

УДК 621.38

Мария А. Роговая¹, Денис С. Костюченко², Илья О. Лоскутов³, Анастасия В. Уланова⁴

¹ООО «ПК Аквариус»,

ул. Крылатская, 15, Москва, 121614, Россия

^{2,3,4}Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия

¹e-mail: rogovaya.m_study@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7653-9796>

²e-mail: dskos@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6700-1225>

³e-mail: iolos@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1519-0746>

⁴e-mail: AVUlanova@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7376-6339>

ВЛИЯНИЕ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СЛОЖНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СБИС

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.4.08>

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ уровней радиационной стойкости сложно-функциональных СБИС при применении операционной системы (ОС) для разработки программного обеспечения по сравнению с традиционным подходом на основе суперцикла. Представлены применяемые ОС и объекты исследований. Описаны особенности программного кода для проведения тестов функционального контроля при использовании и отсутствии ОС. Представлены алгоритмы проведения экспериментов при исследованиях на дозовые эффекты и эффекты мощности дозы. Проведены сравнения уровней радиационной стойкости к воздействию ионизирующих излучений (ИИ) по дозовым эффектам и эффектам мощности дозы при наличии и отсутствии ОС. Полученные результаты исследований к воздействию ИИ по дозовым эффектам демонстрируют, что наличие ОС может изменять уровень радиационной стойкости до ~30% как в большую, так и в меньшую сторону по сравнению с традиционным случаем при отсутствии ОС. По результатам исследований по эффектам мощности дозы сделан вывод, что применение ОС может уменьшить уровень бессбойной работы (УБР) на 43% по сравнению с УБР при отсутствии ОС. Анализ полученных результатов показывает, что на УБР влияет и тип ОС. Предложены возможные объяснения имеющихся различий в уровнях радиационной стойкости. Определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: операционная система, дозовые эффекты, эффекты мощности дозы, СБИС.

Для цитирования. РОГОВАЯ Мария А. и др. ВЛИЯНИЕ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СЛОЖНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СБИС. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 30, № 4, с. 128–136, 2023. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1554>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.4.08>.

Mariia A. Rogovaia¹, Denis S. Kostyuchenko², Ilya O. Loskutov³, Anastasia V. Ulanova⁴

¹Limited Liability Company "Aquarius",

Krylatskaya str., 15, Moscow, 121614, Russia

^{2,3,4}National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),

Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia

¹e-mail: rogovaya.m_study@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7653-9796>

²e-mail: dskos@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6700-1225>

³e-mail: iolos@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1519-0746>

⁴e-mail: AVUlanova@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7376-6339>

Operating System Influence on VLSI Radiation Resistance

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.4.08>

Abstract. The article presents a comparative analysis of radiation resistance levels of complex-functional VLSI when using an operating system (OS) for software development in comparison with the traditional

approach based on a superloop. The applied OSs and objects of the research are presented. The features of the program code for functional control tests when using and not using OS are described. Algorithms of conducting experiments in the studies of absorbed dose effects and dose rate effects are presented. Comparisons were made of radiation resistance levels to total ionizing dose (TID) effects and dose rate effects in the presence and in the absence of OS. The obtained results of studies on TID effects demonstrate that the presence of OS can change the radiation resistance level up to ~30% both up and down compared to the traditional case in the absence of OS. Based on the results of dose rate effects studies, it was concluded that the use of OS can reduce the level of fault-tolerant operation by 43% compared to the case in the absence of OS. The results also show that the type of OS also affects the fault-tolerant operation level. Possible explanations of difference in radiation resistance levels are proposed. Directions for further research are outlined.

Keywords: operating system, OS, total ionizing dose effects, dose rate effects, VLSI.

For citation: ROGOVAIA Mariia A. et al. Operating System Influence on VLSI Radiation Resistance. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 30, no. 4, p. 128–136, 2023. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1554>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.4.08>.

Введение

Один из наиболее применяемых подходов к исследованиям сложно-функциональных СБИС на радиационную стойкость включает в себя написание программы тестирования, в состав которой входят тесты наиболее критичных сложно-функциональных блоков (СФ-блоки): порты ввода-вывода, интерфейсы передачи данных, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП), память [1]. При написании программного кода чаще всего используется система с суперциклом [2, 3]. Система с суперциклом – это модель программирования СБИС, в которой все команды выполняются в теле бесконечного цикла в строго определенной линейной последовательности. С развитием технологий производства и повышением степени интеграции СБИС увеличивается количество СФ-блоков, которые необходимо тестировать во время радиационного эксперимента, что соответственно влечет к увеличению размера программного кода. Это приводит к тому, что разработка программ тестирования на основе систем с суперциклом значительно усложняется: разработка и отладка программного кода затрудняется, ухудшаются его читабельность и наглядность, увеличивается вероятность совершения программистом ошибки. Также с увеличением количества СФ-блоков, функционирование которых проверяется во время тестирования, ухудшается оптимизация программного кода.

Использование операционной системы (ОС) при написании программного кода может значительно упростить процесс его разработки. Основная роль ОС заключается в управлении системными ресурсами, чтобы удовлетворить потребность задач, которые от нее зависят, а также в обеспечении безопасности, что включает в себя ограничение доступа к системным службам, данным, областям памяти и регистрам ввода-вывода. Основными функциями, предоставляемые ОС, являются планирование задач, переключение между ними, многозадачность, управление памятью, интерфейсами, портами ввода-вывода и т.д. [4–7].

По мере роста сложности кода ОС становится эффективным инструментом для его оптимизации. Весь программный код можно разделить на задачи. Часть ОС, называемая планировщиком, отвечает за принятие решения о том, когда и какую задачу запускать. Это обеспечивает иллюзию одновременного выполнения задач за счет быстрого переключения между ними. Кроме того, большинство ОС предлагают разработчикам набор готовых функций API, позволяющие разработчикам свободно структурировать программное обеспечение для получения более организованного и понятного кода [4–7]. Вышеперечисленные функции делают написание программы тестирования более быстрым,

простым и удобным в отладке, а, следовательно, упрощается и процесс подготовки СБИС к исследованиям.

С другой стороны, необходимо проверить, как влияет применение ОС на радиационную стойкость сложно-функциональных СБИС к воздействию ионизирующих излучений (ИИ) по сравнению с традиционной структурой на основе суперцикла. Сама ОС как отдельный элемент также может являться чувствительным узлом СБИС, что в итоге может привести к изменению уровня стойкости [8]. Сбои и отказы, вызванные радиационными эффектами [9, 10], могут влиять и на задачу в составе ОС, и на саму ОС, выполняющую данную задачу, вследствие чего может нарушиться как время реакции СБИС на внешние события, так и само ее функционирование [11].

На текущий момент существует ряд работ, посвященных влиянию ОС на сечение функциональных сбоев (ФС) при воздействии одиночных ядерных частиц (ОЯЧ) [12–14]. Данные исследования указывают, что применение ОС значительно увеличивает сечение ФС. Тем не менее, вопрос о влиянии ОС на радиационную стойкость по эффектам поглощенной дозы и эффектам мощности дозы остается открытым.

1. Постановка экспериментов

Для получения сравнительных данных о влиянии ОС на уровень стойкости объектов исследования к воздействию ИИ было необходимо выбрать такую ОС, которая применима для разработки программного обеспечения широкого спектра СБИС. В качестве основной ОС для исследований была выбрана операционная система реального времени (ОСРВ) FreeRTOS ввиду ее распространенности, возможности работы с широким рядом устройств, а также ввиду удобства ее интеграции [5, 6].

Для проведения исследований были выбраны микроконтроллеры STM32F030, STM32G070, Atmega328P, PIC32MZ1024ECH100. Данные микросхемы удовлетворяют минимальным системным требованиям ОСРВ FreeRTOS: имеют от 5 Кбайт ПЗУ, от 500 байт ОЗУ и тактовую частоту 10 МГц¹. Для сравнения уровней радиационной стойкости СБИС при использовании различных ОС на микроконтроллере STM32G070 использована ОСРВ Azure RTOS ThreadX.

Программы тестов функционального контроля (ФК) были реализованы двумя способами: без использования ОС и с использованием ОС. Во время функционального контроля проводилось тестирование функциональных блоков (блок внутренней энергонезависимой памяти, блок внутренней энергозависимой памяти ОЗУ, блок встроенного АЦП), после чего происходила передача тестовых данных по интерфейсу SPI. На заданном выводе порта ввода-вывода GPIO микросхемы также проводилось переключение логического уровня.

Команды в прошивке, разработанной на основе подхода с использованием суперцикла, выполнялись последовательно в бесконечном цикле. При применении ОС были задействованы API-функции работы с задачами и очередями. Программа тестирования была разделена на две задачи, передача данных между которыми была осуществлена посредством очереди: одна из задач отвечала за проведение тестирования заданного функционального блока, а другая – за передачу тестовых данных по интерфейсу SPI.

Исследования влияния ОС на уровень стойкости микросхем к эффектам накопленной дозы проводились на рентгеновской установке при напряжении на рентгеновской трубке 45 кВ и токе 100 мкА. Во время облучения микросхемы находились в статическом режиме с периодическим проведением ФК. Значения поглощенной дозы

¹FreeRTOS FAQs. Amazon Web Services. 2022 URL: https://aws.amazon.com/freertos/faqs/?nc1=h_ls (дата обращения: 10.01.2023).

были получены в единицах, численно равные секундам, нормированные на показания детектора рентгеновского излучения.

Исследования влияния ОС на уровень стойкости микросхем к эффектам мощности дозы проводились с использованием лазерной установки. На образец подавалось импульсное лазерное воздействие, во время которого проводилось тестирование микросхемы.

2. Результаты исследований к воздействию ИИ по дозовым эффектам

Результаты исследований микросхем к воздействию ИИ по дозовым эффектам представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сводная таблица результатов исследований микросхем к воздействию ИИ по дозовым эффектам

Объект исследований	Функциональный блок	ОС	Уровень отказа функционального блока, ед.	Отличие в уровне рад. стойкости, %
STM32F030	Интерфейс SPI	Отсутствует	$7,9 \times 10^4$	Эталон
		FreeRTOS	$7,8 \times 10^4$	-1,3
	Порты ввода-вывода GPIO	Отсутствует	$1,19 \times 10^5$	Эталон
		FreeRTOS	$1,30 \times 10^5$	9
STM32G070	Flash-память	Отсутствует	$5,9 \times 10^4$	Эталон
		FreeRTOS	$7,1 \times 10^4$	20
		AzureRTOS	$7,8 \times 10^4$	32
	Интерфейс SPI; Порты ввода-вывода GPIO	Отсутствует	$1,9 \times 10^5$	Эталон
		FreeRTOS	$1,6 \times 10^5$	-16
		AzureRTOS	$1,8 \times 10^5$	-5
Atmega328P	EEPROM-память	Отсутствует	$3,7 \times 10^4$	Эталон
		FreeRTOS	$3,9 \times 10^4$	5
	Интерфейс SPI; Порты ввода-вывода GPIO	Отсутствует	$9,8 \times 10^4$	Эталон
		FreeRTOS	$9,3 \times 10^4$	-5
PIC32MZ1024 ECH100	Flash-память	Отсутствует	$5,0 \times 10^4$	Эталон
		FreeRTOS	$4,5 \times 10^4$	-10
	Интерфейс SPI; Порты ввода-вывода GPIO	Отсутствует	$9,4 \times 10^4$	Эталон
		FreeRTOS	$6,8 \times 10^4$	-28

За эталонное значение уровня отказа функционального блока принималось значение, полученное при отсутствии ОС. Функциональные отказы проявлялись в виде [9, 10]:

- Блок интерфейса SPI – отсутствие передачи тестовых данных по данному интерфейсу;
- Блок портов ввода-вывода GPIO – переключение логического состояния на противоположное на контролируемых выводах микросхемы;
- Блок внутренней энергонезависимой памяти Flash – наличие ошибок по чтению и перезаписи;
- Блок внутренней энергонезависимой памяти EEPROM – наличие ошибок по чтению и перезаписи;

- Блок внутренней энергонезависимой памяти ОЗУ – наличие ошибок по чтению и перезаписи.

На рис. 1 и рис. 2 представлены зависимости количества ошибок памяти Flash от величины накопленной дозы для микроконтроллеров STM32G070 и PIC32MZ1024ECH100 соответственно при отсутствии и наличии ОС.

По результатам исследований отличие в уровне радиационной стойкости к воздействию ИИ по дозовым эффектам при использовании и отсутствии ОС может достигать 30%.

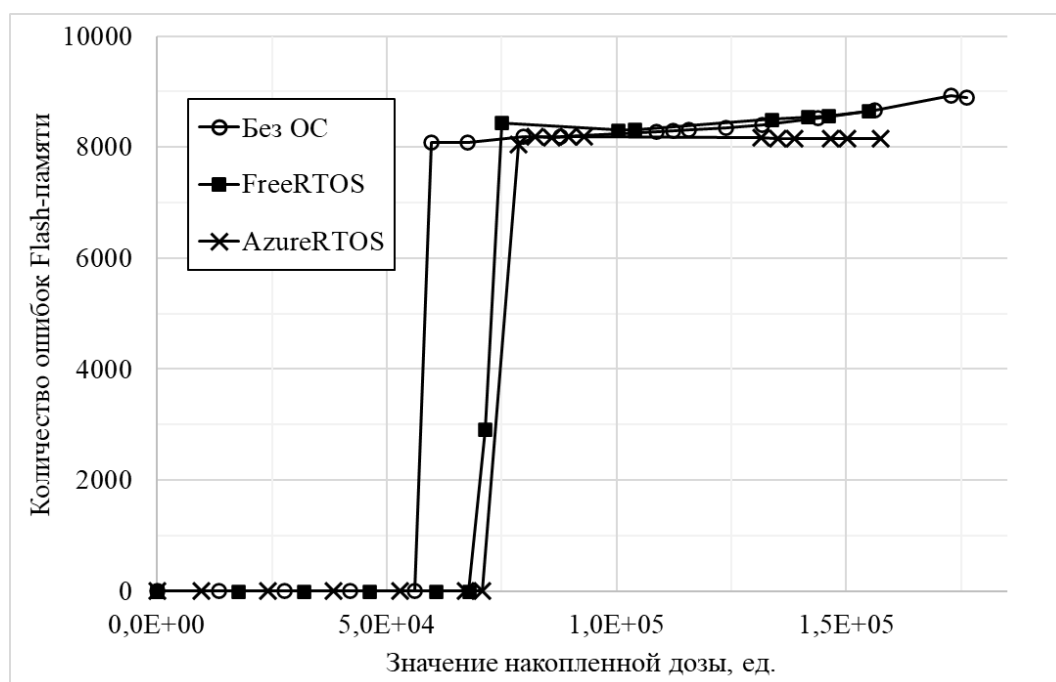


Рис. 1. Зависимость количества ошибок Flash-памяти от величины накопленной дозы для микросхемы STM32G0

Fig. 1. Dependence of Flash-memory errors on the value absorbed dose value of the STM32G0 microcircuit

3. Результаты исследований к воздействию ИИ по эффектам мощности дозы

Результаты исследований микросхемы STM32G070 к воздействию ИИ по эффектам мощности дозы представлены в табл. 2. За зависание микросхемы принималось отсутствие передачи тестовых данных по интерфейсу SPI и отсутствия меандра на выводе порта ввода-вывода GPIO микросхемы [15].

При использовании ОС также наблюдалось зависание задачи тестирования функциональных блоков, при этом задача по передачи данных по интерфейсу SPI продолжала работать исправно. Данный эффект устранялся подачей сигнала сброса.

По данным результатам исследования отличие уровня радиационной стойкости микросхемы STM32G070 к воздействию ИИ по эффектам мощности дозы при выполнении программы с ОС и без нее достигает 43%. Кроме того, данные исследования показали, что тип ОС также влияет на УБР.

Результаты исследований микросхемы Atmega328P по воздействию импульсного ионизирующего излучения представлены в табл. 3. Самопроизвольный сброс проявлялся в виде отсутствия передачи тестовой посылки по интерфейсу SPI, отсутствия меандра на

выводе порта ввода-вывода GPIO, а также переключении логического состояния в противоположное на контролируемых выводах и сопровождался резким уменьшением тока потребления.

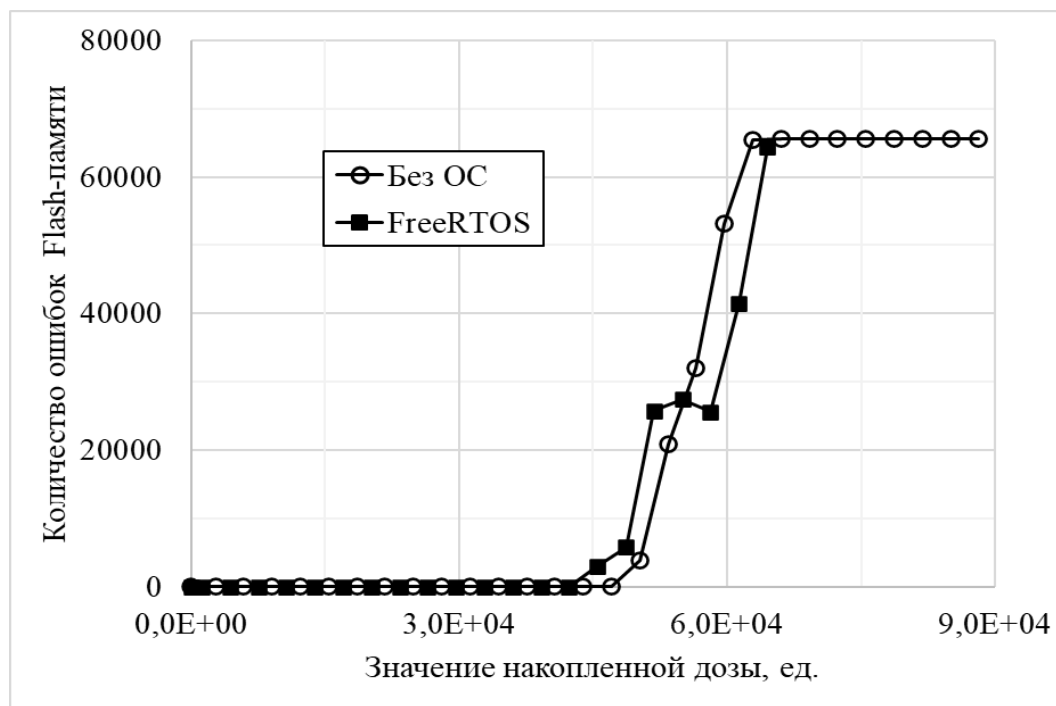


Рис. 2. Зависимость количества ошибок Flash-памяти от величины накопленной дозы для микросхемы PIC32MZ

Fig. 2. Dependence of Flash-memory errors on the value absorbed dose value of the PIC32MZ microcircuit

По данным результатам исследования отличие уровня стойкости микросхемы Atmega328P к воздействию ИИ по эффектам мощности дозы при выполнении программы с ОС и без нее не превышает 25%.

Таблица 2. Результаты исследований микросхемы STM32G0 к воздействию ИИ по эффектам мощности дозы

Режим	ОС	УБР, мкДж	Проявление сбоя	Отличие в уровне рад. стойкости, %
Тест RAM в режиме «Чтение»	Отсутствует	60	Зависание	Эталон
	FreeRTOS	48		-20
	AzureRTOS	34		-43
Тест Flash режиме «Чтение»	Отсутствует	53	Зависание	Эталон
	FreeRTOS	30		-43
	AzureRTOS	33		-38

Таблица 3. Результаты исследований микросхемы Atmega328P к воздействию ИИ по эффектам мощности дозы

Режим	ОС	УБР, мкДж	Проявление сбоя	Отличие в уровне рад. стойкости, %
Передача номера итерации по интерфейсу SPI	Отсутствует	4,9	Изменение скважности	Эталон
	FreeRTOS	3,7	Изменение скважности	-25
Тест RAM в режиме «Чтение»	Отсутствует	7,3	Сбои в ячейках памяти; Самопроизвольный сброс	Эталон
	FreeRTOS	6,2	Сбои в ячейках памяти	-15
Тест Flash в режиме «Чтение»	Отсутствует	7,3	Самопроизвольный сброс	Эталон
	FreeRTOS	7,0	Самопроизвольный сброс	-4

Заключение

На основании полученных результатов исследований можно сделать вывод, что применение ОС влияет на уровень стойкости сложно-функциональных СБИС к воздействию ИИ.

Результаты исследований микросхем к воздействию ИИ по дозовым эффектам показывают, что при применении ОС изменение уровня радиационной стойкости по сравнению с уровнем радиационной стойкости при отсутствии ОС может достигать 30% как в большую, так и в меньшую сторону.

Анализ полученных данных по уровню стойкости к воздействию ИИ по эффектам мощности дозы демонстрируют, что отличие по УБР при отсутствии и наличии ОС может составлять 43%. Тип ОС также влияет на УБР.

Данные результаты могут быть вызваны тем, что ОС для своего функционирования задействует большой объем памяти. Отказ флэш-памяти является одной из основных причин отказа микропроцессорных СБИС. В блоке флэш-памяти хранятся ядро ОС и программы функционирования. При этом сбой выполняемых программ может произойти либо из-за потери хранящейся в памяти информации, либо из-за невозможности ее перезаписи. В блоке ОЗУ значимый объем занимают стек задач и планировщик ОС. Воздействие импульсного ИИ может привести к сбою ОС, а именно неправильному функционированию задач или планировщика ОС из-за изменения состояния ячеек. В этом случае уровень стойкости изделия к эффектам мощности дозы будет меньше, чем без использования ОС.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на воспроизведение результатов на более широкой выборке типов объектов исследований, в том числе и на процессорных СБИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Некрасов, П.В. Методы и средства прогнозирования радиационной стойкости микропроцессорных СБИС: автореф. дисс. канд. техн. наук (05.13.05 - элементы и устройства вычислительной техники и

- систем управления). П.В. Некрасов; рук. работы О.А. Калашников. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 127 с.
2. Brian Amos. Hands-On RTOS with Microcontrollers: Building real-time embedded systems using FreeRTOS, STM32 MCUs, and SEGGER debug tools. Packt Publishing, 2020. – 496 p.
 3. Robert Oshana. DSP Software Development Techniques for Embedded and Real-Time Systems. Newnes, 2006. – 608 p.
 4. Seçkin Canbaz, Gokhan Erdemir. Performance analysis of real-time and general-purpose operating systems for path planning of the multi-robot systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2022, no. 12, p. 285–292. DOI: <http://dx.doi.org/10.11591/ijece.v12i1.pp285-292>.
 5. Золотарев Сергей. Операционные системы реального времени для 32-разрядных микропроцессоров. *Современная электроника*. 2006, № 7, с. 52–59. URL: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/000/000c13856414888bb758bbc790cb9f8c/200607052.pdf> (дата обращения: 10.01.2023).
 6. Бурдонов И.Б., Косачев А.С., Пономаренко В.Н. Операционные системы реального времени. М.: Препринт Института системного программирования РАН. 2006, № 14, с. 1–49. URL: https://www.ispras.ru/preprints/docs/prep_14_2006.pdf (дата обращения: 10.01.2023).
 7. Карчевский Е.М., Панкратова О.В. Лекции по операционным системам (общий курс). Казань: Казанский университет, 2011. – 255 с.
 8. Таненбаум Э., Бос Х. Современные операционные системы. 4-е изд. СПб.: Питер, 2015. – 1120 с.
 9. Чумаков А.И. и др. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание. Под ред. д-ра техн. наук, проф А.И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ, 2015 – 512 с.
 10. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. – 319 с.
 11. Rodrigues G.S. and Kastensmidt F.L. Evaluating the behavior of successive approximation algorithms under soft errors. 18th IEEE Latin American Test Symposium (LATS), Bogota, Colombia. 2017, p. 1–6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LATW.2017.7906764>.
 12. Santini T., Carro L., Wagner F. Rech, Rech P. Reliability Analysis of Operating Systems and Software Stack for Embedded Systems. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 63, no. 4, p. 2225–2232, Aug. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2015.2513384>.
 13. Loskutov I.O. et al. Investigation of Operating System Influence on Single Event Functional Interrupts Using Fault Injection and Hardware Error Detection in ARM Microcontroller. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Kazan, Russia. 2021, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SIBCON50419.2021.9438916>.
 14. Nekrasov P.V., Karakozov A.B., Bobrovskiy D.V. and Marfin V.A. Investigation of Single Event Functional Interrupts in Microcontroller with PIC17 Architecture. *15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*, Moscow, Russia. 2015, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2015.7365625>.
 15. Калашников В.Д., Титовец Д.О., Костюченко Д.С. Методические особенности и основные результаты исследований КМОП СБИС микропроцессоров и микроконтроллеров на стойкость к воздействию импульсного ионизирующего излучения. *Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук*. 2019, т. 9, № 4, с. 70–79. DOI: <http://dx.doi.org/10.25682/NIISI.2019.4.0010>. – EDN KUNKKS.

REFERENCES:

- [1] Nekrasov P.V. Methods and means of predicting the radiation resistance of microprocessor VLSI: abstract of the dissertation of Candidate of Technical Sciences (05.13.05 - elements and devices of computer technology and control systems). P.V. Nekrasov; work supervisor O.A. Kalashnikov. М.: National Research Nuclear University MEPhI, 2010. – 127 p. (in Russian).
- [2] Brian Amos. Hands-On RTOS with Microcontrollers: Building real-time embedded systems using FreeRTOS, STM32 MCUs, and SEGGER debug tools. Packt Publishing, 2020. – 496 p.
- [3] Robert Oshana. DSP Software Development Techniques for Embedded and Real-Time Systems. Newnes, 2006. – 608 p.
- [4] Seçkin Canbaz, Gokhan Erdemir. Performance analysis of real-time and general-purpose operating systems for path planning of the multi-robot systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2022, no. 12, p. 285–292. DOI: <http://dx.doi.org/10.11591/ijece.v12i1.pp285-292>.
- [5] Zolotarev Sergey. Real-time operating systems for 32-bit microprocessors. *Modern Electronics*. 2006, no. 7, p. 52–59. URL: <https://303421.selcdn.ru/soel-upload/clouds/1/iblock/000/000c13856414888bb758bbc790cb9f8c/200607052.pdf> (accessed: 10.01.2023) (in Russian).

- [6] Burdonov I.B., Kosachev A.S., Ponomarenko V.N. Real-time operating systems. M.: Preprint of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences. 2006, no. 14, p. 1–49. URL: https://www.ispras.ru/preprints/docs/prep_14_2006.pdf (accessed: 10.012023) (in Russian).
- [7] Karchevsky E.M., Pankratova O.V. Lectures on operating systems (general course). Kazan: Kazan University, 2011. – 255 p. (in Russian).
- [8] Tanenbaum E., Bos H. Modern operating systems. 4th ed. St. Petersburg: Peter, 2015. – 1120 p. (in Russian).
- [9] Chumakov A.I. Radiation resistance of electronic components: Scientific publication. Ed. By Dr. Tech. Sciences, Prof. A.I. Chumakov. M.: National Research Nuclear University MEPhI, 2015. – 512 p. (in Russian).
- [10] Chumakov A.I. Effects of Cosmic Radiation on IC. M.: Radio i Svyaz', 2004. – 319 p. (in Russian).
- [11] Rodrigues G.S. and Kastensmidt F.L. Evaluating the behavior of successive approximation algorithms under soft errors. 18th IEEE Latin American Test Symposium (LATS), Bogota, Colombia.2017, p. 1–6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LATW.2017.7906764>.
- [12] Santini T., Carro L., Wagner F. Rech, Rech P. Reliability Analysis of Operating Systems and Software Stack for Embedded Systems. IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 63, no. 4, p. 2225–2232, Aug. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2015.2513384>.
- [13] Loskutov I.O. et al. Investigation of Operating System Influence on Single Event Functional Interrupts Using Fault Injection and Hardware Error Detection in ARM Microcontroller. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Kazan, Russia. 2021, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SIBCON50419.2021.9438916>.
- [14] Nekrasov P.V., Karakozov A.B., Bobrovskiy D.V. and Marfin V.A. Investigation of Single Event Functional Interrupts in Microcontroller with PIC17 Architecture. 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Moscow, Russia. 2015, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2015.7365625>.
- [15] Kalashnikov V.D., Titovets D.O., Kostyuchenko D.S. CMOS VLSI Microprocessors and Microcontrollers to the Dose-Rate Effects Hardness Test Procedure. Proceedings of the Research Institute for System Research of the Russian Academy of Sciences. 2019, v. 9, no. 4, p. 70–79. DOI: <http://dx.doi.org/10.25682/NIISI.2019.4.0010> (in Russian). – EDN KUNKKS.

*Поступила в редакцию – 10 октября 2023 г. Окончательный вариант – 10 ноября 2023 г.
Received – 10 October, 2023. The final version – 10 November, 2023.*