

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

Научная статья
УДК 004.942
DOI: 10.14529/ctcr260106

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТА НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Д.Ю. Казанцев^{1, 2}, dep5@vniitf.ru

А.С. Пилипенко¹, A.S.Pilipenko@vniitf.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3163-9183>

Ю.В. Осеев¹, dep5@vniitf.ru

¹ Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, Россия

² Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Снежинск, Челябинская область, Россия

Аннотация. При контроле параметров операционных усилителей (ОУ), подвергаемых воздействию ионизирующего излучения, может потребоваться использование нескольких схем включения и достаточно длительная (до десятков часов) регистрация критериальных параметров, что требует автоматизации всего процесса. **Цели и задачи:** решение задачи автоматизированного контроля параметров ОУ в течение длительного времени при необходимости использования разных схем включения ОУ. **Методы.** До и во время воздействия с помощью разработанной методики контролировались такие наиболее чувствительные к воздействию ионизирующего излучения параметры ОУ, как напряжение смещения нуля, входной ток, быстродействие. Управление переключением измерительных схем, подключение и контроль напряжения питания, регистрация контролируемых параметров проводились с помощью приборов, объединенных под управлением ПК. Для управления приборами и регистрации данных была разработана интерфейсная программа, обеспечивающая отображение результатов измерения всех контролируемых параметров в реальном времени с одновременной записью в файл. **Результаты.** Для ОУ, облучаемого гамма-квантами изотопного источника на основе ⁶⁰Со, получены графики зависимостей исследуемых параметров от накопленной дозы при общем времени регистрации порядка 70 часов для различных значений интенсивности воздействия. Показано, что из исследуемых параметров только входной ток заметно изменяется в рассматриваемом диапазоне уровней воздействия. Экспериментальные результаты проанализированы в рамках наиболее популярной на сегодняшний день конверсионной модели встраивания заряда на поверхностные состояния, определены коэффициенты аппроксимации полученных результатов модельными кривыми для двух различных интенсивностей набора дозы. **Заключение.** Предложена схема контроля параметров ОУ в процессе радиационного эксперимента, разработано программное обеспечение управления измерительным оборудованием, используемого для автоматизированной регистрации отклика ОУ в течение длительного времени. Проведена апробация методики в условиях реального эксперимента при вариации интенсивности воздействия. Установлено, что в ОУ проявляется эффект низкой интенсивности, который не удастся описать в рамках конверсионной модели.

Ключевые слова: операционный усилитель, автоматизированный контроль параметров, эффект низкой интенсивности, ионизирующее излучение

Для цитирования: Казанцев Д.Ю., Пилипенко А.С., Осеев Ю.В. Автоматизированный контроль параметров операционных усилителей при исследовании эффекта низкой интенсивности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 1. С. 72–79. DOI: 10.14529/ctcr260106

Original article

DOI: 10.14529/ctcr260106

OPERATIONAL AMPLIFIER PARAMETERS AUTOMATED CONTROL IN THE ENHANCED LOW DOSE RATE SENSITIVITY EFFECT INVESTIGATION

D.Yu. Kazantsev^{1,2}, dep5@vniitf.ru

A.S. Pilipenko¹, A.S.Pilipenko@vniitf.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3163-9183>

Yu.V. Oseev¹, dep5@vniitf.ru

¹ Russian Federal Nuclear Centre – All-Russian Research Institute of Technical Physics
named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia

² Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPHI,
Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia

Abstract. During monitoring of the operational amplifiers (op amps) parameters exposed to ionizing radiation, it may be necessary to use several application circuits and register the criteria parameters for a sufficiently long time (up to tens of hours) that requires the whole process automation. **Aims and objectives.** The solution of the task of op-amp parameters automated control for a long time using the different op-amp application circuits **Methods.** The developed technique was used to control the most sensitive to the ionizing radiation exposure op-amp characteristics i.e. zero-offset voltage, input current and the performance during the exposure. The set of instruments controlled by PC was used to measuring schemes switching, power supply on-set and control, observed parameters registration. The interface software visualized all controlled parameters results in real time with simultaneously logging was developed to control instruments and data registration. **Results.** The relations of the studied op-amp parameters on the accumulated dose for different exposure intensities have been obtained for op-amp exposed to ⁶⁰Co gamma isotope source (total registration time was about 70 hours) It was shown that among investigating parameters only input current varies significantly in the considering exposure level interval. Experimental results are analyzed in the network of the today' most popular conversion model of charge injection to surface states; coefficients of obtained results with model curves approximation were determined for the two different dose rates. **Conclusion.** A circuit for monitoring op-amp parameters during a radiation experiment is proposed, and software for controlling measuring equipment used for automated recording of op-amp response over a long period of time is developed. The methodology was tested in a real experiment with dose rate variation. It has been established that the low intensity effect is manifested in the op-amp, which cannot be described within the framework of the conversion model.

Keywords: operational amplifier, automated parameter control, enhanced low dose rate sensitivity effect, ionizing radiation

For citation: Kazantsev D.Yu., Pilipenko A.S., Oseev Yu.V. Operational amplifier parameters automated control in the enhanced low dose rate sensitivity effect investigation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2026;26(1):72–79. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260106

Введение

ОУ являются частью большинства современных аналоговых электронных устройств. Существует множество видов ОУ, обладающих различными характеристиками и внутренним устройством. Они могут быть построены как по биполярной, так и по МОП-технологии [1–3]. Вместе с тем для ОУ всех видов можно выделить ряд параметров, наиболее чувствительных к воздействию ионизирующего излучения: напряжение смещения нуля $U_{см}$, входной ток $I_{вх}$, быстродействие или скорость нарастания выходного напряжения $V_{ф}$ [4].

Как правило, в практике радиационного эксперимента объект исследования (ОИ) включается по схеме, позволяющей реализовать самый критичный режим работы или контролировать наибольшее число параметров непосредственно во время воздействия. Однако при контроле разных параметров могут отличаться схемы включения, что требует дополнительных мер при разработке методики контроля. К примеру, типовое значение входного тока ОУ составляет единицы нА, т. е. его измерение является трудоёмкой задачей [5], и в этом случае предпочтительно применять косвенные методы измерения [6, 7].

Испытания на радиационную стойкость могут быть достаточно продолжительными. Например, при имитации воздействия факторов космического пространства [8] рекомендуемая скорость набора дозы составляет не более 0,1 рад(Si)/с [9–11]. Как показано в ряде работ [4, 8–12], более высокие интенсивности воздействия могут приводить к некорректной оценке стойкости ОИ, изготовленных по биполярной технологии. Учитывая, что типовые требования по стойкости составляют $\sim 10^3\text{--}10^5$ рад(Si) [13], возникает необходимость контроля параметров ОИ в течение десятков и даже сотен часов.

Таким образом, целью настоящей работы является решение задачи автоматизированного контроля параметров ОУ в течение длительного времени при необходимости использования разных схем включения ОУ.

1. Методика эксперимента

Для обеспечения контроля необходимых параметров была предложена схема включения ОУ (рис. 1), в которой положением ключей определяется текущий измеряемый параметр. В качестве ключей использованы реле. Если оба ключа разомкнуты, то к входу ОУ подключен высокоомный резистор $R_{3,2}$ и выходное напряжение ОУ $U_{\text{вых}}$ пропорционально $I_{\text{вх}}$. При замыкании ключа К параллельно резистору $R_{3,2}$ подключается низкоомный резистор $R_{3,1}$ и $U_{\text{вых}}$ пропорционально $U_{\text{см}}$. Для измерения V_{ϕ} замыкаются оба ключа и на вход ОУ подается сигнал с генератора. Во всех случаях $U_{\text{вых}}$ контролируется с помощью осциллографа, при этом для повышения точности измерений $U_{\text{см}}$ и $I_{\text{вх}}$ из осциллограммы определяется среднее значение величин.

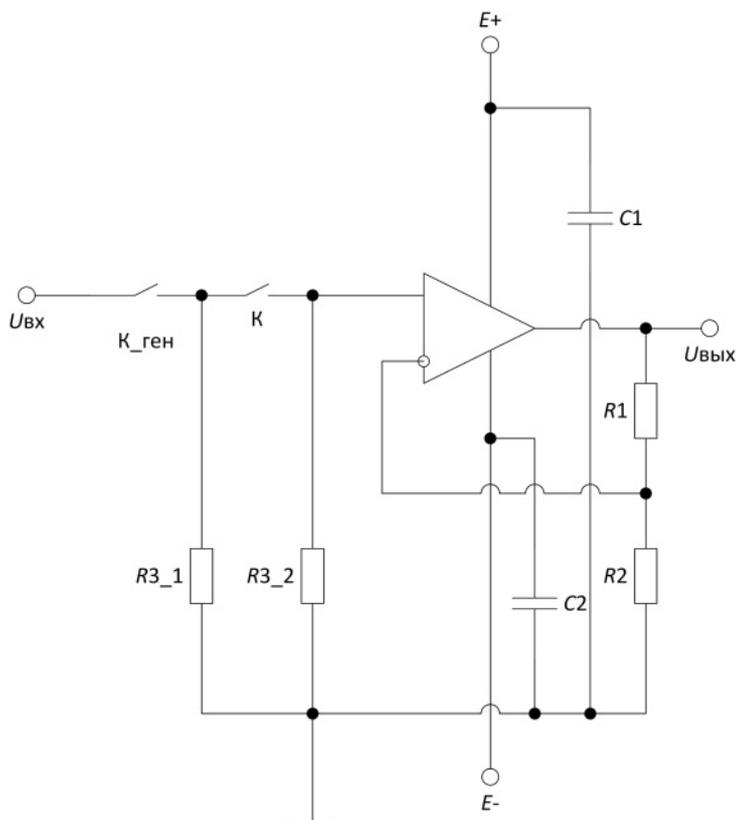


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема включения ОУ:
 $R_1 = 180 \text{ Ом}$, $R_2 = 1800 \text{ Ом}$, $R_{3,1} = 51 \text{ Ом}$, $R_{3,2} = 2 \text{ МОм}$, $C_1 = C_2 = 0,1 \text{ мкФ}$
Fig. 1. Op-amp application circuit:
 $R_1 = 180 \text{ }\Omega$, $R_2 = 1800 \text{ }\Omega$, $R_{3,1} = 51 \text{ }\Omega$, $R_{3,2} = 2 \text{ M}\Omega$, $C_1 = C_2 = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$

Для контроля обозначенных параметров помимо генератора и осциллографа необходимы источники питания ОУ и реле. Общая схема измерительного комплекса приведена на рис. 2. При выборе конкретных приборов помимо их характеристик учитывалась возможность программного управления ими посредством ПЭВМ.

Для управления приборами и регистрации данных была разработана программа, упрощенная блок-схема алгоритма которой приведена на рис. 3. Вначале настраиваются параметры используемых приборов, задаются входные параметры в соответствии с типономиналом исследуемого ОУ и время между циклами измерения параметров. После запускается основной цикл измерений, который может выполняться заданное число раз или до принудительной остановки программы. Все измеренные данные сохраняются в текстовый файл.

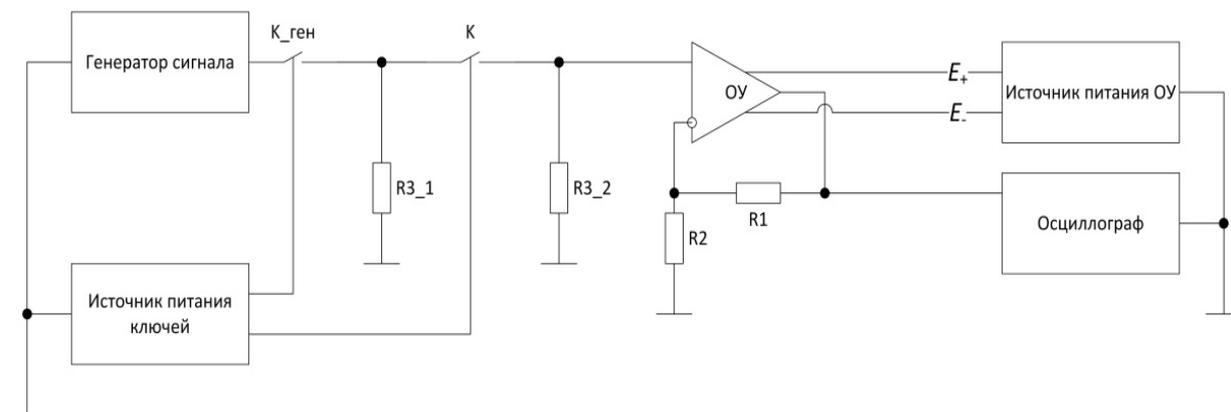


Рис. 2. Измерительный комплекс
Fig. 2. Measuring equipment

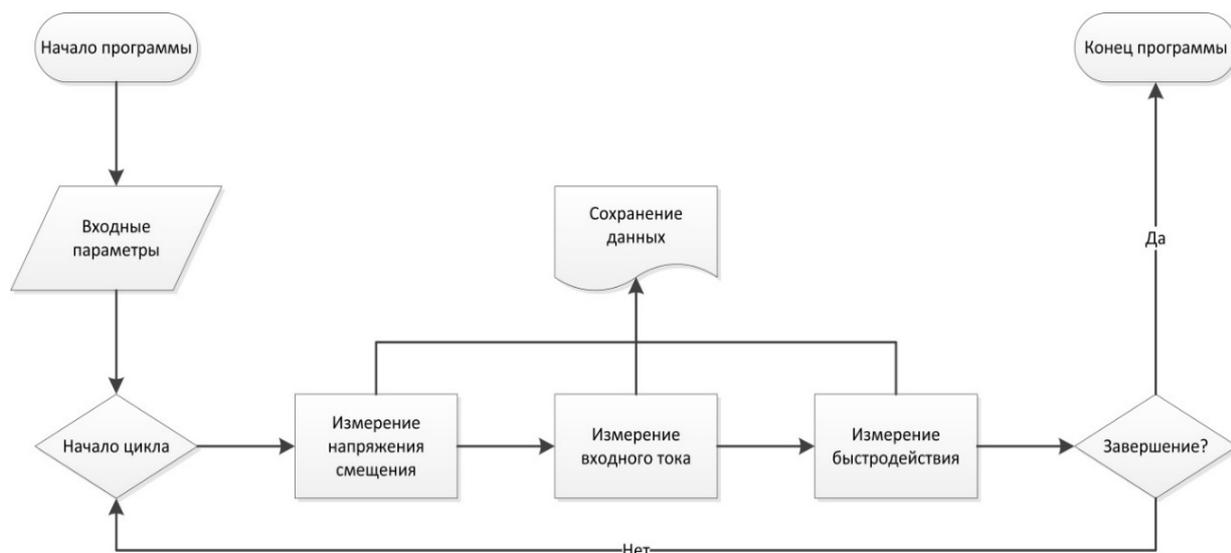


Рис. 3. Блок-схема алгоритма программы управления приборами
Fig. 3. Block diagram of the instrument control program algorithm

2. Методика исследования

В качестве объекта исследования был выбран ОУ, построенный по биполярной технологии, со следующими параметрами: $U_{см}$ – не более 75 мкВ, $I_{вх}$ – не более 4 нА, $V_{ф}$ – не менее 0,1 В/мкс.

В качестве источника воздействия использовался источник на основе ^{60}Co . Воздействию были подвержены два образца одного типономинала при различных интенсивностях поглощённой дозы: 11,6 рад(Si)/с и 0,1 рад(Si)/с. Критерием окончания воздействия являлся выход одного из контролируемых параметров за допустимые пределы.

3. Результаты экспериментов и их анализ

На рис. 4 представлены результаты экспериментов. Из-за значительных погрешностей измерений параметров $\Delta U_{см}$ и $V_{ф}$ (рис. 4а, с) выявить статистически достоверную разницу в деградации двух образцов ОУ не представляется возможным.

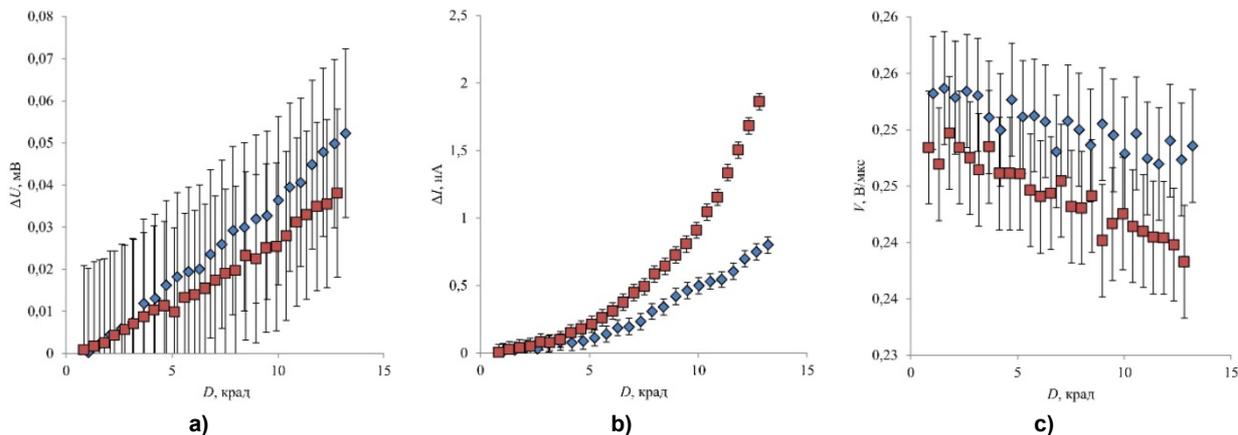


Рис. 4. Зависимости изменения $U_{\text{см}}$ (а), изменения $I_{\text{вх}}$ (b) и V_f (c) от поглощенной дозы гамма-излучения при различных интенсивностях набора дозы (маркер квадрат – 0,1 рад(Si)/с, маркер ромб – 11,6 рад(Si)/с)
Fig. 4. Relations of variations in U_{of} (a); variations in I_{in} (b) and V_f (c) on the absorbed dose of gamma radiation at different dose rates (square marker – 0.1 rad(Si)/s, rhomb marker – 11.6 rad(Si)/s)

Эффект низкой интенсивности наблюдается при изменении входных токов ОУ. Рост входного тока происходит за счёт увеличения тока базы входного биполярного транзистора дифференциального каскада [14]. Такая реакция на воздействие ионизирующего излучения чаще всего объясняется в рамках конверсионной модели [15], согласно которой приращение базового тока биполярного транзистора прямо пропорционально приращению плотности поверхностных состояний и может быть определено как

$$\Delta I = (K_{\Gamma} + K_M)D + K_{\Gamma}P\tau \left(e^{\frac{D}{P\tau}} - 1 \right), \quad (1)$$

где K_{Γ} и K_M – приращение тока базы на единицу поглощённой дозы при низкой и высокой интенсивности соответственно; τ – характерное время конвертации положительного захваченного заряда в оксиде в поверхностные состояния полупроводника; P – интенсивность излучения.

Для экспериментальных данных изменения входного тока ОУ была проведена аппроксимация по формуле (1). Результаты представлены на рис. 5, в таблице приведены коэффициенты аппроксимации.

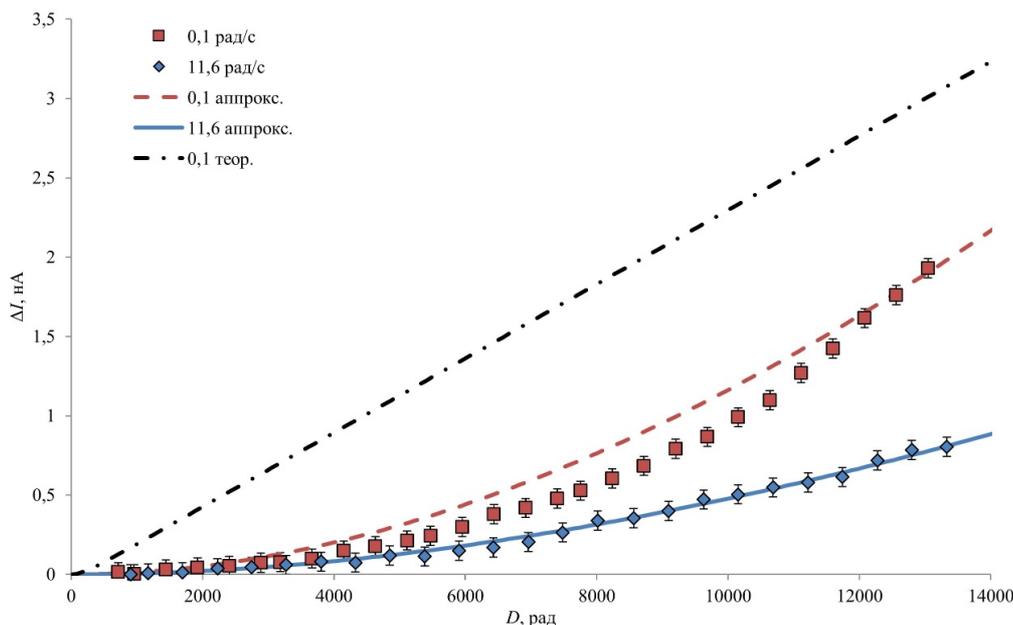


Рис. 5. Зависимости изменения входного тока от дозы гамма-излучения при различных интенсивностях
Fig. 5. Relations of the input current variation on the gamma radiation dose at different dose rates

Коэффициенты аппроксимации
Approximation coefficients

Параметр	Образец № 1	Образец № 2
P , рад(Si)/с	11,6	0,1
τ , с	$1,8 \cdot 10^3 \pm 0,6 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^5 \pm 0,5 \cdot 10^5$
K_G , нА/рад(Si)	$2 \cdot 10^{-4} \pm 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4} \pm 10^{-5}$
K_M , нА/рад(Si)	$2 \cdot 10^{-15} \pm 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-15} \pm 10^{-15}$

Видно, что теоретическая зависимость, построенная на основе коэффициентов аппроксимации для высокой интенсивности с использованием формулы (1), не соответствует экспериментальным данным, полученным при низкой интенсивности. Это может являться следствием приближенного характера конверсионной модели либо обуславливаться влиянием деградации остальных каскадов ОУ (а не только входного).

Заключение

Предложена схема контроля параметров ОУ в процессе радиационного эксперимента, разработано программное обеспечение управления измерительным оборудованием, используемое для автоматизированной регистрации отклика ОУ в течение длительного времени. Проведена апробация методики в условиях реального эксперимента. Установлено, что в ОУ проявляется эффект низкой интенсивности, который не удается описать в рамках конверсионной модели.

Список литературы

1. Чижма С.Н. Основы схемотехники: учеб. пособие для вузов. Омск: Апельсин, 2008. 424 с.
2. Осадченко В.Х., Волкова Я.Ю. Операционные усилители: учеб. пособие для вузов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 156 с.
3. The Performance of Operational Amplifiers Consisting of 4H-SiC CMOS After Gamma Irradiation / M. Masunaga, S. Sato, A. Shima, R. Kuwana // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2018. No. 4. P. 1–6. DOI: 10.1109/TED.2018.2877846
4. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: науч. изд. / под ред. А.И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 512 с.
5. Автоматизированная контрольно-измерительная система для радиационных испытаний операционных усилителей / М.А. Соковишин, Д.В. Бойченко, А.Я. Борисов и др. // Тезисы докладов 16-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2013». Лыткарино: АО «НИИП», 2013. С. 73–74.
6. Neutron Effects on Short Circuit Currents of Op Amps And Consequences / F.J. Franco, Y. Zong, J. Casas-Cubillos et al. // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2005. Vol. 52, no. 5. P. 1530–1537. DOI: 10.1109/TNS.2005.855817
7. Franco F.J., Zong Y., Agapito J.A. Degradation of Power Bipolar Operational Amplifiers in a Mixed Neutron and Gamma Environment // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2007. Vol. 54, no. 4. P. 982–988. DOI: 10.1109/TNS.2007.892183
8. Методология обеспечения стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к воздействию ионизирующего излучения космического пространства: моногр. / Н.В. Кузнецов, Н.И. Николаева, Р.А. Ныммик и др. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. 380 с.
9. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под науч. ред. Г.Г. Райкунова. М.: Физматлит, 2013. 255 с.
10. ОСТ 134-1034-2012. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам.
11. Таперо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.
12. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 319 с.

13. Поверхностные радиационные эффекты в интегральных схемах / Сокоян А.В. и др. // Модель космоса: науч.-информ. изд.: в 2 ч. Ч. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. М.: КДУ, 2007. С. 466–493.

14. Таперо К.И., Диденко С.И. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники: радиационные эффекты в изделиях электронной техники: учеб. пособие. М.: Издат. дом МИСиС, 2013. 349 с.

15. Конверсионная модель эффекта низкой интенсивности в биполярных микроэлектронных структурах при воздействии ионизирующего излучения / В.С. Першенков, Д.В. Савченко, А.С. Бакеренков, В.Н. Улимов // Микроэлектроника. 2010. Т. 39, № 2. С. 102–112.

References

1. Chizhma S.N. *Osnovy skhemotekhniki: ucheb. posobie dlya vuzov* [Fundamentals of Circuit Design. Textbook for Universities]. Omsk: Apel'sin Publ., 2008. 424 p. (In Russ.)

2. Osadchenko V.Kh., Volkova Ya.Yu. *Operatsionnye usiliteli: ucheb. posobie dlya vuzov* [Operational Amplifiers. Textbook for Universities]. Ekaterinburg: Ural University Publ., 2020. 156 p. (In Russ.)

3. Masunaga M., Sato S., Shima A., Kuwana R. The Performance of Operational Amplifiers Consisting of 4H-SiC CMOS After Gamma Irradiation. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2018;(4):1–6. DOI: 10.1109/TED.2018.2877846

4. Chumakov A.I. (Ed.). *Radiatsionnaya stoykost' izdeliy EKB: nauchnoe izdanie* [Radiation resistance of electronic components. Scientific publication]. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI, 2015. 512 p. (In Russ.)

5. Sokovishin M.A., Boychenko D.V., Borisov A.Ya., Kessarinskiy L.N. [Automated test and measurement system for radiation testing of operational amplifiers]. In: *Abstracts of the 16th All-Russian Scientific and Technical Conference "Radiation Resistance of Electronic Systems "Resilience-2013"*. Lytkarino: JSC "Research Institute of Instruments", 2013. P. 73–74. (In Russ.)

6. Franco F.J., Zong Y., Casas-Cubillos J., Rodriguez-Ruiz M.A., Agapito J.A. Neutron Effects on Short Circuit Currents of Op Amps And Consequences. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2005;52(5):1530–1537. DOI: 10.1109/TNS.2005.855817

7. Franco F.J., Zong Y., Agapito J.A. Degradation of Power Bipolar Operational Amplifiers in a Mixed Neutron and Gamma Environment. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2007;54(4):982–988. DOI: 10.1109/TNS.2007.892183

8. Kuznetsov N.V., Nikolaeva N.I., Nymmik R.A., Panasyuk M.I., Yushkov B.Yu. *Metodologiya obespecheniya stoykosti bortovoy apparatury kosmicheskikh apparatov k vozdeystviyu ioniziruyushchego izlucheniya kosmicheskogo prostranstva: monogr.* [Methodology for Ensuring the Resistance of Spacecraft Onboard Equipment to the Effects of Ionizing Radiation in Outer Space. Monograph]. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI, 2017. 380 p. (In Russ.)

9. Raykunov G.G. (Ed.). *Ioniziruyushchie izlucheniya kosmicheskogo prostranstva i ikh vozdeystvie na bortovuyu apparaturu kosmicheskikh apparatov* [Ionizing radiation of outer space and its impact on on-board equipment of spacecraft]. Moscow: Fizmatlit, 2013. 255 p. (In Russ.)

10. *OST 134-1034-2012. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovanie kosmicheskikh apparatov. Metody ispytaniy i otsenki stoykosti bortovoy radioelektronnoy apparatury kosmicheskikh apparatov k vozdeystviyu elektronnoy i protonnoy izlucheniya kosmicheskogo prostranstva po dozovym efektam* [Industry standard 134-1034-2012. Spacecraft Equipment, Devices, and Facilities. Testing and Evaluation Methods for the Resistance of Onboard Electronic Equipment of Spacecraft to the Effects of Electron and Proton Radiation in Space Based on Dose Effects]. (In Russ.)

11. Tapero K.I., Ulimov V.N., Chlenov A.M. *Radiatsionnye efekty v kremnievykh integral'nykh skhemakh kosmicheskogo primeneniya* [Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012. 304 p. (In Russ.)

12. Chumakov A.I. *Deystvie kosmicheskoy radiatsii na integral'nye skhemy* [The effect of cosmic radiation on integrated circuits]. Moscow: Radio i svyaz', 2004. 319 p. (In Russ.)

13. Sogoyan A.V. et al. *Poverkhnostnye radiatsionnye efekty v integral'nykh skhemakh* [Surface radiation effects in integrated circuits]. In: Panasyuk M.I., Novikov L.S. (Eds.). *Model' kosmosa: nauch.-inform. izd.: v 2 ch. Ch. 2. Vozdeystvie kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovanie kosmi-*

cheshkikh apparatov [Space Model: A Scientific Information Publication: in 2 parts. Part 2. Impact of the Space Environment on Spacecraft Materials and Equipment]. Moscow: KDU Publ., 2007. P. 466–493. (In Russ.)

14. Tapero K.I., Didenko S.I. *Osnovy radiatsionnoy stoykosti izdeliy elektronnoy tekhniki: radiatsionnye efekty v izdeliyakh elektronnoy tekhniki: ucheb. posobie* [Fundamentals of radiation resistance of electronic products: radiation effects in electronic products. Tutorial]. Moscow: Publishing House MISiS, 2013. 349 с. (In Russ.)

15. Pershenkov V.S., Savchenkov D.V., Bakerenkov A.S., Ulimov V.N. Conversion model of enhanced low-dose-rate sensitivity for bipolar ICS. *Russian Microelectronics*. 2010;39(2):91–99. DOI: 10.1134/S1063739710020046

Информация об авторах

Казанцев Денис Юрьевич, инженер-исследователь, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, Россия; аспирант, Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Снежинск, Челябинская область, Россия; dep5@vniitf.ru.

Пилипенко Анатолий Сергеевич, канд. физ-мат. наук, старший научный сотрудник, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, Россия; A.S.Pilipenko@vniitf.ru.

Осеев Юрий Владимирович, ведущий инженер, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская область, Россия; dep5@vniitf.ru.

Information about the authors

Denis Yu. Kazantsev, Researching engineer, Russian Federal Nuclear Centre – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia; Postgraduate student, Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia; dep5@vniitf.ru.

Anatolii S. Pilipenko, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior researcher, Russian Federal Nuclear Centre – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia; A.S.Pilipenko@vniitf.ru.

Yuri V. Oseev, Leading engineer, Russian Federal Nuclear Centre – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia; dep5@vniitf.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.06.2025

The article was submitted 18.06.2025