

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.8:004.422

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).403-415

Поступила в редакцию / Received 03.07.2024

ГРНТИ 29.35.19+50.41.23

Специальность ВАК 2.2.2; 1.3.4

Принята к публикации / Accepted 05.08.2024

Научная статья

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Яковлев Н. С., Михайлов А. А., Килиба Ю. В., Петров Р. В.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В данной статье рассматривается тема оптимального выбора микроконтроллера для своего проекта. Применение современных материалов в электронных устройствах, предназначенных для радиофизических измерений – это тренд, нацеленный на совершенствование исследований. Примером тому могут быть магнитоэлектрические материалы, которые используются для изучения электромагнитных и магнитных полей, для производства устройств сбора энергии, для создания радиоизмерительных устройств и нейроморфных компьютеров. В свою очередь, разработка таких радиофизических устройств для радиоастрономии, квантовой и статистической радиофизики, спектроскопии, а также микро- и наноэлектроники невозможна без применения современных микроконтроллеров. Представлен обзор и сравнительный анализ различных микроконтроллеров, включая их архитектуру, периферийные устройства, среду разработки и области применения. Рассматриваются различные семейства микроконтроллеров, такие как MCS-51, AVR, PIC, STM, ESP32, и анализируются их характеристики и преимущества. Данная статья будет полезна разработчикам электронных устройств, студентам радиофизических специальностей и всем, кто интересуется современными микроконтроллерами и их применением в различных областях.

Ключевые слова: *магнитоэлектрические устройства сбора энергии, радиофизические измерительные устройства, микроконтроллеры*

Для цитирования: Яковлев Н. С., Михайлов А. А., Килиба Ю. В., Петров Р. В. Использование современных микроконтроллеров при проектировании электронных устройств // Вестник НовГУ. 2024. 3 (137). 403-415. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).403-415

Research Article

USING MODERN MICROCONTROLLERS WHEN DESIGNING ELECTRONIC DEVICES

Yakovlev N. S., Mikhailov A. A., Kiliba Yu. V., Petrov R. V.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract This article discusses the topic of the optimal choice of a microcontroller for your project. The use of modern materials in electronic devices designed for radiophysical measurements is a trend aimed at improving research. Magnetoelectric materials that are used to study electromagnetic and magnetic fields, to produce energy harvesting devices, to create radio measuring devices and neuromorphic computers can be an example of this. In turn, the development of such radiophysical devices for radio astronomy, quantum and statistical radiophysics, spectroscopy, as well as micro- and nanoelectronics is impossible without using modern microcontrollers. An overview and comparative analysis of various microcontrollers, including their architecture, peripherals, development environment and application areas, is presented. Various families of microcontrollers such as MCS-51, AVR, PIC, STM, ESP32 are considered and their characteristics and advantages are analyzed. This article will be useful for developers of electronic devices, students of radiophysics specialties and anyone interested in modern microcontrollers and their application in various fields.

Keywords: *magnetoelectric energy harvesting devices, radiophysical measuring devices, microcontrollers*

For citation: Yakovlev N. S., Mikhailov A. A., Kiliba Yu. V., Petrov R. V. Using modern microcontrollers when designing electronic devices // Vestnik NovSU. 2024. 3 (137). 403-415. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.3(137).403-415

Введение

Применение современных материалов в электронных устройствах, предназначенных для радиофизических измерений, это тренд, нацеленный на совершенствование исследований. Примером этому могут быть магнитоэлектрические материалы, которые возможно использовать для изучения электромагнитных и магнитных полей, и для производства устройств сбора энергии, и для создания радиоизмерительных устройств и нейроморфных компьютеров. В свою очередь, разработка таких радиофизических устройств для радиоастрономии, квантовой и статистической радиофизики, спектроскопии, а также микро- и наноэлектроники невозможна без применения современных микроконтроллеров. Выбор оптимального микроконтроллера важная и сложная задача, стоящая перед проектировщиком электронных устройств.

Использование вычислительной техники для математических и научных исследований раздвинуло границы научных исследований, позволило решать задачи, которые ранее невозможно было решить или это требовало огромных усилий и ресурсов. С компьютерами стало возможно проводить сложнейшие расчеты, моделировать длинные физические и химические процессы, производить анализ данных и т.д. А к текущему времени компьютеры плотно вошли в нашу повседневную жизнь и используются почти во всех сфера деятельности человека – в образовании, для работы, развлечений, в коммуникации, для физических исследований. Компьютеры стали главным инструментом для большинства людей и организаций.

Первоначально компьютеры использовались как счетные машины, из-за своих огромных размеров и малой вычислительной мощности. С уменьшением размеров и повышением производительности ЭВМ, появилась возможность устанавливать их в различные приборы и создавать компактные компьютерные устройства, производить компьютеризацию. Далее была создана однокристалльная микро-ЭВМ (микроконтроллер), интегральная микросхема, состоящая из трех основных блоков, которые соединяет системная шина: блока микропроцессора, блока памяти и блока ввода-вывода (I/O), изображенная на рисунке 1.

Однокристалльные ЭВМ появляются с началом эпохи развития и массового применения устройств компьютерной автоматизации в области управления, что позволило интегрировать вычислительные функции в различные устройства и системы, обеспечивающие возможность автоматизации процессов, управления устройствами, обработки данных и т. д.

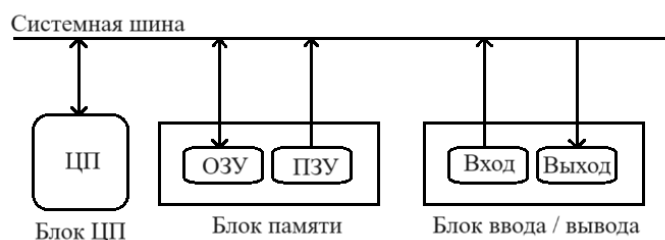


Рисунок 1. Блоки микроконтроллера

Микроконтроллер в полной комплектации может содержать микропроцессор, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), устройства ввода-вывода, устройства аналогово-цифрового преобразования (АЦП) и цифро-аналогового преобразования (ЦАП), устройство широтно-импульсной модуляции (ШИМ), таймеры, различные модули связи и др. [1], что изображено на рисунке 2.

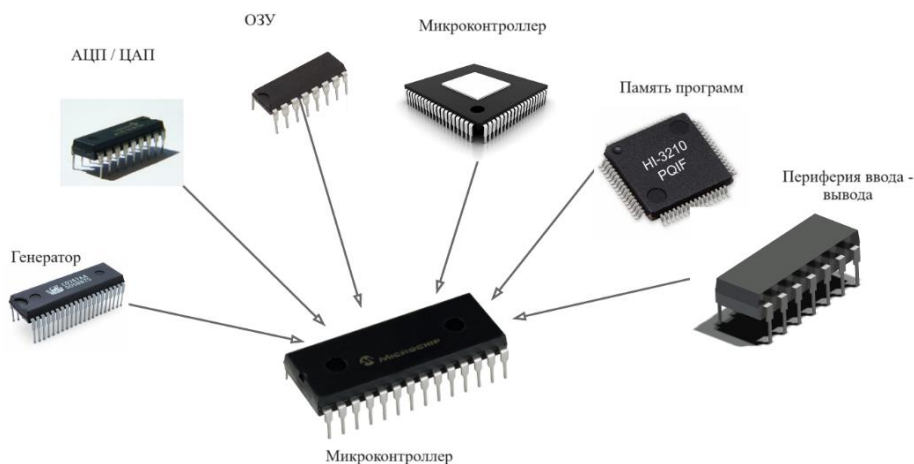


Рисунок 2. Элементы входящие в микроконтроллер

Микропроцессор выполняет команды в виде инструкций, которые хранятся в памяти. Периферийные устройства ввода-вывода обеспечивают возможность взаимодействовать с внешним миром. Таймеры осуществляют синхронизацию выполняемых операций, ограничивая выполнение каждого действия точными временными интервалами. АЦП используется для преобразования аналоговых сигналов в цифровые, а ЦАП наоборот.

Во включенном состоянии микроконтроллер выполняет инструкции, загруженные ранее в его память с помощью программатора или иного способа программирования устройства. Микроконтроллер способен считывать входные данные с датчиков, выполнять вычисления и выводить данные для управления устройствами.

Микроконтроллеры предназначены для работы в режиме реального времени. Работая постоянно и реагируя на изменяющиеся входные данные, они отлично

подходят для задач в робототехнике, автоматизации и управлении. Классификация микроконтроллеров изображена на рисунке 3.



Рисунок 3. Классификация микроконтроллеров

Все микроконтроллеры делят на группы в зависимости от целей и задач их использования, их архитектуры, объема памяти, разрядности, наборов команд и др. Исходя из большого количества параметров, влияющих на выбор микроконтроллера, выбор наиболее подходящего для конкретного проекта может оказаться непростой задачей.

В статье рассматриваются микроконтроллеры разных типов и обсуждаются их преимущества и недостатки применительно к сфере использования, в частности к электронным устройствам и устройствам радиофизики. Представлен обзор и сравнительный анализ различных микроконтроллеров, включая их архитектуру, периферийные устройства, среду разработки и области применения. Рассмотрены различные семейства микроконтроллеров, такие как MCS-51, AVR, PIC, STM, ESP32, и проанализированы их характеристики и преимущества. Данная статья будет полезна разработчикам электронных устройств, студентам радиофизических специальностей и всем, кто интересуется современными микроконтроллерами и их применением в различных областях.

Применение

Благодаря своим крошечным размерам микроконтроллеры нашли свое применение в огромном количестве устройств, где требуется что-то рассчитывать, обрабатывать, проводить вычисления.

Микроконтроллеры используются:

- в вычислительной технике (компьютерная техника, где производятся вычисления);
- в бытовой технике (холодильники, микроволновки, кухонные печи и др.);

- в устройствах промышленной автоматики (датчики, сервоприводы, системы управления);
- в системах умный дом (безопасность, освещение, электропитание, отопление и др.);
- используются в качестве контроллера запоминающего устройства;
- для управления двигателем автомобиля;
- для обработки сигналов;
- в медицинском оборудовании (цифровые термометры, кардиомониторы, рентгеновские аппараты, томографы);
- в игрушках и развлекательных устройствах (игровые приставки, радиоуправляемые машины, звуковоспроизводящие игрушки);
- оборонительные системы (системы связи, системы навигации)
- охранная сигнализация.

В зависимости от сценария применения микроконтроллеры можно разделить на несколько категорий.

1) Промышленные микроконтроллеры

Данные микроконтроллеры разработаны с учетом требований промышленного применения. К ним предъявляют требования повышенной надежности, работы в экстремальных условиях окружающей среды (влажность, механические удары и вибрация), устойчивость к электромагнитным помехам и длительный срок службы.

Silicon Labs C8051F53x Industrial MCUs

Infineon 32-bit XMC7000 Industrial Microcontroller

2) Автомобильные микроконтроллеры

Это специализированные микроконтроллеры, предназначенные для использования в автомобилестроении. Используются в системах управления двигателем, системами безопасности, информационно-развлекательной системой и климат-контролем. Особый акцент здесь делается на функции безопасности и обработки больших объёмов информации в реальном времени. Микроконтроллеры должны правильно и четко работать, даже при наличии неисправностей.

Infineon 32-bit AURIX™ TriCore™ MCU

Renesas RH850 Automotive MCUs

Microchip AT90CAN32 MCU

3) Медицинские микроконтроллеры

Микроконтроллеры используются в медицинском оборудовании занимающиеся диагностической визуализацией, мониторингом состояния пациента, обеспечением работоспособности дефибрилляторов, аппаратов искусственной вентиляции легких и др. Надежность работы, точность и отклик в режиме реального времени являются основными факторами, которые необходимо учитывать при разработке встраиваемых систем медицинского назначения.

Texas Instruments MSP430FR Series

Microchip PIC32MZ Series

STMicroelectronics STM32G4 Series

Renesas RX Series

NXP/Freescale Kinetis KEA Series

4) Микроконтроллеры бытовой электроники

Микроконтроллеры предназначены для обеспечения работоспособности и функциональности бытовой электроники. Микроконтроллеры обладают хорошей производительностью, используются для управления устройством, обработкой звука и мультимедиа, в системах IoT.

ARM Cortex-M Series

ESP8266 and ESP32

PIC32MX Series

Silicon Labs EFR32 Series

Разрядность

Микроконтроллеры разделяют по разрядности. Чем больше разрядность, тем выше производительность микроконтроллера и тем больше данных он может обрабатывать за один такт. Однако, такие микроконтроллеры обычно стоят дороже и потребляют больше энергии.

8-битные микроконтроллеры – простые и дешевые микроконтроллеры, которые используют 8-разрядную шину данных. Данные микроконтроллеры идеально подходят для простых задач, встраиваемых систем, где стоимость и энергопотребление являются ключевыми факторами, т. е. бытовая техника и электроника, игрушки, где не требуются сложные вычисления и мобильные, портативные устройства.

1. ATmega328P: 8-битный микроконтроллер от Atmel (AVR).
2. PIC16F877A: 8-битный микроконтроллер от Microchip.
3. STM8S003F3: 8-битный микроконтроллер от STMicroelectronics, который имеет 8 Кб флэш-памяти, 1 Кб SRAM и 256 байт EEPROM.

16-битные микроконтроллеры используют 16 разрядную шину данных и обладают большей производительностью в сравнении с 8-разрядными и все еще хорошую экономичность. Хорошо подходят для автомобильных систем управления, более продвинутых интеллектуальных датчиков и малогабаритных встраиваемых устройств, требующих умеренной вычислительной мощности и экономичности.

1. AVR25 - семейство 16-битных микроконтроллеров Atmel.
2. PIC24 - семейство 16-битных микроконтроллеров Microchip.
3. MCS-48 - семейство 16-битных микроконтроллеров Intel.

32-битные микроконтроллеры обладают значительно более высокой производительностью и большим объемом памяти. Они могут быть использованы в очень сложных схемах устройств, например, таких как смартфоны, промышленные

компьютеры или комплексы с высокой вычислительной мощностью и сложных обработкой данных.

1. PIC32 - семейство 32-битных микроконтроллеров от Microchip
2. AVR32 - семейство 32-битных микроконтроллеров от Atmel
3. ESP32 - семейство 32-битных микроконтроллеров от Espressif Systems
4. STM32 - семейство 32-битных микроконтроллеров от STMicroelectronics

Набор инструкций (RISC, CISC)

Набор команд (instruction set architecture, ISA) – это часть архитектуры компьютера, которая определяет программируемую часть ядра микропроцессора. Этот набор команд сообщает микропроцессору определенную инструкцию для исполнения. В краткий набор команд входят: прочитать, записать, переместить, сложить, вычислить, умножить, разделить, сравнить и др. В сложный набор команд входят комбинации из нескольких простых команд.

Ядро современных 8-разрядных микроконтроллеров реализуют как на основе CISC (архитектура компьютера со сложным набором команд), так и на основе RISC архитектуры (сокращенный набор команд).

Микроконтроллеры с CISC-архитектурой имеют одно-, двух-, трех- либо четырехбайтовый формат команд. Выборка команды из памяти ведётся побайтно в течение нескольких машинных циклов. Время выполнения каждой команды с учетом времени выборки для большинства случаев составляет от 1 до 10 циклов. Комплексный набор команд CISC требует сложного блока управления, что затрудняет реализацию микропрограммного управления.

RISC представляет ограниченный, но достаточный набор команд, который обеспечивает максимальную скорость за счет сокращения количества тактов, требуемых для каждой команды. Большинство вычислений может быть выполнено с использованием небольшого числа простых операций, что приводит к ускорению разработки в целом. Целью RISC-архитектуры является оптимизация производительности за счет переноса редко используемых функций в аппаратное обеспечение, а часто используемых – в программное, что в итоге приводит к повышению производительности. Микроконтроллеры с RISC-архитектурой имеют фиксированный формат команды – 12, 14 или 16 бит. Выборка из памяти и выполнение основного числа команд осуществляется в них за один машинный цикл [2].

CISC сложнее конвейеризовать, но RISC обеспечивает лучшую эффективность конвейеризации. Преимущество CISC перед RISC заключается в том, что для запуска сложных программ в CISC требуется меньше инструкций при меньшем количестве циклов выборки. В отличие от этого RISC требует большего количества инструкций для выполнения одной и той же задачи с большим количеством циклов выборки. Тем не менее, RISC может значительно повысить производительность за счет более

высокой тактовой частоты, более эффективной конвейерной обработки и оптимизации компилятора.

Архитектура ЭВМ

Архитектура микроконтроллера – это набор правил и соглашений, определяющие его функции, реализацию.

Запоминающее устройство является одним из ключевых частей микроконтроллера. Данный модуль отвечает за хранение данных и инструкций, необходимых для выполнения микроконтроллером его функций. Как правило микроконтроллеры имеют 2 вида памяти:

- память программ (ROM);
- память данных (RAM).

Также микроконтроллеры делят на 2 типа на основе блоков памяти: с встроенной и внешней памятью. Блоки или модули памяти находятся внутри корпуса или снаружи.

Память программ является энергонезависимой и используется для хранения кода встроенного программного обеспечения (инструкций) и управления функциями микроконтроллера. В тоже самое время память данных является энергозависимой, используется для хранения данных, которые используются инструкциями и нужны для их работы.

Разделяют два вида архитектуры ЭВМ такие как Гарвардская и архитектура фон Неймана (Принстонская). Эти архитектуры отличает одну от другой использование единой в одном случае или раздельной памяти для данных и инструкций в другом случае. Гарвардская архитектура характеризуется тем, что в ней память и процессор разделены физически, данные и инструкции передаются по разным каналам и используют разные шины. Схема архитектуры изображена на рисунке 4. Микроконтроллер с Гарвардской архитектурой может выполнять инструкции за один машинный цикл. Это позволяет увеличить скорость работы ЭВМ, так как процессор не тратит время на поиск инструкций в памяти, инструкции загружаются в буфер инструкций, откуда быстро извлекаются процессором. Также это позволяет использовать разные типы памяти для данных и инструкций.

В архитектуре фон Неймана используется общая шина для данных и инструкций, как показано на рисунке 5. Таким образом, обе операции не могут выполняться одновременно, и их необходимо запланировать. Общая шина упрощает конструкцию системы и снижает общую стоимость, но вместе с тем уменьшается производительность из-за необходимости синхронизации между данными и инструкциями.

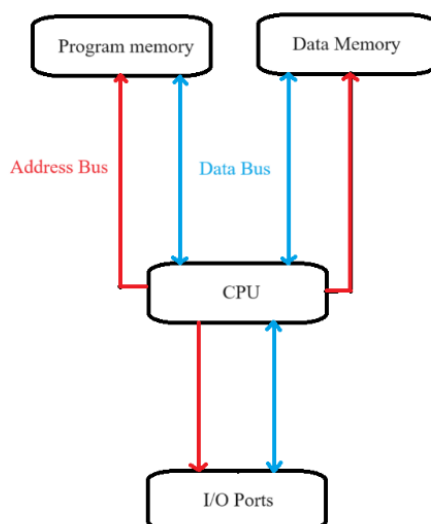


Рисунок 4. Гарвардская архитектура

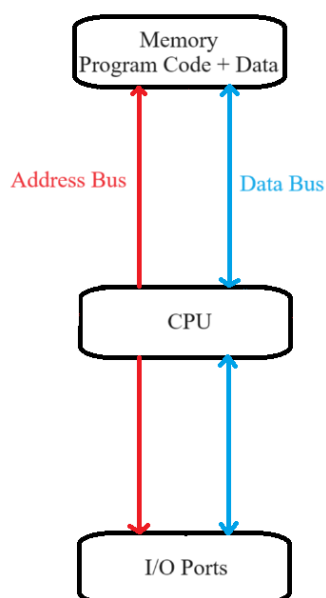


Рисунок 5. Архитектура фон Неймана

8051 (MCS-51)

8051 – это 8 битный микроконтроллер, созданный корпорацией Intel и работающий на архитектуре CISC. Имеет 6 тактов на инструкцию Это один из самых распространенных и дешевых микроконтроллеров в мире. Имеет встроенное программируемое ПЗУ объемом 4 КБ 128 байт встроенной оперативной памяти. Имеющиеся периферийные устройства такие как порты ввода/вывода (I/O ports), таймеры/счетчики, UART (последовательный порт), SPI (последовательный периферийный интерфейс) и I2C (интерфейс последовательной шины) позволяют реализовать широкое разнообразие приложений. На практике используется

в электронике и в учебных целях [3]. Разрабатывались с учетом требований работы в экстремальных условиях, для работы в условиях от -40 до +250 °С.

PIC

PIC (peripheral interface controller) серия микроконтроллеров, производимых американской компанией Microchip Technology Inc, имеющих гарвардскую архитектуру, используют микропроцессоры RISC Микроконтроллер используется в системах встроенной электронике, робототехнике, в транспорте, в медицинском оборудовании. Доступны в 8-разрядном, 16-разрядном и 32-разрядной версии. Ширина набора программных инструкций может составлять 12, 14, 16 и 24 бита. Как правило имеют внутренний генератор с частотой 8 МГц или 16 МГц. Машинный цикл состоит из 4-тактовых импульсов, в отличие от 12-тактовых импульсов в микроконтроллере Intel Представлены в корпусах от SMD до DIP. В качестве языка программирования выступает C и ассемблер.

Микроконтроллеры PIC известны своей надежностью простотой в использовании, энергоэффективностью и небольшими размерами. Микроконтроллеры отлично подходят для большого числа встраиваемых систем начиная от бытовой электроники и автомобильной промышленности до промышленной автоматизации и медицинской техники. Номенклатура моделей насчитывает более 500 различных микроконтроллеров с различными вариантами объема памяти, выводами, тактовой частотой, разным диапазоном питания, рабочими температурами и др. [4].

AVR

Микроконтроллеры AVR (Alf and Vegard's RISC microcontroller) – представляют собой семейство 8-разрядных и 32-разрядных микроконтроллеров, известных своим низким энергопотреблением и высокой производительностью. Они имеют архитектуру RISC и просты в программировании. Микроконтроллеры идеально подойдут для самостоятельных проектов в области электроники, включая любительские и образовательные проекты. Система для микроконтроллеров AVR имеет для различных типов от 90 до 135 различных команд. В основном команды занимают одну ячейку памяти – это 16 бит, а выполняются за один такт. Для применения в устройствах с малым энергопотреблением созданы модели AVR работающие при напряжении питания от 1,8 до 5,5 В.

Микроконтроллеры AVR имеют встроенную Flash-память для хранения программы, оперативную память (SRAM) для временного хранения данных и EEPROM для долговременного хранения данных. Микроконтроллеры AVR имеют периферийные устройства, позволяющие реализовать множество функций – аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, таймеры, интерфейсы UART, SPI, I2C и другие, что даёт им преимущества для реализации приложений [5].

STM32

Семейство микроконтроллеров STM32 это устройства на базе архитектуры ARM Cortex-M с 32-разрядами, высокой производительностью, эффективным использованием памяти и низким энергопотреблением. Эти микроконтроллеры обладают широким спектром функций и возможностей, что позволяет для самых разных задач. Они используются в промышленной автоматизации, медицинском оборудовании, бытовой электроники, в системах управления автомобилем, в устройствах для «умного дома» и др.

STM32 предлагает множество моделей, отличающиеся разным объемом флэш-памяти, ОЗУ, набором периферийных модулей. Микроконтроллеры поддерживают различные стандартные интерфейсы, такие как UART, SPI, I2C, CAN, Ethernet и USB. Для разработки используются Keil, IAR или STM32CubeIDE.

Низкое энергопотребление, высокая скорость обработки и разнообразие периферийных устройств делают его подходящим для широкого спектра применений и одним из самых популярных на рынке.

ESP32

Серия высокопроизводительных микроконтроллеров с низким энергопотреблением и встроенными контроллерами Wi-Fi и Bluetooth. Микроконтроллер ESP 32 основан на 32-разрядной архитектуре Extensa X6, имеет два ядра с максимальной частотой 240 МГц и 7-ступенчатый конвейер. Он также имеет 16/24-разрядный набор команд и различные периферийные интерфейсы, такие как UART, SPI, I2C, АЦП и ЦАП.

ESC 32 поддерживает единицы измерения с плавающей запятой и команды DSP, включая 32-разрядные умножители, 32-разрядные делители и 40-разрядные единицы умножения-накопления (MAC).

Для USP 32 доступно несколько сред разработки, включая Arduino IDE, ASP-IDF и PlatformIO. Благодаря низкому энергопотреблению и поддержке Wi-Fi и Bluetooth ESC32 широко используется в различных приложениях, таких как устройства "умного дома", IoT-устройства и носимые устройства [6].

Renesas RL78

Устройства компании Renesas отличаются высокой производительностью, сверхнизким энергопотреблением и компактной упаковкой.

Благодаря большому объему памяти и количеству контактов эти устройства используются в различных системах управления автомобилями. Два популярных микроконтроллера от Renesas – это RL78 и RX. RL78 известен своим низким энергопотреблением, в то время как RX известен своей высокой производительностью.

Микроконтроллеры основаны на гарвардской архитектуре CISC. Семейство RL78 доступны в виде 8-разрядных и 16-разрядных версий, а RX в 32-разрядном.

Семейство RL78 - это микроконтроллеры с низким энергопотреблением, в то время как RX обеспечивает высокую производительность.

Количество контактов в семействе RL78 варьируется от 20 до 128 контактов, в то время как микроконтроллеры RX доступны в корпусах от 48 до 176 контактов.

Объем флэш-памяти также увеличен с 16 КБ до максимум 512 КБ для RL78 и от 32 КБ до 2 МБ для микроконтроллеров семейства RX.

Объем оперативной памяти в семействе RX составляет от 2 до 128 КБ.

Заключение

Каждый микроконтроллер имеет свои преимущества и недостатки. Для решения той или иной задачи всегда может быть найдено множество вариантов выбора. Выбор микроконтроллера в конечном счете зависит от требований и задач проекта. Применение современных материалов в электронных устройствах, предназначенных для радиофизических измерений, это тренд, нацеленный на совершенствование исследований. Микроконтроллеры на основе микропроцессоров PIC отличный вариант для простых проектов и обучения, благодаря наличию доступной обучающей системы и множеству доступных примеров проектирования в открытых библиотеках. PIC и AVR предлагают самые универсальные устройства, которые можно использовать практически для любых задач. ARM микроконтроллеры предлагают мощные возможности для разработки сложных систем. Микроконтроллеры на 8051 просты в изучении и доступны по стоимости.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20045, <https://rscf.ru/project/24-19-20045/>.

Список литературы / References

1. Isizoh A. N., Obianyo O. R., Ejimofor I. A., Ebih U. J., Alagbu E. E. Application and Analyses of Microcontrollers in Real-Time Systems // International Journal of Advances in Engineering and Management. 2022. 4(4). 97-104. DOI: 10.35629/5252-040497104
2. Isen C., John L. K., John E. A Tale of Two Processors: Revisiting the RISC-CISC Debate // Lecture Notes in Computer Science. 2009. 5419. 57-76. DOI: 10.1007/978-3-540-93799-9_4
3. Kunikowski W., Czerwiński E., Olejnik P., Awrejcewicz J. An Overview of ATmega AVR Microcontrollers Used in Scientific Research and Industrial Applications // Pomiar Automatyka Robotyka. 2015. 19(1). 15-20. DOI: 10.14313/PAR_215/15
4. Vakaliuk T. A., Andreiev O. V., Nikitchuk T. M., Osadchyi V. V., Dubyna O. F. Using Esp32 Microcontroller For Physical Simulation Of The Wireless Remote Control Modem // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2023. 3. 206-214. DOI: 10.15588/1607-3274-2023-3-20
5. Qureshi M. H., Akmal R. Microcontrollers. 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.29112.76800

6. Woo-Garcia R. M., Argüelles-Lucho P., Montes de Oca-Mora N. J., Salas-Rodriguez S., Sanchez-Vidal, A., Ceron-Alvarez C. A., Osorio-de la Rosa E. Evaluation of Assembler and C Programming Languages on PIC16F877 Microcontroller // Journal of Physics: Conference Series. 2024. 2699(1). 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/2699/1/012013

Информация об авторах

Яковлев Никита Сергеевич – студент, инженер-программист, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0005-8593-9758, nikita-yakovlev13@ya.ru

Михайлов Александр Александрович – студент, техник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0006-1087-4942, sanasanowich@gmail.com

Килиба Юрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-7660-6039, Roman.Petrov@novsu.ru

Петров Роман Валерьевич – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9751-116X, Roman.Petrov@novsu.ru