

УДК 621.317:006.354

В.Т. КОНДРАТОВ, Ю.Т. КОНДРАТОВ
Институт кибернетики им. В.М.Глушкова НАН Украины**РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ И АРХИТЕКТУРЫ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ПРИБОРОВ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ
СОСТОЯНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
СООБЩЕНИЕ 2**

В настоящей работе рассматриваются вопросы разработки концепции построения и архитектуры измерительных систем и приборов для экспресс диагностики состояния физических и биологических объектов. В частности рассматриваются аспекты, которые связаны с выбором типов АЦП и ЦАП, микроконтроллеров, операционных систем и т.п.

Показана зависимость архитектуры средств измерений от метода преобразований электрических сигналов, решаемой задачи и существующих стандартов. Приведены конкретные варианты архитектур АЦП и ЦАП, микроконтроллеров. Описаны основные требования к измерительным системам.

Ключевые слова: концепция, архитектура, измерительные системы, приборы

V.T. KONDRATOV, YU.T. KONDRATOV

V.M. Glushkov Institute of cybernetics of National academy of Science of Ukraine

**WORKING OUT OF THE CONCEPT OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE
MEASURING SYSTEMS AND DEVICES FOR EXPRESS DIAGNOSTICS OF THE CONDITION PHYSICAL AND
BIOLOGICAL OBJECTS
THE MESSAGE 2**

Abstract – In the present message questions of working out of the concept of construction and architecture of measuring systems and devices for the express diagnostics of a condition of physical and biological objects are considered. In particular the questions connected with a choice of types of ADC and DAC, microcontrollers, operational systems are considered. Three most popular architecture ADC which, taking into account areas of their application, bring the certain contribution to architecture of measuring systems and devices.

Use of search systems and recommendations for choice of ADC and DAC, given by manufacturers, in a combination to fundamental knowledge of three architecture is noticed, that, can help to developer choose correctly to the ADC for the decision of the put measuring problem.

It is established, that one of essential differences of ARM architecture from other architecture of digital programmed devices is so-called predication — possibility of conditional execution practically any command.

For today there are three profiles of architecture of ARM used at creation of microcontrollers. The architecture of microcontrollers of family STM32, executed on kernel ARM Cortex-M0/M3/M4, is in many respects defined by their application. The basic specifications on seven types of microcontrollers families STM32 providing their correct choice for creation of measuring systems and devices are resulted.

It is noticed, that at creation of architecture of measuring system or the device and their software it is necessary to consider requirements to division of the software and its identification, the requirement to structure of the software, the requirement to influence of the software on metrological characteristics of measuring apparatuses, requirements to protection of the software and data, and also special requirements to the software.

It is established, that the majority of modern operational systems is represented by well structured modular systems capable to development, expansion and carrying over on new platforms. Any uniform architecture of operational system does not exist, but there are universal approaches to structurization of operational systems.

For today of the most perspective the concept of microcore architecture of operational systems is. Their new architecture is based that in an exclusive mode very small part of operational system named a microkernel works only. All the others высокоуровневые kernel functions are made out in the form of the appendices working in the user mode.

The operational systems based on the concept of a microkernel, in high degree satisfy to the majority of the requirements shown to modern operational systems as possess tolerability, expansibility, reliability and create good preconditions for support of the distributed appendices. The basic lack of microcore architecture is decline of productivity.

Введение

В первом сообщении были рассмотрены вопросы разработки концепции построения и архитектуры первичных измерительных преобразователей, формирователей физических величин и измерительных каналов приборов для экспресс диагностики состояния физических и биологических объектов. Перечислены функциональные блоки и элементы измерительных систем и приборов, являющиеся необъемлемой частью их архитектуры.

Приведено ряд архитектур нестандартных первичных измерительных преобразователей. Это дало возможность сделать вывод о необходимости строгого соблюдения требований технического задания по их схемотехнической и конструктивно-технологической реализации, по выбору структур первичных измерительных преобразователей, обеспечивающих максимальное отношение точность/цена, требований по расширению функциональных возможностей при сохранении требуемой точности преобразования.

Отмечено многообразие и роль линий связи при разработке архитектуры измерительной системы или прибора, обеспечивающие достижение заданных метрологических характеристик. Существующие различия, требования и многообразие способов организации связи и определяют архитектуру линии связи и всей измерительной системы или прибора в целом.

При этом необходимо строго соблюдать существующие стандарты связи сенсоров и

измерительных каналов.

Архитектура средств воспроизведения и формирования однородных и нормированных по значению физических величин отличается между собой природой воспроизводимой физической величины, принципами и способами воспроизведения физических величин заданного и нулевого размеров, количеством используемых мер и стандартных образцов, способами одновременного воспроизведения физических величин двух и более нормированных размеров, способами подключения, требованиями к техническим и метрологическим характеристикам и способами их обеспечения, способами защиты мер и стандартных образцов от воздействия внешних дестабилизирующих факторов, принципами конструктивно-технологического исполнения мер и стандартных образцов.

Установлено, что, в связи с развитием методов избыточных измерений, архитектура измерительных систем и приборов существенно меняется по причине введения в нее формирователей физических величин. Последние включают в себя сенсоры, меры или СО, набор автоматических переключателей, зачастую построенные по нестандартным схемам, аналоговые мультиплексоры, актюаторы, оптические элементы и т.п. Главная задача — осуществить высокоточное формирование рядов физических величин и их преобразование в электрический сигнал.

В упомянутом сообщении даны определения четырем видам преобразований физических величин: первичному, вторичному, третичному и четвертичному, которые широко используются в измерительной технике. От их числа также зависит архитектура измерительных систем и приборов.

С позиции системного подхода приведено определение понятия «измерительный канал». Показано существующее многообразие измерительных каналов со структурами открытого и закрытого типов, их различные функциональные возможности. В любом случае архитектура измерительного канала должна обеспечить заданное качество измерений или измерительного преобразования физических величин.

Главный смысл концепции построения состоит в строгом выполнении требований технического задания на разработку измерительной системы или прибора или их составных частей (сенсоров, измерительных каналов и т.д.) с позиции системного подхода, в использовании максимального числа стандартизированных блоков и элементов.

В настоящем сообщении дальнейшее развитие получили вопросы разработки концепции построения и архитектуры измерительных систем и приборов для экспресс диагностики состояния физических и биологических объектов, связанные с выбором типов АЦП и ЦАП, микроконтроллеров на базе ядра Cortex-M с ARM-архитектурой, операционных систем и т.п.

Объект исследований — концепции построения и архитектуры измерительных систем и приборов.

Предмет исследований — концепции построения и архитектуры измерительных систем и приборов для экспресс-диагностики состояния физических и биологических объектов.

Целью работы является ознакомление ученых и специалистов с современной концепцией построения и архитектурой измерительных систем и приборов, связанные с выбором АЦП, ЦАП, микроконтроллеров на базе ядра Cortex-M с ARM-архитектурой и операционных систем.

Результаты исследований

Аспекты, определяющие архитектуру измерительных систем и приборов (начало см. в Сообщении 1)

8. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи

Архитектура АЦП и ЦАП весьма разнообразна и отличается областями применения, разрядностью и частотой преобразования. Их различия также влияют на архитектуру измерительных систем и приборов. Кроме того, на их архитектуру влияет используемое число внешних и встроенные АЦП и ЦАП, их метрологические характеристики, способы подключения и т.д.

Большинство применений аналого-цифровых преобразователей сегодня распределено между четырьмя обширными сегментами рынка [1]: а) сбор данных; б) точные технологические измерения; в) обработка голосовых и аудиоданных; г) «высокоскоростная» обработка (при частоте преобразования выше 5 МГц).

В подавляющем большинстве этих применений используются АЦП последовательного приближения (successive-approximation, SAR), сигма-дельта (Σ - Δ) и конвейерные (pipelined) АЦП, отличающиеся между собой разрядностью и частотой преобразования (рис.1). Понимание основ этих трёх наиболее популярных архитектур АЦП и их связей с областями применения определяет и выбор архитектуры измерительных систем и приборов.

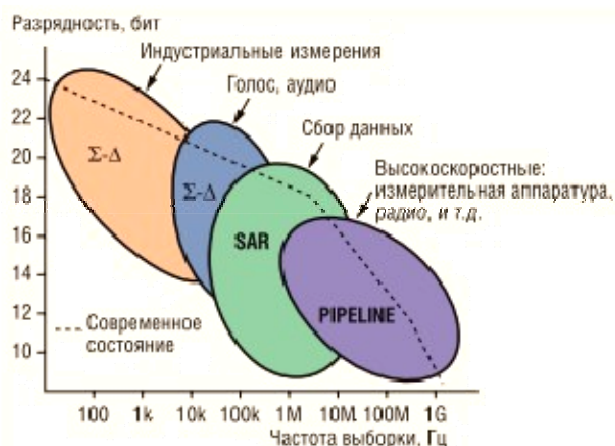


Рис. 1. Архитектуры АЦП, области применения, разрядность и частота преобразования

Согласно [1], аналого-цифровые преобразователи последовательного приближения подходят почти для всех систем сбора данных с мультиплексированием, а также для большинства измерительных приложений. Они относительно просты в использовании, не имеют конвейерной задержки и выпускаются с разрешением до 18 разрядов и частотой преобразования до 3 МГц (рис. 2).

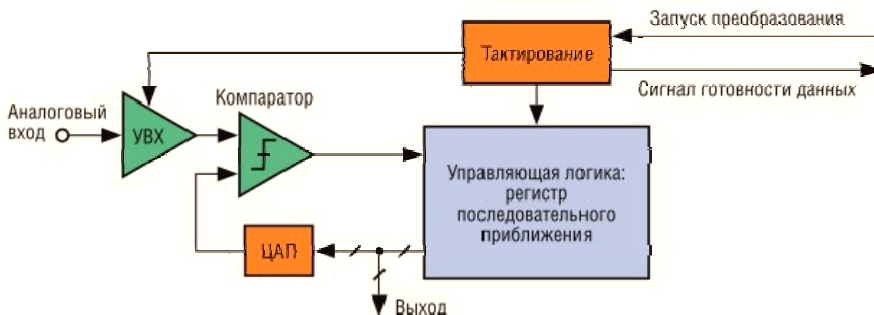


Рис. 2. Структурная схема АЦП последовательного приближения

Для разнообразных технологических измерений идеальными являются сигма-дельта-АЦП (рис. 3 и рис. 4). Их разрешение составляет от 12 до 24 разрядов.

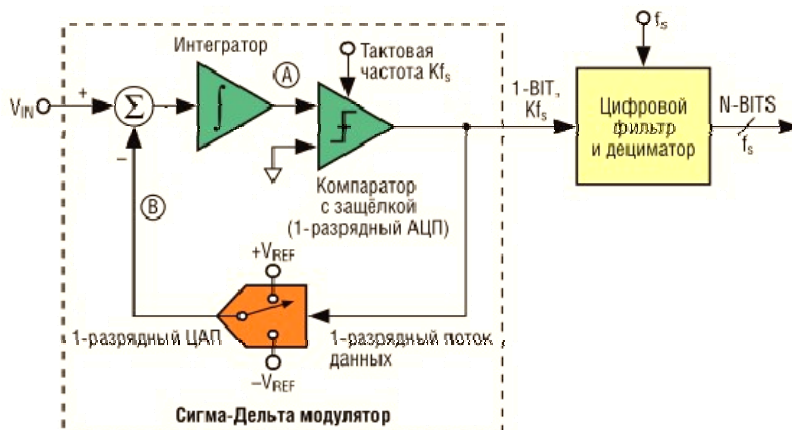


Рис. 3. Сигма-дельта АЦП первого порядка

Сигма-дельта-АЦП пригодны для обработки сигналов от различных датчиков, мониторинга энергии и управления двигателями.

В большинстве случаев высокое разрешение и наличие встроенного инструментального усилителя позволяют подключать АЦП непосредственно к выходу датчика без необходимости использовать отдельный измерительный усилитель или другие схемы согласования.

Сигма-дельта-АЦП и ЦАП легко интегрируются в большие интегральные схемы (БИСы), содержащие огромное количество цифровых функциональных узлов, и доминируют в системах тональной передачи и обработки звука.

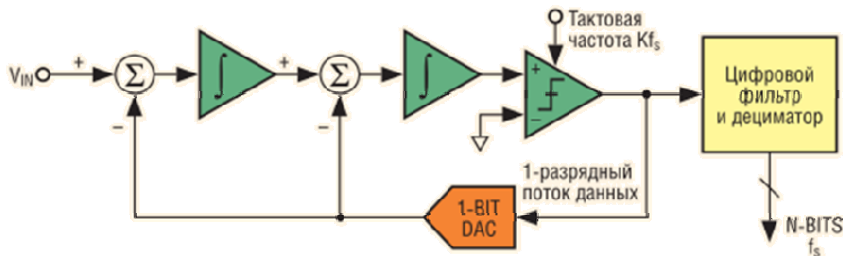


Рис. 4. Сигма-дельта АЦП второго порядка

Передискретизация, присутствующая в этих АЦП, уменьшает требования к антиалиасным фильтрам, включаемым перед АЦП, т.е. к фильтрам нижних частот, устраняющим наложение спектров после дискретизации сигнала, и восстанавливающим фильтрам, включаемых после ЦАП.

Для частот преобразования выше примерно 5 МГц наиболее часто используются АЦП с конвейерной архитектурой. Напомним, что архитектура конвейерных АЦП происходит от поддиапазонной (sub-ranging) архитектуры, впервые применённой в 1950-х гг. Схема простого шестизрядного двухкаскадного поддиапазонного АЦП показана на рис. 5. На рис. 6 приведена структурная схема

поддиапазонного АЦП с коррекцией погрешностей, $N_1 = 3$, $N_2 = 4$. В этих применениях обычно требуется разрешение до 14 разрядов и высокими SFDR и SNR в диапазоне частот от 5 МГц до более чем 100 МГц.

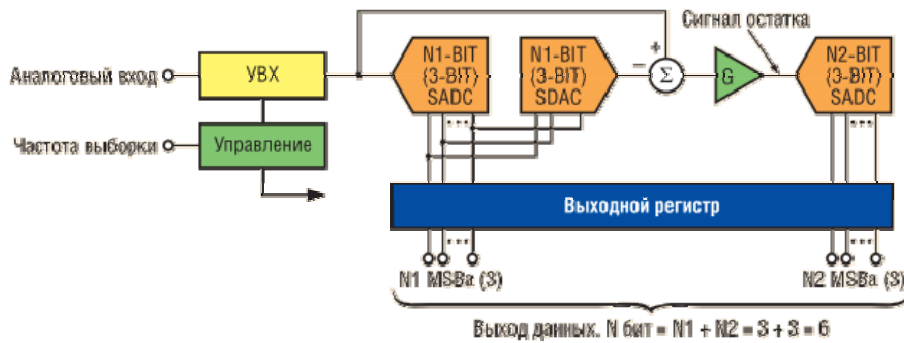


Рис. 5. Шестиразрядный двухкаскадный поддиапазонный АЦП

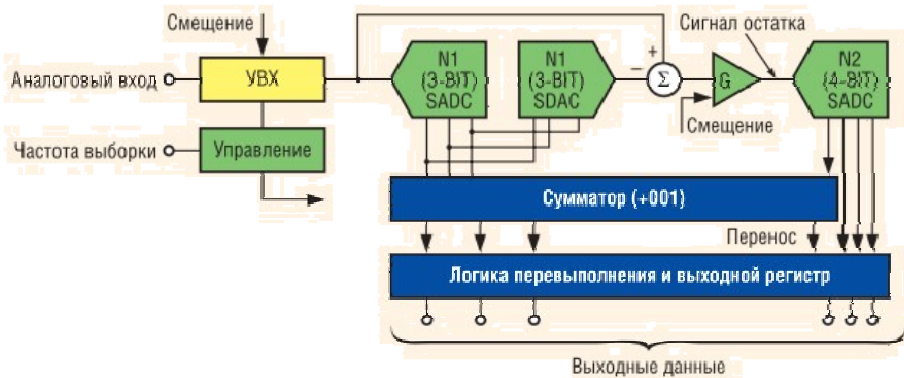


Рис. 6. Поддиапазонный АЦП с коррекцией погрешностей, $N_1 = 3$, $N_2 = 4$

Более сложная схема АЦП с конвейерной архитектурой и с коррекцией погрешностей приведена на рис. 7.

Использование поисковых систем и рекомендаций по выбору АЦП и ЦАП, предоставляемых производителями, в сочетании с фундаментальными знаниями об этих трёх архитектурах, могут помочь разработчику правильно выбрать АЦП для решения поставленной задачи.

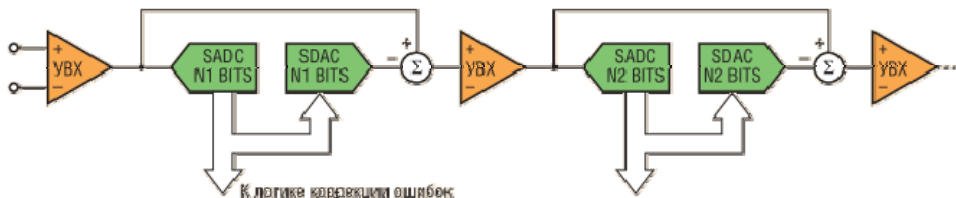


Рис. 25. Обобщённый вид конвейерных каскадов в поддиапазонном АЦП с коррекцией погрешностей

9. *Конструктивно-технологические решения* сеноров, линий связи и измерительного канала в целом (с экранированием, с термостатированием, водовлагодонепроницаемые, ударопрочные, теплопрочные и т.п.)

Для успешной разработки измерительных систем и приборов со смешанными сигналами не менее важны правильная конструкция печатной платы, правильная разводка заземления и корректная развязка электрических цепей. Учитываются также рекомендации по программному обеспечению процесса измерительного преобразования сигналов, временные диаграммы работы АЦП, ЦАП и т.д. Нельзя упускать из вида и правильную разработку входных и выходных согласующих схем, схем синхронизации и привязки к реальному (календарному) времени.

В измерительных системах и приборах широко используются микроконтроллеры, микроверторы и микропроцессоры. Наибольший интерес для рассматриваемого круга измерительных задач представляют микроконтроллеры и их архитектура. В качестве примера, рассмотрим микроконтроллеры, выполненные на базе ядра Cortex с ARM-архитектурой.

10. *Микроконтроллеры, выполненные на базе ядра Cortex с ARM-архитектурой*

Первым производителем микроконтроллеров с ядром Cortex-M0 была Компания **NXP Semiconductors N.V.** Микроконтроллеры этой компании имели большой рыночный успех. Затем были разработаны контроллеры с ядром Cortex-M3. С появлением процессора с ядром Cortex-M4, компания NXP стала единственным на рынке производителем, поддерживающим все три ядра семейства ядер Cortex-M.

Сегодня компания NXP сосредоточилась именно на микроконтроллерах с АРМ-архитектурой, прекратив развитие процессоров семейства 8051[2].

Следует отметить, что архитектура АРМ — это семейство лицензируемых 32-битных и 64-битных микропроцессорных ядер разработки компании ARM Limited. Архитектура АРМ развивалась с течением времени, и начиная с ARM v.7 были определены три профиля архитектуры [3]:

«А» (application) — для устройств, требующих высокой производительности (смартфоны, планшеты);

«R» (real time) — для приложений, работающих в реальном времени;

«M» (microcontroller) — для микроконтроллеров (МК) и недорогих встраиваемых устройств.

Профили могут поддерживать меньшее количество команд (команды определенного типа).

Одним из существенных отличий архитектуры АРМ от других архитектур цифровых программируемых устройств (ЦПУ) является так называемая *предикация* — возможность условного исполнения практически любой команды. Под «условным исполнением» здесь понимается то, что команда будет выполнена или проигнорирована в зависимости от текущего состояния флагов состояния процессора.

В настоящее время значимыми являются следующие семейства процессоров АРМ [3 – 5]:

ARM7 с тактовой частотой до 60-72 МГц. Они предназначены для недорогих мобильных телефонов и встраиваемых решений средней производительности;

ARM9 и ARM11 с тактовой частотой до 1 ГГц. Предназначены для продвинутых телефонов, карманных компьютеров и встраиваемых решений высокой производительности;

Cortex A — это новое семейство процессоров, пришедшее на смену ARM9 и ARM11;

Cortex M — новое семейство процессоров, пришедшее на смену ARM7, и призванное занять место встраиваемых решений низкой производительности. В семействе присутствуют три значимых ядра: Cortex M0, Cortex M3 и Cortex M4.

Cortex-A12 — это лицензируемое ядро 32-битного процессора, может использоваться в многоядерных конфигурациях до четырех ядер с поддержкой кэш-когерентности. Ядро реализует набор инструкций АРМ v7.

Cortex-A15 — процессор, который на 40 процентов производительнее (на той же частоте), чем ядро Cortex-A9 при одинаковом числе ядер на чипе. Процессор, изготовленный по 28-нанометровой технологии, имеет четыре ядра, может функционировать на частоте до 2,5 ГГц и поддерживается многими современными операционными системами.

Правильный выбор МК, выполненных на ядре Cortex с АРМ-архитектурой, — залог успешной разработки архитектуры измерительных систем и приборов [22].

Рассмотрим, в качестве примера, современные МК семейства STM32 с ядром Cortex-M компании STMicroelectronics.

10. Микроконтроллеры с ядром Cortex-M

Архитектура измерительных систем и приборов во многом определяется принципом измерений, соответствующими схемами измерительных каналов и особенностями подключения к ним сенсоров, конфигурации, используемой платформы МК и т.д. Их выбор должен соответствовать поставленной технической задаче, опираться на рекомендации производителей этих устройств, иметь оптимальное соотношение «цена/функционал» и высокие стандарты качества.

Что представляют собой микроконтроллеры семейства STM32? Это семь серий МК, выполненных на ядре ARM Cortex-M0/M3/M4 [6-10]:

STM32W — 24МГц/30DMIPS МК для беспроводной связи;

STM32L — 32МГц/33DMIPS МК с батарейным питанием;

STM32F0 — 48МГц/38DMIPS МК для весьма дешевых приложений;

STM32F1 — 72МГц/61DMIPS МК общего назначения;

STM32F2 — 120МГц/150DMIPS высокопроизводительные МК;

STM32F3 — 72МГц/90DMIPS — МК комбинированных сигналов с DSP и FPU;

STM32F4 — 168МГц/210DMIPS — высокопроизводительные МК с DSP и FPU.

Семейство микроконтроллеров STM32Wxxx — это линейка микроконтроллеров компании STMicroelectronics на базе ядра Cortex-M3 с беспроводным интерфейсом, 12-битным АЦП и 12-битным ЦАП. Особенностью этой линейки является наличие встроенного радиомодуля, отвечающего стандарту IEEE 802.15.04 (поддерживает стеки ZigBee complaint PRO, IP, RF4CE, 6lowPan Contiki open source, программный стек IEEE 802.15.4 MAC library) [7].

МК включают в себя необходимый набор интерфейсов и достаточный объем встроенной памяти: ядро Cortex-M3 с частотой процессора до 24 МГц, Flash-память до 256 кБ, до 16 кБ оперативной памяти (RAM), таймеры, часы реального времени (RTC), асинхронный приемопередатчик (UART), одну-две двунаправленные двухпроводные шины для так называемого "межмикросхемного" (inter-IC) управления (I2C), один-два четырехпроводных интерфейса SPI. Микроконтроллеры STM32Wxxx выпускаются в корпусах двух типов: VFQFPN40 и VFQFPN48.

Необходимо отметить, что международный стандарт ZigBee обеспечивает масштабируемую, отказоустойчивую технологию беспроводной сети с максимальной скоростью передачи данных 250 кбит при работе в диапазоне 2,4 ГГц.

ZigBee Pro улучшает стандарт ZigBee и включает ряд важных особенностей формирования больших сетей.

Семейство микроконтроллеров STM32Lxxx — это новое семейство 32-разрядных МК STM32L компании STMicroelectronics, которое обеспечивает ультранизкое динамическое энергопотребление, сохраняя высокую производительность, свойственную ядру ARM Cortex-M3 [8].

Семейство микроконтроллеров STM32F0 — это линейка STM32F0 на ядре Cortex-M0. Предназначено для ультрадешевых приложений, поскольку ядро Cortex-M0 на сегодняшний день является самым «маленьким» из всего многообразия ядер ARM. Ядро характеризуется исключительно малой площадью на кристалле, низким потреблением и очень высокой плотностью кода, что позволяет достигать 32-битной производительности при стоимости 8/16-битных решений. Компания ARM возлагает на ядро Cortex-M0 задачу завоевания рынка недорогих решений, где стандартом де-факто стали 8/16-бит микроконтроллеры [9].

STM32F0 содержит такую же периферию, как остальные контроллеры семейства STM32, в том числе часы реального времени RTC, контроллер прямого доступа к памяти DMA, АЦП и ЦАП с высоким разрешением, таймеры управления двигателем и разнообразные интерфейсы. Эти интегрированные возможности дают большое преимущество в сравнении с не столь богатыми по периферии МК на 8- и 16-разрядной архитектуре.

Семейство микроконтроллеров STM32F1xx — это МК общего назначения с 12-битным АЦП и 12-битным ЦАП, младшая линейка микроконтроллеров компании STMicroelectronics на базе ядра Cortex-M3. МК STM32F1xx включают в себя широкий набор интерфейсов и большой объем встроенной памяти: ядро Cortex-M3 с частотой процессора до 24 МГц, Flash-память до 512 кБ, оперативную память (RAM) до 32 кБ, большее количество таймеров, часы реального времени (RTC), до пяти асинхронных приемо-передатчиков (UART), одну-две двунаправленные двухпроводные шины для так называемого "межмикросхемного" (inter-IC) управления (I2C), до трех четырехпроводных интерфейса SPI, встроенный температурный датчик, а так же контроллер внешней памяти (EMC) [10-14]. МК STM32F1xx выпускаются в корпусах: LQFP48, LQFP64, TFBGA64, LQFP100, LQFP144.

Семейство высокопроизводительных микроконтроллеров STM32F2xx — это линейка МК компании STMicroelectronics на базе ядра Cortex-M3. Микроконтроллеры включают в себя обширный набор интерфейсов и большой объем встроенной памяти: ядро Cortex-M3 с частотой процессора до 120 МГц, Flash до 1024 кБ, до 128 кБ RAM, большее количество таймеров, часы реального времени (RTC), USB Full-Speed OTG, USB High-Speed OTG, до 6 UART, до 2 I2C, до 2 CAN, до 3 SPI, до 2 I2S, 12-битный АЦП и 12-битный ЦАП, интерфейс карт SD/MMC, встроенный температурный датчик, а так же контроллер внешней памяти (EMC) [11]. МК STM32F2xx выпускаются в корпусах: LQFP64, WLCSP66, LQFP100, LQFP144 (рис. 8).

Семейство микроконтроллеров STM32F3 — это серия недорогих МК с малым и средним объемом Flash-памяти, с мощным ядром Cortex-M4F и высокотехнологичной периферией. Их аналоговая периферия расширена 16-разрядными сигма-дельта АЦП, компараторами, операционными усилителями, сенсорным контроллером и 12-разрядными скоростными АЦП последовательного приближения (5 Msps). Данное семейство — это МК комбинированных сигналов с сигнальным микропроцессором (DSP) и с обработкой операций с плавающей запятой (FPU) с ординарной точностью. [12].

У МК STM32F3 ARM-ядро Cortex-M4F является расширением Cortex-M3 и поддерживает команды умножения с накоплением (MAC), команды управления потоками данных (SIMD) и команды «арифметики с насыщением». Реально достижимая производительность составляет 90 DMIPS на максимальной частоте ядра 72 МГц. Отсутствие циклов ожидания обеспечивается при работе с встроенной быстродействующей ССМ-памяти на 8 кБ, часто используемой в качестве высокоскоростной памяти данных. Большая часть оперативной памяти этих МК обеспечена аппаратной проверкой битов четности. Это позволяет распознавать сбои, связанные с внешними воздействиями электромагнитной природы. МК STM32F3 содержат блок защиты памяти (MPU), обычно используемый в ОСРВ для защиты критичных или сертифицированных задач от сбоев в других задачах. Данный блок может обслуживать до 8 регионов памяти, с делением до 8 блоков каждый.

Согласно [12], МК семейства STM32F3 совместимы программно, по выводам и средствами программирования и отладки с стандартной серией МК STM32F1. Они предназначены, главным образом, для систем управления, автоматизации производства, измерительных систем и систем сбора данных, медицинских приборов, аудио-приложений и интеллектуального управления мощным электроприводом.

Семейство микроконтроллеров STM32F4 — это линейка высокопроизводительных МК компании STMicroelectronics на базе высокопроизводительного ядра Cortex-M4, т.е. с сигнальным микропроцессором (DSP) и с обработкой операций с плавающей запятой (FPU). Согласно [13], эти микроконтроллеры включают в себя широкий набор интерфейсов и большой объем встроенной памяти: ядро Cortex-M4 с частотой процессора до 168 МГц, Flash-память до 1024 кБ, статическая оперативная память с произвольным доступом (SRAM) до 192 кБ, большее количество таймеров, часы реального времени (RTC), Ethernet интерфейс, USB Full-Speed OTG, USB High-Speed OTG (т.е. USB порт может выполнять обе ведущие и ведомые роли), до четырех универсальных асинхронных приёмопередатчика (UART), до трех двунаправленных двухпроводных шин управления (I2C), до трех четырехпроводных последовательных интерфейсов периферийных устройств, работающие в двух полнодуплексных режимах (SPI/2full duplex I2S),

до двух контроллеров (CAN), ориентированный прежде всего на объединение в единую сеть различных исполнительных устройств и датчиков, 12-битный АЦП и 12-битный ЦАП, интерфейс карт SD, встроенный температурный датчик, интерфейс видекамеры, а так же интерфейс внешней памяти (EMI), модуль шифрования (AES).

Размер памяти, бит

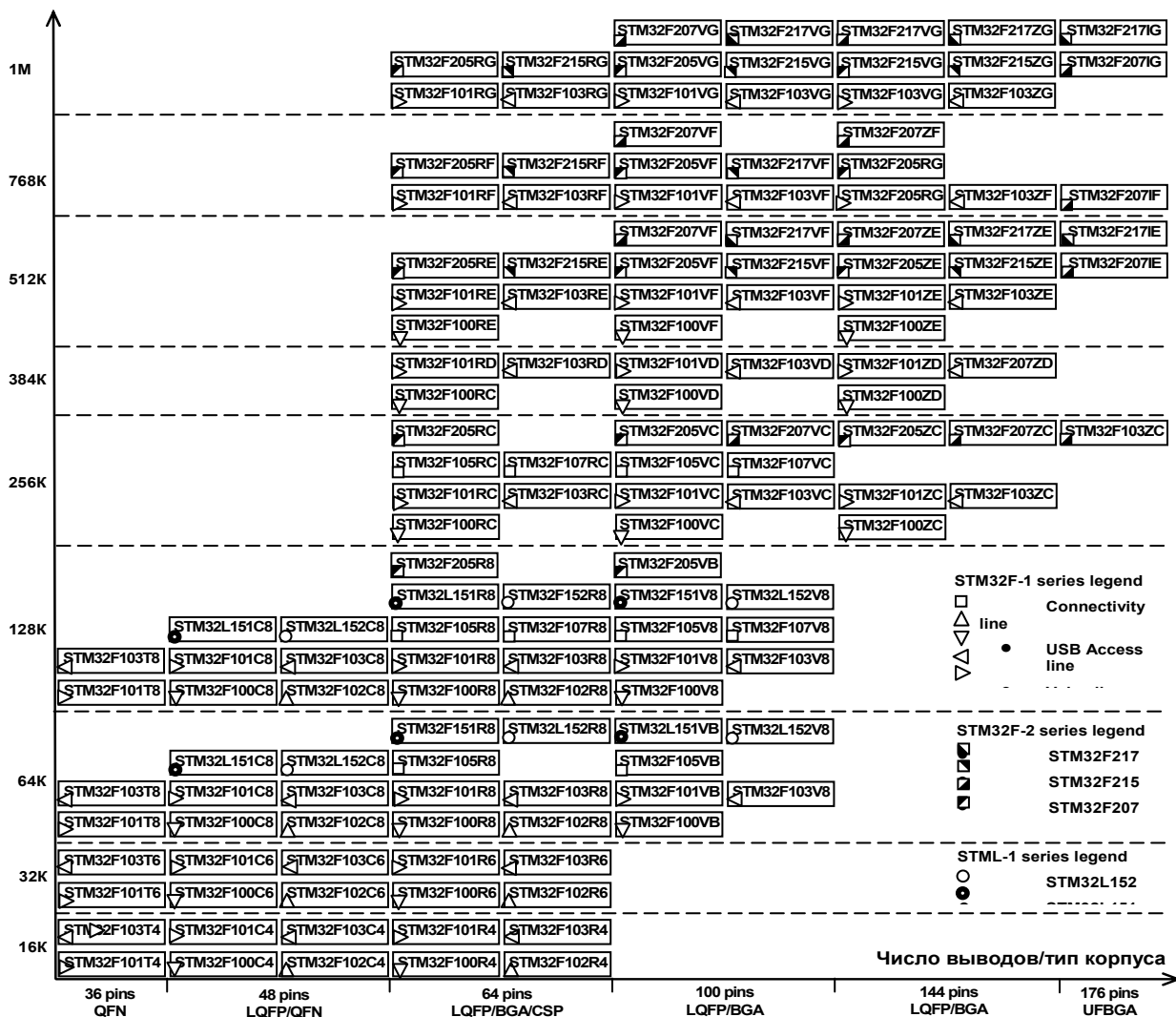


Рис. 8. Микроконтроллеры семейства STM32 в зависимости от объема флэш-памяти и типа корпуса

МК STM32F4 выпускаются в корпусах: LQFP100, LQFP144, LQFP176, UFBGA176 (рис. 8). Расшировка 32-битных МК приведена в табл.1 по данным [14].

Таблица 1

Расшифровка 32-битных микроконтроллеров от ST Microelektronics

STM32	F	103	C	B	T	6	XXX
Семейство	Тип	Под-семейство	Кол-во выводов	Объем FLASH памяти	Корпус	Температурный диапазон	Упаковка
32-битные Cortex микроконтроллеры	F – общее применение L – с низким энергопотреблением W – для беспроводной связи TS – семейство TouchScreen	103 207	F – 20 G – 28 K – 32 T – 36 H – 40 C – 48 R – 64 O – 90 V – 100 Z – 144 I – 176 B – 208 N – 216	4 – 16 6 – 32 8 – 64 B – 128 Z – 192 C – 256 D – 384 E – 512 F – 768 G – 1024 I – 2048	H – UFBGA N – TBGA P – TSSOP T – LQFP U – V/UFQFPN Y – WLCSP	6 – 40 ... +85°C 7 – 40 ... +85°C	TR – лента

На рис. 9 приведена обобщенная архитектура микроконтроллеров семейства STM32 по данным работы [15], где используются следующие дополнительные условные обозначения: ПДП — прямой доступ к памяти; ЧБР — часы реального времени; АWУ — автовозобновление работы по сигналу ЧБР; POR — сброс при подаче питания; PDR — сброс при снятии питания; PVD — схема контроля питания.

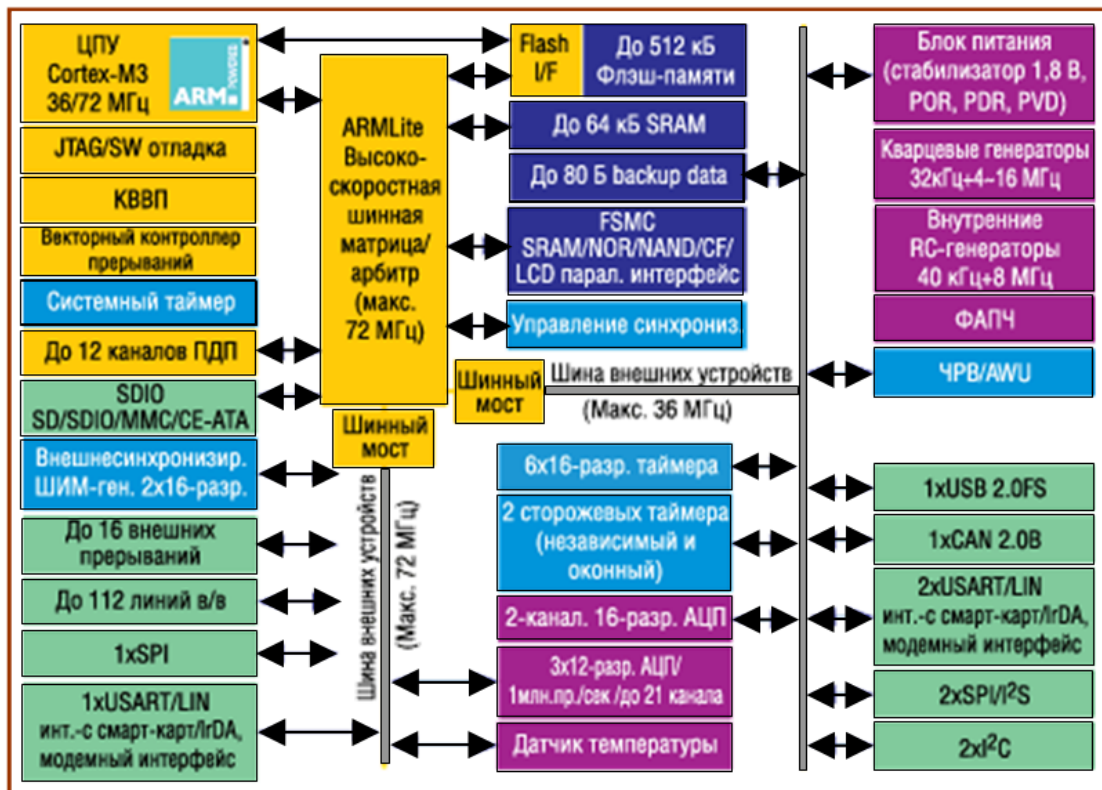


Рис. 9. Обобщенная архитектура микроконтроллеров семейства STM32

Следует отметить, что использование в STM32 64-разрядной шины flash-памяти с двумя 64-разрядными буферами предвыборки в большинстве случаев избавляет от задержек, которые связаны с тем, что flash, в отличие от ядра CORTEX M3, не работает на столь высоких скоростях (72 МГц) [15]. Ограничения скорости flash-памяти можно обойти за счет того, что извлечение кода из SRAM осуществляется на максимальной тактовой частоте. Можно использовать SRAM как некий аналог кэш-памяти, загружая туда критичные к быстродействию подпрограммы, такие как циклические алгоритмы DSP и обработка прерываний.

На практике разработчики сталкиваются со случаями, когда производительность быстрого ядра сводится на нет медленной периферией, или большие объемы данных переносятся в/из микроконтроллера и занимают шину или отбирают много ресурсов ядра на их перенос. Микроконтроллеры STM32 свободны от этих ограничений, так как имеют несколько внутренних шин (см. рис. 9), а также мощный семиканальный (в новых STM32 — двенадцатиканальный) DMA-контроллер, разгружающий ядро от ненужной работы.

Линии ввода/вывода STM32 совместимы с 5 В сигналами и индивидуально настраиваются как входы с опциями притяжки к земле/питанию или выходы с регулированием крутизны фронтов. Выводы, предназначенные для работы периферии, могут быть переназначены, позволяя производить гибкую настройку под конкретное приложение.

Во всех микроконтроллерах семейства STM32 встроен температурный датчик и прецизионный источник опорного напряжения. Их сигналы заведены на два специальных канала АЦП. Для увеличения точности допускается подача внешнего опорного напряжения.

Приложения управления в реальном масштабе времени требуют большого количества таймеров. Микроконтроллеры семейства STM32 хорошо вписываются в эти требования, благодаря наличию:

- таймера часов реального времени с током потребления 1,4 мкА при батарейном питании и возможности подключения внешнего кварцевого резонатора на частоту 32768 Гц;

- таймера непрерывного счета «SysTick», задающего базу времени для операционных систем реального времени;

- двух отдельных сторожевых таймеров. Первый таймер оконного типа позволяет детектировать отклонения от нормальной работы программы. Второй таймер, управляемый независимым RC-генератором, позволяет отслеживать изменения частоты основного тактового генератора. Оба таймера запускаются аппаратно в байте опций микроконтроллера;

- четырёх 16-разрядных таймеров с функциями IC/OC и ШИМ;

двух расширенных 16-разрядным таймеров управления со специальными функциями, идеально подходящими для управления трехфазными электродвигателями.

В целом универсальность системы увеличивается благодаря имеющейся системе каскадирования и синхронизации таймеров.

Дополнительную информацию по архитектуре микроконтроллеров STM32 можно найти в работе [16].

11. Периферия, интерфейсы и стандарты связи;

Периферия измерительных систем (приборы, принтеры, сканеры, LCD-мониторы, клавиатура, Web-камеры, мыши проводные, мыши беспроводные и т.д.) подключаются на физическом уровне к компьютеру через интерфейсы, спецификации на которые давно известны всему миру.

Интерфейс — совокупность унифицированных аппаратных, программных, конструктивных средств, необходимых для реализации алгоритмов взаимодействия различных функциональных блоков измерительных систем и приборов, а также функциональных блоков, входящих в состав автоматизированных систем управления [17].

В интерфейсе стандартизации подлежат: состав и тип линий связи, электрические и временные параметры сигналов, форматы передаваемой информации, команды и состояния, алгоритмы функционирования, а также конструктивное исполнение соединений. В приборах широко используются интерфейсы RS-232, RS-485 и др.

Производители, как правило, придерживаются установленных стандартов и спецификаций на интерфейсы обмена и передачи информации. При этом протоколы управления у каждого производителя могут быть разными. Протокол — это набор правил и процедур, необходимых для организации взаимодействия между оборудованием и программной средой. Все это необходимо учитывать при разработке архитектуры измерительных систем и приборов.

12. Программное обеспечение

Под программным обеспечением (ПО) средств измерений понимают компьютерную программу или совокупность программ, реализующие алгоритмы сбора, передачи, обработки, хранения и представления измерительной информации.

Различают: ПО процесса измерительного преобразования физических величин, аналого-цифрового преобразования, запоминания, предварительной обработки; ПО процесса обработки данных (в реальном времени или по окончании измерений); ПО сервиса (визуализация данных, результатов обработки, сигнализации, метрологической надежности, напряжения питания, значений входных измеряемых величин, контроль параметров измерительного канала с сенсором и т.д.); ПО управления работой стандартной периферией, синхронизацией работы функциональных блоков во времени; привязкой к реальному времени и т.д.

МК, например, семейства STM32, отличаются большим набором бесплатных библиотек ПО, среди которых можно выделить следующие [14]:

библиотека для всей стандартной периферии (UART, SPI, I²C, CAN, АЦП, ЦАП, таймеры, все источники тактирование, FSMC, IO, DMA, RTC, и т.д.);

библиотека для USB-интерфейса (с такими режимами как mass storage, HID, DFU, CDC, audio, а также хост full speed);

библиотека для Ethernet-интерфейса (MAC-уровень от ST и бесплатный полный TCP/IP-уровень от Interniche);

библиотеки для управления моторами (трехфазные бесщеточные моторы);

библиотеки для цифровой обработки сигнала DSP (PID, IIR, FFT, FIR);

библиотеки для воспроизведения звука (декодирования и кодирования на основе кодека SPEEX, с хорошим качеством звука);

библиотеки для графических решений.

Все эти библиотеки сопровождаются документацией по применению. Помимо бесплатных библиотек, есть огромный выбор платных от большого количества компаний — Keil, IAR, Micrium, Segger, Greenhills, Quadros, CMX, **Spirit DSP (PФ)** и т.д.

При создании архитектуры измерительной системы или прибора и их программного обеспечения (ПО) необходимо учитывать [17, 18]:

1. Требования к разделению ПО и его идентификации

— На этапе разработки рекомендуется выделить метрологически значимую часть ПО;

— Для каждого конкретного экземпляра СИ должно использоваться ПО, идентичное утвержденному;

— Необходимо обеспечить уполномоченным органам (организациям) возможность доступа к исполняемому коду метрологически значимой части ПО.

2. Требования к структуре программного обеспечения

— Метрологически значимое ПО разрабатывается таким образом, чтобы на него невозможно было оказать искажающее воздействие через интерфейсы пользователя и другие интерфейсы;

— Обмен данными между метрологически значимыми и не значимыми частями ПО необходимо проводить через защищенный интерфейс, который охватывает как все взаимодействия между этими частями

ПО, так и прохождение данных.

3. *Требования к влиянию ПО на метрологические характеристики средств измерений (СИ)*

— Влияние ПО на метрологические характеристики СИ должно быть оценено.

4. *Требования к защите программного обеспечения и данных*

— ПО СИ должно содержать средства обнаружения, обозначения и/или устранения сбоев (функциональных дефектов) и искажений, которые нарушают целостность программного обеспечения и данных;

— Метрологически значимое ПО СИ и данные должны быть защищены от случайных или непреднамеренных изменений;

— Метрологически значимое ПО СИ и данные должны быть защищены от несанкционированной модификации.

5. *Специальные требования к программному обеспечению*

— ПО СИ в случае использования в них таких информационных технологий как загрузка, долговременное сохранение, передача и разделение должно удовлетворять требованиям ГОСТ Р 8.654 – 2009.

При разработке архитектуры измерительных систем и приборов необходимо выбрать один из следующих способов защиты ПО СИ [19]:

а) *использование физической памяти*

Для сохранения контролируемого ПО СИ используется не перезаписываемая физическая память.

При этом корпус печатывается таким способом, чтобы невозможно было подменить элементную базу (элемент физической

памяти, в котором записано контролируемое ПО СИ). Аппаратные интерфейсы будут защищенными.

б) *использование встроенной функции*

Используется встроенная функция, которая осуществляет сравнение текущей контрольной характеристики с эталонной, которая сохраняется на внешнем носителе. Или, если ПО СИ имеет электронную цифровую подпись (ЭЦП), проверяется ЭЦП, выполняя требования по безопасности применения технологии ЭЦП и применяя сертифицированные средства ЭЦП;

в) *комбинированный подход*

Используется встроенная функция, которая осуществляет сравнение текущего контрольного кода с кодом, который сохраняется в физической памяти СИ.

После аттестации контрольное ПО СИ не должно изменяться без уведомления органа, проводящего его аттестацию.

13. *Операционные системы реального времени*

На выбор архитектуры измерительной системы и прибора не последнюю роль играет и операционная система (ОС) реального времени, на которую делается ставка.

Так, например, при выборе микроконтроллера семейства STM32 необходимо знать, что ядро Cortex-M3 не поддерживает Linux. Поэтому разработчикам лучше обратить внимание на такие ядра, как ARM9. Но ядро Cortex-M3 в сравнении с ARM7 улучшено с точки зрения ОС реального времени (RTOS). Оно имеет два привилегированных режима и два специализированных стека. Также ядро имеет большую гибкость с точки зрения установления приоритетов среди прерываний и дополнительный системный таймер SysTick. Все это дает возможность строить операционные системы реального времени более высокого качества. Для микроконтроллеров STM32 разработано уже множество операционных систем, часть из них приведена в табл. 2 (полный список можно посмотреть на официальном сайте STMicroelectronics).

В итоге можно сказать, что на сегодня имеются все условия для успешной, удобной и быстрой разработки измерительных систем и приборов на базе микроконтроллеров STM, поскольку продукция фирмы STMicroelectronics отличается от других производителей микроконтроллеров прекрасным соотношением «цена/функционал» при сохранении самых высоких стандартов качества. Микроконтроллеры семейства STM32 — яркий пример этому. Для разработчиков, выбирающих бюджетные решения, имеются очень доступные с точки зрения цены отладочные модули, бесплатные среды разработки, бесплатные библиотеки и операционные системы RTOS.

Иными словами, для успешного проектирования измерительных систем и приборов на базе микроконтроллеров семейства STM32 требуются только интеллект и творчество разработчика.

14. *Архитектура операционных систем*

Большинство современных ОС представляют собой хорошо структурированные модульные системы, способные к развитию, расширению и переносу на новые платформы. Какой-либо единой архитектуры ОС не существует, но существуют универсальные подходы к структурированию ОС [20, 21].

На сегодняшний день наиболее перспективной является концепция микроядерной архитектуры операционных систем.

Суть микроядерной архитектуры состоит в следующем. Если при классическом способе построения ОС все основные функции операционной системы, составляющие многослойное ядро, выполняются в привилегированном режиме, то новая архитектура ОС основана на том, что в привилегированном режиме работает только очень небольшая часть ОС, называемая микроядром. Все остальные высокоуровневые функции ядра оформляются в виде приложений, работающих в пользовательском режиме.

Операционные системы реального времени для микроконтроллеров STM32

Компания	Наименование ОС	Описание	ROM	RAM
FreeRTOS.org	FreeRTOS	Надежная портируемая RTOS с открытыми исходными кодами и двух вариантах — платный и бесплатный, с возможностью технической поддержки. Также есть версия SafeRTOS, специфицируемая по стандарту IEC 61508.	4,2К	1К
Micrium	μC/OS-II	Легко портируемая, масштабируемая RTOS, поддерживающая многозадачность (до 250 задач), сертифицированная для критических условий эксплуатации (медицина, авиационная электроника)	16К	2К
IAR	PowerPac	Полноценная RTOS с высокоэффективной файловой системой. Поставляется с многими примерами и, по выбору, — с USB-стеком для приборов класса HID, MSD и CDC.	2...4К	51 байт
Quadros System	RTXC Quadro	Гибкая масштабируемая RTOS с большим набором стеков и драйверов для периферии (TC/IP, USB, файловая система, графические GUI-инструменты, CAN и т.д.). Поддерживается средством разработки VisualRTXC — идеальная среда для начинающих работу с 32-битными микроконтроллерами.	<20К	<4К
Keik	ARXC-ARM	Многозадачная вытесняющая RTOS, поддерживающая почтовый ящик и pool памяти, включает файловую систему и передачу данных по протоколу TC/IP.	6К	0,5К
CMX	CMX-RT	Операционная система реального времени, поддерживающая многозадачность, без отчислений.	<10К	<1К

Согласно [20], в состав микроядра обычно входят машинно-зависимые модули, а также модули, выполняющие базовые (но не все!) функции ядра по управлению процессами, обработке прерываний, управлению виртуальной памятью, пересылке сообщений и управлению устройствами ввода-вывода, связанные с загрузкой или чтением регистров устройств. Набор функций микроядра обычно соответствует функциям слоя базовых механизмов обычного ядра. Такие функции операционной системы трудно, а порой и невозможно выполнить в пространстве пользователя.

Операционные системы, основанные на концепции микроядра, в высокой степени удовлетворяют большинству требований, предъявляемых к современным ОС, поскольку обладают переносимостью, расширяемостью, надежностью и создают хорошие предпосылки для поддержки распределенных приложений. Основным недостатком микроядерной архитектуры является снижение производительности.

Высокая степень переносимости обусловлена тем, что весь машинно-зависимый код изолирован в микроядре, поэтому для переноса системы на новый процессор требуется меньше изменений и все они логически сгруппированы вместе.

Микроядерная архитектура является альтернативой классическому способу построения ОС.

Разновидности структур измерительных систем и приборов, требования к ним, вопросы расширения функциональных возможностей сенсоров, общие принципы построения и применения измерительных систем и приборов и другие вопросы будут рассмотрены в следующем сообщении.

Выводы

Рассмотрены три наиболее популярные архитектуры АЦП, которые, с учетом областей их применения, вносят определенный вклад в архитектуру измерительных систем и приборов.

Отмечается, что в большинстве случаев высокое разрешение и наличие встроенного инструментального усилителя позволяют подключать АЦП непосредственно к выходу датчика без необходимости использования отдельного измерительного усилителя или других схем согласования.

Использование поисковых систем и рекомендаций по выбору АЦП и ЦАП, предоставляемых производителями, в сочетании с фундаментальными знаниями об этих трёх архитектурах, могут помочь разработчику правильно выбрать АЦП для решения поставленной измерительной задачи.

Микроконтроллеры с ядром Cortex-M0/M3/M4 компании NXP Semiconductors N.V. имеют наибольший успех на рынке. Правильный выбор микроконтроллеров, выполненных на ядре Cortex с ARM-архитектурой, — залог успешной разработки архитектуры измерительных систем и приборов.

Установлено, что одним из существенных отличий архитектуры ARM от других архитектур цифровых программируемых устройств является так называемая *предикация* — возможность условного исполнения практически любой команды.

На сегодня существует три профиля архитектур APM, используемых при создании

микроконтроллеров:

«А» (application) — для устройств, требующих высокой производительности (смартфоны, планшеты);

«R» (real time) — для приложений, работающих в реальном времени;

«М» (microcontroller) — для микроконтроллеров (МК) и недорогих встраиваемых устройств.

Архитектура микроконтроллеров семейства STM32, выполненных на ядре ARM Cortex-M0/M3/M4, во многом определяется их применением, в частности:

STM32W — 24МГц/30DMIPS МК для беспроводной связи;

STM32L — 32МГц/33DMIPS МК с батарейным питанием;

STM32F0 — 48МГц/38DMIPS МК для весьма дешевых приложений;

STM32F1 — 72МГц/61DMIPS МК общего назначения;

STM32F2 — 120МГц/150DMIPS высокопроизводительные МК;

STM32F3 — 72МГц/90DMIPS — МК комбинированных сигналов с DSP и FPU;

STM32F4 — 168МГц/210DMIPS — высокопроизводительные МК с DSP и FPU.

Приведены основные технические данные по семи типам микроконтроллеров семейства STM32, обеспечивающие их правильный выбор для создания измерительных систем и приборов.

Отмечено, что в интерфейсе стандартизации подлежат: состав и тип линий связи, электрические и временные параметры сигналов, форматы передаваемой информации, команды и состояния, алгоритмы функционирования, а также конструктивное исполнение соединений. В приборах широко используются интерфейсы RS-232, RS-485 и др.

При создании архитектуры измерительной системы или прибора и их программного обеспечения необходимо учитывать требования к разделению программного обеспечения и его идентификации, требования к структуре программного обеспечения, требования к влиянию программного обеспечения на метрологические характеристики СИ, требования к защите программного обеспечения и данных, специальные требования к программному обеспечению.

На выбор архитектуры измерительной системы и прибора не последнюю роль играет и операционная система реального времени, на которую делается ставка. Приведен ряд операционные системы реального времени, разработанных известными компаниями для микроконтроллеров STM32.

Установлено, что большинство современных операционных систем представляют собой хорошо структурированные модульные системы, способные к развитию, расширению и переносу на новые платформы. Какой-либо единой архитектуры операционной системы не существует, но существуют универсальные подходы к структурированию операционных систем.

Установлено, что на сегодняшний день наиболее перспективной является концепция микроядерной архитектуры операционных систем. Их новая архитектура основана на том, что в привилегированном режиме работает только очень небольшая часть операционной системы, называемая микроядром. Все остальные высокоуровневые функции ядра оформляются в виде приложений, работающих в пользовательском режиме.

Операционные системы, основанные на концепции микроядра, в высокой степени удовлетворяют большинству требований, предъявляемых к современным операционным системам, поскольку обладают переносимостью, расширяемостью, надежностью и создают хорошие предпосылки для поддержки распределенных приложений. Основным недостатком микроядерной архитектуры является снижение производительности.

Литература

1. Какая архитектура АЦП подходит для вашей задачи? Режим доступа: <http://www.google.com.ua/url?sa=t&rcct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CBsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.soel.ru%2Fcms%2F%2F%3F%2F369593.pdf&ei=ZxqU6wIhdjhBOmygMAE&usq=AFQjCNFHjmaR4XYnuhIjVX-Sc6yw5uSU-w&%20bvm=bv.72676100,d.bGE>
2. Двухядерные микроконтроллеры CORTEX-M4/M0 от NXP. Режим доступа: http://nauka.relis.ru/20/01_09/20109021.htm.
3. АРМ (архитектура) https://ru.wikipedia.org/wiki/ARM_%28%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0%29
4. ARM Cortex-A12. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/ARM_Cortex-A12.
5. ARM Cortex-A15. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/ARM_Cortex-A15_MPCore.
6. Новые микроконтроллеры STM32F3XX. Режим доступа: <http://vestnikmag.ru/articlesposts/novye-mikrokontrollery-stm32f3xx/>.
7. Микроконтроллеры STM32W для беспроводной связи. Режим доступа: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32W>.
8. Микроконтроллеры STM32W с батарейным питанием. Режим доступа: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32L>.
9. Микроконтроллеры STM32FO для ультрадешёвых приложений. Режим доступа: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32F0>.

10. Семейство микроконтроллеров STM32F1. Режим доступа: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32F1>.
11. Семейство высокопроизводительных микроконтроллеров STM32F2xx. Режим доступа: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32F2>.
12. Семейство микроконтроллеров STM32F3. Режим доступа: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32F3>.
13. Семейство микроконтроллеров STM32F4. Режим доступа: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32F4>.
14. STM32: эпоха 32-битных микроконтроллеров наступила. Режим доступа: <http://www.compel.ru/lib/ne/2011/2/3-stm32-epoha-32-bitnyih-mikrokontrollerov-nastupila/>
15. 15.Архитектура. Режим доступа: <http://www.kosmodrom.com.ua/data/stm32.php>.
16. Ознакомительное руководство по ARM-микроконтроллерам Cortex-M3. Режим доступа: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/micros/arm/cortex_arh/index.htm.
17. Программное обеспечение средств измерений. Режим доступа: https://www.google.com.ua/?gws_rd=ssl#q=%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B5+%D0%BE%D0%B1%D0%B5%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5+%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D1%85+%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC
18. ГОСТ Р 8.654 – 2009. ГСИ. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения (взамен МИ 2891 – 2004).
19. Порядок атестації програмного забезпечення засобів вимірювальної техніки. Режим доступа: http://www.uazakon.com/documents/date_9k/pg_izcgxm.htm
20. Архитектура операционных систем. Режим доступа: <http://education.aspu.ru/view.php?olif=gl3>,
21. Гула І.В. Застосування операційних систем реального часу в задачах вимірювання та обробки вимірювальної інформації / І.В. Гула, Л.Є. Байдич, А.В. Клепиковський, Є.Г. Махрова. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – №4. – С. 120-123.
22. Нездоровін В. П. Архітектура ARM як потенційна основа ГРІД-інфраструктури наукової бази України / В. П. Нездоровін, К.Л. Горященко, Є. Г. Махрова // Вісник ХНУ. - 2012. - №1. - С.204-208

References

1. Kakaja arkhitektura ATsP podkhodit dlja vashej zadachi? Rezhim dostupa: <http://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CBsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.soe1.ru%2Fcms%2F%2F%3F%2F369593.pdf&ei=ZxzqU6wIhdjhBOMygMAE&usq=AFQjCNFhJmaR4XyNuhJjVX-Sc6yw5uSu-w&%20bvm=bv.72676100.d.bGE>
2. Dvukhjadernye mikrokontrollery CORTEX-M4/M0 ot NXP. Rezhim dostupa: <http://nauka.relis.ru/20/0109/20109021.htm>.
3. ARM (arkhitektura). Rezhim dostupa: https://ru.wikipedia.org/wiki/ARM_%28%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0%29
4. ARM Cortex-A12. Rezhim dostupa: https://ru.wikipedia.org/wiki/ARM_Cortex-A12.
5. ARM Cortex-A15. Rezhim dostupa: https://ru.wikipedia.org/wiki/ARM_Cortex-A15_MPCore.
6. Novyje mikrokontrollery STM32F3XX. Rezhim dostupa: <http://vestnikmag.ru/articlesposts/novye-mikrokontrollery-stm32f3xx/>.
7. Mikrokontrollery STM32W dlja besprovodnoj svyazi. Rezhim dostupa: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32W>.
8. Mikrokontrollery STM32W s batarejnym pitaniem. Rezhim dostupa: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32L>
9. Mikrokontrollery STM32FO dlja ultradeshovykh prilozhenij. Rezhim dostupa: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32FO>.
10. Semejstvo mikrokontrollerov STM32F1. Rezhim dostupa: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32F1>.
11. Semejstvo vysokoproduktivnykh mikrokontrollerov STM32F2xx. Rezhim dostupa: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32F2>.
12. Semejstvo mikrokontrollerov STM32F3. Rezhim dostupa: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32F3>.
13. Semejstvo mikrokontrollerov STM32F4. Rezhim dostupa: <http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?name=STM32F4>.
14. STM32: epokha 32-bitnykh mikrokontrollerov nastupila. Rezhim dostupa: <http://www.compel.ru/lib/ne/2011/2/3-stm32-epoha-32-bitnyih-mikrokontrollerov-nastupila/>
15. Arkhitektura. Rezhim dostupa: <http://www.kosmodrom.com.ua/data/stm32.php>.
16. Oznakomitelnoje rukovodstvo po ARM-mikrokontrolleram Cortex-M3. Rezhim dostupa: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/micros/arm/cortex_arh/index.htm.
17. Programnoje obespechenije sredstv izmerenij. Rezhim dostupa: https://www.google.com.ua/?gws_rd=ssl#q=%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B5+%D0%BE%D0%B1%D0%B5%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5+%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D1%85+%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC
18. ГОСТ Р 8.654 – 2009. ГСИ. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения (взамен МИ 2891 – 2004).
19. Porjadok attestatsii programmnoho zabezpechennja zasobiv vymiryuvalnoji tekhniki. Rezhim dostupa: http://www.uazakon.com/documents/date_9k/pg_izcgxm.htm.
20. Arkhitektura operatsionnykh sistem. Rezhim dostupa: <http://education.aspu.ru/view.php?olif=gl3>.
21. Hula I.V., Baidych L.Ye., Klepikovskiy A.V., Makhrova Ye.H. Zastosuvannia operatsionnykh system realnogo chasu v zadachakh vymiryuvannia ta obrobky vymiryuvalnoi informatsii. Khmelnytskyi. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Technical sciences. 2014. Issue 4. P. 120-123.
22. Nezdorovin V. P., Gorjashhenko K.L., Mahrova E. G. Arhitektura ARM jak potencijna osnova GRID-infrastrukturi naukovoї bazi Ukraini. Visnyk HNU. 2012. №1. P. 204-208