

automation systems (smart homes), and multimedia devices. It is concluded that microcontrollers are the technological foundation of the modern intelligent household environment, and their further development is aimed at creating fully connected, adaptive, and autonomous ecosystems of home devices.

Keywords: microcontroller, household appliances, smart home, Internet of Things (IoT), embedded systems, peripheral devices, ARM Cortex, energy efficiency, home automation, sensors, actuators.

Об авторе:

МИНБАЕВ Айдар Марселевич – студент бакалавриата, КНИТУ-КАИ «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева», Казань. E-mail: ajdarminbaev2@gmail.ru

About the author:

MINBAEV Aidar Marselevich – Undergraduate Student, KNRTU-KAI "Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev", Kazan. E-mail: ajdarminbaev2@gmail.ru

УДК 004

ОБЗОР ПРОМЫШЛЕННЫХ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ В РОССИИ

А.М. Минбаев

© Минбаев А.М., 2026

Аннотация. В статье представлен обзор современных отечественных и доступных зарубежных микроконтроллеров, ориентированных на применение в промышленных системах в условиях импортозамещения. Рассмотрены архитектурные особенности, технические характеристики и периферийные возможности микроконтроллеров, производимых в России и дружественных странах. Особое внимание уделено вопросам совместимости, экосистемы разработки, наличия документации и готовности к серийному применению в различных отраслях промышленности – от автоматизации технологических процессов до энергетики и транспортных систем. Сделан вывод о текущем состоянии рынка, ключевых игроках и перспективных направлениях развития отечественной компонентной базы в сегменте промышленных микроконтроллеров.

Ключевые слова: микроконтроллер, промышленная автоматизация, импортозамещение, отечественная электронная компонентная база,

ARM Cortex, RISC-V, периферийные интерфейсы, реальное время, отказоустойчивость, экосистема разработки.

Современная промышленность немыслима без широкого применения микроконтроллеров (МК), которые являются «мозгом» систем управления, сбора данных, мониторинга и автоматизации. Исторически сложилось, что на данном рынке доминировали зарубежные производители, такие как STMicroelectronics, NXP, Texas Instruments, Microchip Technology и др. Однако геополитические изменения и санкционные ограничения актуализировали задачу импортозамещения электронной компонентной базы (ЭКБ) в России.

Переход на отечественные решения сопряжен с рядом вызовов: необходимостью обеспечения функциональной и по возможности pin-to-pin совместимости, наличием полноценной экосистемы разработки (сред, компиляторов, отладчиков, библиотек), соответствием жестким промышленным требованиям по надежности, температурному диапазону, помехоустойчивости и долгосрочной доступности компонентов [1].

Данная статья ставит целью систематизировать информацию о промышленных МК, пригодных для решения задач импортозамещения в России, оценить их текущие возможности и ограничения, а также обозначить перспективные направления развития.

1. Критерии выбора промышленного МК в условиях импортозамещения.

При выборе МК для промышленного применения в новых условиях ключевыми становятся следующие критерии:

1) происхождение и доступность: производство на территории России или дружественных стран, отсутствие санкционных рисков для поставок;

2) технические характеристики: соответствие требованиям конкретной задачи по производительности (частоте, разрядности ядра), объему памяти, набору периферии (аналого-цифровому преобразователю (АЦП), цифро-аналоговому преобразователю (ЦАП), таймерам, коммуникационным интерфейсам);

3) промышленное исполнение: расширенный температурный диапазон (как правило, $-40...+85$ °C или $-40...+105$ °C), повышенная помехоустойчивость, защита от электростатических разрядов (ESD);

4) экосистема и поддержка: наличие и качество технической документации, средств разработки (IDE, компиляторов с поддержкой языка C/C++), отладочных инструментов (программаторов, отладчиков), драйверов и middleware (например, стеков промышленных сетей, RTOS);

5) совместимость: уровень совместимости с распространенными зарубежными аналогами (архитектурный, программный, аппаратный) для упрощения миграции существующих проектов;

б) надежность и долгосрочность: гарантии поставок, планируемый срок производства, наличие квалифицированных инженерных и технических поддержек.

2. Обзор архитектур и производителей.

2.1. Отечественные разработки на ядре ARM Cortex-M.

Ряд российских компаний предлагает МК на лицензионных ядрах ARM Cortex-M, что обеспечивает высокую степень программной совместимости с мировым парком.

Микроконтроллеры серии «Миландр» (АО «ПСК Миландр», один из наиболее известных отечественных производителей) на ядрах Cortex-M0, M3, M4 (например, K1986BE92QI, K1986BE1TQI) обладают богатой периферией (АЦП, ЦАП, USB, CAN, Ethernet) и широко применяются в промышленной автоматике, измерительной технике. Имеется развитая экосистема, включающая собственные и сторонние средства разработки [2].

Микроконтроллеры серии «Элвис» (ЗАО «Элвис») разрабатываются и производятся в России. Предлагаются МК на ядрах Cortex-M0, M3, M4 (например, ELVEES M7C), которые обеспечивают высоконадежные применения, в том числе в условиях повышенных требований к радиационной стойкости. Активно развивается поддержка в популярных средах (Keil, IAR).

Микроконтроллеры серии «КМ211» (АО «НПЦ «ЭЛВИС») – это 32-разрядные МК на ядре Cortex-M3. Они создаются для применения в системах управления, телеметрии, медицинском оборудовании [3].

2.2. Отечественные и совместные разработки на архитектуре RISC-V.

Архитектура RISC-V, открытая и свободная от лицензионных ограничений, рассматривается как стратегическое направление для импортозамещения.

Микроконтроллеры серии «Синквр» (АО «НИИЭТ») – это линейка 32-битных промышленных МК на ядре собственной разработки, совместимом с RISC-V. Предназначены для встраиваемых систем реального времени. Поддерживают CAN, Ethernet, USB.

В совместных проектах ведется активная работа по созданию и внедрению отечественных процессорных ядер на базе RISC-V (например, проект «Скиф»). Ряд компаний анонсирует будущие продукты на этой базе [4].

2.3. Микроконтроллеры от производителей дружественных стран.

Для расширения выбора и снижения рисков рассматриваются МК от производителей из стран, не присоединившихся к санкционному режиму.

Производители из Юго-Восточной Азии, в частности некоторые компании из Китая и Тайваня, предлагают промышленные МК на ядрах ARM Cortex-M (например, GigaDevice, Nuvoton). Их доступность и политика поставок требуют отдельного анализа для каждого проекта.

Совместные предприятия предполагают создание производств на территории России или ЕАЭС для выпуска МК по лицензии или собственным разработкам.

3. Сравнительный анализ возможностей МК (таблица).

Сравнительные характеристики
некоторых промышленных МК для импортозамещения

Производитель / серия МК	Архитектура ядра	Тактовая частота, МГц	Флеш / ОЗУ, Кб	Ключевая периферия	Примечания
Миландр K1986BE92Q1	ARM Cortex-M3	72	512/64	2 x CAN, USB, 2 x UART, SPI, I ² C, 2 x ADC, DAC	Отечественный аналог STM32F103. Активная экосистема
Элвис M7C	ARM Cortex-M7	До 400	До 2 000/512	Ethernet, CAN-FD, USB HS/FS, 3 x ADC, графический ускоритель	Высокая производительность для сложных задач человеко-машинного интерфейса (ЧМИ)
НИИЭТ Синквр-М	RISC-V (совместимое)	80	128/32	2 x CAN, 2 x UART, SPI, I ² C, ADC	Отечественная архитектура. Развиваемая экосистема
Миландр K1986BE1T (Cortex-M0)	RM Cortex-M0	48	64/8	UART, SPI, I ² C, ADC	Низкобюджетное решение для простых задач автоматизации

4. Экосистема разработки и инструментальная поддержка.

Успешное внедрение МК напрямую зависит от качества экосистемы.

Среды разработки (IDE): поддержка в Keil MDK, IAR Embedded Workbench, а также в бесплатных / open-source средах Eclipse-based IDE и PlatformIO. Для RISC-V активно развивается поддержка в GCC и специализированных средах.

Аппаратные средства отладки: наличие и доступность отладочных плат (Debugger/Programmer), соответствующих стандарту SWD/JTAG. Многие отечественные производители предлагают собственные или совместимые с ST-Link программаторы.

Программное обеспечение: наличие библиотек для работы с периферией (HAL-, LL-драйверы), порты популярных Real-Time Operating Systems (FreeRTOS, RT-Thread), стеки коммуникационных протоколов (Modbus, CANopen, Ethernet).

Документация: полнота и качество даташитов, руководств по применению (Application Notes), примеров кода. На данный момент по некоторым отечественным МК документация может уступать лидерам рынка, но ситуация активно улучшается.

5. Области промышленного использования и примеры внедрения.

Рассмотренные МК находят применение в различных отраслях.

Промышленная автоматизация является одной из ключевых областей для внедрения отечественных МК. В современных производственных условиях возрастает потребность в надежных, адаптируемых и защищенных от внешних рисков системах управления. Программируемые логические контроллеры, построенные на базе отечественных МК, способны обеспечивать выполнение сложных алгоритмов управления технологическими процессами, поддерживая при этом высокий уровень отказоустойчивости и безопасности. Устройства связи с объектом, выполняющие функции сбора и первичной обработки данных с датчиков и исполнительных механизмов, также активно оснащаются современными МК, что позволяет повысить точность измерений и скорость передачи информации. Панели оператора, или ЧМИ (HMI), на базе производительных ядер обеспечивают интуитивное и отзывчивое управление оборудованием, визуализацию данных и диагностику систем. Частотные преобразователи, использующие МК для точного управления скоростью вращения электродвигателей, способствуют значительной экономии электроэнергии и повышению эффективности производственных линий.

В энергетике требования к надежности и точности работы электронных компонентов особенно высоки. Устройства релейной защиты и автоматики, отвечающие за предотвращение аварийных ситуаций в электросетях, должны функционировать безотказно в реальном времени и при любых внешних условиях. Отечественные МК с расширенным температурным диапазоном и аппаратной поддержкой функций

безопасности начинают применяться в таких системах, обеспечивая выполнение сложных алгоритмов защит. Счетчики электроэнергии нового поколения, основанные на современных МК, позволяют не только точно учитывать потребление, но и поддерживать дистанционный сбор данных, анализ профилей нагрузки и интеграцию в системы интеллектуальных сетей (Smart Grid). Системы мониторинга оборудования, в свою очередь, используют МК для сбора телеметрии, прогнозирования отказов и оптимизации режимов работы энергообъектов, что способствует повышению общей надежности энергосистемы.

Транспортный сектор предъявляет жесткие требования к безопасности, долговечности и способности электроники работать в условиях вибраций и перепадов температур. Бортовые системы управления в железнодорожном транспорте, отвечающие за контроль тяги, торможения, диагностику и безопасность движения, требуют применения высоконадежных и сертифицированных МК. Системы мониторинга автотранспорта, включающие в себя регистраторы параметров движения, телематические устройства и системы навигации, также активно используют МК для обработки данных с датчиков и обеспечения связи. Светофорное оборудование и системы управления дорожным движением, построенные на МК, позволяют реализовывать адаптивные алгоритмы, оптимизирующие транспортные потоки и повышающие безопасность на перекрестках.

Медицинское оборудование представляет собой особую сферу, где к электронным компонентам предъявляются строгие требования по точности, безопасности и соответствию нормативным стандартам (например, ГОСТ Р МЭК 60601). Некоторые серии отечественных МК, прошедшие необходимые процедуры сертификации, начинают применяться в диагностических приборах средней сложности. К таким приборам могут относиться портативные анализаторы, мониторы жизненных показателей, инфузионные насосы и другое оборудование, где МК отвечает за управление исполнительными механизмами, обработку сигналов с датчиков и обеспечение интерфейса взаимодействия с медицинским персоналом. Внедрение отечественных компонентов в эту чувствительную отрасль способствует не только импортозамещению, но и повышению технологической независимости в сфере здравоохранения.

Перспективы развития:

- 1) фокус на RISC-V: достижение технологического суверенитета;
- 2) развитие отечественных производственных мощностей: увеличение объемов выпуска и снижение стоимости;
- 3) углубление кооперации: создание консорциумов производителей ЭКБ, разработчиков инструментов и системных интеграторов для формирования полного цикла;

4) стандартизация и создание референсных проектов: разработка отраслевых стандартов на применение отечественных МК и типовых проектных решений для ускорения внедрения.

Рынок промышленных МК для целей импортозамещения в России находится в активной стадии формирования. Уже сегодня существуют работоспособные отечественные решения на ядрах ARM Cortex-M, способные заменить зарубежные продукты в широком спектре задач средней сложности. Активно развивается направление RISC-V, обещающее большую независимость в долгосрочной перспективе.

Ключевым фактором успешного перехода является не только наличие самих микросхем, но и развитие полноценной экосистемы (инструментов разработки, программных компонентов, документации и компетенций инженеров). Несмотря на существующие вызовы, такие как ограниченная номенклатура и высокая стоимость на начальном этапе, наблюдаются позитивные тенденции – увеличение инвестиций, рост кооперации между участниками рынка и поддержка со стороны государства.

Дальнейшее развитие будет определяться способностью отрасли быстро закрывать технологические пробелы [3], наращивать объемы производства и создавать удобные для разработчика инструменты. В ближайшие годы следует ожидать расширения линейки изделий, повышения их конкурентоспособности и более широкого проникновения отечественных промышленных микроконтроллеров в реальные сектора экономики.

Библиографический список

1. Официальный сайт АО «ПКК Миландр». URL: <https://www.milandr.ru> (дата обращения: 15.12.2025).
2. Белов А.В. Микроконтроллеры AVR: от азов программирования до создания практических устройств. СПб.: Наука и Техника, 2016. 544 с.
3. Официальный сайт ЗАО «Элвис». URL: <https://www.elvees.com> (дата обращения: 15.12.2025).
4. RISC-V: архитектура, которую будут развивать в РФ. Перспективы и возможности в России и мире. URL: <https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/565952/> (дата обращения: 15.02.2025).

REVIEW OF INDUSTRIAL MICROCONTROLLERS TO ADDRESS IMPORT SUBSTITUTION TASKS IN RUSSIA

A.M. Minbaev

Abstract. *The article provides an overview of modern domestic and accessible foreign microcontrollers focused on use in industrial systems under import substitution conditions. The architectural features, technical*

characteristics and peripheral capabilities of microcontrollers manufactured in Russia and friendly countries are considered. Special attention is paid to issues of compatibility, development ecosystem, availability of documentation and readiness for serial application in various industries – from process automation to energy and transport systems. A conclusion is drawn about the current state of the market, key players and promising directions for the development of the domestic component base in the industrial microcontroller segment.

Keywords: *microcontroller, industrial automation, import substitution, domestic electronic component base, ARM Cortex, RISC-V, peripheral interfaces, real-time, fault tolerance, development ecosystem.*

Об авторе:

МИНБАЕВ Айдар Марселевич – студент бакалавриата, КНИТУ-КАИ «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева», Казань. E-mail: ajdarminbaev2@gmail.ru

About the author:

MINBAEV Aidar Marselevich – Undergraduate Student, KNRTU-KAI "Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev", Kazan. E-mail: ajdarminbaev2@gmail.ru

УДК 628.35:62-5

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НИТРИ-ДЕНИТРИФИКАЦИИ НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

А.Ю. Эйтерник, Н.А. Малев

© Эйтерник А.Ю., Малев Н.А., 2026

Аннотация. *В статье представлен аналитический обзор современных подходов к управлению процессом биологического удаления азота на очистных сооружениях. Особое внимание уделено адаптивным системам управления, позволяющим эффективно компенсировать нестационарность и нелинейность процесса нитри-денитрификации. Проанализированы различные архитектуры систем управления: от классических ПИД-регуляторов до систем с нейросетевой идентификацией и предиктивным управлением. Рассмотрены принципы косвенной адаптации, основанные на онлайн-идентификации параметров объекта. Показано, что комбинированные системы, сочетающие адаптивные алгоритмы с методами искусственного интеллекта, демон-*