

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.317; 629.7

doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-9

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНЫХ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ

А. С. Ишков¹, П. А. Максимов², А. В. Селиверстов³

^{1,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

² Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

¹ishkovanton@mail.ru, ²m@pa8880.ru, ³tollik.seliverstov.03@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В рамках развития космической отрасли важным аспектом является уменьшение стоимости и сроков, а также повышение качества проведения измерений параметров электронной аппаратуры, в том числе изделий, сочетающих в себе как аналоговые, так и цифровые узлы, к которым относятся адаптивные каналы управления. Для воспроизведения свойств излучения космического пространства используются моделирующие и имитирующие установки, что сопряжено со сложностью инфраструктуры измерительных стендов, высокой стоимостью и длительностью проведения измерений, трудностями при неудовлетворительных результатах испытаний. Цель представленного исследования – разработка специализированного стенда для измерения параметров адаптивных каналов управления на основе цифровой модели исследуемого образца, воспроизводящего эффекты электронной компонентной базы, связанные с воздействием космического излучения программно-аппаратными методами для оценки устойчивости адаптивных систем управления в контролируемых условиях. *Материалы и методы.* В основу работы положена интеграция аппаратных и программных компонентов. Аппаратная часть включает систему внесения и отслеживания изменений в параметры действующих в исследуемом образце аналоговых и цифровых сигналов посредством высокоточных аналого-цифровых преобразователей и микроконтроллеров, обеспечивающих синхронный контроль параметров. В качестве источника температурных воздействий, близких к условиям космического пространства, используется термокамера. Программная часть реализована на ПЭВМ как модуль управления стендом, в состав которого включены: управляемый источник измеряемой физической величины; система внесения и отслеживания изменений в параметры действующих в исследуемом образце аналоговых и цифровых сигналов; дополнительное измерительное оборудование, имеющее возможность быть включенным в состав измерительного стенда по желанию испытателя. *Результаты.* Сформирована теоретическая основа стенда, а именно: назначение, технические возможности, структура аппаратно-программного комплекса и детальное описание его компонентов. *Вывод.* Разработанный стенд обеспечивает безопасное, гибкое и комплексное измерение параметров электронных изделий, используемых в настоящее время для повышения надежности, качества, уменьшения стоимости и длительности на проведение измерений. Его внедрение ускоряет разработку надежных систем для космических аппаратов.

Ключевые слова: адаптивные каналы управления, измерения параметров, космическое излучение, космический аппарат, термокамера, электронная компонентная база, аналого-цифровой преобразователь, цифроаналоговый преобразователь, персональная электронно-вычислительная машина

Для цитирования: Ишков А. С., Максимов П. А., Селиверстов А. В. Специализированный стенд проведения измерений параметров адаптивных каналов управления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 73–79. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-9

SPECIALISED STAND FOR MEASURING PARAMETERS OF ADAPTIVE CONTROL CHANNELS

A.S. Ishkov¹, P.A. Maksimov², A.V. Seliverstov³

^{1,3} Penza State University, Penza, Russia

² Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

¹ishkovanton@mail.ru, ²m@pa8880.ru, ³tollik.seliverstov.03@mail.ru

Abstract. *Background.* In the development of the space industry, an important aspect is to reduce the cost and time, as well as improve the quality of measurements of the parameters of electronic equipment. Including products that combine both analog and digital units, which include adaptive control channels. To reproduce the properties of radiation of outer space, modeling and simulating installations are used, which is associated with the complexity of the infrastructure of measuring stands, high cost and duration of measurements, difficulties with unsatisfactory test results. The purpose of the presented study is to develop a specialized stand for measuring the parameters of adaptive control channels based on a digital model of the sample under study, reproducing the effects of ECB associated with the impact of cosmic rays using software and hardware methods to assess the stability of adaptive control systems under controlled conditions. *Materials and methods.* The work is based on the integration of hardware and software components. The hardware part includes a system for introducing and tracking changes in the parameters of analog and digital signals operating in the test sample by means of high-precision ADCs and microcontrollers providing synchronous control of the parameters. A thermal chamber is used as a source of temperature effects close to the conditions of outer space. The software part is implemented on a PC as a module for controlling the stand, which includes: a controlled source of the measured physical quantity; a system for introducing and tracking changes in the parameters of analog and digital signals operating in the test sample; additional measuring equipment that can be included in the measuring stand at the request of the tester. *Results.* The theoretical basis of the stand has been formed, namely: the purpose, technical capabilities, structure of the hardware and software complex and a detailed description of its components. *Conclusion.* The developed stand ensures safe, flexible and comprehensive measurement of the parameters of electronic products, the methods currently used to improve reliability, quality, reduce the cost and duration of measurements. Its implementation accelerates the development of reliable systems for space vehicles.

Keywords: adaptive control channels, parameter measurements, space radiation, space vehicle, thermal chamber, electronic component base, analog-to-digital converter, digital-to-analog converter, personal electronic computer

For citation: Ishkov A.S., Maksimov P.A., Seliverstov A.V. Specialised stand for measuring parameters of adaptive control channels. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3): 73–79. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-9

Введение

Развитие космических технологий сопровождается ростом требований к надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В этой связи адаптивные каналы управления, осуществляющие контроль различных параметров систем космического аппарата (КА), требуют комплекса измерительных процедур, подтверждающих целевые характеристики и их сохранность при воздействии излучений космического пространства. Однако традиционные методы тестирования сталкиваются с проблемами высокой стоимости и длительности процессов, что замедляет разработку и определяет высокую стоимость ошибки при проектировании, которая, как правило, может быть выявлена только на самых последних этапах разработки. Особую сложность представляет тестирование гибридных аналого-цифровых схем, где взаимодействие компонентов требует синхронного контроля множества параметров.

Таким образом, актуальность создания специализированного стенда, позволяющего проводить измерения на территории завода-изготовителя РЭА до проведения испытаний с использованием моделирующих и имитирующих установок [1], обусловлена необходимостью ускорения разработки электронной компонентной базы (ЭКБ) для космических аппаратов [2].

Методы испытаний ЭКБ

Современные методы испытаний электронной компонентной базы для космических применений возможны при проведении натурного эксперимента с использованием моделирующих и имитирующих установок. Первый подход мало реализуем на практике ввиду его значительной сложности. Второй подход, обеспечивая наибольшую достоверность, требует сложной

инфраструктуры и значительных временных затрат [3]. Третий подход использует альтернативные источники излучения. Так, например, лазерные имитаторы не способны воспроизвести комплексное воздействие космического излучения [4], но при сверке с результатами испытаний на моделирующих установках в ряде случаев могут обеспечивать адекватные условия испытаний ЭКБ и РЭА.

Другим подходом являются расчетно-экспериментальные методы, в которых проводится моделирование эффектов космического излучения, что дает адекватные результаты для отдельных элементов и структур, но часто игнорирует физические процессы и комплексность влияния космического излучения на сложные электронные узлы [5].

Преимущества создания специализированных стендов, разработанных для внесения эффектов воздействия космического излучения в исследуемый образец в процессе проведения измерений, частично решают указанные проблемы за счет интеграции нескольких ключевых технологий.

Аппаратная часть стенда включает программируемые источники помех, которые искажают сигналы в аналоговых и цифровых цепях, имитируя эффекты влияния космического излучения. Так, инъекция шума посредством операционных усилителей позволяет воспроизвести влияние, вызываемое одиночными событиями (*Single Event Effects, SEE*) [6, 7]. В то же время термокамера используется для обеспечения температурного режима аналогичного диапазону, в котором функционирует КА, обеспечивая комплексное воздействие двух видов воздействия, что критически важно для оценки долговременной устойчивости компонентов.

Программная часть стенда реализует алгоритмы, вычисляющие степень изменения параметров узлов и субблоков элементов микросхем в составе канала управления для последующей передачи их в аппаратную часть, а также отслеживание текущих параметров функционирования измерительного стенда. Синхронный контроль аналоговых параметров и цифровых характеристик позволяет обеспечить комплексный анализ взаимодействия компонентов.

Структура аппаратно-программного комплекса

В ходе проведенных исследований авторами предложена структурная схема аппаратно-программного комплекса (АПК) как основы специализированного стенда измерения параметров адаптивных каналов управления, представленная на рис. 1.

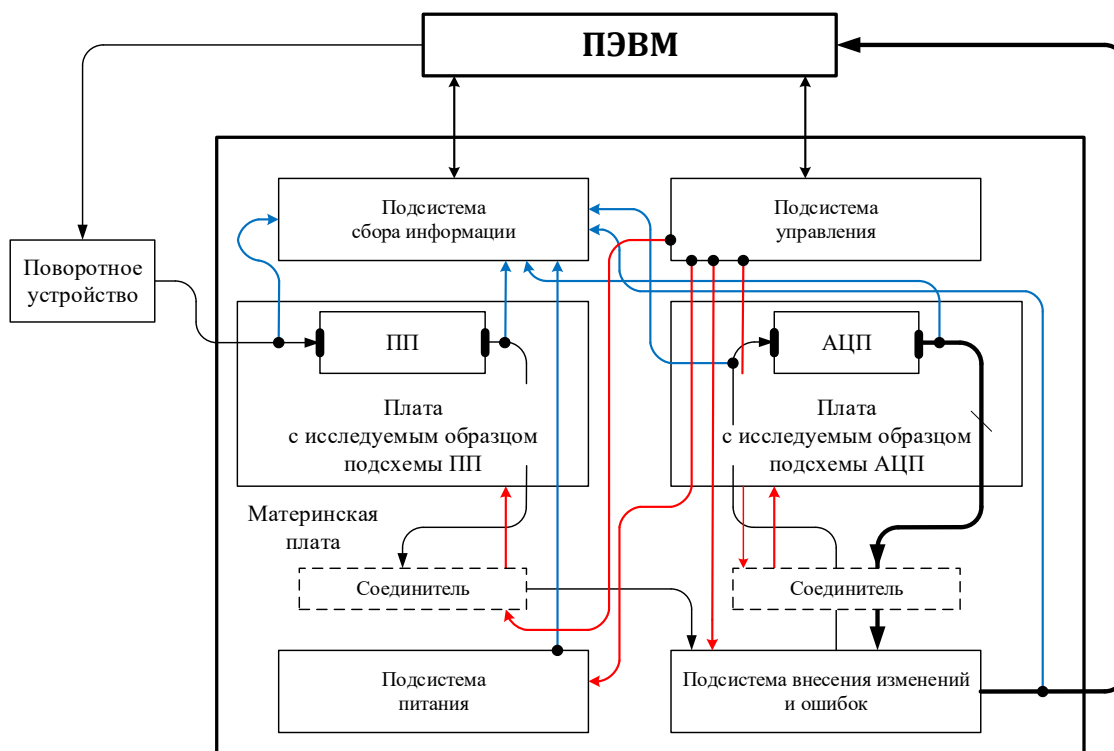


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Структура и состав АПК подразумевают его возможность быть установленным в типовые средства проведения испытаний (термокамера) с выводом отдельных информационных каналов

за пределы установки для связи с персональной электронно-вычислительной машиной (ПЭВМ) для обмена данными. Разработанный комплекс представляет из себя четыре подсистемы, расположенные на одной плате, в которую посредством соединителей устанавливаются элементы измерительного канала – датчик и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с их дискретными элементами. Связь между элементами осуществляется по плате, с измерительным оборудованием – внешними кабелями.

Разделение на подсистемы АПК подразумевает наличие четырех независимых частей в составе материнской платы, каждая из которых имеет возможность быть модифицированной:

- подсистема сбора информации осуществляет сбор и преобразование в цифровой вид напряжений сигналов, циркулирующих в измеряемой схеме, напряжений питания исследуемой схемы, а также прием данных, необходимых для внесения корректировок и поправок, связанных с влиянием космического излучения. Обмен данными с программой на ПЭВМ [8];

- подсистема управления осуществляет контроль других подсистем аппаратно-программного комплекса, сбор собственной телеметрии. Получая текущие данные от программы на ПЭВМ, где функционирует математическая модель исследуемого образца, производит управление подсистемой внесения изменений и ошибок исследуемой схемы, подсистемой сбора информации, подсистемой питания АПК;

- подсистема питания и подсистема внесения изменений и ошибок осуществляют управление питанием исследуемой схемы измерительного канала и процессом внесения ошибок в исследуемый измерительный сигнал, а также выходной цифровой код АЦП соответственно.

На основе разработанной структурной схемы АПК предложена его функциональная схема (рис. 2), которая разъясняет процессы преобразования информации отдельными его блоками и демонстрирует принцип работы АПК в целом.

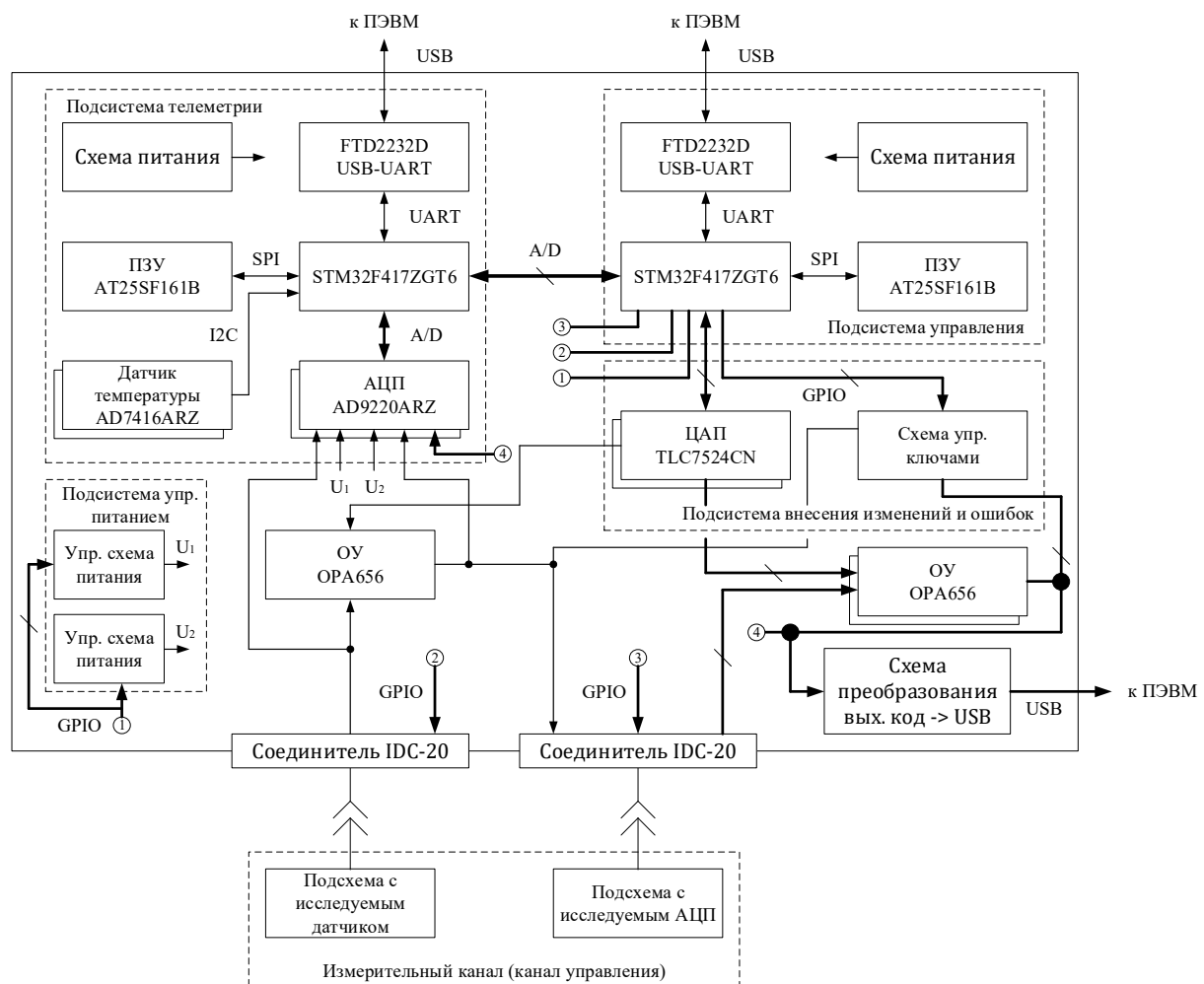


Рис. 2. Функциональная схема аппаратно-программного комплекса

С учетом типа исследуемого адаптивного канала управления реализация аппаратно-программного комплекса представляет собой схему из двух микроконтроллеров, работающих

на частоте до 160 МГц, каждый из которых связан через интерфейс USB с ПЭВМ для независимой работы и обмена данными на скорости до 12 Мбит/с. Подсистемы АПК имеют независимое питание для нивелирования влияния помех от каждой из систем на параметры исследуемой схемы.

Сбор информации о текущем значении амплитуды сигнала осуществляется с помощью нескольких АЦП, входы которых подключаются к соответствующим исследуемым линиям. Внесение изменений, связанных с постепенной деградацией характеристик элементов измерительного канала и их частей, реализовано за счет использования схем сложения/вычитания на операционных усилителях и цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). Изменения, связанные с влиянием ионов и протонов космического излучения, реализованы за счет аналоговых ключей.

Описание специализированного стенда измерения параметров адаптивных каналов управления

Специализированный стенд предназначен для одновременного воспроизведения влияния космического излучения и физического влияния заданного вида воздействия на электронные компоненты в условиях, приближенных к эксплуатационным, без использования моделирующих и имитирующих установок. Его архитектура обеспечивает комплексный контроль параметров адаптивных систем управления, таких как точность, устойчивость к помехам и температурным нагрузкам [9].

Разработанная структурная схема специализированного стенда измерения параметров адаптивных каналов управления представлена на рис. 3.

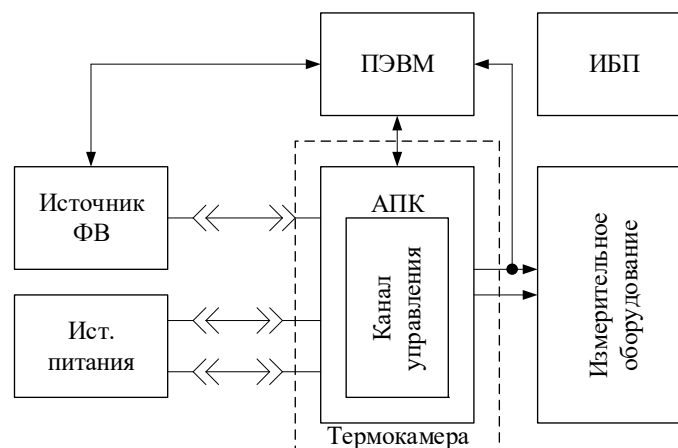


Рис. 3. Структурная схема специализированного стенда измерения параметров адаптивных каналов управления

В состав специализированного стенда входят следующие компоненты:

- 1) ПЭВМ – выполняет роль центра управления, запускает программные модели, имитирующие эффекты, вызванные космическим излучением; обрабатывает данные с измерительных модулей, управляет работой АПК [10];
- 2) источник физической величины – имитирует изменение измеряемой адаптивным каналом управления физической величины в соответствии с ранее заданной функцией;
- 3) источник питания – обеспечивает питание АПК и исследуемого образца;
- 4) источник бесперебойного питания – гарантирует бесперебойную работу стенда при колебаниях напряжения в сети (220 В), защищая критически важные компоненты;
- 5) канал управления – исследуемый объект, осуществляющий преобразование заданной аналоговой физической величины в цифровой код, поступающий в последующие системы КА;
- 6) термокамера – воспроизводит температурные режимы от -60°C до $+120^{\circ}\text{C}$, позволяя оценить влияние экстремальных условий на деградацию компонентов;
- 7) измерительное оборудование – позволяет произвести замеры степени деградации измерительного канала и включает в себя: осциллографы для анализа сигналов в реальном времени и логические анализаторы для отслеживания цифровых сбоях.

Заключение

Специализированный стенд измерения параметров адаптивных каналов управления представляет собой эффективное решение для испытаний ЭКБ и РЭА КА в условиях, приближенных к эксплуатационным. Его архитектура, сочетающая программно-управляемое аппаратное воспроизведение эффектов, связанных с воздействием космического излучения, подаваемого в процессе климатического воздействия при проведении измерений, ускоряет разработку надежных систем, снижает затраты и риски, связанные с ошибками в разрабатываемой РЭА, способными привести к неудовлетворительным результатам испытаний.

Список литературы

1. Иванов А. О., Кохановский А. Г., Кремез Г. В., Лачугин В. П. Экспериментальные исследования радиационной стойкости элементной базы бортовой аппаратуры космических аппаратов // Труды военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2013. № 641. С. 12–18. EDN: RYHUGP
2. Никифоров А. Ю., Телец В. А. Радиационная стойкость электронной компонентной базы систем специальной техники и связи // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 2–4. EDN: OOSZAN
3. Никифоров А. Ю., Скоробогатов П. К., Стриханов М. Н. [и др.]. Развитие базовой технологии прогнозирования, оценки и контроля радиационной стойкости изделий микроэлектроники // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2012. № 5. С. 18–23. EDN: PEMQXJ
4. Яненко А. В., Чумаков А. И., Печенкин А. А. [и др.]. Сравнительный анализ испытаний электронной компонентной базы на стойкость к воздействию отдельных ядерных частиц на лазерных имитаторах и ускорителях ионов // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 4–7. EDN: OOSZAX
5. Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.
6. Чуков Г. В., Елесин В. В., Бойченко Д. В. [и др.]. Эффекты одиночных событий в РЧ и СВЧ ИС // Микроволновые и телекоммуникационные технологии : 24-я Междунар. Крымская конф. Севастополь, 2014. С. 860–861. doi: 10.1109/CRMICO.2014.6959665 EDN: UFMQQP
7. Громов В. Т. Введение в радиационную физику твердого тела. Снежинск : Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007. 208 с.
8. Елесин В. В., Никифоров А. Ю., Телец В. А., Чуков Г. В. Комплекс методических, аппаратных и программных средств для автоматизированных исследований параметров полупроводниковых СВЧ ИС в условиях испытаний на радиационную стойкость // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 28–32.
9. Зебрев Г. И. Моделирование дозовых и одиночных радиационных эффектов в кремниевых микро- и нанoeлектронных структурах для целей проектирования и прогнозирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2009. 156 с.
10. Ожегин Ю. А., Никифоров А. Ю., Телец В. А. [и др.]. Направления развития системы управления качеством радиационных испытаний электронной компонентной базы // Спецтехника и связь. 2011. № 4-5. С. 59–62. EDN: OOSZFX

References

1. Ivanov A.O., Kokhanovskiy A.G., Kremez G.V., Lachugin V.P. Experimental studies of the radiation resistance of the element base of the onboard equipment of spacecraft. *Trudy voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo = Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky*. 2013;(641):12–18. (In Russ.)
2. Nikiforov A.Yu., Telets V.A. Radiation resistance of the electronic component base of special equipment and communications systems. *Spetstekhnika i svyaz' = Special equipment and communications*. 2011;(4-5):2–4. (In Russ.)
3. Nikiforov A.Yu., Skorobogatov P.K., Strikhanov M.N. et al. Development of basic technology for forecasting, evaluation and control of radiation resistance of microelectronics products. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika = News of higher educational institutions. Electronics*. 2012;(5):18–23. (In Russ.)
4. Yanenko A.V., Chumakov A.I., Pechenkin A.A. et al. Comparative analysis of tests of the electronic component base for resistance to the effects of individual nuclear particles on laser simulators and ion accelerators. *Spetstekhnika i svyaz' = Special equipment and communications*. 2011;(4-5):4–7. (In Russ.)
5. 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. (In Russ.)
6. Chukov G.V., Elesin V.V., Boychenko D.V. et al. Effects of single events in RF and microwave IC. *Mikrovolnovye i telekommunikatsionnye tekhnologii: 24-ya Mezhdunar. Krymskaya konf. Sevastopol' = Microwave and Telecommunication technologies : 24th International Crimean conference*. 2014:860–861. (In Russ.). doi: 10.1109/CRMICO.2014.6959665

7. Gromov V.T. *Vvedenie v radiatsionnyuyu fiziku tverdogo tela = Introduction to solid state radiation physics*. Snezhinsk: Izd-vo RFYaTs-VNIITF, 2007:208. (In Russ.)
8. Elesin V.V., Nikiforov A.Yu., Telets V.A., Chukov G.V. A set of methodological, hardware and software tools for automated studies of semiconductor microwave IC parameters under radiation resistance testing conditions. *Spetsstekhnika i svyaz' = Special equipment and communications*. 2011;(4-5):28–32. (In Russ.)
9. Zebrev G.I. Modeling of dose and single dose radiation effects in silicon micro- and nanoelectronic structures for design and forecasting purposes: DSc abstract. Moscow, 2009:156. (In Russ.)
10. Ozhegin Yu.A., Nikiforov A.Yu., Telets V.A. et al. Directions for the development of a quality management system for radiation testing of an electronic component base. *Spetsstekhnika i svyaz' = Special equipment and communications*. 2011;(4-5):59–62. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Сергеевич Ишков

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ishkovanton@mail.ru

Anton S. Ishkov

Candidate of technical sciences, associate professor of the sub-department of radio engineering and radio electronic system, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Павел Андреевич Максимов

инженер-программист, Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт (Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: m@pa8880.ru

Pavel A. Maksimov

Software engineer, Penza Research Electrotechnical Institute (9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Анатолий Владимирович Селиверстов

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tolik.seliverstov.03@mail.ru

Anatoly V. Seliverstov

Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 13.03.2025

Поступила после рецензирования / Revised 14.04.2025

Принята к публикации / Accepted 12.05.2025