

# Тенденции развития микропроцессоров и микроконтроллеров

Пётр Павлов (Москва)

**В статье представлен краткий анализ рынка микроконтроллеров, вскрыты причины доминирования в разработках 8-разрядных микросхем, определены тенденции развития рынка на ближайшее будущее. Обзор сопровождается конкретными примерами и будет интересен как маркетологам, так и инженерам-разработчикам.**

Стратегия развития сегодняшнего рынка микропроцессоров и микроконтроллеров направлена на предоставление разработчику микросхем с большей производительностью, широким набором периферии и малым энергопотреблением.

Рост производительности микроконтроллеров обуславливается расширяющимся применением 32-битных процессоров. Использование компаниями микроконтроллерного рынка архитектуры ARM произвело поистине революционный переворот в создании высокопроизводительных микросхем и проникновении на рынок COTS-технологий.

Однако растёт вычислительная мощность и восьмиразрядных микросхем с «архаичной», но ставшей уже стандартной архитектурой 8051, диапазон производительности которой простирается ныне от единиц до сотен MIPS. Ещё одной инновацией, способствующей росту производительности микроконтроллеров, является внедрение в них элементов архитектуры цифровых сигнальных процессоров.

В числе «стандартной» коммуникационной периферии микропроцессоров и микроконтроллеров сегодня находятся интерфейсы Ethernet, USB, а у микросхем, ориентированных на автомобильный рынок, – CAN, LIN, MOST, FlexRay.

Качество и темпы разработок приложений на основе современных микроконтроллеров обеспечиваются не только расширяющимся набором программного инструментария, но и включением в конструкцию кристалла систем для внутрисхемной отладки.

Если первые процессорные микросхемы являлись плодом пытливых мысли инженеров и учёных и формировали рынок, то сегодня сам рынок определяет ход мысли создателей современных процессорных архитектур и микроархитектурных конструкций. Рынок формирует список потребностей заказчиков и устраивает аукционные торги по «распродаже» этих потребностей OEM-производителям. Своеобразием этого аукциона является то, что, в отличие от антикварных салонов, участники инновационных торгов побеждают, предлагая меньшую цену. Минимизация цены конечных встроенных систем транслируется производителям элементной базы для таких систем. Именно это определяет «живучесть» 8-разрядных микроконтроллеров, доля продаж которых составляет приблизительно половину от общего объёма продаж аналогичных микросхем. А если перевести эти деньги в штуки микросхем, то при небольшой стоимости 8-разрядных микроконтроллеров их доминирование в производстве станет просто неоспоримым. В 2007 г. рынок 8-разрядных микроконтроллеров в «штучном» выражении может составить 4,2 млрд. микросхем.

## Недорогие, компактные, но достаточно мощные...

В качестве примера недорогих современных 8-разрядных микроконтроллеров можно привести новое семейство MC9RS08KA компании Freescale Semiconductor, реализованное на основе ядра RS08. Компактные размеры позволяют размещать эти микросхемы в электрической зубной

щётке. Ядро RS08 является «урезанной» версией высокопроизводительной архитектуры HCS08, отличающейся низким энергопотреблением. Рабочая тактовая частота ядра микросхем нового семейства достигает 10 МГц, а напряжение питания составляет 1,8 В. Встроенный стабилизатор напряжения обеспечивает питание «логики», а также, вместе с гибкой системой тактирования, общую экономичность микроконтроллеров. В конструкции микросхем предусмотрен детектор низкого уровня питания. Новые микроконтроллеры выпускаются в корпусах с 6 или 8 выводами, имеют до 2 Кб флэш-памяти с возможностью побайтного программирования и 63 байта памяти RAM. В составе периферии имеется аналоговый компаратор и четыре линии ввода/вывода общего назначения.

«Урезание» количества выводов позволяет доводить габариты 8-разрядных микроконтроллеров до минимума и при этом снабжать их развитым набором периферии. Микроконтроллеры ST7FLITEUS от STMicroelectronics в 8-выводных корпусах DFN имеют толщину 0,9 мм и площадь менее 16 мм<sup>2</sup>.

Миниатюрность не мешает на кристалле ST7FLITEUS разместить 12- и 8-битный таймеры, 5-канальный 10-битный АЦП, RC-генератор. Двенадцатибитный таймер с автоперезагрузкой и диапазоном рабочих частот 250 Гц...4 МГц генерирует ШИМ-сигнал с функцией сравнения на выходе (output compare function). Восемьбитный таймер поддерживает работу «сторожевого» таймера, системы сбора входных данных и их временной привязки. Наличие 12-битного таймера позволяет использовать новые микроконтроллеры в системах управления двигателями. Рабочий температурный диапазон ST7FLITEUS составляет –40°C...+125°C. Пять режимов энергосбережения делают микроконтроллеры ST7FLITEUS весьма экономичными.

Компанией Atmel созданы 8-разрядные микроконтроллеры ATmega88, сертифицированные для работы при температурах до +150°C (AECQ100 Grade 0). Микроконтроллеры предназначены для автомобильных приложений и позволяют разработчикам создавать распределённые системы, встраивая управляющие модули непосредственно в такие агрегаты, как коробка передач, двигатель, турбокомпрессор и т.п. Микроконтроллер ATmega88 вклю-

чает 8 Кб флэш-памяти программ, 512 байт памяти EEPROM, усилитель, 10-разрядный АЦП, быстрый аналоговый компаратор, генератор тактовых сигналов на 8 МГц. Надёжная работа микроконтроллера обеспечивается наличием подсистем Power-on-Reset (перезапуск при подаче питания), Brown-out-Detector (детектор сбоев питания), «сторожевого» таймера.

Спектр приложений для 8-битных микроконтроллеров существенно расширился за счёт того, что теперь они поддерживают технологии Ethernet. Сегодняшним 8-разрядным «малышам» под силу работа во «всемирной паутине». Новинкой продуктовой линейки компании Microchip Technology является семейство миниатюрных 8-разрядных микроконтроллеров PIC18F97J60, поддерживающих интерфейс IEEE 802.3 Ethernet.

Интегрированный 10BASE-T Ethernet-контроллер (уровни MAC и PHY), производительность вычислительного ядра в 10 MIPS, 128 Кб флэш-памяти программ и 4 Кб памяти RAM позволяют использовать новую микросхему в системах мониторинга серверного оборудования, контроля окружающей среды, системах «интеллектуального» здания, бытовой автоматики, торговом оборудовании. Ресурсы памяти PIC18F97J60 обеспечивают размещение стека протоколов TCP/IP, Web-сервера и кода приложения. Усовершенствованный Ethernet-буфер объёмом 8 Кб поддерживает операции хранения и модификации пакетов. Компания Microchip бесплатно предоставляет стек протоколов TCP/IP ([www.microchip.com/tcpip](http://www.microchip.com/tcpip)) для ускорения разработки приложений.

Новые микроконтроллеры Rabbit 4000 от Rabbit Semiconductor в 128-выводных корпусах TQFP и TFPGA, имеющие максимальную рабочую тактовую частоту ядра 60 МГц, также поддерживают интерфейс 10Base-T Ethernet. Назначение многих выводов микропроцессора изменяется программно. В составе периферии микросхем имеются аппаратные средства защиты данных, контролер прямого доступа к памяти (DMA), до 40 линий ввода-вывода общего назначения.

### С ДОСТАТОЧНЫМИ РЕСУРСАМИ ПАМЯТИ И УДОБНЫЕ ДЛЯ РАЗРАБОТОК...

Технологией «выживания» 8-разрядных микроконтроллеров стал пе-

реход к использованию флэш-памяти для хранения программного кода, что, помимо прочего, облегчает модернизацию готовых систем. При этом компактные 6-выводные микроконтроллеры могут иметь 512 байт флэш-памяти, тактовый генератор на 4 МГц, 8-битный таймер, аналоговый компаратор, несколько линий GPIO.

Встроенная флэш-память активно применяется в большинстве новых микроконтроллеров, что придаёт гибкость разработке, обеспечивая возможность перепрограммирования флэш-памяти в готовой системе. Благодаря этому изменения кода могут оперативно вноситься и тестироваться во время разработки, а обновление программного обеспечения при необходимости может быть произведено и в готовом оборудовании.

Современные микроконтроллеры обладают большими возможностями при отладке приложений. Это достигается включением в конструкцию кристалла встроенного модуля эмуляции и добавлением нескольких дополнительных контактов для поддержки отладочного порта JTAG (стандарт IEEE 1149.1). Для микроконтроллеров, имеющих несколько десятков выводов, это является оправданной «платой» за удобство отладки. Для устройств с малым количеством выводов используется мультиплексирование сигналов интерфейса JTAG. Сегодня некоторые разработчики микроконтроллеров «втискивают» JTAG-отладку в один разъём. Интерфейс JTAG устанавливается в микросхемы и широко применяется в процессе производства при автоматическом тестировании.

«Паразитный» прирост площади подложки, требуемой для размещения модуля эмуляции, составляет не более 5%. В то же время его применение с интерфейсом JTAG обеспечивает высокоуровневый доступ и возможность управления всеми цифровыми и периферийными аналоговыми устройствами, ресурсами процессора, а также кодом приложения, размещённым во флэш-памяти. При этом достигается полная идентичность электрических характеристик отлаживаемой системы и конечного продукта.

Интегрированная система отладки является ещё одним инструментом продления жизненного цикла апробированных микроконтроллерных архитектур. В продуктовой линейке корпо-

рации Atmel появилась микросхема T89C51RE2, представляющая собой микроконтроллер на основе архитектуры 8051 с флэш-памятью программ объёмом 128 Кб. Новинка дополняет семейство микроконтроллеров AT89C51RB2/RC2/RD2/ED2 с архитектурой 8051, имеющих флэш-память объёмом 16, 32 и 64 Кб, фактически превратившихся в промышленный стандарт. Ключевой особенностью микроконтроллера AT89C51RE2 является интегрированная на кристалле схема поддержки отладки, что снижает стоимость эмуляции, позволяет проводить отладку в режиме реального времени и ускоряет процесс отладки.

Напряжение питания микроконтроллера AT89C51RE2 составляет 2,7...5,5 В, рабочая тактовая частота – 2...40 МГц, максимальная производительность – 4 MIPS. Микроконтроллер AT89C51RE2, помимо памяти RAM объёмом 8 Кб, имеет развитую периферию, включающую два порта UART, «сторожевой» таймер, подсистемы детектирования сбоев питания и перезапуска системы после них, счётчик PCA, интерфейс SPI, систему поддержки отладки (on-chip debug), 50 линий ввода/вывода общего назначения. Новый микроконтроллер предлагается для использования в потребительских и промышленных приложениях, таких как управление двигателями, «интеллектуальные» сенсорные системы, телевизионные приставки.

### «БЫСТРО, КАК ТОЛЬКО МОЖНО... ЕЩЁ БЫСТРЕЕ...»

Однако дешёвизна, в том числе за счёт ускорения и упрощения процесса отладки, и компактность сегодня должны быть дополнены высокой производительностью (конечно, понятие «высокая производительность» не является абсолютным).

«Патриарх» микроконтроллерного мира – архитектура 8051, появившаяся в 70-х годах прошлого века – на «заре своей юности» использовала 12 циклов для выполнения одной инструкции. Через 20 лет Dallas Semiconductor (нынешняя Maxim Integrated Products) снизила эти «затраты» до 4 циклов. В 2006 г. компанией Atmel представлены шесть новых микроконтроллеров (AT89LP214, AT89LP213, AT89LP414, AT89LP413, AT89LP216, AT89LP416) на основе архитектуры Atmel 8051 Single Cycle Core, которая обеспечивает исполне-

ние 70% инструкций за один цикл. Производительность новых микросхем может достигать 20 MIPS на тактовой частоте 20 МГц. По сравнению с традиционной архитектурой 8051 инновации Atmel повышают производительность в 12 раз и позволяют снизить энергопотребление на 80%. Новые микросхемы включают подсистемы, обеспечивающие отладку на кристалле, аппаратное умножение, ШИМ, имеют системы аналогового компаратора, тактового генератора и 12 линий ввода/вывода общего назначения. Это позволяет использовать их в приложениях управления двигателями, управления зарядкой аккумуляторов и т.п.

Во встроенных системах, где цена и габаритные ограничения по сравнению с производительностью отступают на второй план, неизбежен переход на 32-разрядные архитектуры. При этом применение для их производства технологических процессов с проектными нормами 0,35 мкм, 0,25 мкм и 0,18 мкм позволяет снизить площадь кристаллов и повысить выход «годных» с одной кремниевой пластины до уровня, обеспечивающего сравнимость цен 8- и 32-разрядных микросхем.

Одной из особенностей перехода к 32-разрядным высокопроизводительным процессорным ядрам в микроконтроллерах является возможность отказаться от избыточности периферии в 8- и 16-разрядных микросхемах. Зачастую эти блоки представляют собой системы, призванные закрыть «прорехи», которые обусловлены маломощностью вычислительных ядер (большие буферы FIFO, дополнительный набор регистров UART, дополнительные цепи интерполяции ЦАП и т.п.). Для 32-битных процессоров вспомогательные подсистемы уже не нужны, и отказ от них сокращает площадь кристалла.

Для создания микроконтроллеров уже применяются 90-нанометровые технологии, на базе которых производится, например, семейство 32-разрядных микроконтроллеров LPC3000 с архитектурой ARM926EJ-S и с тактовой частотой до 200 МГц.

О том, что может обеспечить современная 32-разрядная архитектура на микроконтроллерном рынке, можно судить по микросхеме SH7203 с уровнем производительности 480 MIPS, сравнимым с производительностью

промышленных ПК. Время реакции на прерывания у микроконтроллера составляет лишь 30 нс при тактовой частоте 200 МГц.

Микроконтроллер SH7203 создан компанией Renesas на основе 32-разрядного RISC-ядра SH2-A-FPU, имеет сопроцессор для работы с плавающей запятой (FPU) с одинарной и двойной точностью. Удельная производительность нового микроконтроллера с пятиступенчатым конвейером – 2,4 MIPS/МГц. Сопроцессор для работы с плавающей запятой нового микроконтроллера имеет производительность 400 MFLOPS. Модуль FPU может использоваться для поддержки алгоритмов цифровой обработки сигналов, включая одновременное декодирование нескольких потоков.

В составе периферии нового микроконтроллера имеется инструмент для создания системы сбора данных и управления: 8-канальный 10-разрядный АЦП, 2-канальный 8-разрядный ЦАП, таймер сравнения (Compare-Match-Timer), «часы» реального времени (Real Time Clock).

Сочетание высокопроизводительных ядер и сопроцессора, периферии для создания системы сбора данных и управления, интерфейсов CAN, USB, портов последовательной передачи данных, драйвера ЖК-дисплея позволяет использовать новый микроконтроллер для современных систем управления двигателями и иных промышленных приложений реального времени.

### ПЕРИФЕРИЯ, НА КОТОРУЮ МОЖНО ОПЕРЕТЬСЯ...

Оценивая однокристалльные компьютеры – микроконтроллеры, всегда анализируют характеристики не только процессорного ядра, но и коммуникационной подсистемы и поддерживаемой памяти.

Важнейшей частью периферии являются коммуникационные интерфейсы. Автомобильные системы широко используют CAN, портативная бытовая электроника нуждается в USB, телекоммуникационные устройства всё активнее опираются на Ethernet, причём сетевые передачи должны быть надёжно защищены. Для этого, например, новые флэш-микроконтроллеры AT91SAM7X128 и AT91SAM7X256 корпорации Atmel с архитектурой ARM7 имеют систему аппаратного шифрования на основе

технологий AES/3DES. Встроенный процессор шифрования AES и тройного DES совместно с контроллером прямого доступа к памяти периферийных устройств обеспечивает шифрование и дешифрование данных на скорости до 80 Мбит/с для AES, 32,8 Мбит/с для DES и 20 Мбит/с для тройного DES. Аппаратная поддержка шифрования данных позволяет в ряде случаев в 20 раз ускорить этот процесс по сравнению с его программной реализацией.

Сегодня в конструкции микроконтроллера наиболее затратной с точки зрения занимаемой площади является память, а именно, флэш-память для хранения кода программ и SRAM для хранения данных. Для оптимизации размеров памяти SRAM усовершенствованы технологии размещения и хранения данных в ней. Технология «невывороченной» выборки (unaligned data) позволяет хранить данные разных типов рядом. Для уменьшения потребных ресурсов SRAM используется техника связывания битов (bit banding). Позволяя манипулировать единичными битами, она обеспечивает 100-% использование памяти в приложениях, управляющих «единичными» («статусными») данными.

Чтобы облегчить своим заказчикам переход на 32-разрядную платформу, компания Freescale Semiconductor создала новое процессорное ядро для 32-разрядных микроконтроллеров, совместимых с 8-разрядными платформами.

Новое процессорное ядро 68K/ColdFire V1 позволяет создать 32-разрядные платформы, совместимые с 8-разрядными. Ядро 68K/ColdFire V1 включает полный набор регистров архитектуры ColdFire и поддерживает ту же модель программирования, что и ядра 68K/ColdFire V2 – V4. В то же время ядро V1 использует шинную структуру S08, что позволяет применять те же периферийные модули, что и при использовании 8-разрядной архитектуры. Ряд изделий на основе ядра 68K/ColdFire V1 компания Freescale Semiconductor намерена выпустить в 2007 г.

### ТО ЛИ ЕЩЁ БУДЕТ...

Для приложений по управлению электродвигателями создан новый класс микроконтроллеров – цифровые сигнальные микроконтроллеры (ЦСМ). В сравнении с микроконтрол-

лером, цифровой сигнальный процессор (ЦСП) до недавнего времени проигрывал в удобстве программирования, а написанные куски кода для поддержки логических переходов и операций ввода/вывода превосходили по своему объёму написанные для микроконтроллеров. В нынешних ЦСМ совмещены удобство программирования микроконтроллеров и высокая скорость обработки сигналов, присущая ЦСП. Благодаря этому ЦСМ TMS320F2812 корпорации TI, например, имея тактовую частоту 150 МГц, при работе в системе управления электродвигателем позволяет обрабатывать в реальном времени данные, собираемые при частоте дискретизации, превышающей требования критерия Найквиста в несколько раз. Применение этого ЦСМ обеспечивает не только требуемую скорость, но и точность вычислений благодаря использованию 32 разрядов для представления данных.

Микросхемы ЦСМ семейства 2000 (C280x и F280x) имеют 32-битную шину данных. Их смешанный набор 16/32-битных инструкций обеспечивает высокую плотность кода. Двенадцатибитный аналого-цифровой преобразователь ЦСМ F2809 с частотой дискретизации 12,5 МГц позволяет получать эффективное число разрядов (ENOB) до 10,9 и сохранять его неизменным во всём диапазоне температур от -40 до +125°C. Микросхемы TMS320C28x и TMS320F28x поддерживают технологию широтно-импульсной модуляции с высоким разрешением, обеспечивающую 16-битную точность при частоте в контуре управления 100 кГц и 12-битную при 1,5 МГц. В устройствах цифрового управления питанием более высокая разрешающая способность ШИМ позволяет получить «короткую» переходную характеристику с меньшими амплитудными искажениями.

Аппаратная поддержка цифровой обработки сигналов включается сегодня в возможности 8-разрядных микроконтроллеров. Компания Ramtron выпустила микроконтроллер VRS51L3074 на основе архитектуры 8051. Помимо того что ядро VRS51L3074 имеет производительность 40 MIPS, микроконтроллер аппаратно поддерживает технологию цифровой обработки сигналов, набор периферии включает два порта

UART (1,25 Мбит/с), интерфейс Enhanced SPI (20 Мбит/с), 8 широтно-импульсных модуляторов с разрешением 16 бит, таймеры которых могут использоваться как таймеры общего применения.

### Подводя итоги...

Рынок 8-разрядных микроконтроллеров успешно развивается. Но несомненным фактом является и возрастание роли 32-разрядных процессоров в поддержке встраиваемых приложений. При этом лидеры рынка стремятся иметь в своей продуктовой линейке сбалансированный набор 8/16- и 32-разрядных микросхем. В качестве иллюстрации можно привести тот факт, что в линейке предложений компании ZiLOG появился первый 16-разрядный микроконтроллер ZNEOZ16F на основе нового ядра ZNEO. В перспективе к концу года в линейке компании должны появиться и 32-разрядные микроконтроллеры на основе ядра ARM 9.

В среднем же в мире около трети новых разработок встроенных систем основаны на 32-разрядных процессорных платформах. На стремительно развивающемся азиатском рынке от половины до 70% разработчиков (в зависимости от страны) планируют использовать 32-разрядные процессоры в своих проектах.

Эта тенденция подкрепляется не только спросом, но и адекватным предложением от производителей процессоров и микроконтроллеров. 32-разрядные платформы не только обладают вычислительной мощностью, но и удобны для разработчиков в части возможностей высокоуровневого программирования на языках C, C++ и высокой интеграции периферийных подсистем для подключения внешних сигналов, передачи сигналов управления и управления графическими устройствами.

На рынке 32-разрядных микроконтроллеров доминирует архитектура ARM в 7 и 9 версиях. Однако конкуренты не дремлют. Так, недавно компания Tensilica представила новое семейство синтезируемых процессорных ядер Diamond Standard. Оно включает два ядра – 108Mini и 212GP. Первое из них при реализации «в кремнии» на основе технологического процесса 0,13 мкм позволяет создать RISC-микроконтроллер без кэш-памяти с подключаемой памятью

RAM для хранения данных и программ. Он обеспечивает работу на максимальной тактовой частоте 350 МГц с производительностью, сопоставимой с той, что обеспечивает ядро ARM9 при энергопотреблении меньшем, чем у ядра ARM7. Ядро Diamond 212GP позволяет создать RISC-микроконтроллер с кэш-памятью инструкций и данных, 16-битным умножителем с накоплением, поддержкой ряда возможностей ЦСП и локальной шиной с задержкой в один цикл. Процессорное ядро Diamond 212GP обеспечивает производительность на 40% большую, чем у ARM9 при энергопотреблении, меньшем на 30%, чем у этого ядра.

Несмотря на сближение производственной стоимости 8/16- и 32-разрядных микроконтроллерных кристаллов, «экономная» экономика оставляет достойное место на рынке 16-разрядным микроконтроллерам. Их использование позволяет создавать не только высоконадёжные системы для приложений промышленного класса, но и весьма оригинальные системы для ёмкого потребительского рынка «полупромышленных» систем. Так, в числе победителей проектов на базе микроконтроллеров семейства MSP430 на пятой ежегодной конференции MSP430 Advanced Technical Conference первый приз получил разработчик «карманного» двухканального запоминающего осциллографа, а второе и третье места получили регистратор температур и часы реального времени с температурной компенсацией.

Карманный осциллограф, победивший на конкурсе, обеспечивает функциональность 8-канального логического анализатора, генератора сигналов, спектроанализатора и двухканального вольтметра, поддерживающего как визуализацию сигналов, так и запоминание данных. Компактный регистратор температуры на основе микроконтроллера MSP430F2013 обеспечивает разрешение в 0,02°C. Часы реального времени с температурной компенсацией были созданы на основе микросхемы MSP430FG439. Они позволяют определять точное время, управлять ЖК-дисплеем и осуществлять температурную компенсацию работы устройства. Созданные часы способны показывать точное время в течение 10 лет без замены комплекта батарей. ©