

ЗАЩИТА ОТ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАРУБЕЖНЫХ МИКРОКОНТРОЛЛЕРАХ

А.В. Шпинев, А.Н. Потапов

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация: С расширением космической деятельности и увеличением сложности миссий на первый план выходит задача обеспечения бесперебойной работы бортовой электроники в условиях агрессивной радиационной среды космоса. Зарубежные производители микроэлектроники, обладая развитой технологической базой и многолетним опытом, предлагают ряд специализированных решений – радиационно-стойких микроконтроллеров, способных выдерживать воздействие ионизирующего излучения, тяжелых заряженных частиц и одиночных сбоев.

Цель данной статьи – провести обзор ключевых зарубежных микроконтроллеров, предназначенных для работы в космическом пространстве, проанализировать их архитектурные особенности, радиационные характеристики и области применения. Отдельное внимание уделяется сравнению подходов к обеспечению радиационной стойкости у ведущих зарубежных компаний и их отечественных аналогов, что позволяет выявить конкурентные преимущества и потенциальные точки роста для национальной микроэлектроники.

Ключевые слова: зарубежные микроконтроллеры, радиационная стойкость, космическое излучение, Rad-Hard электроника, отказоустойчивость, ионизирующее излучение, Single Event Latchup (SEL), Total Ionizing Dose (TID), обзор микроконтроллеров.

PROTECTION FROM COSMIC RADIATION IN FOREIGN MICROCONTROLLERS

A.V. Spinev, A.N. Potapov

Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov

Abstract. With the expansion of space activities and the increasing complexity of missions, the task of ensuring the smooth operation of on-board electronics in the aggressive radiation environment of space is coming to the fore. Foreign microelectronics manufacturers, with a well-developed technological base and many years of experience, offer a number of specialized solutions - radiation-resistant microcontrollers capable of withstanding ionizing radiation, heavy charged particles and single failures.

The purpose of this article is to review the key foreign microcontrollers designed to operate in outer space, to analyze their architectural features, radiation characteristics and applications. Special attention is paid to comparing approaches to radiation resistance from leading foreign companies and their domestic counterparts, which makes it possible to identify competitive advantages and potential growth points for the national microelectronics industry.

Keywords: foreign microcontrollers, radiation resistance, cosmic radiation, Rad-Hard electronics, fault tolerance, ionizing radiation, Single Event Latchup (SEL), Total Ionizing Dose (TID), microcontroller overview.

Существующие зарубежные микроконтроллеры.

Микроконтроллер Microchip ATmegaS64M1 AVR обеспечивает улучшенную защиту от излучения, расширенный температурный диапазон и повышенную надежность для космических и аэрокосмических применений.

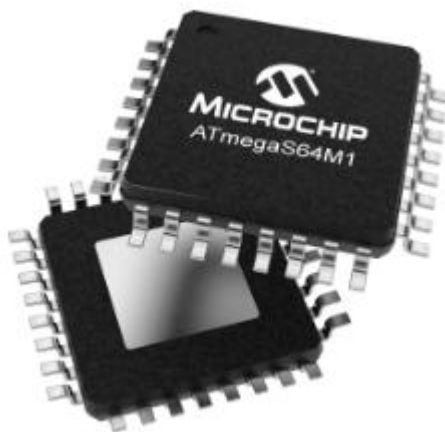


Рисунок 1 – микроконтроллер ATmegaS64M1

Недавно компания Microchip представила свой новый радиационно-стойкий микроконтроллер ATmegaS64M1. Этот MCU (микроконтроллер) предлагается в двух типах корпусов (см. рисунок ниже). Один из корпусов, предназначенный для применения в аэрокосмической промышленности, представляет собой тонкий четырехгранный плоский пластиковый корпус с 32

выводами (TQFP). Другой тип упаковки – рекламируемая радиационно-стойкая упаковка, предназначенная для использования в космической среде, – герметична и поставляется в четырехслойной керамической упаковке с 32 выводами (CQFP).

ATmegaS64M1 – это радиационно-стойкая версия популярного 8-разрядного AVR-микроконтроллера Microchip ATmega64M1.

Этот высокопроизводительный 8-разрядный микроконтроллер на базе AVR RISC с низким энергопотреблением сочетает в себе 64 КБАЙТ флэш-памяти ISP с возможностью чтения во время записи, 2 КБАЙТ EEPROM, 4 КБАЙТ SRAM, 27 линий ввода-вывода общего назначения, 32 рабочих регистра общего назначения, один регулятор мощности двигателя, два гибких таймера /счетчики с режимами сравнения и ШИМ, один UART с HW LIN, 11-канальный 10-разрядный аналого-цифровой преобразователь с двумя входными каскадами дифференциального программируемого усиления, 10-разрядный цифроаналоговый преобразователь, программируемый сторожевой таймер со встроенным индивидуальным генератором, последовательный порт SPI, система отладки на кристалле, и четыре программно выбираемых режима энергосбережения.

Благодаря выполнению мощных команд за один такт устройство достигает производительности, приближающейся к 1 МБИТ/с на МГц, что позволяет сбалансировать энергопотребление и скорость обработки. Микроконтроллер ATmegaS64M1 с контроллером CAN, контроллером каскада питания, АЦП, ЦАП и аналоговыми компараторами является отличным выбором для многих наиболее распространенных космических приложений, которые обычно требуют небольших габаритов и низкой мощности. Устройство работает в диапазоне 3-3,6 вольт.

Эта версия продукта, предназначенная для использования в помещениях, включает в себя керамическую и герметичную упаковки, расширенный диапазон температур - от 55 до 125 °C, увеличенный расход, эквивалентный классу QML-V или QML-Q space. Радиационные характеристики ATmegaS64M1: SEL LET > 60 МэВ/см²/мг (при 125°C) и TID до 30 Крад (Si)[1].

К числу лучших продуктов VORAGO, предназначенных для применения в космосе, относятся следующие.

Микроконтроллер VA41630 (производительность M4): VA41630 - это защищенный от радиации микроконтроллер Arm® Cortex®-M4, обеспечивающий высокопроизводительную обработку данных с

интегрированными отказоустойчивыми функциями. Разработанный специально для обеспечения надежности космического уровня, он поддерживает передовые системы управления, авионику и критически важные вычислительные системы, где важна устойчивость к воздействию агрессивных радиационных сред.



Рисунок 2 – микроконтроллер VA41630

Микроконтроллер VA10805 (маломощный M0): Микроконтроллер VA10805 – это микроконтроллер Arm® Cortex®-M0 космического класса, защищенный от радиации, разработанный для маломощных и высоконадежных приложений, таких как спутниковые подсистемы, системы управления полезной нагрузкой и телеметрии. Он обеспечивает исключительную энергоэффективность и при этом выдерживает экстремальные радиационные условия[2].

Gaisler

GR740 - защищенный от радиации четырехъядерный микропроцессор LEON4FT, часто используемый в одноплатных компьютерах для космических полетов.



Рисунок 3 – микроконтроллер GR740

Устройство GR740 представляет собой радиационно-стойкую систему на кристалле, оснащенную четырехъядерным отказоустойчивым процессором LEON4 SPARC V8, восьмипортовым маршрутизатором SpaceWire, интерфейсом инициатора/получателя PCI, интерфейсами CAN 2.0 и интерфейсами Ethernet 10/100/1000 Мбит.

GR740 был разработан Европейским космическим агентством как микропроцессор нового поколения (NGMP).

Основные технические характеристики:

1. Отказоустойчивый четырехъядерный целочисленный модуль LEON4 SPARC V8 с 7-ступенчатым конвейером, 8 окнами регистров, инструкциями размером 4x4 КБ и кэшами данных размером 4x4 КБ.
2. Модули с плавающей запятой двойной точности IEEE-754.
3. Кэш-память 2-го уровня объемом 2 МБ.
4. 64-разрядный интерфейс PC100 SDRAM с интерфейсом Reed-Solomon.
5. EDAC8/16-разрядный интерфейс PROM/ввода-вывода с EDAC в 8-разрядном режиме PROM.
6. Маршрутизатор SpaceWire с восемью каналами SpaceWire.
7. 2 интерфейса Ethernet 10/100/1000 Мбит/с.
8. Интерфейс инициатора/получателя PCI.
9. Интерфейс MIL-STD-1553B.
10. 2 интерфейса контроллера CAN 2.0.
11. 2x UART, SPI, таймеры и сторожевой таймер, 16+ 22-контактный GPIO.
12. Блоки управления процессором и памятью ввода-вывода.
13. Многопроцессорный контроллер прерываний с поддержкой асимметричной и симметричной многопроцессорной обработки.
14. Контроллер SpaceWire TDP и поддержка синхронизации по времени.

GR716B - Защищенный от радиации микроконтроллер с отказоустойчивым процессором LEON3FT SPARC V8.

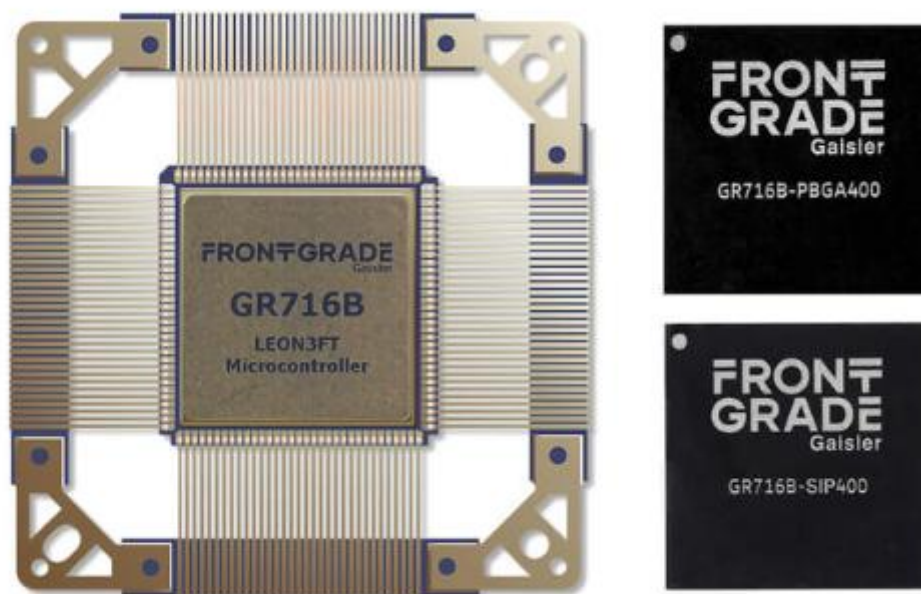


Рисунок 4 – микроконтроллер GR716B

GR716B – это защищенный от радиации микроконтроллер, оснащенный отказоустойчивым процессором LEON3 SPARC V8. Основанный на конструкции GR716A, GR716B был разработан для обеспечения более высокой вычислительной производительности и отличных коммуникационных интерфейсов.

GR716B основан на процессоре LEON3FT и двух ускорителях реального времени (RTA). Он оснащен встроенной оперативной памятью объемом 192 КБАЙТ, а также отказоустойчивыми контроллерами памяти, обеспечивающими доступ к памяти вне чипа.

Список интерфейсов ввода-вывода включает маршрутизатор SpaceWire, Ethernet, MIL-STD-1553B, CAN, PacketWire, программируемый ШИМ-интерфейс, SPI с протоколами SPI-for-Space, UART, I2C, GPIO.

Аналоговые функции включают в себя радиационно-стойкие сердечники, такие как ЦАП и АЦП, аналоговые компараторы, прецизионный источник опорного напряжения, PLL и все активные компоненты кварцевого генератора (ХО).

С системной точки зрения, GR716B обеспечивает возможность определения напряжения в сети для корректировки встроенного регулятора напряжения для приложений с низким энергопотреблением. LEON3 обеспечивает выполнение команд в течение одного цикла и выборку данных из

тесно связанной памяти. Детерминированность выполнения обеспечивается детерминированным временем выполнения команд и фиксированной задержкой прерывания.

Отказоустойчивый процессор LEON3FT SPARC версии 8.

Расширение LEON-REX с 16-разрядными инструкциями: улучшенная плотность кода.

Конвейерный модуль с плавающей запятой двойной точности IEEE-754.

Блоки защиты памяти.

Детерминированное выполнение программного обеспечения: несколько ненавязчивых шин, фиксированная задержка прерывания, архитектура без использования кэша.

2-кратный ускоритель реального времени (RTA).

Позволяет разгрузить основную часть LEON3 от сложных задач реального времени.

Встроенная оперативная память объемом 192 КБАЙТ (защищена EDAC).

Внешняя 8-разрядная память PROM/SRAM с защитой EDAC.

SPI-память защищена EDAC и резервированием двойной памяти.

Супервизор ПЛИС для программирования и очистки Xilinx Virtex5 и Kintex UltraScale.

Программируемый ШИМ-интерфейс с аналогово-цифровым регулированием напряжения и поддержкой контура управления двигателем.

Встроенное загрузочное ПЗУ для низкоуровневой инициализации и дополнительного самотестирования, ожидания и загрузки приложений.

Поддержка удаленной загрузки через SpaceWire RMAP, CANopen, SPI slave, UART

Контроллеры DMA с поддержкой команд if-else.

Таймеры со сторожевым таймером

Интерфейсы:

- 2-портовый маршрутизатор SpaceWire с поддержкой временного распределения;
- LVDS с расширенной поддержкой синфазного режима, холодного резервирования и отказоустойчивости;
- Ethernet 10/100 Мбит/с;
- интерфейс MIL-STD-1553B;

- интерфейс контроллера CAN FD с поддержкой CANopen для удаленной загрузки;
- PacketWire с поддержкой CRC-ускорения;
- программируемый усовершенствованный ШИМ с поддержкой аналого-цифрового контура управления напряжением;
- SPI с протоколами SPI-for-Space;
- UARTs, I2C, GPIO;
- комбинированные входы и выходы общего назначения.

Встроенные аналоговые функции:

- 4-кратный АЦП: разрешение 11 бит, 4 различных или 8 отдельных каналов;
- 4xDAC: 12 бит, 3 Мбит/с, генерация цифрового сигнала со скоростью нарастания до 25 МС/с;
- 8-кратный ЦАП: 24-разрядный $\Delta\Sigma$, частота до 25 МГц;
- 20-кратный быстродействующий аналоговый компаратор;
- PLL;
- кварцевый генератор с внешним XTAL;
- высокоточный эталонный выход 1,9 В;
- датчики напряжения 1,8 В и 3,3 В;
- приемопередатчики LVDS;
- датчик температуры.

Поддержка памяти:

- Встроенная оперативная память с защитой EDAC емкостью 192 Кбайт.
- Встроенное ПЗУ с загрузчиком для инициализации и удаленного доступа.
- Выделенный интерфейс памяти SPI с возможностью загрузки ПЗУ.
- 8-разрядный интерфейс ввода-вывода SRAM/ROM с поддержкой до 16 Мб ПЗУ и 32 мб SRAM.
- Очиститель с программируемой скоростью очистки для всех встроенных и внешних модулей памяти PROM/SRAM и SPI.
- Резервная загрузочная память (PROM/SRAM/SPI/NVRAM).
- Контейнер прикладного программного обеспечения для проверки целостности программного обеспечения с помощью CRC.
- Загрузка из внутренней памяти SRAM, внешней памяти PROM/FLASH/SRAM/SPI [3].

Сравнение отечественных и зарубежных микроконтроллеров.

Преимущества отечественных производителей.

Несомненным преимуществом для покупателей является локализация производства, которая снижает зависимость от внешних поставок. Российские предприятия, включая АО «НИИПП», «Группа Кремний Эл» и «ДжиЭс-Нанотех», обеспечивают полный цикл корпусирования микросхем внутри страны. Стратегия сокращает логистические издержки и минимизирует риски срывов поставок из-за санкций. В 2023 году «Микрон» наладил выпуск чипов для банковских карт, полностью отказавшись от импортных аналогов, что только подтверждает потенциал локальных мощностей.

Дополнительно усиливает развитие отрасли государственная поддержка. Налоговые льготы для дизайн-центров предполагают дальнейшее снижение страховых взносов и налога на прибыль. Программа Минпромторга до 2024 года выделила 3.6 миллиарда долларов на строительство фабрик с техпроцессом 28 нм. Дополнительные субсидии покрывают до 50% затрат на НИОКР для компаний, разрабатывающих отечественные аналоги импортных компонентов. Меры создают основу для технологического рывка.

Отечественные производители фокусируются на специфических потребностях рынка, где глобальные игроки менее активны. Разработанные для применения в оборонной промышленности и космической отрасли, микросхемы обладают устойчивостью к радиации, выдерживают резкие перепады температур и полностью отвечают требованиям безопасности. Например:

Процессоры «Эльбрус» и «Байкал» используют в системах управления критической инфраструктурой.

Радиационно-защищенные чипы от «НИИПП» применяют в спутниках серии «Глонасс».

Российские предприятия выпускают ограниченные партии компонентов под индивидуальные заказы, что на данный момент недоступно крупным зарубежным производителям.

Таким образом, гибкость производства становится конкурентным преимуществом. В отличие от глобальных корпораций, выпускающих стандартизированную продукцию, российские компании адаптируют решения под узкие задачи. Малые предприятия активно сотрудничают с научными институтами, создавая специализированные микросхемы, включая СВЧ-компоненты для радиолокационных систем. Подобный подход позволяет

закрывать ниши, которые остаются вне зоны влияния международных гигантов и выйти из периферии внимания как потребителей, так и многих заказчиков.

Недостатки отечественных производителей.

Российские микросхемы надежны, их можно использовать в экстремальных условиях, но их производство все еще сталкивается с трудностями, которые мешают выйти на уровень глобальной конкуренции.

Основные мощности российских заводов работают на устаревших технологиях. И пока мировые лидеры выпускают микросхемы с элементами размером 5-7 нанометров, отечественные предприятия в основном используют нормы 90-130 нанометров. Такое отставание создает значительные препятствия для создания компактных и энергоэффективных решений, необходимых для современных спутников и систем вооружения.

И даже в стратегических проектах производители не могут полностью отказаться от зарубежных компонентов. Кремниевые подложки для радиационно-стойких микросхем, а также оборудование для их производства и иные критически важные материалы до сих пор закупают за границей. Санкции увеличивают сроки поставок и повышают себестоимость, что срывает планы по выполнению государственных заказов.

Кроме того, отрасль остро испытывает дефицит специалистов. Молодые инженеры чаще выбирают IT-сферу или уезжают работать за рубеж, в итоге предприятия остаются без достаточного числа квалифицированных кадров. Разработка перспективных технологий вроде микропроцессоров для автономных систем на базе искусственного интеллекта замедляется.

Объемы вложений в исследования и разработки остаются низкими. Российские компании тратят на R&D около 8% выручки, тогда как зарубежные конкуренты инвестируют 15-20%. Нехватка средств увеличивает сроки внедрения новых решений и, соответственно, ограничивает их совместимость с современным программным обеспечением.

Преимущества зарубежных производителей.

Ограничения российских производителей ярче высвечивают сильные стороны зарубежных компаний, которые десятилетиями формировали экосистему, позволяющую доминировать на рынке микроэлектроники.

Ведущие зарубежные производители вроде TSMC, Intel и Samsung, ежегодно сокращают размер транзисторов и доводят их до рекордных 3-2 нм. Итог таких разработок – микросхемы с рекордной производительностью и минимальным энергопотреблением. Именно эти чипы стали основой для

искусственного интеллекта в системах спутниковой навигации и автономного вооружения.

Кроме того, иностранные компании контролируют все этапы создания продукции – от разработки до массового выпуска. Они опираются на сеть специализированных поставщиков (ASML для литографии, Applied Materials для материалов) и у них есть собственные логистические хабы, обеспечивающие бесперебойные поставки даже в условиях кризисов.

Ежегодные бюджеты на R&D у лидеров рынка превышают \$10 млрд (TSMC – \$11 млрд, Intel – \$20 млрд по данным на 2023 год), и это позволяет им привлекать лучших инженеров и быстро внедрять прорывные технологии. Например:

NVIDIA использует гибридные архитектуры для военных нейросетей; европейские стартапы создают радиационно-стойкие чипы для лунных миссий за 2-3 года.

Недостатки зарубежных производителей.

Доминирование зарубежных производителей на рынке микроэлектроники не отменяет их уязвимостей, которые становятся очевидными в условиях глобальных кризисов и меняющихся политических реалий.

Конфликты между крупными игроками, например, США и Китаем, напрямую влияют на отрасль. В 2023 году ограничения на экспорт высокотехнологичного оборудования в КНР привели к приостановке строительства заводов TSMC в провинции Цзянсу, что нарушило планы по выпуску чипов для электромобилей и телекоммуникационных систем.

Другой момент – даже лидеры рынка не могут полностью контролировать поставки критически важных ресурсов. Более 60% редкоземельных металлов для производства микросхем добывается в Китае, а переработка сосредоточена в Малайзии. Сбои в этих регионах, как это произошло во время пандемии, парализуют заводы в Европе и США.

Основное различие между отечественными и зарубежными микроконтроллерами с защитой от космического излучения заключается в их конструкторских подходах, технологиях производства и технических характеристиках применения. Отечественные решения ориентированы на максимальную надежность для оборонной и космической промышленности, в то время как зарубежные решения (хотя и имеют аналогичные решения) часто используются в более широком спектре промышленных и коммерческих применений.

Технологии и подходы к защите.

Радиационно-стойкая конструкция (по технологии Radhart). Отечественные компании, такие как Миландер и НИИЭТ, используют специальные технологические процессы с использованием специальных материалов и конструкторских решений (например, технология кремний-на-изоляторе) для повышения радиационной стойкости на уровне самого полупроводникового кристалла. Зарубежные производители (например, BAE Systems, Texas Instruments) также предлагают аналогичные решения, но они могут быть более дорогими и не всегда доступны для покупки.

Резервирование цепи (по проекту Радхарта). Многие иностранные компании, включая VORAGO Technologies, используют резервирование на уровне схемотехники, такое как тройное модульное резервирование (TMR), для обеспечения работоспособности даже в случае единичных отказов. Такой подход также активно используется в отечественных разработках, но чаще в сочетании с радиационно-стойким технологическим процессом.

Сопротивление блокировке тиристора (SEL). RFC могут вызывать блокировку тиристора в КМОП-схемах, что приводит к короткому замыканию и выходу из строя микросхемы. Отечественные микроконтроллеры часто используют технологические и схемотехнические методы для предотвращения этого эффекта.

Назначение и область применения.

Оборонная и космическая промышленность. Отечественные микроконтроллеры с радиочастотной защитой в первую очередь предназначены для использования в космических кораблях, военной технике и ядерной энергетике, где надежность является критическим фактором.

Широкий спектр применения. Зарубежные радиационно-стойкие микрочипы также активно используются в космической и военной сферах, но наличие коммерческих решений позволяет использовать их в более широком спектре промышленных задач.

Возможности проектирования и обеспечения доступности. Закрытая архитектура. Отечественные микроконтроллеры часто имеют особую закрытую архитектуру, которая может затруднить настройку программного обеспечения, но обеспечивает высокий уровень безопасности и контроля.

Открытая архитектура. Иностранные микроконтроллеры часто используют открытые архитектуры, такие как ARM, что упрощает разработку

программного обеспечения, но может вызвать проблемы с обеспечением информационной безопасности.

Сложность импорта. Отечественные производители имеют полный контроль над производственной цепочкой и цепочкой поставок, что гарантирует независимость от внешних факторов. Использование иностранных микроконтроллеров может быть ограничено санкциями или другими геополитическими факторами [4].

Список литературы

1. Gaisler. Rad-Hard Microcontrollers – URL: <https://www.gaisler.com/secondary-product-category/rad-hard-microcontrollers>.
2. Vorago Technologies. ARM Cortex-M4 Microcontrollers. – URL: <https://www.voragotech.com/products/microcontrollers/arm-cortex-m4-family/va41630>.
3. Microchip. ATmegaS64M1 Microcontroller. – URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/atmegas64m1>.
4. Сравнение отечественных и зарубежных производителей радиоэлектронных компонентов // EICOM. – 2023. – URL: <https://eicom.ru/news/sravnenie-otechestvennyh-i-zarubezhnyh-proizvoditeley-radioelektronnyh-komponentov>.

References

1. Gaisler. Rad-Hard Microcontrollers. – URL: <https://www.gaisler.com/secondary-product-category/rad-hard-microcontrollers>.
2. Vorago Technologies. ARM Cortex-M4 Microcontrollers. – URL: <https://www.voragotech.com/products/microcontrollers/arm-cortex-m4-family/va41630>.
3. Microchip. ATmegaS64M1 Microcontroller. – URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/atmegas64m1>.
4. Comparison of domestic and foreign manufacturers of radio electronic components // EICOM. – 2023. – URL: <https://eicom.ru/news/sravnenie-otechestvennyh-i-zarubezhnyh-proizvoditeley-radioelektronnyh-komponentov>.