



Содержание

1	Классификация МК.....	3
1.1	Разрядность.....	3
1.2	Принадлежность к семейству МК.....	5
1.3	Производительность.....	5
1.4	По типу памяти программ.....	6
1.5	По объему памяти ОЗУ и ПЗУ.....	6
1.6	По набору (присутствию) контроллеров.....	6
1.7	Потребляемая мощность.....	6
1.8	По количеству выводов.....	6
1.9	Наличие доп. функциональных возможностей.....	6
1.10	Ценовой диапазон.....	6
2	Структура МК.....	6
2.1	Процессорное ядро микроконтроллера.....	7
2.2	Периферийные контроллеры (адаптеры) в МК.....	12
3	Параметры МК.....	13
4	Семейство MCS-51.....	13
4.1	Важные особенности и применение.....	14
4.2	Программирование.....	16
4.3	Родственные контроллеры.....	16
5	Семейство AVR.....	17
5.1	AVR-32.....	27
6	PIC микроконтроллеры.....	28
6.1	8-битные микроконтроллеры.....	28
6.2	16-битные контроллеры.....	32
6.3	Контроллеры цифровой обработки сигналов dsPIC30F и dsPIC33F-отдельные лекции.....	33
6.4	32-битные микроконтроллеры.....	33
7	MSP430 — семейство шестнадцатиразрядных микроконтроллеров фирмы Texas Instruments ...	34
7.1	Система команд MSP430.....	34
8	Семейство ARM.....	34
8.1	Российские МК семейства ARM.....	35

Микроконтроллер (MCU=МК) — [микросхема](#), предназначенная для управления [электронными](#) устройствами. Типичный микроконтроллер сочетает в себе функции [процессора](#) и [периферийных устройств](#), может содержать [ОЗУ](#) и [ПЗУ](#). По сути, это однокристалльный [компьютер](#), способный выполнять простые задачи. Использование одной микросхемы, вместо целого набора ИС, как в случае обычных процессоров, применяемых в персональных компьютерах, значительно снижает размеры, энергопотребление и стоимость устройств, построенных на базе микроконтроллеров.

Микроконтроллеры являются основой для построения [встраиваемых систем](#), их можно встретить во многих современных приборах, таких, как [телефоны](#), стиральные машины и т. п. Большая часть выпускаемых в мире процессоров — микроконтроллеры

Термин «микроконтроллер» (МК) вытеснил из употребления ранее использовавшийся термин «однокристалльная микро-ЭВМ». Первый же патент на однокристалльную микро-ЭВМ был выдан в [1971 году](#) инженерам М. Кочрену и Г. Буну, сотрудникам [Texas Instruments](#). Именно они предложили на одном кристалле разместить не только микропроцессор, но и память, устройства ввода-вывода. С появлением однокристалльных микро-ЭВМ связывают начало эры компьютерной автоматизации в области управления. По-видимому, это обстоятельство и определило термин «микроконтроллер» (control — управление). В [1979 году](#) НИИ ТТ разработали однокристалльную 16-разрядную ЭВМ K1801BE1, архитектура которой называлась «Электроника НЦ»^[1]. В [1980 году](#)



фирма [Intel](#) выпускает микроконтроллер [i8048](#). Чуть позже в этом же году Intel выпускает следующий микроконтроллер: [i8051](#). Удачный набор периферийных устройств, возможность гибкого выбора внешней или внутренней программной памяти и приемлемая цена обеспечили этому микроконтроллеру успех на рынке. С точки зрения технологии микроконтроллер [i8051](#) являлся для своего времени очень сложным изделием — в кристалле было использовано 128 тыс. [транзисторов](#), что в 4 раза превышало количество транзисторов в 16-разрядном микропроцессоре [i8086](#).

На сегодняшний день существует более 200 модификаций микроконтроллеров, совместимых с [i8051](#), выпускаемых двумя десятками компаний, и большое количество микроконтроллеров других типов. Популярностью у разработчиков пользуются 8-битные микроконтроллеры [PIC](#) фирмы [Microchip Technology](#) и [AVR](#) фирмы [Atmel](#), шестнадцатитбитные [MSP430](#) фирмы [TI](#), а также [ARM](#), архитектуру которых разрабатывает фирма [ARM](#) и продаёт лицензии другим фирмам для их производства.

Основной особенностью современного этапа развития МПС является завершение перехода от систем, выполненных на основе нескольких больших ИС, к однокристалльным МК, которые объединяют в одном кристалле все основные элементы МПС: центральный процессор (ЦП), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), порты ввода/вывода, таймеры.

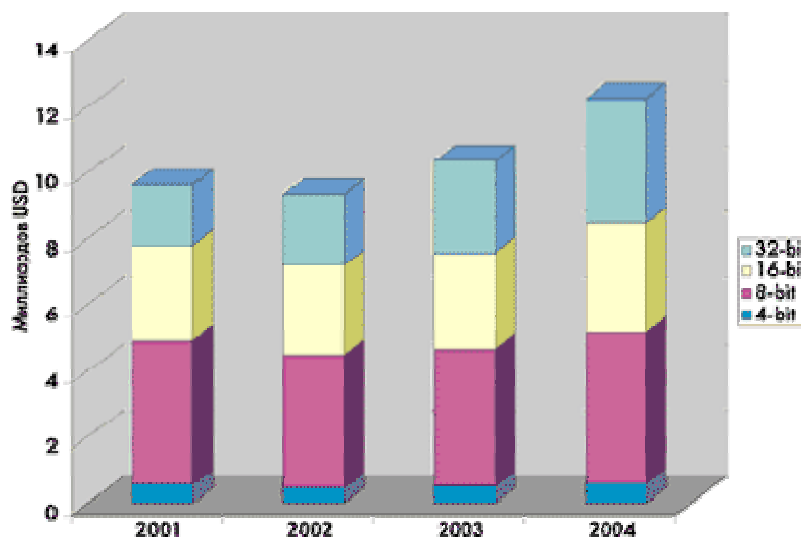


Рис. 2. Продажи микроконтроллеров в мире

Одной из важных и первостепенных задач микроэлектроники в настоящее время является создание универсальных микропроцессорных систем на кристалле. Такие сложные ИС класса SoC обычно состоят из трех основных цифровых системных блоков: процессор, память и логика. Процессорное ядро реализует поток управления, когда каждой управляющей программой однозначно устанавливаются последовательности выполнения операций обработки данных, что позволяет задавать один из возможных алгоритмов работы всей ИС. Память используется по ее прямому назначению - хранение кода программы процессорного ядра и данных. И, наконец, логика используется для реализации специализированных аппаратных устройств обработки и прохождения данных, состав и назначение которых определяются конечным приложением - потоком данных.

Реальная система на кристалле содержит как минимум все три перечисленных блока, что исключает применение многочисленных отдельных ИС и реализацию интерфейсов связи между ними. Причем однокристалльное конфигурируемое или программируемое решение, очевидно, является здесь более предпочтительной альтернативой, так как допускает оперативное изменение своей внутренней аппаратной структуры и конечного предназначения как на этапе производства, так и в полевых условиях, непосредственно в проекте. Такие ИС были отнесены к группе изделий системного уровня интеграции, но получили другое название - Configurable System on a Chip или CSoC. Поскольку термин CSoC не стандартизован, то существуют и другие названия изделий этого класса - System on Programmable Chip



(SoPC), Programmable System on a Chip (PSoC) или просто SoC, что определяется вкусом и желаниями конкретного производителя микросхем. В данной статье мы будем придерживаться термина CSoC.

1 Классификация МК

В настоящее время выпускается целый ряд типов МК.

1.1 Разрядность

По разрядности все эти приборы можно условно разделить на три основных класса:

- 4-х разрядные (для банковских карт, контроллеры ЖК матриц, и т.д)
- 8-разрядные МК для встраиваемых приложений;
- 16- и 32-разрядные МК;
- цифровые сигнальные процессоры (DSP)-отдельный класс МК будем рассматривать отдельно.

1.1.1 4-х разрядные

Самая малая вычислительная мощность. Банковские и ТЛФ карты, контроллеры :LCD (ЖКИ),

1.1.2 8 разрядные МК

Наиболее интересным представляется сегмент 8-разрядных микроконтроллеров. В 2002 и 2003 годах его стоимость составляла более \$4 млрд. В каждом году этих микроконтроллеров производилось более 3,2 миллиардов штук. В данном сегменте 28% всего объема производства (в штуках) приходится на OTP-микроконтроллеры, 45% - на масочные версии и 27% - на Flash-микроконтроллеры (34% всего сегмента по стоимости). При этом доля Flash-версий непрерывно растет и по оценкам независимых источников (Semico) составит к 2007 году до 64% общего количества выпускаемых в мире 8-разрядных микроконтроллеров. Средний прирост производства в этом сегменте планируется на уровне не менее 6-7% в год. Наиболее серьезными игроками на мировом рынке считаются Motorola (22%), Renesas (15%), Microchip (14%), ST Micro (9%) и Philips (8%) (рис. 3). Atmel находится здесь на почетном шестом месте с 6% долей рынка, одновременно лидируя в производстве именно Flash-микроконтроллеров. По итогам 2002 и 2003 годов доля Atmel составляет здесь 27%.

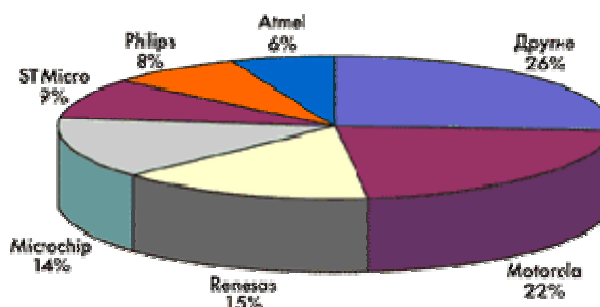


Рисунок 3 - Рынок 8-разрядных микроконтроллеров

Сама корпорация расценивает занимаемое ей шестое место в мире как большой успех. Дело в том, что Atmel продолжительное время выпускает микроконтроллеры и микропроцессоры всех разрядностей от 3 до 4 бит [2], но подлинный успех к компании пришел только после принятия стратегически верного решения объединить передовую Flash-технологию Atmel Corp. с популярным процессорным ядром MCS-51. Корпорация Atmel первой в мире в 1995 году реализовала электрически стираемые и программируемые



Flash-микроконтроллеры семейства C51 как современную альтернативу уже существовавшим масочным версиям и дорогим перепрограммируемым кристаллам с ультрафиолетовым стиранием. Аналогичное решение было использовано и для AVR-микроконтроллеров. И Atmel Corp. сразу же вошла в группу лидеров на рынке 8-разрядных микроконтроллеров, потеснив такие известные фирмы, как Intel, Motorola, Philips и Siemens.

Нельзя не упомянуть и о конкурентах Atmel. Первым "без сомнения" является компания Motorola. Это крупнейший производитель микропроцессоров и микроконтроллеров различного назначения высокой надежности с разрядностью от 8 до 64 бит. В настоящее время Motorola активно развивает 8-разрядное и 16-разрядное Flash-семейства (HCS08 и HCS12 соответственно) и планирует выпустить в 2004 году 14 новых микроконтроллеров. Вторым главным конкурентом Atmel является компания Microchip. Она представляет широкий спектр 8-разрядных RISC-подобных микроконтроллеров (всего более 180 различных наименований), среди которых имеются как OTP, так и Flash-версии. Только в 2003 году Microchip выпустила 12 новых Flash-микроконтроллеров.

Наиболее распространенным представителем семейства МК являются 8-разрядные приборы, широко используемые в промышленности, бытовой и компьютерной технике. Они прошли в своем развитии путь от простейших приборов с относительно слаборазвитой периферией до современных многофункциональных контроллеров, обеспечивающих реализацию сложных алгоритмов управления в реальном масштабе времени. Причиной жизнеспособности 8-разрядных МК является использование их для управления реальными объектами, где применяются, в основном, алгоритмы с преобладанием логических операций, скорость обработки которых практически не зависит от разрядности процессора.

Росту популярности 8-разрядных МК способствует постоянное расширение номенклатуры изделий, выпускаемых такими известными фирмами, как Motorola, Microchip, Intel, Zilog, Atmel и многими другими. Современные 8-разрядные МК обладают, как правило, рядом отличительных признаков. Перечислим основные из них:

- модульная организация, при которой на базе одного процессорного ядра (центрального процессора) проектируется ряд (линейка) МК, различающихся объемом и типом памяти программ, объемом памяти данных, набором периферийных модулей, частотой синхронизации;
- использование закрытой архитектуры МК, которая характеризуется отсутствием линий магистралей адреса и данных на выводах корпуса МК. Таким образом, МК представляет собой законченную систему обработки данных, наращивание возможностей которой с использованием параллельных магистралей адреса и данных не предполагается;
- использование типовых функциональных периферийных модулей (таймеры, процессоры событий, контроллеры последовательных интерфейсов, аналого-цифровые преобразователи и др.), имеющих незначительные отличия в алгоритмах работы в МК различных производителей;
- расширение числа режимов работы периферийных модулей, которые задаются в процессе инициализации регистров специальных функций МК.

1.1.3 16-разрядные

MSP430 от TI по сравнению с семействами [AVR](#) и [PIC](#) используют 16-ти битную арифметику и [ортогональную систему команд](#) с разнообразными способами адресации. От классических [RISC](#) процессоров отличаются тем, что не содержат, например, как [AVR](#), отдельных команд для загрузки регистров и команд для выполнения операций над аргументами в регистрах

16-битные микроконтроллеры MICROCHIP представлены в двух модификациях — PIC24F и PIC24H, которые отличаются технологией изготовления FLASH программной памяти. Это определяет диапазон питающих напряжений — для PIC24F — 2,0...3,6 В, для PIC24H — 3,0...3,6 В. Первое семейство (PIC24F) производится по более дешевой технологии (0,25 мкм) и работает с максимальной производительностью ядра 16MIPS@32МГц. Второе семейство (PIC24H)



производится с использованием более сложного техпроцесса изготовления, что позволяет добиться большей скорости работы (40MIPS@80МГц). Оба семейства поддерживают внутрисхемное программирование (ICSP), а так же самопрограммирование (RTSP).

1.1.4 32-разрядные

Старшим семейством контроллеров от Microchip Technology является 32-разрядное семейство микроконтроллеров PIC32:

AVR32 — 32 битная архитектура [микроконтроллеров](#), анонсированная фирмой [Atmel](#) в [2006 году](#). Призвана конкурировать с архитектурами фирмы [ARM](#). Может использоваться в [КПК](#) и других мобильных высокопроизводительных устройствах. Обладает примечательным соотношением производительность/тактовая частота. Имеет 2 семейства: AVR32 AP и AVR32 UC3.

1.2 Принадлежность к семейству МК

При модульном принципе построения все МК одного семейства содержат процессорное ядро, **одинаковое для всех МК данного семейства**, и изменяемый функциональный блок, который отличает МК разных моделей.

1.2.1 MARC-4

MARC4 - семейство 4-х разрядных однокристальных микроконтроллеров, в основу которого положено 4-х битное стек-ориентированное ядро Гарвардской архитектуры с физически разделенными памятью программ и памятью данных. Микроконтроллеры MARC4 содержат на кристалле до 8К памяти программ ROM, 256 бит статической памяти данных SRAM, параллельные порты ввода/вывода, 8-разрядный многофункциональный таймер/счетчик, супервизор напряжения, интервальный таймер с функциями сторожевого таймера и сложный тактовый генератор. M44C89x и T48C89x имеют третий 8-битный таймер/счетчик с функциями захвата/сравнения и модуляции/демодуляции. M44C89x и T48C89x содержат блок энергонезависимой памяти данных EEPROM. Все микроконтроллеры семейства MARC4 (кроме M44C510E и T48C510), имеют синхронный последовательный интерфейс SSI. Низкое рабочее напряжение и малое энергопотребление кристаллов MARC4 идеально подходят для портативных и носимых применений, в том числе и с батарейным питанием. Эти микросхемы успешно применяются в различных областях: инфракрасный и радиочастотный обмен данными, удаленный контроль и управление, встраиваемые применения, и т. д. (например, в качестве контроллеров клавиатуры, драйвера жидкокристаллических и светодиодных индикаторов, считывателя Smart Cards и т.д.).

1.2.2 MCS-51 8 bit (линейка intel 80c48Б 80C32, 80C51, 80C52, сейчас производится почти всеми основными производителями)

1.2.3 AVR 8 bit

1.2.4 MSP430- 16 bit

1.2.5 ARM

1.2.6 Программируемые ядра ПЛИС PicoBLAZE, MicroBlaze, NIOS

1.3 Производительность

Потактовой частоте и MIPS

Таблица. Размер и время выполнения кода для некоторых популярных микроконтроллеров					
Производитель	Устройство	Максимальная скорость, МГц	Размер кода, кбайт	Количество циклов	Время выполнения, мкс
Atmel, AVR	Atmega16	16	32	227	14,2
Texas Instruments	MSP430	8	34	246	30,8
Atmel, C51	T89C51RD2	20	57	4200	210,0
Microchip	PIC18F452	40	92	716	17,9



1.4 По типу памяти программ

FLASH, OTP, EEPROM

1.5 По объему памяти ОЗУ и ПЗУ

ОЗУ 128бит-64 Мбайт

ПЗУ программ 125 байт-128Мбайт

EEPROM- хранение настроек системы 0- 4Кбайт

1.6 По набору (присутствию) контроллеров

-с 2-3 UART, Ethernet, CAN, SPI, I2C, USB, и так далее

1.7 Потребляемая мощность

Обычные, Малопотребляющие, сверхмалопотребляющие, наличие спящего режима, потребление в обычном и спящем режиме.

1.8 По количеству выводов

4,6,8,-малые корпуса

14,16,18,24...48- обычные

64 и более 64—большие.

1.9 Наличие доп. функциональных возможностей

Отладчик JTAG , внутрисхемное программирование ISP, самопрограммирование SPM

1.10 Ценовой диапазон

LOW-End , low Middle, Hi , Hi-END

2 Структура МК

Структура модульного МК приведена на рис. 2.1.

Процессорное ядро включает в себя:

- центральный процессор;
- внутреннюю контроллерную магистраль (ВКМ) в составе шин адреса, данных и управления;
- схему синхронизации МК;
- схему управления режимами работы МК, включая поддержку режимов пониженного энергопотребления, начального запуска (сброса) и т.д.

Изменяемый функциональный блок включает в себя модули памяти различного типа и объема, порты ввода/вывода, модули тактовых генераторов (Г), таймеры. В относительно простых МК модуль обработки прерываний входит в состав процессорного ядра. В более сложных МК он представляет собой отдельный модуль с развитыми возможностями. В состав изменяемого функционального блока могут входить и такие дополнительные модули как компараторы напряжения, аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и другие. Каждый модуль проектируется



для работы в составе МК с учетом протокола ВКМ. Данный подход позволяет создавать разнообразные по структуре МК в пределах одного семейства.

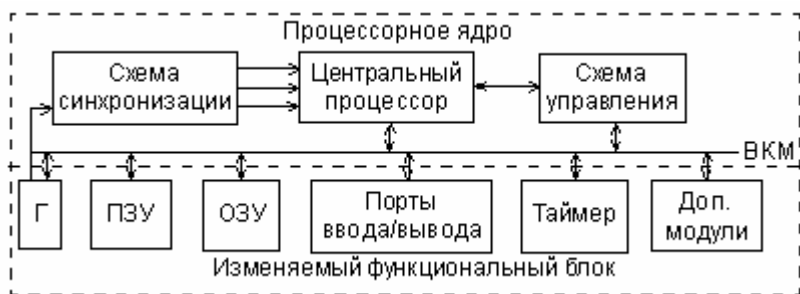


Рисунок 2.1 - Модульная организация МК

2.1 Процессорное ядро микроконтроллера

2.1.1 Структура процессорного ядра МК

Основными характеристиками, определяющими производительность процессорного ядра МК, являются:

- набор регистров для хранения промежуточных данных;
- система команд процессора;
- способы адресации операндов в пространстве памяти;
- организация процессов выборки и исполнения команды.

С точки зрения системы команд и способов адресации операндов процессорное ядро современных 8-разрядных МК реализует один из двух принципов построения процессоров CISC и RISC:

К МК с CISC-архитектурой относятся МК фирмы Intel с ядром MCS-51, которые поддерживаются в настоящее время целым рядом производителей, МК семейств HC05, HC08 и HC11 фирмы Motorola и ряд других.

В процессорах с RISC-архитектурой набор исполняемых команд сокращен до минимума. Для реализации более сложных операций приходится комбинировать команды. При этом все команды имеют формат фиксированной длины (например, 12, 14 или 16 бит), выборка команды из памяти и ее исполнение осуществляется за один цикл (такт) синхронизации. Система команд RISC-процессора предполагает возможность равноправного использования всех регистров процессора. Это обеспечивает дополнительную гибкость при выполнении ряда операций. К МК с RISC-процессором относятся МК AVR фирмы Atmel, МК PIC16 и PIC17 фирмы Microchip и другие.

На первый взгляд, МК с RISC-процессором должны иметь более высокую производительность по сравнению с CISC МК при одной и той же тактовой частоте внутренней магистрали. Однако на практике вопрос о производительности более сложен и неоднозначен.

Во-первых, оценка производительности МК по времени выполнения команд различных систем (RISC и CISC) не совсем корректна. Обычно производительность МП и МК принято оценивать числом операций пересылки «регистр-регистр», которые могут быть выполнены в течение одной секунды. В МК с CISC-процессором время выполнения операции «регистр-регистр» составляет от 1 до 3 циклов, что, казалось бы, уступает производительности МК с RISC-процессором. Однако



стремление к сокращению формата команд при сохранении ортогональности системы команд RISC-процессора приводит к вынужденному ограничению числа доступных в одной команде регистров. Так, например, системой команд МК PIC16 предусмотрена возможность пересылки результата операции только в один из двух регистров — регистр-источник операнда f или рабочий регистр W . Таким образом, операция пересылки содержимого одного из доступных регистров в другой (не источник операнда и не рабочий) потребует использования двух команд. Такая необходимость часто возникает при пересылке содержимого одного из регистров общего назначения (РОН) в один из портов МК. В то же время, в системе команд большинства CISC-процессоров присутствуют команды пересылки содержимого РОН в один из портов ввода/вывода. То есть более сложная система команд иногда позволяет реализовать более эффективный способ выполнения операции.

Во-вторых, оценка производительности МК по скорости пересылки «регистр-регистр» не учитывает особенностей конкретного реализуемого алгоритма управления. Так, при разработке быстродействующих устройств автоматизированного управления основное внимание следует уделять времени выполнения операций умножения и деления при реализации уравнений различных передаточных функций. А при реализации пульта дистанционного управления бытовой техникой следует оценивать время выполнения логических функций, которые используются при опросе клавиатуры и генерации последовательной кодовой посылки управления. Поэтому в критических ситуациях, требующих высокого быстродействия, следует оценивать производительность на множестве тех операций, которые преимущественно используются в алгоритме управления и имеют ограничения по времени выполнения.

В-третьих, необходимо еще учитывать, что указанные в справочных данных на МК частоты синхронизации обычно соответствуют частоте подключаемого кварцевого резонатора, в то время как длительность цикла центрального процессора определяется частотой обмена по ВКМ. Соотношение этих частот индивидуально для каждого МК и должно быть принято в расчет при сравнении производительности различных моделей контроллеров.

С точки зрения организации процессов выборки и исполнения команды в современных 8-разрядных МК применяется одна из двух уже упоминавшихся архитектур МПС: фон-неймановская (принстонская) или гарвардская.

Гарвардская архитектура почти не использовалась до конца 70-х годов, пока производители МК не поняли, что она дает определенные преимущества разработчикам автономных систем управления.

Дело в том, что, судя по опыту использования МПС для управления различными объектами, для реализации большинства алгоритмов управления такие преимущества фон-неймановской архитектуры как гибкость и универсальность не имеют большого значения. Анализ реальных программ управления показал, что необходимый объем памяти данных МК, используемый для хранения промежуточных результатов, как правило, на порядок меньше требуемого объема памяти программ. В этих условиях использование единого адресного пространства приводило к увеличению формата команд за счет увеличения числа разрядов для адресации операндов. Применение отдельной небольшой по объему памяти данных способствовало сокращению длины команд и ускорению поиска информации в памяти данных.

Кроме того, гарвардская архитектура обеспечивает потенциально более высокую скорость выполнения программы по сравнению с фон-неймановской за счет возможности реализации параллельных операций. Выборка следующей команды может происходить одновременно с выполнением предыдущей, и нет необходимости останавливать процессор на время выборки команды. Этот метод реализации операций позволяет обеспечивать выполнение различных команд за одинаковое число тактов, что дает возможность более просто определить время выполнения циклов и критичных участков программы.



Большинство производителей современных 8-разрядных МК используют гарвардскую архитектуру. Однако гарвардская архитектура является недостаточно гибкой для реализации некоторых программных процедур. Поэтому сравнение МК, выполненных по разным архитектурам, следует проводить применительно к конкретному приложению.

2.1.2 Система команд процессора МК

Так же, как и в любой микропроцессорной системе, набор команд процессора МК включает в себя четыре основные группы команд:

- команды пересылки данных;
- арифметические команды;
- логические команды;
- команды переходов.

Для реализации возможности независимого управления разрядами портов (регистров) в большинстве современных МК предусмотрена также группа команд битового управления (булевый или битовый процессор). Наличие команд битового процессора позволяет существенно сократить объем кода управляющих программ и время их выполнения.

В ряде МК выделяют также группу команд управления ресурсами контроллера, используемую для настройки режимов работы портов ввода/вывода, управления таймером и т.п. В большинстве современных МК внутренние ресурсы контроллера отображаются на память данных, поэтому для целей управления ресурсами используются команды пересылки данных.

Система команд МК по сравнению с системой команд универсального МП имеет, как правило, менее развитые группы арифметических и логических команд, зато более мощные группы команд пересылки данных и управления. Эта особенность связана со сферой применения МК, требующей, прежде всего, контроля окружающей обстановки и формирования управляющих воздействий.

2.1.3 Схема синхронизации МК

Схема синхронизации МК обеспечивает формирование сигналов синхронизации, необходимых для выполнения командных циклов центрального процессора, а также обмена информацией по внутренней магистрали. В зависимости от исполнения центрального процессора командный цикл может включать в себя от одного до нескольких (4 — 6) тактов синхронизации. Схема синхронизации формирует также метки времени, необходимые для работы таймеров МК. В состав схемы синхронизации входят делители частоты, которые формируют необходимые последовательности синхросигналов.

2.1.4 Память программ и данных МК

В МК используется четыре основных вида памяти:

- Память программ представляет собой постоянную память (ПЗУ), предназначенную для хранения программного кода (команд) и констант. Ее содержимое в ходе выполнения программы не изменяется.
- Память данных предназначена для хранения переменных в процессе выполнения программы и представляет собой ОЗУ.
- Энергонезависимая память данных предназначена для хранения данных, которые должны сохраниться при пропадании питания МК. Обычно выполнено в виде EEPROM.



– Регистры МК — этот вид памяти включает в себя внутренние регистры процессора и регистры, которые служат для управления периферийными устройствами (регистры специальных функций).

2.1.4.1 Память программ

Основным свойством памяти программ является ее энергонезависимость, то есть возможность хранения программы при отсутствии питания. С точки зрения пользователей МК следует различать следующие типы энергонезависимой памяти программ:

- ПЗУ масочного типа — mask-ROM. Содержимое ячеек ПЗУ этого типа заносится при ее изготовлении с помощью масок и не может быть впоследствии заменено или допрограммировано. Поэтому МК с таким типом памяти программ следует использовать только после достаточно длительной опытной эксплуатации. Основным недостатком данной памяти является необходимость значительных затрат на создание нового комплекта фотошаблонов и их внедрение в производство. Обычно такой процесс занимает 2-3 месяца и является экономически выгодным только при выпуске десятков тысяч приборов. ПЗУ масочного типа обеспечивают высокую надежность хранения информации по причине программирования в заводских условиях с последующим контролем результата.
- ПЗУ, программируемые пользователем, с ультрафиолетовым стиранием — EPROM (Erasable Programmable ROM). ПЗУ данного типа программируются электрическими сигналами и стираются с помощью ультрафиолетового облучения. Ячейка памяти EPROM представляет собой МОП-транзистор с «плавающим» затвором, заряд на который переносится с управляющего затвора при подаче соответствующих электрических сигналов. Для стирания содержимого ячейки она облучается ультрафиолетовым светом, который сообщает заряду на плавающем затворе энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера и стекания на подложку. Этот процесс может занимать от нескольких секунд до нескольких минут. МК с EPROM допускают многократное программирование и выпускаются в керамическом корпусе с кварцевым окошком для доступа ультрафиолетового света. Такой корпус стоит довольно дорого, что значительно увеличивает стоимость МК. Для уменьшения стоимости МК с EPROM его заключают в корпус без окошка (версия EPROM с однократным программированием).
- ПЗУ, однократно программируемые пользователем, — OTPROM (One-Time Programmable ROM). Представляют собой версию EPROM, выполненную в корпусе без окошка для уменьшения стоимости МК на его основе. Сокращение стоимости при использовании таких корпусов настолько значительно, что в последнее время эти версии EPROM часто используют вместо масочных ПЗУ.
- ПЗУ, программируемые пользователем, с электрическим стиранием — EEPROM (Electrically Erasable Programmable ROM). ПЗУ данного типа можно считать новым поколением EPROM, в которых стирание ячеек памяти производится также электрическими сигналами за счет использования туннельных механизмов. Применение EEPROM позволяет стирать и программировать МК, не снимая его с платы. Таким способом можно производить отладку и модернизацию программного обеспечения. Это дает огромный выигрыш на начальных стадиях разработки микроконтроллерных систем или в процессе их изучения, когда много времени уходит на поиск причин неработоспособности системы и выполнение циклов стирания-программирования памяти программ. По цене EEPROM занимают среднее положение между OTPROM и EPROM. Технология программирования памяти EEPROM допускает побайтовое стирание и программирование ячеек. Несмотря на очевидные преимущества EEPROM, только в редких моделях МК такая память используется для хранения программ. Связано это с тем, что, во-первых, EEPROM имеют ограниченный объем памяти. Во-вторых, почти одновременно с EEPROM появились Flash-ПЗУ, которые при сходных потребительских характеристиках имеют более низкую стоимость;



- ПЗУ с электрическим стиранием типа Flash — Flash-ROM. Функционально Flash-память мало отличается от EEPROM. Основное различие состоит в способе стирания записанной информации. В памяти EEPROM стирание производится отдельно для каждой ячейки, а во Flash-памяти стирать можно только целыми блоками. Если необходимо изменить содержимое одной ячейки Flash-памяти, потребуется перепрограммировать весь блок. Упрощение декодирующих схем по сравнению с EEPROM привело к тому, что МК с Flash-памятью становятся конкурентоспособными по отношению не только к МК с однократно программируемыми ПЗУ, но и с масочными ПЗУ также.

2.1.4.2 Память данных ОЗУ

Память данных МК выполняется, как правило, на основе статического ОЗУ. Термин «статическое» означает, что содержимое ячеек ОЗУ сохраняется при снижении тактовой частоты МК до сколь угодно малых значений (с целью снижения энергопотребления). Большинство МК имеют такой параметр, как «напряжение хранения информации» — U_{STANDBY} . При снижении напряжения питания ниже минимально допустимого уровня U_{DDMIN} , но выше уровня U_{STANDBY} работа программы МК выполняться не будет, но информация в ОЗУ сохраняется. При восстановлении напряжения питания можно будет сбросить МК и продолжить выполнение программы без потери данных. Уровень напряжения хранения составляет обычно около 1 В, что позволяет в случае необходимости перевести МК на питание от автономного источника (батарей) и сохранить в этом режиме данные ОЗУ.

Объем памяти данных МК, как правило, невелик и составляет обычно десятки и сотни байт. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке программ для МК. Так, при программировании МК константы, если возможно, не хранятся как переменные, а заносятся в ПЗУ программ. Максимально используются аппаратные возможности МК, в частности, таймеры. Прикладные программы должны ориентироваться на работу без использования больших массивов данных.

2.1.4.3 Энергонезависимая память данных

Доступ к этой памяти (EEPROM) обычно осуществляется через специальные регистры. Так-что EEPROM память можно рассматривать как отдельный функциональный модуль (контроллер). Этот вид памяти присутствует не у всех МК.

2.1.4.4 Регистры МК

Как и все МПС, МК имеют набор регистров, которые используются для управления его ресурсами. В число этих регистров входят обычно регистры процессора (аккумулятор, регистры состояния, индексные регистры), регистры управления (регистры управления прерываниями, таймером), регистры, обеспечивающие ввод/вывод данных (регистры данных портов, регистры управления параллельным, последовательным или аналоговым вводом/выводом). Обращение к этим регистрам может производиться по-разному.

В МК с RISC-процессором все регистры (часто и аккумулятор) располагаются по явно задаваемым адресам. Это обеспечивает более высокую гибкость при работе процессора.

Одним из важных вопросов является размещение регистров в адресном пространстве МК. В некоторых МК все регистры и память данных располагаются в одном адресном пространстве. Это означает, что память данных совмещена с регистрами. Такой подход называется «отображением ресурсов МК на память».



В других МК адресное пространство устройств ввода/вывода отделено от общего пространства памяти. Отдельное пространство ввода/вывода дает некоторое преимущество процессорам с гарвардской архитектурой, обеспечивая возможность считывать команду во время обращения к регистру ввода/вывода.

2.1.4.5 Стек МК

В микроконтроллерах ОЗУ данных используется также для организации вызова подпрограмм и обработки прерываний. При этих операциях содержимое программного счетчика и основных регистров (аккумулятор, регистр состояния и другие) сохраняется и затем восстанавливается при возврате к основной программе.

В фон-неймановской архитектуре единая область памяти используется, в том числе, и для реализации стека. При этом снижается производительность устройства, так как одновременный доступ к различным видам памяти невозможен. В частности, при выполнении команды вызова подпрограммы следующая команда выбирается после того, как в стек будет помещено содержимое программного счетчика.

В гарвардской архитектуре стековые операции производятся в специально выделенной для этой цели памяти. Это означает, что при выполнении программы вызова подпрограмм процессор с гарвардской архитектурой производит несколько действий одновременно.

Необходимо помнить, что МК обеих архитектур имеют ограниченную емкость памяти для хранения данных. Если в процессоре имеется отдельный стек и объем записанных в него данных превышает его емкость, то происходит циклическое изменение содержимого указателя стека, и он начинает ссылаться на ранее заполненную ячейку стека. Это означает, что после слишком большого количества вызовов подпрограмм в стеке окажется неправильный адрес возврата. Если МК использует общую область памяти для размещения данных и стека, то существует опасность, что при переполнении стека произойдет запись в область данных либо будет сделана попытка записи загружаемых в стек данных в область ПЗУ.

2.1.4.6 Внешняя память

Несмотря на существующую тенденцию по переходу к закрытой архитектуре МК, в некоторых случаях возникает необходимость подключения дополнительной внешней памяти (как памяти программ, так и данных).

Если МК содержит специальные аппаратные средства для подключения внешней памяти, то эта операция производится штатным способом (как для МП).

Второй, более универсальный, способ заключается в том, чтобы использовать порты ввода/вывода для подключения внешней памяти и реализовать обращение к памяти программными средствами. Такой способ позволяет задействовать простые устройства ввода/вывода без реализации сложных шинных интерфейсов, однако приводит к снижению быстродействия системы при обращении к внешней памяти.

2.2 Периферийные контроллеры (адаптеры) в МК

Встроенные Контроллеры **PLL, Timer, Cap, PWM, RTC, WDT, UART, USB, CAN, MAC, I2C, SPI, LIN, ADC, DAC, CMP, LCD, KeyBoard, I/O**



Неполный список периферии, которая может присутствовать в микроконтроллерах, включает в себя:

- универсальные цифровые порты, которые можно настраивать как на ввод, так и на вывод
- различные интерфейсы ввода-вывода, такие как [UART](#), [I²C](#), [SPI](#), [CAN](#), [USB](#), [IEEE 1394](#), [Ethernet](#)
- [аналого-цифровые](#) и [цифро-аналоговые](#) преобразователи
- [компараторы](#)
- [широтно-импульсные модуляторы](#)
- [таймеры](#)
- контроллеры бесколлекторных двигателей
- контроллеры дисплеев и клавиатур
- радиочастотные приемники и передатчики
- массивы встроенной [флеш-памяти](#)
- встроенный тактовый генератор и [сторожевой таймер](#)

3 Параметры МК

- 1) Основной параметр МК- перечень встроенных в ИС МК функциональных и периферийных модулей;
- 2) Принадлежность к определённому семейству МК (определяет систему команд ядра, типовой набор периферии, типовые параметры процессорного ядра, распространённость и доступность МК, распространённость средств разработки для данного МК, новизна и прогрессивность архитектуры и т.п.)
- 3) параметры периферийных модулей (разрядность и быстродействие АЦП, ЦАП, количество, разрядность, структура таймеров, количество разрядность, архитектура и максимальная частота PWM (ШИМ) модулей и т.д.)
- 4) Объем памяти программ
- 5) Объем ОЗУ
- 6) Объем EEPROM
- 7) Архитектура и Разрядность процессорного ядра, применённые (RISC, Гарв. Архитектура, SIMD)б скалярность ядра и т.д)
- 8) Система команд, семейство МК
- 9) Тактовая частота процессора
- 10) Быстродействие процессорного ядра (интегральный параметр- MIPS=MOPS/FLOPS)
- 11) Показатель производительности процессорного ядра Гфлопс/ГГц
- 12) Напряжение питания (или несколько)
- 13) Энергопотребление, удельное потребление Вт/флоры, Вт/операцию, Гфлопс/Вт тип теплоотвода
- 14) Корпус (тип корпуса по ISO=размеры, кол и тип выводов)

4 Семейство MCS-51

Intel 8051 — это однокристалльный [микроконтроллер](#) (не путать с [процессором](#)) [гарвардской архитектуры](#), который был впервые произведен [Intel](#) в [1980](#) году, для использования во [встраиваемых системах](#). В течение 1980-ых и начале 1990-ых годов был чрезвычайно популярен. Однако, в настоящее время устарел и вытеснен более современными устройствами, с 8051-совместимыми ядрами, производимыми более чем 20 независимыми производителями, такими как [Atmel](#), [Maxim IC](#) (дочерняя компания [Dallas Semiconductor](#)), [NXP](#) (ранее [Philips Semiconductor](#)), [Winbond](#), [Silicon Laboratories](#), [Texas Instruments](#) и [Cypress Semiconductor](#). Существует также отечественный клон данной микросхемы, KP1816BE51. Официальное название 8051-семейства микроконтроллеров Intel — **MCS 51**.

Первые из 8051-семейства Intel производились с использованием [n-MOP](#) технологии, но следующие версии, содержащие символ «C» в названии, такие как 80C51, использовали [КМОП](#)-



технологии и потребляли меньшую мощность, чем n-МОП предшественники (это облегчало их применение для устройств с питанием от батарей).

4.1 Важные особенности и применение

- Состоит из процессорного ядра ([CPU](#)), [ОЗУ](#), [ПЗУ](#), [последовательного порта](#), [параллельного порта](#), логики управления [прерываниями](#), [таймер](#) и т. д.
- [Шина данных](#) — 8-ми битная шина данных. Возможность обработки 8 бит данных за одну операцию. Обуславливает название [8-битный микропроцессор](#).
- [Шина адреса](#) — 16 битная адресная шина. Возможность доступа к 2^{16} адресам памяти, то есть 64 [кБ](#) адресное пространство в [ОЗУ](#) и [ПЗУ](#).
- Встроенное [ОЗУ](#) — 128 [байт](#) ([Памяти данных](#)).
- Встроенное [ПЗУ](#) — 4 [кБ](#) ([Памяти программ](#)).
- Четыре порта [ввода/вывода](#): один двунаправленный и три квазидвунаправленных.
- Последовательный интерфейс USART ([Универсальный асинхронный приёмопередатчик](#)).
- Два 16-битных [таймера](#).
- Два уровня приоритета [прерываний](#).
- [Энергосберегающий](#) режим.

Чрезвычайно полезной особенностью 8051 ядра является обработка [булевых](#) данных, что позволило ввести бинарную логику, оперирующую напрямую с битами внутренней ОЗУ (области из 128 прямо-адресуемых битов) и регистров. Данная особенность была востребована в приложениях [промышленной автоматике](#). Еще одна ценная особенность состояла в 4 независимых наборах [регистров](#), которые значительно уменьшали задержки при обработке [прерываний](#), в сравнении с классическим использованием [стека](#), применявшимся ранее.

Универсальный асинхронный приёмопередатчик ([УАПП](#), [UART](#)) может быть настроен для использования в режиме 9-бит данных, что делает возможным адресную приемо-передачу в многоточечном подключении на основе [RS-485](#) аппаратного протокола.

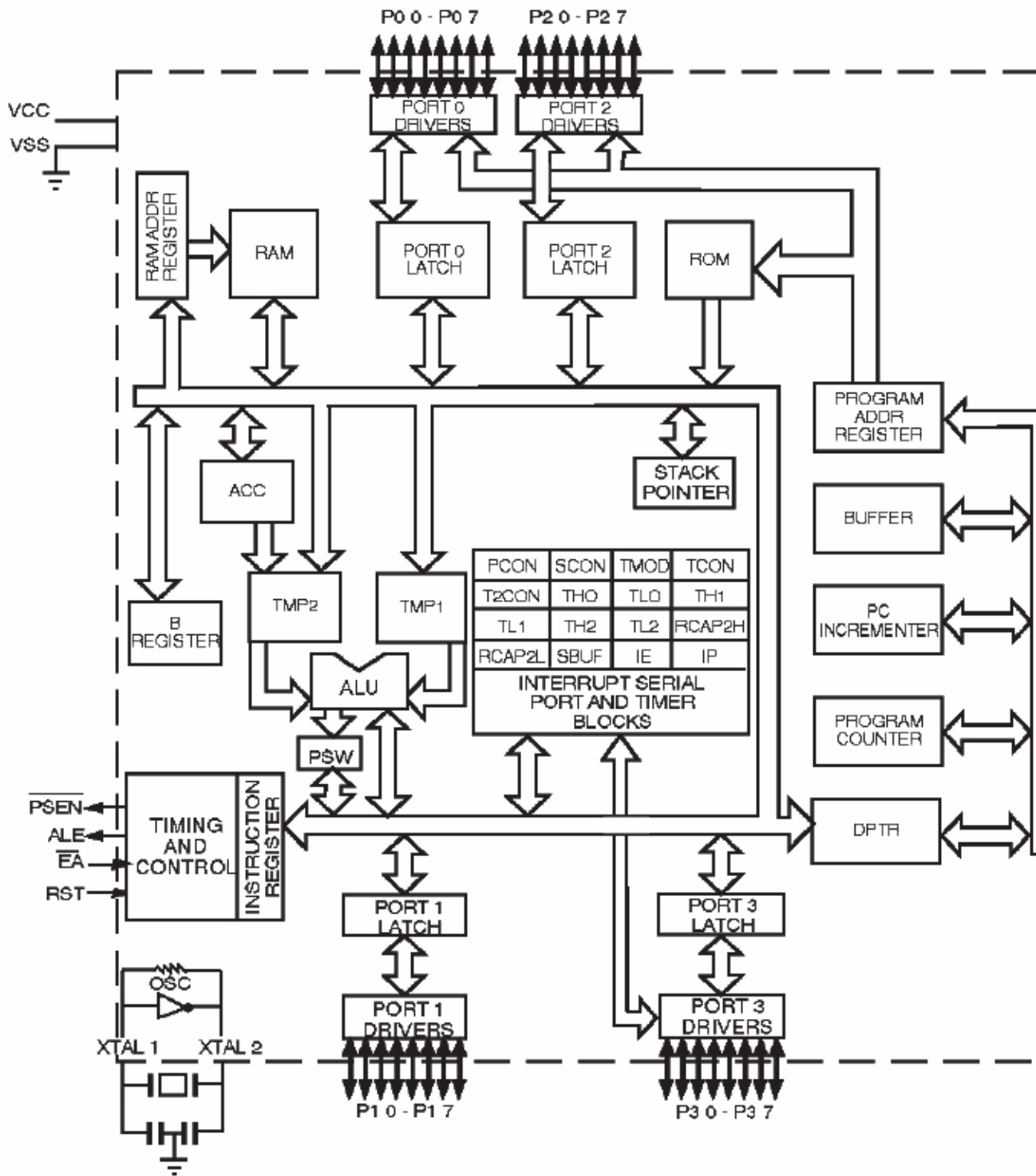
8051-совместимые микроконтроллеры обычно имеют один или два [УАПП](#) ([UART](#)), два или три [таймера](#), 128 или 256 [байт](#) встроенной ОЗУ (16 байт которой имеют побитовую адресацию), от 512 [байт](#) до 128 [кбайт](#) встроенной памяти программ ([ПЗУ](#)), и иногда встречается использование [EEPROM](#), адресуемой через «регистры специального назначения» (SFR = special function register). Один [машинный цикл](#) оригинального 8051 ядра занимает 12 временных тактов, а большинство инструкций выполняется за один или два машинных цикла. При [частоте тактового генератора](#), равной 12 [МГц](#), 8051 ядро может выполнять 1 миллион операций в секунду, выполняемых за один цикл, или 500 тысяч операций в секунду, выполняемых за два цикла. Улучшенное 8051-совместимое ядро, которое в настоящее время распространено, выполняет машинный цикл за шесть, четыре, два, или даже за один временной такт, и позволяет использовать тактовые генераторы с частотой до 100 МГц, что позволило увеличить количество выполняемых операций в секунду. Все 8051 совместимые устройства, производимые SILabs, некоторые из производимых Dallas и немногие из производимых Atmel имеют ядро с 1 тактом на машинный цикл.

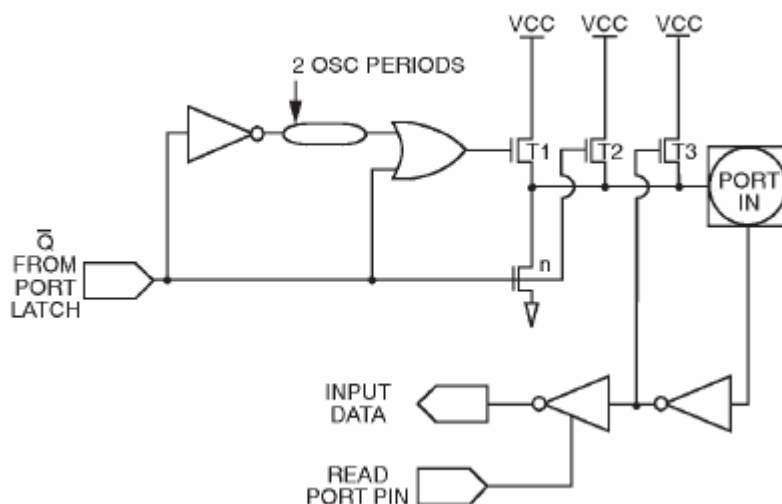
Еще более быстрые 8051 ядра, с 1 тактом на машинный цикл, организуются использованием [ПЛИС](#), таких как [FPGA](#) (скорость в диапазоне 130—150 МГц) или [ASIC](#) (скорость в диапазоне нескольких сотен МГц), при помощи специальной прошивки. Примеры можно увидеть на [e8051.com](#).

Общей особенностью в современных 8051-совместимых [микроконтроллерах](#) стало встраивание улучшенных и дополнительных схем, таких как: автоматический сброс по падению питающего напряжения; встроенные тактовые генераторы; внутрисхемное программирование памяти программ; автозагрузчики долговременной памяти данных на основе EEPROM; [I²C](#) (стандарт 3-х проводной последовательной шины); [SPI](#); [USB](#) хост интерфейс; [ШИМ](#)-генераторы; аналоговых [компараторов](#); [АЦП](#) и [ЦАП](#) преобразователей; часов [реального времени](#); дополнительных таймеров



и счетчиков; внутрисхемных [отладчиков](#), дополнительных источников прерываний; расширенных энергосберегающих режимов.





4.2 Программирование

Для **8051** доступно несколько компиляторов с [языка программирования Си](#), большинство из которых поддерживает расширения языка для более эффективного использования особенностей **8051**. Например, программист может указать, в каком из шести типов памяти 8051 необходимо хранить переменную; компилятору можно указать, каким образом использовать переключаемые регистровые блоки и инструкции для манипулирования отдельными разрядами регистров. Для программирования **8051** используются и другие языки высокого уровня: [Форт](#), [Бейсик](#), [Паскаль](#), [PL/M](#) и [Modula-2](#), однако они не получили такого широкого распространения как [Си](#) и [ассемблер](#).

4.3 Родственные контроллеры

Предшественником контроллера 8051 был **Intel 8048 (отечественный аналог 1816BE48)**, который был применён в клавиатуре первого компьютера [IBM PC](#) — он конвертировал сигналы о нажатиях на клавиши в поток данных, передававшийся по последовательной линии в системный блок компьютера. Контроллер 8048, а также контроллеры, спроектированные на его базе, всё ещё применяются в клавиатурах начального уровня.

Контроллер **8031** является урезанной версией Intel 8051: у него отсутствует встроенная память для хранения программы.

Контроллер **8052** является расширенной версией оригинального Intel 8051: он оснащён 256 байтами внутреннего ОЗУ (вместо 128 байт 8051), 8 КБ ПЗУ (вместо 4 КБ), также ему добавлен третий 16-разрядный таймер. Контроллер **8032** аналогичен **8052**, но не имеет встроенной памяти для хранения программы. Контроллеры **8052** и **8032** считаются устаревшими, так как почти все современные варианты **8051** оснащены теми расширениями, которыми обладает **8052**.



5 Семейство AVR

Для примера, на рисунке 1 приведены упрощенные структурные схемы AVR выпуска 1997 и 2003 годов.

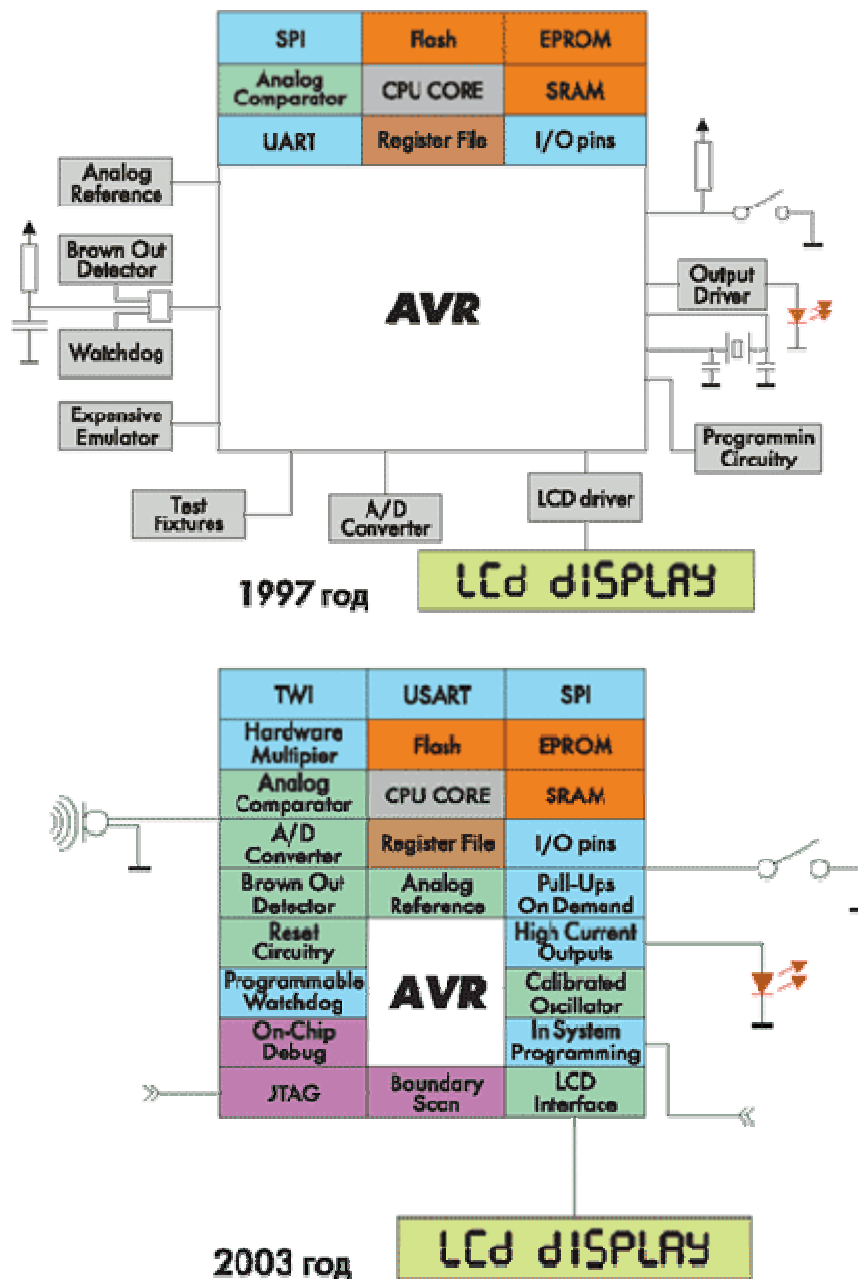


Рисунок 4.1 - Структурные схемы микроконтроллеров AVR в 1997 и 2003 годах

AVR - это относительно молодой продукт корпорации Atmel. В этой линии микроконтроллеров общего назначения постоянно появляются новые кристаллы, обновляются версии уже существующих микросхем, совершенствуется и расширяется программное обеспечение поддержки. Первое официальное издание - каталог Atmel, посвященный AVR, - был датирован маем 1997 года. Второе, существенно расширенное издание каталога, вышло в августе 1999 года [1], и в него уже были включены все три семейства AVR - "tiny", "classic" и "mega".

Сама идея создания нового RISC-ядра родилась в 1994 году в Норвегии. В 1995 году два его изобретателя Альф Боген (Alf-Egil Bogen) и Вегард Воллен (Vegard Wollen) предложили корпорации Atmel выпускать новый 8-разрядный RISC-микроконтроллер как стандартное изделие и снабдить его Flash-памятью программ на кристалле. Руководство Atmel Corp. приняло решение инвестировать



данный проект. В 1996 году был основан исследовательский центр в городе Тронхейм (Норвегия). Оба изобретателя стали директорами нового центра, а микроконтроллерное ядро было запатентовано и получило название AVR (Alf - Egil Bogen + Vegard Wollen + RISC).

Представляем очередную версию обзора линии 8-разрядных высокопроизводительных RISC микроконтроллеров общего назначения производства Atmel Corp., объединенных общей маркой AVR. Серийное производство AVR началось в 1996 году, а в настоящее время в серийном производстве у Atmel находятся три семейства AVR - "tiny", "classic" и "mega". Многие российские специалисты и разработчики уже по достоинству оценили высокую скорость работы и мощную систему команд AVR, наличие двух типов энергонезависимой памяти на одном кристалле и активно развивающуюся периферию. Для тех читателей, которые, возможно, еще не слышали про AVR или просто пока присматриваются к этой микроконтроллерной платформе, данная статья может оказаться полезной.

Казалось бы, что еще нового можно было придумать в этой области и для чего? Ведь к началу 1990-х широко распространенное семейство микроконтроллеров MCS51, выпускаемое целым рядом фирм-производителей (Intel, Philips, Temic, OKI, Siemens и др.), уже являлось де-факто промышленным стандартом для 8-разрядных систем и прекрасно подходило для использования в широком классе задач, особенно если выбирались кристаллы с дополнительными встроенными периферийными устройствами и повышенной тактовой частотой. Конечно, была и обратная сторона медали - значительное удельное энергопотребление этих микроконтроллеров. Тогда, если необходимо было получить высокую производительность кристалла при фиксированном энергопотреблении или, наоборот, снизить последнее не теряя производительности, внимание разработчика, как правило, останавливалось на микросхемах Dallas Semiconductor, Microchip или Hitachi. Широко развитые линии PIC-контроллеров фирмы Microchip и микроконтроллеров H8/300 фирмы Hitachi обеспечивают достаточно высокую производительность при небольшом энергопотреблении. Эффективность работы микроконтроллеров Dallas Semiconductor, имеющих базовую архитектуру MCS51, в среднем превышает стандартную в 2,5 - 3 раза. Появившиеся в последнее время новые процессорные платформы MSP430 фирмы Texas Instruments и XE8000 фирмы Xemics также заслуживают самого пристального внимания, особенно если основным критерием для конечного приложения является минимальное энергопотребление.

Окончательный выбор разработчиком той или иной микропроцессорной платформы для реализации своей задачи зависит, естественно, от большого числа разнообразных факторов, включая экономические. Но обычно первостепенным условием остается получение максимально выгодного соотношения "цена - производительность - энергопотребление", определяемого сложностью решаемой задачи. Видимо, это обстоятельство и послужило толчком к разработке в середине 1990-х нового 8-разрядного микроконтроллера.

AVR, пожалуй, одно из самых интересных направлений, развиваемых корпорацией Atmel. Они представляют собой мощный инструмент для создания современных высокопроизводительных и экономичных многоцелевых контроллеров. На настоящий момент соотношение "цена - производительность - энергопотребление" для AVR является одним из лучших на мировом рынке 8-разрядных микроконтроллеров. Объемы продаж AVR в мире удваиваются ежегодно. В геометрической прогрессии растет число сторонних фирм, разрабатывающих и выпускающих разнообразные программные и аппаратные средства поддержки разработок для них. Можно считать, что AVR постепенно становится еще одним индустриальным стандартом среди 8-разрядных микроконтроллеров общего назначения.

Области применения AVR многогранны. Для семейства "tiny" - это интеллектуальные автомобильные датчики различного назначения, игрушки, игровые приставки, материнские платы персональных компьютеров, контроллеры защиты доступа в мобильных телефонах, зарядные устройства, детекторы дыма и пламени, бытовая техника, разнообразные инфракрасные пульты



дистанционного управления. Для семейства "classic" - это модемы различных типов, современные зарядные устройства, изделия класса Smart Cards и устройства чтения для них, спутниковые навигационные системы для определения местоположения автомобилей на трассе, сложная бытовая техника, пульта дистанционного управления, сетевые карты, материнские платы компьютеров, сотовые телефоны нового поколения а также различные и разнообразные промышленные системы контроля и управления. Для "mega" AVR - это аналоговые (NMT, ETACS, AMPS) и цифровые (GSM, CDMA) мобильные телефоны, принтеры и ключевые контроллеры для них, контроллеры аппаратов факсимильной связи и ксероксов, контроллеры современных дисковых накопителей, CD-ROM и т.д.

AVR - это относительно молодой продукт корпорации Atmel. В этой линии микроконтроллеров общего назначения постоянно появляются новые кристаллы, обновляются версии уже существующих микросхем, совершенствуется и расширяется программное обеспечение поддержки. Так, первое официальное издание - каталог Atmel, посвященный AVR - датирован маем 1997 года. В него были включены всего четыре первых AVR - микроконтроллера семейства AT90S "classic". Второе, существенно расширенное издание каталога вышло в августе 1999 года, и в него уже были включены три семейства AVR - "tiny", "classic" и "mega". И до сих пор более "свежей" версии каталога в печатном виде не существует, постоянно обновляются лишь технические данные в электронном виде (Data Sheet), которые Atmel Corp. размещает на своей информационной странице в Интернете www.atmel.com/atmel/products/prod23.htm. Скорее всего, к моменту выхода этой статьи представленная информация уже будет нуждаться в дополнениях и коррективах. Будьте внимательны, разрабатывая Ваши конечные системы и программное обеспечение с использованием AVR, потому что многое может изменяться и, пожалуйста, регулярно следите за обновлениями технической документации, выпускаемой Atmel Corp.

Что же представляют собой микроконтроллеры AVR? Начнем знакомство с аппаратных возможностей, которые сведены для разных семейств в таблицы "[AVR-tiny](#)", "[AVR-classic](#)" и "[AVR-mega](#)". В таблицах представлены уже существующие, серийно выпускаемые кристаллы AVR, а также планируемые к выпуску в 2002 году. Отметим, что объемы массивов Flash-, EEPROM и SRAM памяти, набор периферийных узлов и построение схемы тактирования существенно различаются как между семействами, так и между микроконтроллерами внутри каждого семейства. Поэтому приведенное здесь краткое вводное описание основных возможностей AVR-микроконтроллеров не будет исчерпывающим. Конкретные детали и полные описания микроконтроллеров, особенности построения и функционирования всех периферийных блоков можно найти в оригинальной технической документации Atmel.

Условные обозначения в таблицах:

- Flash ROM - объем энергонезависимой памяти программ (в килобайтах);
- EEPROM - объем энергонезависимой памяти данных (в байтах);
- RAM - объем статической памяти данных (в байтах);
- External RAM - возможность подключения к микроконтроллеру дополнительной микросхемы внешней статической памяти данных (в килобайтах);
- ISP - возможность программирования микроконтроллера в системе (на целевой плате) при основном напряжении питания;
- SPM - функция самопрограммирования Flash ROM памяти микроконтроллера в системе без участия внешнего программатора;
- JTAG - встроенный JTAG - интерфейс;
- I/O (pins) - максимальное количество доступных линий ввода / вывода;
- Timer(s) 8/16 bit - количество и разрядность таймеров/счетчиков;
- USI - универсальный коммуникационный интерфейс;
- AC - аналоговый компаратор;
- ADC (channels) - количество каналов аналого-цифрового преобразования;
- Internal RC - наличие внутренней RC-цепочки для автономной работы микроконтроллера (без внешнего источника опорной частоты);



- WDT - сторожевой таймер;
- BDC - аппаратный программируемый блок защиты от сбоев при внезапном (в том числе и кратковременном) пропадании напряжения питания микроконтроллера;
- UART - асинхронный последовательный приемопередатчик;
- SPI - синхронный трехпроводной последовательный интерфейс;
- I2C - двухпроводной последовательный интерфейс;
- RTC - система реального времени;
- PWM (channels) - количество независимых каналов широтно - импульсной модуляции;
- Command Set - количество различных инструкций в системе команд микроконтроллера;
- Vcc - диапазон рабочих напряжений питания (в Вольтах);
- Clock - диапазон рабочих частот (в мегагерцах);
- Packages - типы корпусов, в которые опрессовывается микроконтроллер, и общее количество выводов.

Таблица 4.1 - Микроконтроллеры AVR семейства "tiny" в 2003-2004 годах

	tiny11	tiny12	tiny13	tiny15	tiny2313	tiny25	tiny26	tiny28
Flash, кбайт	1	1	1	1	2	2	2	2
SRAM, байт	-	-	64	-	128	128	128	-
EEPROM, байт	-	64	64	64	128	128	128	-
U(S)ART	-	-	-	-	1	-	-	-
USI	-	-	-	-	Есть	-	Есть	-
Таймер/счетчик	1	1	1	2	2	2	2	1
Каналы ШИМ	-	-	2	1	4	2	2	1
Каналы АЦП	-	-	4	4	-	4	11	-
ISP	12B	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	-
debugWIRE	-	-	Есть	-	Есть	Есть	-	-
Инженерные образцы					Доступны	Первая половина 2004		
Образцы серийной продукции	+	+	Доступны	+	фев.04	Вторая половина 2004	+	+
Массовое производство	+	+	фев.04	+	май.04	Вторая половина 2004	+	+
Типы корпуса	PDIP 8	PDIP 8	PDIP 8	PDIP 8	PDIP 20	PDIP 8	PDIP 20	PDIP 28
	SOIC 8	SOIC 8	SOIC 8	SOIC 8	SOIC 20	SOIC 8	SOIC 20	TQFP 28
					MLF 32		MLF 32	MLF 32

Все AVR имеют Flash-память программ, которая может быть загружена как с помощью обычного программатора, так и с помощью SPI-интерфейса, в том числе непосредственно на целевой плате. Число циклов перезаписи - не менее 1000. Последние версии кристаллов семейства "mega" выпуска 2001-2002 года имеют возможность самопрограммирования. Это означает, что микроконтроллер способен самостоятельно, без какого-либо внешнего программатора, изменять содержимое ячеек памяти программ. То есть, новые AVR могут менять алгоритмы своего функционирования и программы, заложенные в них, и далее работать уже по измененному алгоритму или новой программе. Например, Вы можете написать и сохранить несколько рабочих



версий программы для конкретного приложения во внешней энергонезависимой памяти (DataFlash, EEPROM и т.п.), а затем по мере необходимости или по реакции на какие-нибудь внешние или внутренние логические условия перегружать рабочие программы в тот же самый микроконтроллер AVR, не извлекая его из печатной платы. Для этого весь массив памяти программ делится на две неравные по объему области: блок загрузчика (программа, управляющая перезаписью Flash-памяти программ) и блок для размещения рабочего программного кода, причем свободная память в области загрузчика может быть использована в качестве дополнительного пространства для рабочего кода. Программа - загрузчик создается самим разработчиком и должна быть запрограммирована внешним программатором.

Все AVR имеют также блок энергонезависимой электрически стираемой памяти данных EEPROM. Этот тип памяти, доступный программе микроконтроллера непосредственно в ходе ее выполнения, удобен для хранения промежуточных данных, различных констант, таблиц перекодировок, калибровочных коэффициентов и т.п. EEPROM также может быть загружена извне как через SPI интерфейс, так и с помощью обычного программатора. Число циклов перезаписи - не менее 100000. Два программируемых бита секретности позволяют защитить память программ и энергонезависимую память данных EEPROM от несанкционированного считывания. Внутренняя оперативная память SRAM имеется у всех AVR семейств "classic" и "mega" и у одного нового кристалла семейства "tiny" - ATtiny26/L. Для некоторых микроконтроллеров возможна организация подключения внешней памяти данных объемом до 64К.

Внутренний тактовый генератор AVR может запускаться от нескольких источников опорной частоты (внешний генератор, внешний кварцевый резонатор, внутренняя или внешняя RC-цепочка). Поскольку AVR-микроконтроллеры полностью статические, минимальная допустимая частота ничем не ограничена (вплоть до пошагового режима). Максимальная рабочая частота определяется конкретным типом микроконтроллера. Верхние границы частотного диапазона, указанные в таблицах 1 - 3, гарантируют устойчивую работу микроконтроллеров при работе во всем температурном диапазоне (хотя, например, AT90S8515 при комнатной температуре может быть "разогнан" до 14 МГц). Интересную аппаратную особенность имеет микроконтроллер ATtiny15L. Он содержит блок PLL для аппаратного умножения основной тактовой частоты в 16 раз. При номинальном значении последней 1,6 МГц получаемая вспомогательная периферийная частота равна 25,6 МГц. Эта частота может служить источником для одного из таймеров/счетчиков микроконтроллера, значительно повышая временное разрешение его работы.

Сторожевой (WATCHDOG) таймер предназначен для защиты микроконтроллера от сбоев в процессе работы. Он имеет свой собственный RC-генератор, работающий на частоте 1 МГц. Эта частота является приближенной и зависит прежде всего от величины напряжения питания микроконтроллера и от температуры. WATCHDOG-таймер снабжен своим собственным предделителем входной частоты с программируемым коэффициентом деления, что позволяет подстраивать временной интервал переполнения таймера и сброса микроконтроллера. WATCHDOG-таймер может быть отключен программным образом во время работы микроконтроллера как в активном режиме, так и в любом из режимов пониженного энергопотребления. В последнем случае это приводит к значительному снижению потребляемого тока.

Микроконтроллеры AVR имеют в своем составе от 1 до 4 таймеров/счетчиков общего назначения с разрядностью 8 или 16 бит, которые могут работать и как таймеры от внутреннего источника опорной частоты, и как счетчики внешних событий с внешним тактированием. Общие черты всех таймеров/счетчиков следующие.

- наличие программируемого предделителя входной частоты с различными градациями деления. Отличительной чертой является возможность работы таймеров/счетчиков на основной тактовой частоте микроконтроллера без предварительного ее понижения, что существенно повышает точность генерации временных интервалов системы;



- независимое функционирование от режима работы процессорного ядра микроконтроллера (т.е. они могут быть как считаны, так и загружены новым значением в любое время);
- возможность работы или от внутреннего источника опорной частоты, или в качестве счетчика событий. Верхний частотный порог определен в этом случае как половина основной тактовой частоты микроконтроллера. Выбор перепада внешнего источника (фронт или срез) программируется пользователем;
- наличие различных векторов прерываний для нескольких различных событий (переполнение, захват, сравнение).

Система реального времени (RTC) реализована во всех микроконтроллерах семейства "mega" и в двух кристаллах семейства "classic" - AT90(L)S8535. Таймер/счетчик RTC имеет свой собственный делитель, который может быть программным способом подключен или к основному внутреннему источнику тактовой частоты микроконтроллера, или к дополнительному асинхронному источнику опорной частоты (кварцевый резонатор или внешний синхросигнал). Для этой цели зарезервированы два внешних вывода микроконтроллера. Внутренний осциллятор, нагруженный на счетный вход таймера/счетчика RTC, оптимизирован для работы с внешним "часовым" кварцевым резонатором 32,768 кГц.

Порты ввода/вывода AVR имеют число независимых линий "Вход/Выход" от 3 до 53. Каждый разряд порта может быть запрограммирован на ввод или на вывод информации. Мощные

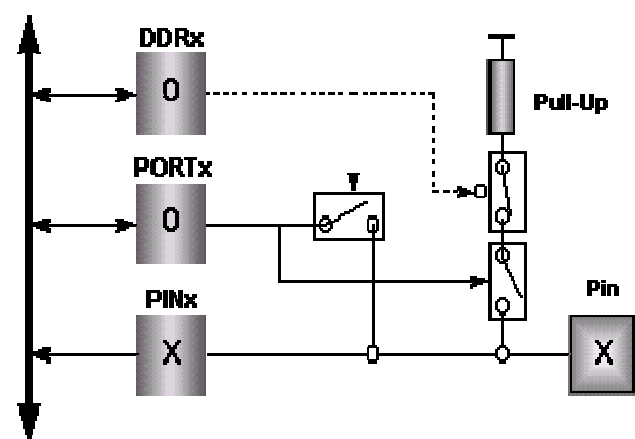


Рис. 1. Структура элемента ввода/вывода AVR

выходные драйверы обеспечивают токовую нагрузочную способность 20 мА на линию порта (втекающий ток) при максимальном значении 40 мА, что позволяет, например, непосредственно подключать к микроконтроллеру светодиоды и биполярные транзисторы. Общая токовая нагрузка на все линии одного порта не должна превышать 80 мА (все значения приведены для напряжения питания 5 В).

Интересная архитектурная особенность построения портов ввода/вывода у AVR заключается в том, что для каждого физического вывода существует 3 бита контроля/управления, а не 2, как у распространенных 8-разрядных

микроконтроллеров (Intel, Microchip, Motorola и т.д.). Упрощенная структурная схема элемента ввода/вывода AVR - микроконтроллера приведена на рис. 1. Здесь DDRx - бит контроля направления передачи данных и привязки вывода к шине питания (VCC), PORTx - бит привязки вывода к VCC и бит выходных данных, PINx - бит для отображения логического уровня сигнала на физическом выводе микросхемы.

Естественно возникает вопрос: а зачем необходимы именно 3 бита? Дело в том, что использование только двух бит контроля/управления порождает ряд проблем при операциях типа "чтение-модификация-запись". Например, если имеют место две последовательные операции "чтение-модификация-запись", то первый результат может быть потерян безвозвратно, если вывод порта работает на емкостную нагрузку и требуется некоторое время для стабилизации уровня сигнала на внешнем выводе микросхемы. Архитектура построения портов ввода/вывода AVR с тремя битами контроля/управления позволяет разработчику полностью контролировать процесс ввода/вывода. Если необходимо получить реальное значение сигнала на физическом выводе микроконтроллера - читайте содержимое бита по адресу PINx. Если требуется обновить выходы - прочитайте PORTx защелку и потом модифицируйте данные. Это позволяет избежать необходимости иметь копию содержимого порта в памяти для безопасности и повышает скорость



работы микроконтроллера при работе с внешними устройствами. Особую значимость приобретает данная возможность AVR для реализации систем, работающих в условиях внешних электрических помех.

Аналоговый компаратор входит в состав большинства микроконтроллеров AVR. Типовое напряжение смещения равно 10 мВ, время задержки распространения составляет 500 нс и зависит от напряжения питания микроконтроллера. Так, например, при напряжении питания 2,7 Вольт оно равно 750 нс. Аналоговый компаратор имеет свой собственный вектор прерывания в общей системе прерываний микроконтроллера. При этом тип перепада, вызывающий запрос на прерывание при срабатывании компаратора, может быть запрограммирован пользователем как фронт, срез или переключение. Логический выход компаратора может быть программным образом подключен ко входу одного из 16-разрядных таймеров/счетчиков, работающего в режиме захвата. Это дает возможность измерять длительность аналоговых сигналов а также максимально просто реализовывать АЦП двухтактного интегрирования.

Аналого - цифровой преобразователь (АЦП) построен по классической схеме последовательных приближений с устройством выборки/хранения (УВХ). Каждый из аналоговых входов может быть соединен со входом УВХ через аналоговый мультиплексор. Устройство выборки/хранения имеет свой собственный усилитель, гарантирующий, что измеряемый аналоговый сигнал будет стабильным в течение всего времени преобразования. Разрядность АЦП составляет 10 бит при нормируемой погрешности +/- 2 разряда. АЦП может работать в двух режимах - однократное преобразование по любому выбранному каналу и последовательный циклический опрос всех каналов. Время преобразования выбирается программно с помощью установки коэффициента деления частоты специального делителя, входящего в состав блока АЦП. Оно составляет 70...280 мкс для ATmega103 и 65...260 мкс для всех остальных микроконтроллеров, имеющих в своем составе АЦП. Важной особенностью аналого-цифрового преобразователя является функция подавления шума при преобразовании. Пользователь имеет возможность, выполнив короткий ряд программных операций, запустить АЦП в то время, когда центральный процессор находится в одном из режимов пониженного энергопотребления. При этом на точность преобразования не будут оказывать влияние помехи, возникающие при работе процессорного ядра.

AVR - микроконтроллеры могут быть переведены программным путем в один из шести режимов пониженного энергопотребления. Для разных семейств AVR и разных микроконтроллеров в пределах каждого семейства изменяются количество и сочетание доступных режимов пониженного энергопотребления. Подробную информацию можно найти в оригинальной технической документации Atmel Corp.

- Режим холостого хода (IDLE), в котором прекращает работу только процессор и фиксируется содержимое памяти данных, а внутренний генератор синхросигналов, таймеры, система прерываний и WATCHDOG-таймер продолжают функционировать.
- Режим микропотребления (Power Down), в котором сохраняется содержимое регистрового файла, но останавливается внутренний генератор синхросигналов. Выход из Power Down возможен либо по общему сбросу микроконтроллера, либо по сигналу (уровень) от внешнего источника прерывания. При включенном WATCHDOG-таймере ток потребления в этом режиме составляет около 60...80 мкА, а при выключенном - менее 1 мкА для всех типов AVR. Вышеприведенные значения справедливы для величины питающего напряжения 5 В.
- Режим сохранения энергии (Power Save), который реализован только у тех AVR, которые имеют в своем составе систему реального времени. В основном, режим Power Save идентичен Power Down, но здесь допускается независимая работа дополнительного таймера/счетчика RTC. Выход из режима Power Save возможен по прерыванию, вызванному или переполнением таймера/счетчика RTC, или



- срабатыванием блока сравнения этого счетчика. Ток потребления в этом режиме составляет 6...10 мкА при напряжении питания 5 В на частоте 32,768 кГц.
- Режим подавления шума при работе аналого-цифрового преобразователя (ADC Noise Reduction). Как уже отмечалось, в этом режиме останавливается процессорное ядро, но разрешена работа АЦП, двухпроводного интерфейса I2C и сторожевого таймера.
 - Основной режим ожидания (Standby). Идентичен режиму Power Down, но здесь работа тактового генератора не прекращается. Это гарантирует быстрый выход микроконтроллера из режима ожидания всего за 6 тактов генератора.
 - Дополнительный режим ожидания (Extended Standby). Идентичен режиму Power Save, но здесь работа тактового генератора тоже не прекращается. Это гарантирует быстрый выход микроконтроллера из режима ожидания всего за 6 тактов генератора.

Микроконтроллеры AVR mega64, mega103 и mega128 имеют еще одну примечательную архитектурную особенность, позволяющую значительно снизить энергопотребление всего кристалла в целом, когда в процессе работы возникают вынужденные паузы ожидания. В этом случае целесообразно уменьшить ток потребления центрального процессора и периферийных устройств как в активном режиме, так и в режиме холостого хода, понизив основную тактовую частоту микроконтроллера. Для этой цели на кристалле размещен специальный предделитель, позволяющий делить основную тактовую частоту на целое число в диапазоне от 2 до 129. Включение/выключение данной функции осуществляется одной короткой командой в программе.

AVR функционируют в широком диапазоне питающих напряжений от 1,8 до 6,0 Вольт. Энергопотребление в активном режиме зависит от величины напряжения питания, от частоты, на которой работает AVR и от конкретного типа микроконтроллера. Подробные спецификации обычно приводятся в оригинальной технической документации Atmel Corp. Температурные диапазоны работы микроконтроллеров AVR - коммерческий (0С...70С) и промышленный (-40С...+85С). К сожалению, корпорация Atmel не выпускает и не планирует выпускать AVR для работы в автомобильном (-40С...+125С) и военном (-55С...+125С) температурных диапазонах.

С точки зрения программиста AVR представляет собой 8-разрядный RISC микроконтроллер, имеющий быстрый Гарвардский процессор, память программ, память данных, порты ввода/вывода и различные интерфейсные схемы. Структурная схема микроконтроллера приведена на рис. 2. Гарвардская архитектура AVR реализует полное логическое и физическое разделение не только адресных пространств, но и информационных шин для обращения к памяти программ и к памяти данных, причем способы адресации и доступа к этим массивам памяти также различны. Подобное построение уже ближе к структуре цифровых сигнальных процессоров и обеспечивает существенное повышение производительности. Центральный процессор работает одновременно как с памятью программ, так и с памятью данных; разрядность шины памяти программ расширена до 16 бит.

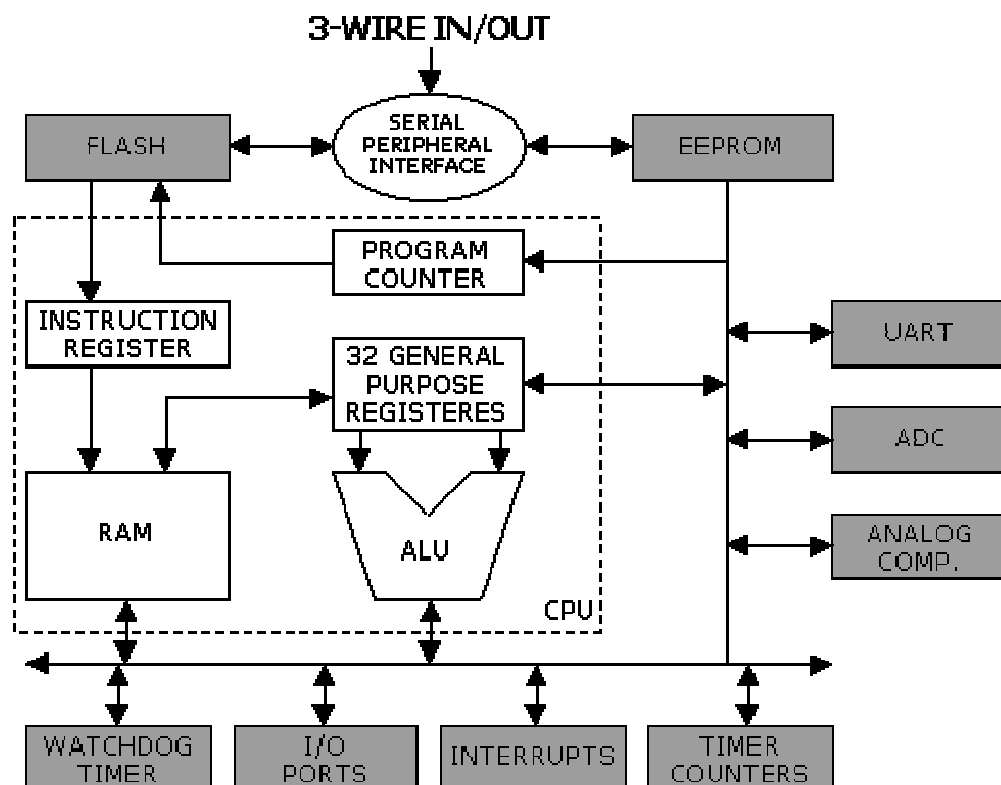


Рис. 2. Структурная схема AVR

Следующим шагом на пути увеличения быстродействия AVR является использование технологии конвейеризации, вследствие чего цикл "выборка - исполнение" команды заметно сокращен. Например, у микроконтроллеров семейства MCS51 короткая команда выполняется за 12 тактов генератора (1 машинный цикл), в течение которого процессор последовательно считывает код операции и исполняет ее. В PIC-контроллерах фирмы Microchip, где уже реализован конвейер, короткая команда выполняется в течение 8 периодов тактовой частоты (2 машинных цикла). За это время последовательно дешифрируется и считывается код операции, исполняется команда, фиксируется результат и одновременно считывается код следующей операции (одноуровневый конвейер). Поэтому в общем потоке команд одна короткая команда реализуется за 4 периода тактовой частоты или за один машинный цикл. В микроконтроллерах AVR тоже используется одноуровневый конвейер при обращении к памяти программ и короткая команда в общем потоке выполняется, как и в PIC-контроллерах, за один машинный цикл. Главное же отличие состоит в том, что этот цикл у AVR составляет всего один период тактовой частоты. Для сравнения, на рис. 3 приведены временные диаграммы при выполнении типовой команды для различных микроконтроллерных платформ.

Следующая отличительная черта архитектуры микроконтроллеров AVR - регистровый файл быстрого доступа, структурная схема которого показана на рис. 4. Каждый из 32-х регистров общего назначения длиной 1 байт непосредственно связан с арифметико-логическим устройством (ALU) процессора. Другими словами, в AVR существует 32 регистра - аккумулятора (сравните, например, с MCS51). Это обстоятельство позволяет в сочетании с конвейерной обработкой выполнять одну операцию в ALU за один машинный цикл. Так, два операнда извлекаются из регистрового файла, выполняется команда и результат записывается обратно в регистровый файл в течение только одного машинного цикла.

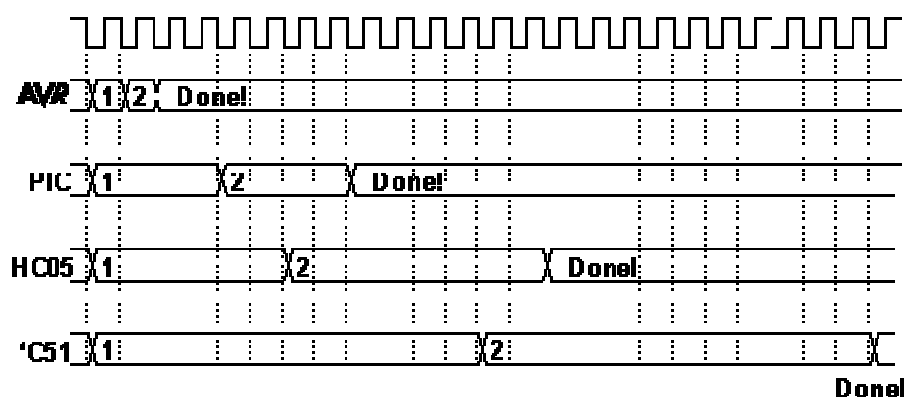
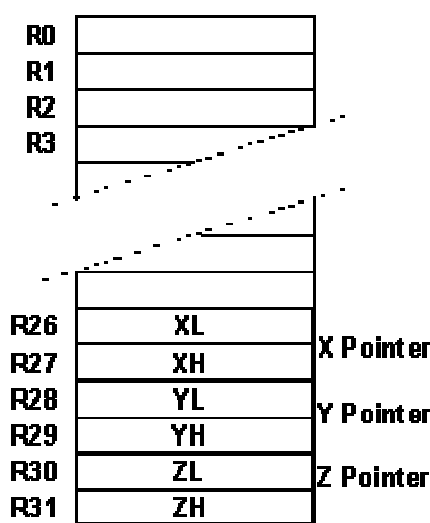


Рис. 3. Временные диаграммы микропроцессорных платформ

Рис. 4. Регистровый файл AVR

Шесть из 32-х регистров файла могут использоваться как три 16-разрядных указателя адреса при косвенной адресации данных. Один из этих указателей (Z Pointer) применяется также для доступа к данным, записанным в памяти программ микроконтроллера. Использование трех 16-битных указателей (X, Y и Z Pointers) существенно повышает скорость пересылки данных при работе прикладной программы.

Регистровый файл занимает младшие 32 байта в общем адресном пространстве SRAM AVR. Такое архитектурное решение позволяет получать доступ к быстрой "регистровой" оперативной памяти микроконтроллера двумя путями - непосредственной адресацией в коде команды к любой ячейке и другими способами адресации ячеек SRAM. В технической документации фирмы Atmel это полезное свойство носит название "быстрое контекстное переключение" и является еще одной отличительной особенностью архитектуры AVR, повышающей эффективность работы микроконтроллера и его производительность. Особенно заметно данное преимущество при реализации процедур целочисленной 16-битной арифметики, когда исключаются многократные пересылки между различными ячейками памяти данных при обработке арифметических операндов в ALU.

Система команд AVR весьма развита и насчитывает до 133 различных инструкций. Конкретное количество команд для каждого микроконтроллера того или иного семейства AVR приведено в таблицах 1 - 2. Почти все команды имеют фиксированную длину в одно слово (16 бит), что позволяет в большинстве случаев объединять в одной команде и код операции, и операнд(ы). Лишь немногие команды имеют размер в 2 слова (32 бит) и относятся к группе команд вызова процедуры CALL, длинных переходов в пределах всего адресного пространства JMP, возврата из подпрограмм RET и команд работы с памятью программ LPM. Различают пять групп команд AVR: условного ветвления, безусловного ветвления, арифметические и логические операции, команды пересылки данных, команды работы с битами. В последних версиях кристаллов AVR семейства "mega" реализована функция аппаратного умножения, что придает новым микроконтроллерам еще больше привлекательности с точки зрения разработчика.

По разнообразию и количеству реализованных инструкций AVR больше похожи на CISC, чем на RISC процессоры. Например, у PIC-контроллеров система команд насчитывает до 75 различных инструкций, а у MCS51 она составляет 111. В целом, прогрессивная RISC архитектура AVR в сочетании с наличием регистрового файла и расширенной системы команд позволяет в



короткие сроки создавать работоспособные программы с эффективным кодом как по компактности реализации, так и по скорости выполнения.

Корпорация Atmel планирует дальнейшее развитие перспективной линии AVR - микроконтроллеров. Исключение составляет лишь семейство "classic", развитие которого не планируется. Считается, что это семейство функционально сбалансировано и разнообразно представлено. В семействе "tiny" анонсирован очень интересный микроконтроллер - ATtiny26, имеющий в своем составе блок SRAM емкостью 128 байт и модуль USI (Universal Serial Interface). Это означает, что один и тот же периферийный узел связи на кристалле может быть программным образом сконфигурирован для работы в качестве коммуникационных интерфейсов SPI (Master/Slave) или I2C (Master/Slave). Дополнительно USI может быть запрограммирован для работы в качестве полудуплексного UART или 4/12 разрядного счетчика. Но наиболее интересные решения реализованы в семействе "mega", где анонсирован и начат серийный выпуск целого ряда кристаллов, которые будут выпускаться по технологии 0,35 мкм. Объем Flash-памяти программ с функциями ISP и SPM у новых "mega" будет варьироваться от 8 до 128 килобайт, а выпускаться они будут в корпусах MLF, DIP и TQFP с количеством выводов от 32 до 64. Все новые микроконтроллеры семейства "mega" будут иметь JTAG - интерфейс (за исключением mega8), аппаратный умножитель 8x8, дающий 16-разрядный результат, схему защиты от сбоев, двухпроводной последовательный интерфейс, аналого-цифровой преобразователь (за исключением ATmega162) и ряд других аппаратных особенностей (см. таблицу 3). Помимо этого, вдвое будет повышена скорость работы всех периферийных узлов (SPI, PWM, UART и др.), улучшена работа схемы тактирования и упрощен доступ к внешней памяти данных.

Хорошо известно, что развитые средства поддержки разработок при освоении и знакомстве с любым микроконтроллерным семейством играют не менее значимую роль, чем сами кристаллы. Фирма Atmel уделяет этому вопросу большое внимание. Программные и аппаратные средства для AVR всегда разрабатывались и разрабатываются параллельно с самими микроконтроллерами и включают в себя компиляторы, внутрисхемные эмуляторы, отладчики, программаторы, простейшие отладочные платы - конструкторы практически на любой вкус. Немаловажную роль играет и открытая политика Atmel Corp. в вопросах развития и распространения разнообразных, доступных средств поддержки разработок. Это позволяет разработчикам и производителям электронной техники надеяться на сохранение полноценной поддержки для перспективного семейства микроконтроллеров, закладывая AVR в свои новые изделия.

Официальным дистрибьютором фирмы Atmel в России является ООО "ЭФО", Санкт-Петербург. Здесь Вы можете ознакомиться с каталогами по всему спектру продукции Atmel, заказать и приобрести микросхемы, программные продукты и аппаратные средства поддержки а также получить консультацию квалифицированных технических специалистов

5.1 AVR-32

AVR32 — 32 битная архитектура [микроконтроллеров](#), анонсированная фирмой [Atmel](#) в [2006 году](#). Призвана конкурировать с архитектурами фирмы [ARM](#). Может использоваться в [КПК](#) и других мобильных высокопроизводительных устройствах. Обладает примечательным соотношением производительность/тактовая частота. Имеет 2 семейства: AVR32 AP и AVR32 UC3. Характеристики модели AT32AP7000

- Розничная цена около 25\$.
- Принадлежит семейству AVR32 AP.
- 186 [RISC](#) инструкций и 7-ступенчатый [конвейер](#).
- Инструкции [цифрового сигнального процессора](#).
- Тактовая частота до 200 МГц.
- Производительность до 295 [миллион операций в секунду](#).
- LCD контроллер 2048 x 2048.



- Аудиоконтроллер [AC97](#).
- Интерфейс светочувствительной [КМОП-матрицы](#).
- Интерфесы SD / MMC, NAND Flash, Compact Flash.
- 2 [Ethernet](#) MAC 10/100.
- USB интерфейс и элементы USB устройства.
- 4 [UART](#).
- 3 таймера.
- 32 Кбайта встроенной [статической](#) оперативной памяти.

6 PIC микроконтроллеры

PIC — [микроконтроллеры Гарвардской архитектуры](#), производимые американской компанией [Microchip Technology Inc.](#) Название PIC является сокращением от *Peripheral Interface Controller*, что означает "периферийный интерфейсный контроллер". Название объясняется тем, что изначально PIC предназначались для расширения возможностей ввода-вывода 16-битных микропроцессоров CP1600 ^[1].

В номенклатуре Microchip Technology Inc. представлен широкий спектр 8-и, 16-и и 32-битных микроконтроллеров и цифровых сигнальных контроллеров под маркой PIC. Отличительной особенностью PIC-контроллеров является хорошая преемственность различных семейств. Это и программная совместимость (единая бесплатная среда разработки MPLAB IDE, C-компиляторы от GCC), и совместимость по выводам, по периферии, по напряжениям питания, по средствам разработки, по библиотекам и стекам наиболее популярных коммуникационных протоколов. Номенклатура насчитывает более 500 различных контроллеров со всевозможными вариациями периферии, памяти, количеством выводов, производительностью, диапазонами питания и температуры и т. д.

6.1 8-битные микроконтроллеры

8-битные микроконтроллеры имеют модифицированную Гарвардскую архитектуру и делятся на 2 больших семейства: PIC10/12/16 и PIC18.

6.1.1 8-битные микроконтроллеры PIC10/12/16

8-битные микроконтроллеры PIC10/12/16 представлены двумя базовыми архитектурами ядра: BASELINE и MID-RANGE.

6.1.1.1 Архитектура базового (BASELINE) семейства

Базовая архитектура (BASELINE) состоит из контроллеров семейства PIC10 и части контроллеров семейств PIC12 и PIC16. Основываются они на 12-и разрядной архитектуре слова программ и представлены контроллерами в корпусах от 6 до 28-и выводов. Упрощенная архитектура базового семейства предоставляет наиболее дешевое решение из предлагаемых Microchip. Широкий диапазон напряжений питания, возможность работы при низких напряжениях преследует целью возможность применения микроконтроллеров в батарейных устройствах.

- маловыводные и миниатюрные корпуса
- Flash память программ
- низкое потребление тока
- низкая цена
- легкое освоение, всего 35 команд

6.1.1.2 Архитектура среднего (MID-RANGE) семейства



Архитектура среднего семейства (Mid-Range) нашла применение в микроконтроллерах серий PIC12 и PIC16, и имеет ширину слова памяти программ 14 бит. Эти микроконтроллеры выпускаются в корпусах от 8 до 64 выводов. Микроконтроллеры с Flash памятью работают в диапазоне напряжений питания от 2.0 до 5.5В, имеют систему прерываний, аппаратный стек и энергонезависимую память данных EEPROM, а также богатый набор периферии, такой как USB, SPI, I2C™, USART, LCD, компараторы, АЦП и т. п.

- различные корпуса: 8 — 64 выводов
- Flash память программ
- малый ток потребления
- богатая периферия
- производительность 5 MIPS
- легкое освоение, всего 35 команд

Расширенное ядро микроконтроллеров среднего семейства

В более новых микроконтроллерах Microchip применяет улучшенную архитектуру 8-битных PIC микроконтроллеров среднего семейства PIC12 и PIC16:

- увеличенный объем памяти программ и данных
- более глубокий и улучшенный аппаратный стек
- дополнительные источники сброса
- расширенная периферия, периферия включает модуль mTouch™ для создания сенсорных пользовательских интерфейсов
- уменьшенное время входа в прерывание
- производительность увеличена на 50 %, а размер кода снижен на 40 %
- 14 дополнительных инструкций, оптимизированных под C-компилятор — итого, 49 инструкций

На рисунке показана обобщённая структура МК семейства PIC16



PIC18F2525/2620/4525/4620

FIGURE 1-1: PIC18F2525/2620 (28-PIN) BLOCK DIAGRAM

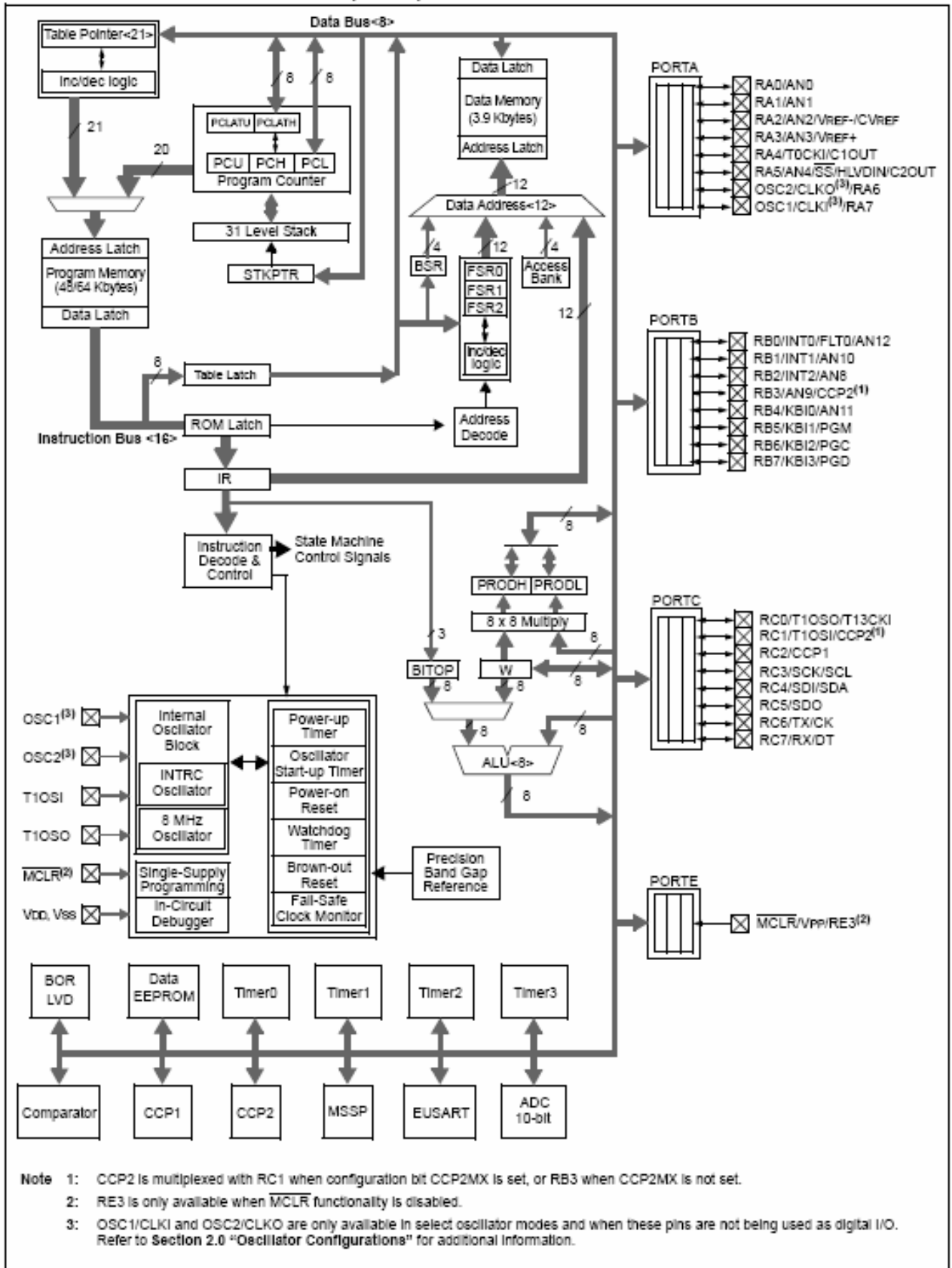
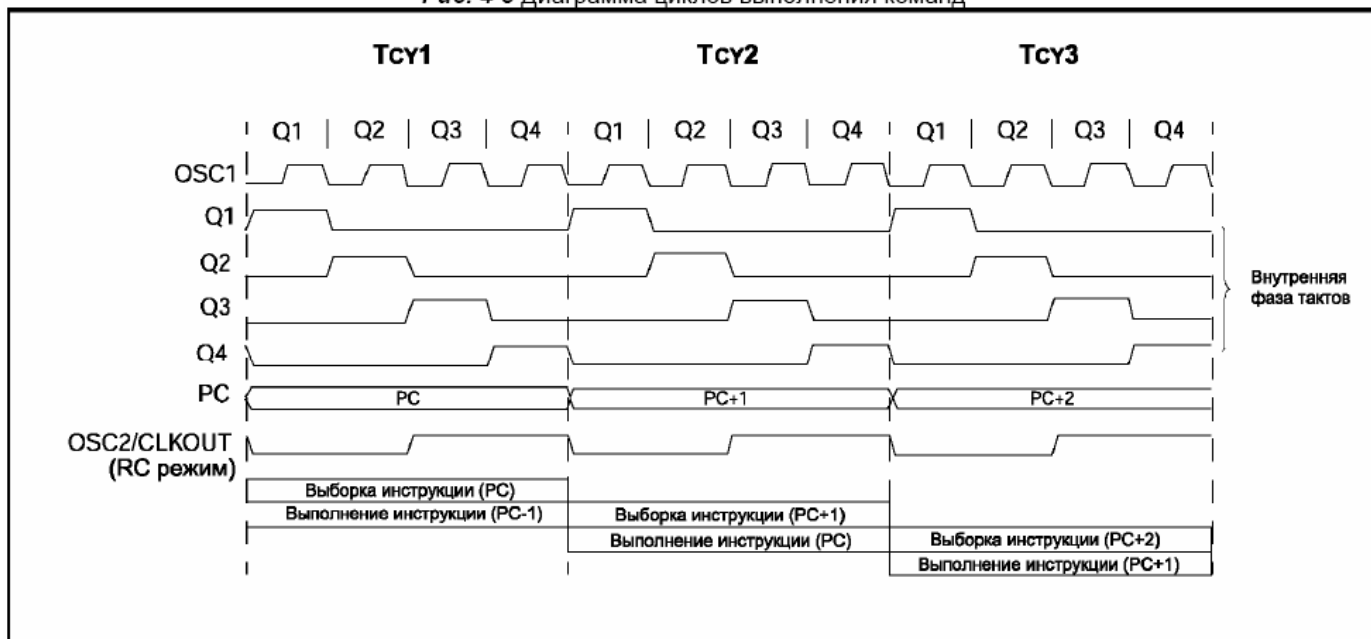




Рис. 4-3 Диаграмма циклов выполнения команд



4.3 Конвейерная выборка и выполнение команд

Цикл выполнения команды состоит из четырех тактов Q1, Q2, Q3 и Q4. Выборка следующей команды и выполнение текущей совмещены по времени, таким образом, выполнение команды происходит за один цикл. Если команда изменяет счетчик команд PC (команды ветвления, например GOTO), то необходимо два машинных цикла для выполнения команды (см. пример 4-1).

Цикл выборки команды начинается с приращения счетчика команд PC в такте Q1.

В цикле выполнения команды, код загруженной команды, помещается в регистр команд IR на такте Q1. Декодирование и выполнение команды происходит в тактах Q2, Q3 и Q4. Операнд из памяти данных читается в такте Q2, а результат выполнения команды записывается в такте Q4.

В примере 4-1 показаны две стадии конвейерной обработки команд для представленной последовательности. В цикле Tcy0 происходит выборка первой команды из памяти программ. На цикле Tcy1 первая команда исполняется, а вторая команда выбирается из памяти программ. В течение цикла Tcy2 вторая команда исполняется, а третья выбирается из памяти программ. На цикле Tcy3 происходит выборка четвертой команды и выполняется команда третья команда (CALL SUB_1). Когда завершается выполнение третьей команды CPU загружает адрес четвертой команды в вершину стека и изменяет счетчик команд PC на адрес SUB_1. Это означает, что команда, загруженная в цикле Tcy3, должна быть удалена из конвейера. В течение цикла Tcy4 четвертая команда удаляется из конвейера (выполняется пустой цикл NOP) и происходит выборка команды по адресу SUB_1. В цикле Tcy5 выполняется команда пять и выбирается из памяти программ команда с адресом SUB_1 + 1.

Пример 4-1 Выборка и выполнения команд



Все команды выполняются за один цикл, кроме команд ветвления. Команды ветвления требуют два машинных цикла, т.к. необходимо удалить предварительно выбранную команду из конвейера. Во время удаления выбирается новая команда, а затем она исполняется в следующем машинном цикле.

6.1.2 8-битные микроконтроллеры PIC18

Высокопроизводительное семейство 8-битных микроконтроллеров PIC18F представлено широкой гаммой микроконтроллеров, включающих большой набор периферийных модулей: 10бит АЦП, компараторы, ШИМ, захват/сравнение, драйвер ЖКИ; интерфейсы связи USB, CAN, I2C, SPI, USART, Ethernet и т. д.



- быстродействия до 16 MIPS
- объем памяти программ до 128Кб
- корпуса от 18 до 100 выводов.
- эффективное кодирование на С
- NanoWatt технологии
- встроенный программируемый генератор
- 3В и 5В семейства
- продвинутая архитектура (16-и разрядные слова программ)
- гибкость самопрограммирования
- поддержка широко распространенных протоколов связи (CAN, USB, ZigBee™, TCP/IP)
- программная совместимость и совместимость по выводам и периферийным модулям внутри семейства, а также со старшими (16-битными) семействами, предоставляют возможность расширения и увеличения функциональности при развитии разработок.

6.1.3 Российские МК семейства PIC17

1886BE1, 1886BE2 отечественные МК фирмы МИЛАНД (milandr.ru) являются полным аналогом 8 битного МК PIC17C756. В отличие от Микрочиповского аналога отечественные МК имеют расширенный диапазон рабочих температур (от -60 до +125С)

6.2 16-битные контроллеры

Компания Microchip Technology Inc. производит два семейства 16-и разрядных микроконтроллеров (MCU) и два семейства 16-и разрядных цифровых сигнальных контроллеров (DSC), которые дают разработчикам совместимые платформы с обширным выбором типов корпусов, периферийных модулей и быстродействия. Общие атрибуты всех 16-и разрядных семейств — это совместимость по выводам, общая система команд и, соответственно, общие компиляторы Си и средства разработки. Широкая линейка 16-битных контроллеров включает контроллеры от 18 до 100 выводов с объемом flash памяти от 6 Кб до 256 Кб.

6.2.1 16-битные микроконтроллеры PIC24F и PIC24H

Основные особенности:

- выполнение команды за 2 такта генератора
- гарантированное время отклика на прерывание — 5 командных тактов
- доступ к памяти (в том числе инструкции чтения-модификации-записи) за 1 командный такт
- аппаратный умножитель (за 1 такт)
- аппаратный делитель 32/16 и 16/16 чисел (17 командных тактов)
- диапазон питающих напряжений 2.0...3.6В, один источник питания.
- внутрисхемное и само- программирование
- встроенный генератор с PLL
- расширенная периферия (до 3-х SPI, до 3-х I2C, до 4-х UART (с поддержкой IrDA, LIN), CAN (и расширенный ECAN), USB OTG)
- модуль измерения времени заряда (CTMU), основное применение — управление емкостными сенсорами
- ток портов ввода/вывода общего назначения — 18 мА
- порты толерантны к устройствам с 5 В питанием
- до девяти 16-битных таймеров общего назначения
- до восьми модулей захвата
- ряд энергосберегающих режимов
- до двух АЦП (32 канала) с конфигурируемой разрядностью



- до восьми 16-битных модулей сравнения / генерации ШИМ
- расширенный набор инструкций, 16 ортогональных регистров общего назначения, векторная приоритетная система прерываний, и другие особенности (методы адресации, аппаратные циклы).

16-битные микроконтроллеры представлены в двух модификациях — PIC24F и PIC24H, которые отличаются технологией изготовления FLASH программной памяти. Это определяет диапазон питающих напряжений — для PIC24F — 2,0...3,6 В, для PIC24H — 3,0...3,6 В. Первое семейство (PIC24F) производится по более дешевой технологии (0,25 мкм) и работает с максимальной производительностью ядра 16MIPS@32МГц. Второе семейство (PIC24H) производится с использованием более сложного техпроцесса изготовления, что позволяет добиться большей скорости работы (40MIPS@80МГц). Оба семейства поддерживают внутрисхемное программирование (ICSP), а так же самопрограммирование (RTSP).

6.3 Контроллеры цифровой обработки сигналов dsPIC30F и dsPIC33F-отдельные лекции

6.4 32-битные микроконтроллеры

Старшим семейством контроллеров от Microchip Technology является 32-разрядное семейство микроконтроллеров PIC32:

- ядро [MIPS32 M4K](#), частота тактирования 80 МГц, большинство команд выполняются за 1 такт генератора, производительность 1.53 Dhrystone MIPS/МГц
- порты ввода/вывода относятся к основному частотному диапазону, т.о., к примеру, можно дергать портами с тактовой частотой.
- дополнительный частотный диапазон организуется для периферии из основного посредством программно настраиваемого делителя, т.о. частота тактирования периферии может быть снижена для снижения энергопотребления.
- 64- и 100-выводные корпуса, до 32 кБ SRAM и 512 кБ Flash с кэшем предвыборки
- совместимость по выводам и отладочным средствам с 16-битными контроллерами Microchip
- аппаратный умножитель-делитель с независимым от основного ядра конвейером, оптимизированным по скорости выполнения
- набор расширенных инструкций MIPS16e™ — набор 16-битных инструкций, позволяющий на некоторых приложениях снизить объем кода на 40 %
- независимый от основного ядра контроллер USB

Семейство 32-разрядных микроконтроллеров PIC32 выделяется значительно увеличенной производительностью и объемом памяти на кристалле по сравнению с 16-разрядными микроконтроллерами и контроллерами цифровой обработки сигналов PIC24/dsPIC. Контроллеры PIC32 также оснащены большим количеством периферийных модулей, включая различные коммуникационные интерфейсы — те же, что у PIC24, и 16-битный параллельный порт, который может использоваться, например, для обслуживания внешних микросхем памяти и жидкокристаллических TFT-индикаторов. Семейство PIC32 построено на ядре MIPS32®, с конкурентоспособной комбинацией низкого потребления энергии, быстрой реакции на прерывание, функциональностью средств разработки и лидирующем в своем классе быстродействием 1.53 Dhrystone MIPS/МГц. Такое быстродействие достигнуто благодаря эффективному набору инструкций, 5-ступенчатому конвейеру, аппаратному умножителю с накоплением и несколькими (до 8) наборами 32-разрядных регистров ядра.



7 MSP430 — семейство шестнадцатиразрядных микроконтроллеров фирмы Texas Instruments

Первый контроллер с аббревиатурой MSP430 появился в [1999 году](#). При разработке контроллера инженеры [TI](#) постарались создать контроллер с базисом, наследующим легендарную архитектуру процессора 70-80-х годов [PDP-11](#) и им это удалось. В результате появился [RISC](#)-контроллер с системой команд близкой к [PDP-11](#). Данные [микроконтроллеры](#) характеризуются сверхнизким потреблением, наличием различных периферийных устройств и широко используются в портативных приборах (например, в мультиметрах, датчиках и др.). По сравнению с семействами [AVR](#) и [PIC](#) используют 16-ти битную арифметику и [ортогональную систему команд](#) с разнообразными способами адресации. От классических [RISC](#) процессоров отличаются тем, что не содержат, например, как [AVR](#), отдельных команд для загрузки регистров и команд для выполнения операций над аргументами в регистрах. Операнды команд могут располагаться в памяти при нехватке регистров общего назначения.

7.1 Система команд MSP430

MSP430 имеет [фоннеймановскую](#) архитектуру, с единым адресным пространством для команд и данных. Память может адресоваться как побайтово, так и пословно. Порядке хранения 16-разрядных слов — [little-endian](#).

Процессор содержит 16 16-разрядных ортогональных регистров. Регистр R0 используется как программный указатель ([англ. Program Counter](#)), регистр R1 как указатель стека ([англ. Stack Pointer](#)), регистр R2 как слово состояния процессора ([англ. Processor State Word](#)), а R3 как специальный регистр именуемый *генератор констант*, R2 также может использоваться в качестве генератора констант. Генератор констант используется для сокращения общей длины команды вследствие неявного представления константы в коде операции. Регистры с R4 по R15 используются как регистры общего назначения.

Набор инструкций очень простой и представлен 27-ю инструкциями. Инструкции имеют как 8-битную (байт), так и 16-битную (слово) форму обработки операндов. Бит V/W — управляет этим признаком.

8 Семейство ARM

ARM Ltd. (название происходит от **Advanced RISC Machines**) ([LSE: ARM](#), [NYSE: ARMHY](#)) — [британская](#) корпорация, являющаяся одним из крупнейших разработчиков и лицензиаров современной архитектуры 32-х разрядных [RISC-процессоров](#), специально ориентированных для использования в портативных и мобильных устройствах (таких, как [мобильные телефоны](#), [персональные органайзеры](#), пр.).

ARM не является производителем [микропроцессоров](#) как таковым, однако лицензирует собственную технологию третьим фирмам, таким как [Atmel](#), [Cirrus Logic](#) ([англ.](#)), [Intel](#), [Marvell](#) ([англ.](#)), [NXP](#) ([англ.](#)), [Samsung](#), [Qualcomm](#), [Sony Ericsson](#), [Texas Instruments](#) которые, собственно, и воплощают её в чипах. Подробнее смотрите [Архитектура ARM](#).

Технология ARM оказалась весьма успешной и в настоящее время является доминирующей микропроцессорной архитектурой для портативных цифровых устройств. ARM утверждает, что общий объём микропроцессоров, произведённых по их лицензии, превышает 2,5 миллиарда штук.

В настоящее время известны несколько семейств микропроцессоров [ARM](#) — [ARM7](#) (с тактовой частотой до 60-72 МГц, предназначенные, например, для недорогих мобильных телефонов), [ARM9](#) (с частотами порядка 200 МГц для продвинутых телефонов и карманных компьютеров) и [ARM9E](#). Новейшими семействами являются [Cortex](#) и [ARM11](#) с тактовой частотой до 1ГГц и расширенными возможностями для цифровой обработки сигналов.

Популярное семейство микропроцессоров [xScale](#) ([англ.](#)) фирмы [Marvell](#) ([англ.](#)) (до 27 июня 2007 года — [Intel](#), [источник](#) ([англ.](#))) в действительности является расширением архитектуры ARM9,



дополненной набором инструкций [Wireless MMX](#), специально разработанных фирмой Intel для поддержки мультимедийных приложений.

Интересной дополнительной возможностью архитектуры ARM9 является технология [Jazelle](#), предназначенная для аппаратного ускорения выполнения байт-кодов языка [Java](#).

8.1 Российские МК семейства ARM

Микроконтроллеры серии 1986BE9x, K1986BE9x и MDR32F9Qx (далее 1986BE9x), построенные на базе высокопроизводительного процессорного RISC ядра ARM Cortex-M3, содержат встроенную 128 Кбайт Flash-память программ и 32 Кбайта ОЗУ. Микроконтроллеры работают на тактовой частоте до 80 МГц. Периферия микроконтроллера включает контроллер USB интерфейса со встроенным аналоговым приемопередатчиком со скоростями передачи 12 Мбит/с (Full Speed) и 1.5 Мбит/с (Low Speed), стандартные интерфейсы UART, SPI и I2C, контроллер внешней системной шины, что позволяет работать с внешними микросхемами статического ОЗУ и ПЗУ, NAND Flash-памятью и другими внешними устройствами. Микроконтроллеры содержат три 16-ти разрядных таймера с 4 каналами схем захвата и ШИМ с функциями формирования «мертвой зоны» и аппаратной блокировки, а также системный 24-х разрядный таймер и два сторожевых таймера. Кроме того, в состав микроконтроллеров входят: два 12-ти разрядных высокоскоростных (до 0,5М выборок в сек) АЦП с возможностью оцифровки информации от 16 внешних каналов и от встроенных датчиков температуры и опорного напряжения; два 12-ти разрядных ЦАП; встроенный компаратор с тремя входами и внутренней шкалой напряжений.

Встроенные RC генераторы HSI (8 МГц) и LSI (40 кГц) и внешние генераторы HSE (2...16 МГц) и LSE (32 кГц) и две схемы умножения тактовой частоты PLL для ядра и USB интерфейса позволяют гибко настраивать скорость работы микроконтроллеров.

Архитектура системы памяти за счет матрицы системных шин позволяет минимизировать возможные конфликты при работе системы и повысить общую производительность. Контроллер DMA позволяет ускорить обмен информацией между ОЗУ и периферией без участия процессорного ядра.

Встроенный регулятор, предназначенный для формирования питания внутренней цифровой части, формирует напряжение 1,8 В и не требует дополнительных внешних элементов. Таким образом, для работы микроконтроллера достаточно одного внешнего напряжения питания в диапазоне от 2,2 до 3,6 В. Также в микроконтроллерах реализован батарейный домен, работающий от внешней батареи, который предназначен для обеспечения функций часов реального времени и сохранения некоторого объема данных при отсутствии основного питания. Встроенные детекторы напряжения питания могут отслеживать уровень внешнего основного питания, уровень напряжения питания на батарее. Аппаратные схемы сброса при просадке питания позволяют исключить сбойную работу микросхемы при выходе уровня напряжения питания за допустимые пределы.

В зависимости от корпуса, в котором выпускается микросхема, изменяются функциональные возможности микроконтроллеров, но при этом объем памяти программ и ОЗУ остается одинаковым.


Таблица 1 – Основные характеристики микроконтроллеров серии 1986VE9х 1986VE91Т

	1986VE91Т	1986VE92У MDR32F9Q2	1986VE93У
Корпус	132 вывода	64 вывода	48 выводов
Ядро		ARM Cortex-M3	
ПЗУ		128 Кбайт Flash	
ОЗУ		32 Кбайт	
Питание		2,2...3,6 В	
Частота		80 МГц	
USER IO	96	43	30
USB	Device и Host FS (до 12 Мбит/с) встроенный PNY		
UART	2	2	2
CAN	2	2	2
SPI	2	2	1
I2C	1	1	1
2 x 12-ти разрядных АЦП	16 каналов	8 каналов	4 канала
ЦАП 12 разрядов	2	1	1
Компаратор	3 входа	2 входа	2 входа
Внешняя шина	32 разряда	8 разрядов	-