ОУ.

Целью настоящей статьи является рассмотрение схемотехники и результатов компьютерного моделирования (при одновременном воздействии низких температур и проникающей радиации) одного из базовых функциональных узлов аналоговых интерфейсов датчиков – прецизионного операционного усилителя (ОУ), реализованного на основе радиационно-стойкого ViJFet технологического процесса.

ОСОБЕННОСТИ PSpice МОДЕЛИРОВАНИЯ ViJFet ОУ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР И ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

При схемотехническом моделировании ИС применяют разнообразные коммерческие САПР со встроенными моделями биполярного транзистора (БТ) и SPICE- параметрами, содержащимися в фирменных библиотеках предприятий изготовителей полупроводниковых приборов и ИС [16]. Обычно это модели Гуммеля-Пуна и Шихмана–Ходжеса (для полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом, р-ПТП).

Однако, не все коммерческие САПР и фирменные библиотеки SPICE-параметров моделей транзисторов пригодны для схемотехнического моделирования влияния ПР и криогенной температуры на параметры аналоговых ИС.

Моделирование при низких температурах вольтамперных характеристик (ВАХ) типовых БТ в различных схемотехнических САПР (OrCAD 16.6, HSPICE, LTSpice) позволило установить, что в OrCAD, HSPICE наблюдаются «выбросы» и отклонения ВАХ при моделировании БТ при температурах менее -148°C [15]. Наряду с этим в LTSpice такое моделирование может быть проведено при условии настройки модели и определения ее температурных параметров в нужном диапазоне. Таким образом, в LTSpice может проводиться моделирование характеристик БТ и р-ПТП с учетом влияния ПР и криогенных температур.

Как показано в работе [15], для одновременного учета влияния радиации и низких температур на биполярные и полевые транзисторы в структуре ViJFet базовых матричных кристаллов [17] и микроэлектронных изделий [10, 12, 13] на их основе целесообразно применение:

- САПР LTSpice,
- встроенных в LTSpice типовых моделей Гуммеля-Пуна и Шихмана–Ходжеса,
- математических выражений, устанавливающих взаимосвязь параметров моделей, полупроводника и радиационного облучения,
- усредненных температурных коэффициентов параметров моделей,
- математических выражений, описывающих зависимость скорости поверхностной рекомбинации от поглощенной дозы облучения и немонотонное изменение параметра $\beta_{\text{ЭТ}}$ ПТП в диапазоне температур от -197°C до 27°C .

Апробация предложенных в [12] моделей выявила удовлетворительное совпадение результатов измерений и моделирования ВАХ БТ и р-ПТП до и после воздействия гамма-излучения, а также потока «быстрых» электронов [18].

VIJFET ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ВХОДНОГО КАСКАДА БЕЗ КЛАССИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ОПОРНОГО ТОКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При проектировании аналоговых микросхем в рамках конкретного технологического процесса значительная роль отводится использованию удачных схемотехнических решений, позволяющих иногда улучшить важнейшие качественные

показатели ИС в 5–10 раз.

Рассмотрим особенности проектирования низкотемпературных, радиационно-стойких BiJFet аналоговых компонентов на примере операционного усилителя рис. 1. Данная схема представляет собой модифицированный ОУ по патенту [19].

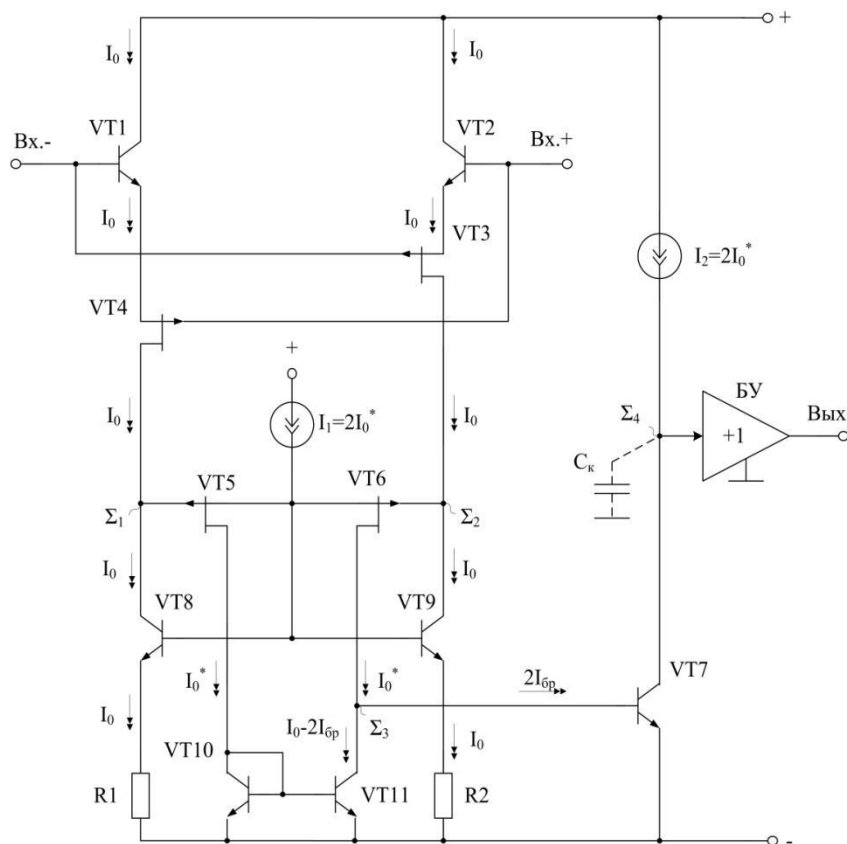


Рис. 1. – Электрическая принципиальная схема BiJFet ОУ с повышенным коэффициентом усиления

Операционный усилитель рис. 1 содержит нетрадиционный входной каскад на транзисторах VT1-VT4, рассмотренный в работах [20–21], имеющий симметричный дифференциальный выход в узлах. Это позволяет уменьшить влияние выходной подсхемы ОУ на нулевой уровень ОУ. Промежуточный дифференциальный усилитель реализован на полевых транзисторах VT5, VT6 с активной нагрузкой VT10, VT11. Выходная подсхема, обеспечивающая дополнительное усиление, выполнена на каскаде с общим эмиттером (VT7) и буферном усилителе (БУ).

В схеме рис. 1 созданы специальные условия для взаимной компенсации [22] существенной радиационной и низкотемпературной деградации коэффициентов усиления по току базы (β) транзисторов VT10, VT11, VT7, которые уменьшаются в десятки раз. Так для узла Σ_3 справедливо следующее уравнение Кирхгофа:

$$I_{c6} = I_{k11} + I_{б7}, \quad (1)$$

где $I_{c6} = I_0^*$ – ток стока VT6, I_{k11} – ток коллектора VT11, $I_{б7}$ – ток базы VT7, I_0^* – половина тока двухполюсника П.

Причем

$$I_{k11} = I_0^* - 2I_{бp}, \quad (2)$$

$$I_{б7} = 2I_{бp} = I_{к7} / \beta_7, \quad (3)$$

Из уравнений (1)-(3) следует, что в рассматриваемой схеме ОУ обеспечивается

взаимная компенсация всех составляющих токов в узле Σ_3 . Это является необходимым условием минимизации влияния деградации β транзисторов VT10, VT11 и VT7 на нулевой уровень ОУ (систематическую составляющую напряжения смещения нуля).

Следует заметить, что при других вариантах построения активной нагрузки и выходной подсистемы ОУ эффект взаимной компенсации токов в узле Σ_3 не сохраняется. Как следствие напряжение смещения нуля такого ОУ существенно увеличивается при дестабилизирующих факторах.

Операционный усилитель (рис. 1) имеет 4 высокоимпедансных узла ($\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \Sigma_4$), что обеспечивает повышенное значение коэффициента усиления по напряжению. При этом, входной каскад ОУ не содержит классических источников опорного тока, а его статический режим устанавливается за счет выбора геометрии полевых транзисторов VT4, VT3.

Компьютерное моделирование основных параметров ОУ рисунка 1, осуществлялось в среде LTSpice на моделях ViJFet транзисторов [15], учитывающих радиационную и низкотемпературную зависимость их параметров.

Графики рисунка 2 характеризуют зависимость систематической составляющей напряжения смещения нуля ОУ от температуры (диапазон от -197°C до 27°C), а графики рисунка 3 и рисунка 4 – от потока нейтронов и накопленной дозы радиации.

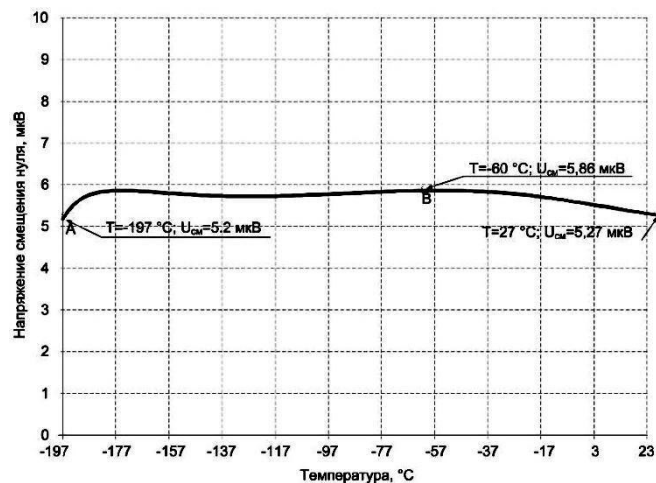


Рис. 2. – Зависимость систематической составляющей напряжения смещения нуля ОУ от температуры (диапазон от -197°C до 27°C)

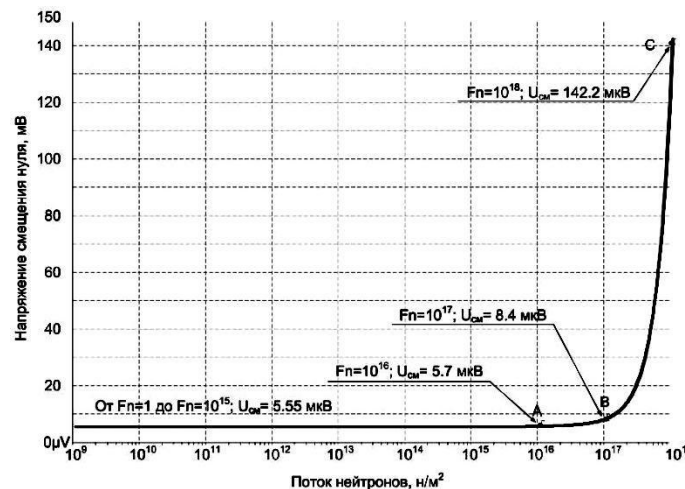


Рис. 3. – Зависимость систематической составляющей напряжения смещения нуля ОУ от потока нейтронов

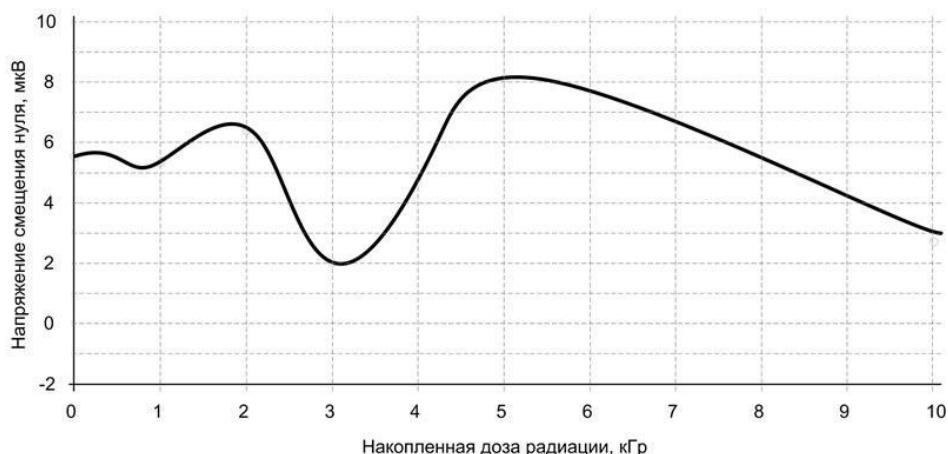


Рис. 4. – Зависимость систематической составляющей напряжения смещения нуля ОУ от накопленной дозы радиации

Амплитудно-частотная характеристика разомкнутого ОУ (рис. 5) в диапазоне температур от -197°C до 27°C и радиационных воздействий изменялась не более чем на 1дБ. Это обусловлено эффектами взаимной компенсации основных факторов, влияющих на коэффициент усиления рассматриваемой схемы ОУ.

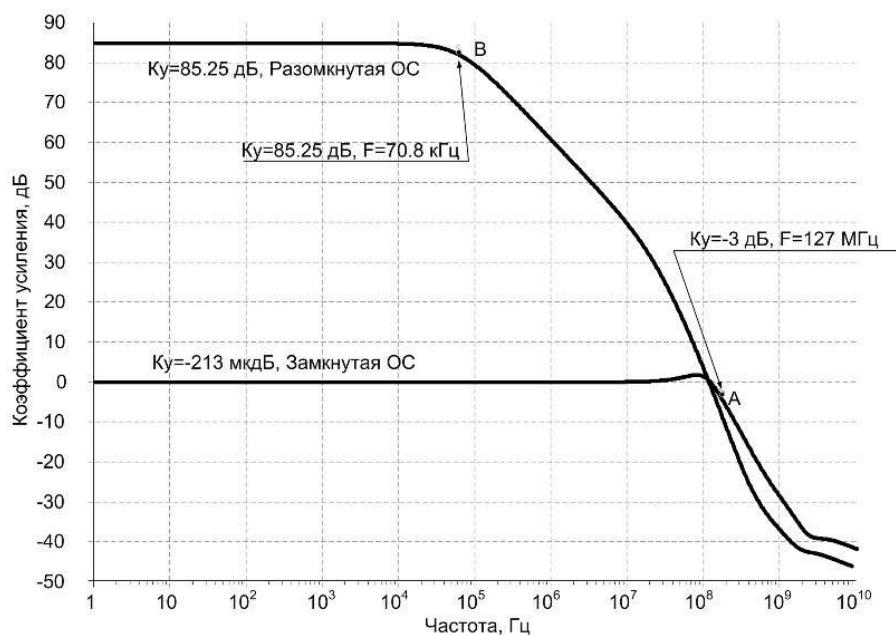


Рис. 5. – Амплитудно-частотные характеристики коэффициентов усиления ОУ в диапазоне температур от -197°C до 27°C

ВЫВОДЫ

Рассмотренные особенности проектирования операционных усилителей для аналоговых интерфейсов датчиков, работающих в условиях воздействия радиации и низких температур, показывают, что на основе BiJFet кремниевой технологии [23] возможно создание перспективных микроэлектронных изделий, успешно конкурирующих по ряду параметров с микросхемами на широкозонных полупроводниках.

Разработанный BiJFet ОУ обеспечивает систематическую составляющую напряжения смещения нуля не более 8 мкВ в диапазоне температур $-197 \div +27\text{C}$ при потоке нейтронов до 10^{17} н/м^2 и накопленной дозе радиации до 10 кГр.

В указанном диапазоне внешних воздействий амплитудно-частотная характеристика ОУ (при разомкнутом коэффициенте усиления более 80дБ) изменяется не более чем на 1дБ.

Для исследования характеристик ОУ использовалась САПР LTSpice и Spice-модели транзисторов базового матричного кристалла АБМК 1.3 [17], учитывающие радиационные и низкотемпературные изменения их параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворников, О.В. и др. Особенности аналоговых интерфейсов датчиков. Часть 1. [Текст] / О.В. Дворников, В. Чеховский, В. Дятлов, Н. Прокопенко // Современная электроника. – 2013. – №2. – С. 44–49.
2. Дворников, О.В. и др. Радиационно-стойкие аналоговые интегральные схемы [Текст] / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Ю.В. Богатырев, С.Б. Ластовский // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (2012). Сб. трудов; под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2012. – С. 280–283.
3. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L., Prokopenko N.N. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors. Russian Microelectronics, 2016, Vol. 45, No. 1, pp. 54–62. DOI: 10.1134/S10 63739716010030.
4. Прокопенко, Н.Н. и др. Многоканальный радиационно-стойкий инструментальный усилитель для датчиковых систем и аналоговых интерфейсов ответственного применения [Текст] / Н.Н. Прокопенко, Н.В. Бутырлагин, А.В. Бугакова, А.А. Игнашин // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – №1(18). – С. 76–86.
5. Дворников, О.В. и др. Средства регистрации импульсного видимого излучения малой интенсивности. Часть 1. Особенности и возможности многоканальных фотоприемников с внутренним усилением [Текст] / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов // Приборы и методы измерений. – 2012. – №2(5). – С. 5–13.
6. Дворников, О.В. и др. Изменение параметров комплементарных биполярных транзисторов при воздействии ионизирующих излучений [Текст] / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Ю.В. Богатырев, С.Б. Ластовский // Вопросы атомной науки и техники “ВАНТ”, 2015. – С. 17–22.
7. Дворников, О.В. и др. Модуль на малошумящих полевых транзисторах для обработки сигналов лавинных фотодиодов [Текст] / О. Дворников, В. Чеховский, В. Дятлов, Н. Прокопенко // Современная электроника. – 2014. – №8. – С. 82–87.
8. Ardelean J., Citterio M., Hrisoho A., Manfredi P.F, Speziali V., Truong K. On the noise behaviour of DMILL charge and current-sensitive preamplifier architectures. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1998, Vol. A406, pp. 127–138.
9. Дворников, О.В. и др. Перспективы применения новых микросхем базового матричного и базового структурного кристаллов в датчиковых системах [Текст] / О.В. Дворников, Н.Н. Прокопенко, Н.В. Бутырлагин, А.В. Бугакова // Труды СПИИРАН–2016. Вып. 2 (45). С. 157–171. DOI: <http://dx.doi.org/10.15622/sp.45.10>
10. Дворников, О.В. и др. Проектирование радиационно-стойких аналоговых процессоров и преобразователей сигналов датчиков на основе базового структурного кристалла МН2ХА010 [Текст] / О.В. Дворников, Н.Н. Прокопенко, И.В. Пахомов, Н.В. Бутырлагин, А.В. Бугакова. – М.: Радиотехника, 2016, №2, С. 108–115.
11. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V., Bugakova A.V. The Analog Array Chip AC-1.3 for the Tasks of Tool Engineering in Conditions of Cryogenic Temperature, Neutron Flux and Cumulative Radiation Dose Effects. IEEE EWDTs, 2016, Yerevan, October, 14-17, 2016, pp. 282–285, DOI: 10.1109/EWDTs.2016.7807724
12. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. The Design of the Circuits of Radiation-Hardened Charge-Sensitive Amplifiers Based on the Structured Array (МН2ХА010) and Array Chip (AC-2.1). 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). In 12 Volumes. Vol. 1, Part 1, Novosibirsk, 2016. pp. 253–258, DOI: 10.1109/APEIE.2016.7802268
13. Dvornikov O.V., Bozhatkin O.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.B., Butyrlagin N.V. Operation-routing sequence of production of the radiation-hardened microcircuits of the structured array

- MH2XA010 for multichannel sensor systems. 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE-2016), September 22–23, 2016, Saratov, Russia.
14. Starchenko E.I., Prokopenko N.N., Budyakov P.S. The Radiation-Hardened Voltage References On Bipolar and JFET Transistors. Proceedings of the 8th IEEE GCC Conference and Exhibition, Muscat, Oman, 1–4 February, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/IEEEGCC.2015.7060065
 15. Dvornikov O.V., Dzatlau V.L., Prokopenko N.N., Petrosiants K.O., Kozhukhov N.V., Tchekhovski V.A. The Accounting of the Simultaneous Exposure of the Low Temperatures and the Penetrating Radiation at the Circuit Simulation of the BiJFET Analog Interfaces of the Sensors. Sibcon 2017, Astana, Kazakhstan.
 16. Дворников, О.В. и др. Комплексный подход к проектированию радиационноустойчивых аналоговых микросхем. Часть 1. Учет влияния проникающей радиации в “Spice-подобных” программах [Текст] / О.В. Дворников, В.Н. Гришков // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2010. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2010. С. 301–306.
 17. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Pakhomov I.V. The Differential and Differential Difference operational amplifiers of sensor systems based on bipolar- field technological process AGAMC. International Siberian Conference on Control and Communications, Moscow, SIBCON-2016, Russia, 12–14 May, 2016.
 18. Дворников, О.В. Влияние быстрых электронов на аналоговые интегральные элементы и схемы [Текст] / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Ю.В. Богатырев, С.Б. Ластовский // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2012. – Выпуск 3. – С. 54–59.
 19. Дворников О.В., Бугакова А.В., Бутырлагин Н.В., Прокопенко Н.Н. Патент РФ №2014147805/08, 26.11.2014 Прецизионный операционный усилитель на основе радиационно устойчивого биполярно-полевого технологического процесса. Патент России № 2568384.
 20. Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. The Radiation-Hardened BiJfet Differential Amplifiers with Negative Current Feedback on the Common-Mode Signal. 2016 13th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE – 2016). Novosibirsk, October 3–6, 2016. In 12 Vol. Vol. 1, Part 1, pp. 104–108. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7802224.
 21. Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Pakhomov I.V., Butyrlagin N.V. The Radiation-Hardened Differential Stages and Op Amps without Classical Reference Current Source. 2015 Conference on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS), September 14th– 18th, 2015, Moscow, Russia. DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365681.
 22. Prokopenko N.N., Bugakova A.V. and Pakhomov I.V. The radiation-hardened differential difference operational amplifiers for operation in the low-temperature analog interfaces of sensors. 2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Yerevan, 2016, pp. 1–4, DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807727.
 23. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Bugakova A.V., Ignashin A.A. The Radiation-Hardened Microcircuits of the Multichannel Op Amps with Current Feedback and the Analog Interfaces Based on the Structured Array MH2XA010. Proceedings of 2016 International Siberian Conference On Control And Communications (SIBCON'2016), Russia Moscow MAY 12–14, 2016, DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491790.

REFERENCES

- [1] Dvornikov O., Chehovskij V., Djatlov V., Prokopenko N. Osobennosti analogovykh interfeysov datchikov. Chast 1 [Features analog sensor interfaces. Part 1]. Sovremennaja jelektronika [Modern Electronics]. 2013. Vol. 2. pp. 44-49. (in Russian)
- [2] Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L., Bogatyrev Yu.V., Lastovski S.B. Radiatsionno-stoykie analogovye integralnye skhemy [Radiation hardened analog IC]. Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development – 2012. Proceedings, Edited by A. Stempkovsky, M. Pub. IPPM RAS, 2012, pp. 280–283. (in Russian).
- [3] Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L., Prokopenko N.N. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors. Russian Microelectronics, 2016, Vol. 45, No. 1, pp. 54–62. DOI: 10.1134/S1063739716010030. (in Russian).
- [4] Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V., Ignashin A.A. Mnogokanalnyj radiacionno-stojkij instrumentalnyj usilitel dlya datchikovykh sistem i analogovykh interfeysov otvetstvennogo

- primeneniya [Multichannel Radiation-Hardened Instrumentation Amplifier for Sensor Systems and Analog Interfaces of Demanding Application]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global Nuclear Safety], 2016, №1(18), ISSN 2305-414X, eISSN 2499-9733, pp. 76–86 (in Russian)
- [5] Dvornikov O.V., Chehovskij V.A., Djatlov V.L., Bogatyrev Ju.V., Lastovskij S.B. Izmenenie parametrov komplementarnykh bipolyarnykh tranzistorov pri vozdeystvii ioniziruyushchikh izluchenyi [Changing the complementary bipolar transistors when exposed to ionizing radiation]. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki "VANT"* [Problems of Atomic Science and Technology "PAST"], 2015, pp. 17-22. (in Russian).
- [6] Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L. Equipments to Single Photon Registration. Part 1. Features and Possibilities of Multi-Channel Photodetectors with Intrinsic Amplification. (Review). *Devices and Methods of Measurements*, 2012, №2, pp. 5–14. (in Russian).
- [7] Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L., Prokopenko N.N. Modul na maloshumyashchikh polevykh tranzistorakh dlya obrabotki signalov lavinykh fotodiodov [Low noise electronics module for avalanche photodiode signal readout]. *Sovremennaja jelektronika* [Modern Electronics], 2014, №8, pp. 82–87. (in Russian).
- [8] Ardelean J., Citterio M., Hrisoho A., Manfredi P.F., Speziali V., Truong K. On the noise behaviour of DMILL charge and current-sensitive preamplifier architectures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1998, Vol. A406, pp. 127–138. (in English)
- [9] Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. Perspektivy primeneniya novykh mikroskhem bazovogo matrichnogo i bazovogo strukturnogo kristallov v datchikovykh sistemakh [Perspectives of application of new chips of analog master slice array (AGAMC-2.1) and configurable structured array (MH2XA010) of crystals (JSC MNIPI, Minsk) in the radiation-hardened sensor systems of robots and analog processors]. *SPIIRAS Proceedings*, 2016, Issue 2(45), pp. 157–171, DOI: <http://dx.doi.org/10.15622/sp.45.10> (in Russian).
- [10] Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. Proektirovanie radiacionno-stojkikh analogovykh processorov i preobrazovatelej signalov datchikov na osnove bazovogo strukturnogo kristalla MH2XA010 [Design of the radiation-hardened analog processors and signal converters of the sensors systems based on basic structural crystal MH2XA010]. *M. Pub. Radiotekhnika* [Radiotechnics], 2016, №2, pp. 107–113. (in Russian).
- [11] Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V., Bugakova A.V. The Analog Array Chip AC-1.3 for the Tasks of Tool Engineering in Conditions of Cryogenic Temperature, Neutron Flux and Cumulative Radiation Dose Effects. *IEEE EWDTs*, 2016, Yerevan, October, 14-17, 2016, pp. 282-285, DOI: 10.1109/EWDTs.2016.7807724 (in English)
- [12] Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. The Design of the Circuits of Radiation-Hardened Charge-Sensitive Amplifiers Based on the Structured Array (MH2XA010) and Array Chip (AC-2.1). 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). In 12 Volumes. Vol. 1, Part 1, Novosibirsk, 2016. pp. 253–258, DOI: 10.1109/APEIE.2016.7802268 (in English)
- [13] Dvornikov O.V., Bozhatkin O.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.B., Butyrlagin N.V. Operation-routing sequence of production of the radiation-hardened microcircuits of the structured array MH2XA010 for multichannel sensor systems. 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE-2016), September 22–23, 2016, Saratov, Russia. (in English)
- [14] Starchenko E.I., Prokopenko N.N., Budyakov P.S. The Radiation-Hardened Voltage References On Bipolar and JFET Transistors. *Proceedings of the 8th IEEE GCC Conference and Exhibition*, Muscat, Oman, 1–4 February, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/IEEEGCC.2015.7060065 (in English)
- [15] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N., Petrosiants K.O., Kozhukhov N.V., Tchekhovski V.A. The Accounting of the Simultaneous Exposure of the Low Temperatures and the Penetrating Radiation at the Circuit Simulation of the BiJFET Analog Interfaces of the Sensors. *Sibcon 2017*, Astana, Kazakhstan. (in English)
- [16] Dvornikov O.V., Grishkov V.N. Kompleksnyj podkhod k proektirovaniyu radiacionnostojkikh analogovykh mikroskhem [Radiation hardened analog IC design]. Part 1. Uchet vlijanija pronikajushhej radiacii v "Spice-podobnykh" programmakh [Radiation effects simulation in the "Spice-like" programs]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem – 2010. Sbornik trudov IV Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii* [Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development – 2010]. *Proceedings / edited by A. Stempkovsky, M. Pub. IPPM RAS*, 2010. pp. 301–306. (in Russian).
- [17] Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Pakhomov I.V. The Differential and Differential Difference operational amplifiers of sensor systems based on bipolar- field technological process AGAMC. *International Siberian Conference on Control and Communications*,

- Moscow, SIBCON-2016, Russia, 12–14 May, 2016. (in English)
- [18] Dvornikov O.V., Chehovskij V.A., Djatlov V.L., Bogatyrev Ju.V., Lastovskij S.B. Vliyanie bystrykh elektronov na analogovye integralnye elementy i skhemy [Effect of fast electrons in the analog integrated circuit and elements]. *Voprosy atom-noj nauki i tehniki. Serija: fizika radiacionnogo vozdejstviya na radioelektronnuju apparaturu* [Issues of atomic science and technology. Series: Physics of radiation effects on electronic equipment], 2012, Vol. 3, pp. 54–59. (in Russian)
- [19] Dvornikov O.V., Bugakova A.V., Butyrlagin N.V., Prokopenko N.N. Patent RF №2014147805/08, 26.11.2014 Precizionnyj operacionnyj usilitel' na osnove radiacionno stojkogo bipoljarno-polevogo tekhnologicheskogo processa. Patent Rossii № 2568384 [Patent RF №2014147805/08, 26.11.2014 Precision operational amplifier based on radiation-hardened bipolar-field process. Patent of Russia № 2568384]. (in Russian)
- [20] Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. The Radiation-Hardened BiJFet Differential Amplifiers with Negative Current Feedback on the Common-Mode Signal. 2016 13th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE – 2016). Novosibirsk, October 3–6, 2016. In 12 Vol. Vol. 1, Part 1, pp. 104–108, DOI: 10.1109/APEIE.2016.7802224 (in English)
- [21] Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Pakhomov I.V., Butyrlagin N.V. The Radiation-Hardened Differential Stages and Op Amps without Classical Reference Current Source. 2015 Conference on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS), September 14th– 18th, 2015, Moscow, Russia. DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365681 (in English)
- [22] Prokopenko N.N., Bugakova A.V. and Pakhomov I.V. The radiation-hardened differential difference operational amplifiers for operation in the low-temperature analog interfaces of sensors. 2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTTS), Yerevan, 2016, pp. 1–4, DOI: 10.1109/EWDTTS.2016.7807727 (in English)
- [23] Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Bugakova A.V., Ignashin A.A. The Radiation-Hardened Microcircuits of the Multichannel Op Amps with Current Feedback and the Analog Interfaces Based on the Structured Array MH2XA010. Proceedings of 2016 International Siberian Conference On Control And Communications (SIBCON'2016), Russia Moscow MAY 12–14, 2016, DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491790 (in English)

Precision Radiation-Hardened BiJFet OP AMP for Low-temperature Analog Interfaces Sensors²

O.V. Dvornikov^{*1}, N.N. Prokopenko^{**2,***2}, I.V. Pakhomov^{***3}, A.A. Ignashin^{***4},
A.V. Bugakova^{***5}

** Plc., “Minsk Research Instrument-Making Institute”
Kolasa st., 73, Minsk, Belarus, 220113
¹ e-mail: Oleg_dvornikov@tut.by
ORCID iD: 0000-0001-6450-9090
Scopus Author ID: 6602465259
WoS ResearcherID: I-7207-2013*

*** Don State Technical University
Gagarina sq. 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000
² e-mail: prokopenko@sssu.ru
ORCID iD: 0000-0001-8291-1753
Scopus Author ID: 25227786700
WoS ResearcherID: I-6599-2013;
³ e-mail: ilyavpakhomov@sssu.ru
ORCID iD: 0000-0001-9861-7153
Scopus Author ID: 56535229400
WoS ResearcherID: E-4208-2017
⁴ e-mail: igan_96@mail.ru
ORCID iD: 0000-0002-6390-4205*

² The article was prepared within the framework of the project No.16-19-00122 of the Russian Science Foundation for 2016-2018.

Scopus Author ID: 57190163883
WoS ResearcherID: E-1358-2017;
⁵ *e-mail: annabugakova.1992@mail.ru*
ORCID iD: 0000-0001-9255-0015
Scopus Author ID: 56543776600
WoS ResearcherID: E-6820-2014

**** Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (IPPM RAS)
Sovetskaya st. 3, Zelenograd, Russia, 124681*

Abstract – The original architecture and circuit design of the precision BiJFet operational amplifier (OA), which provides a systematic component of offset voltage no more than 8 μV in the temperature range $-197 \div + 27\text{C}$, with neutron flux up to 10^{17} N / m^2 and accumulated radiation dose up to 10 kGy, was considered. The OA circuit has a high symmetry of the input circuits, and three high-impedance nodes, this makes possible to obtain an open-loop gain more than 80 dB. The choice of CAD and SPICE-models of array chip AC 1.3 transistors, which used to research the characteristics of the op-amp, was substantiated.

Keywords: radiation hardness, cryogenic temperature, general-circuit simulation, SPICE-models, analog integrated circuit, sensors, analog interfaces, offset voltage, neutron flux, accumulated radiation dose.