

УДК 681.3.068
ББК 32.973.26-018.1
Р32

Ревич Ю. В.

Р32 Практическое программирование микроконтроллеров Atmel AVR на языке ассемблера. — 2-е изд., испр. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 352 с.: ил. — (Электроника)

ISBN 978-5-9775-0657-1

Изложены принципы функционирования, особенности архитектуры и приемы программирования микроконтроллеров Atmel AVR. Приведены готовые рецепты для программирования основных функций современной микроэлектронной аппаратуры: от реакции на нажатие кнопки или построения динамической индикации до сложных протоколов записи данных во внешнюю память или особенностей подключения часов реального времени. Особое внимание уделяется обмену данными микроэлектронных устройств с персональным компьютером, приводятся примеры программ. В книге учтены особенности современных моделей AVR и сопутствующих микросхем последних лет выпуска. Приложения содержат основные параметры микроконтроллеров AVR, перечень команд и тексты программ для них, а также список используемых терминов и аббревиатур.

Для учащихся, инженерно-технических работников и радиолюбителей

УДК 681.3.068
ББК 32.973.26-018.1

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Игорь Шишигин</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Юрий Рожко</i>
Компьютерная верстка	<i>Ольги Сергиенко</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Оформление обложки	<i>Елены Беляевой</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 01.10.10.

Формат 70×100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 28,38.

Тираж 1500 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию
№ 77.99.60.953 Д.005770.05.09 от 26.05.2009 г. выдано Федеральной службой
по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ГУП "Типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

ISBN 978-5-9775-0657-1

© Ревич Ю. В., 2010
© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2010

Оглавление

Микроконтроллеры, их возникновение и применение	7
Предыстория микроконтроллеров	8
Электроника в греческом стиле	10
Почему AVR?	12
Что дальше?	14
 ЧАСТЬ I. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ УСТРОЙСТВА И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ATMEL AVR.....	 17
Глава 1. Обзор микроконтроллеров Atmel AVR	19
Семейства AVR	21
Особенности практического использования МК AVR	23
О потреблении	23
Некоторые особенности применения AVR в схемах	25
Глава 2. Общее устройство, организация памяти, тактирование, сброс.....	27
Память программ	27
Память данных (ОЗУ, SRAM).....	29
Энергонезависимая память данных (EEPROM)	31
Способы тактирования	32
Сброс	34
Глава 3. Знакомство с периферийными устройствами	37
Порты ввода-вывода	38
Таймеры-счетчики	39
Аналогово-цифровой преобразователь	41
Последовательные порты	42
UART.....	43
Интерфейс SPI	46
Интерфейс TWI (I ² C)	50
Универсальный последовательный интерфейс USI	50
Глава 4. Прерывания и режимы энергосбережения	53
Прерывания	53
Разновидности прерываний.....	57
Режимы энергосбережения	58

ЧАСТЬ II. ПРОГРАММИРОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ**ATMEL AVR 61****Глава 5. Общие принципы программирования МК семейства AVR..... 63**

Ассемблер или C? 63

Способы и средства программирования AVR..... 67

Редактор кода 67

Об AVR Studio 68

Обустройство ассемблера..... 70

Программаторы 71

О hex-файлах 75

Команды, инструкции и нотация AVR-ассемблера 78

Числа и выражения 79

Директивы и функции..... 80

Общая структура AVR-программы 84

Обработка прерываний..... 85

RESET 89

Простейшая программа 90

Задержка 92

Программа счетчика 94

Использование прерываний 96

Задержка по таймеру..... 97

Программа счетчика с использованием прерываний..... 98

О конфигурационных битах 101

Глава 6. Система команд AVR..... 105Команды передачи управления и регистр *SREG* 105

Команды проверки-пропуска 111

Команды логических операций 113

Команды сдвига и операции с битами 114

Команды арифметических операций..... 116

Команды пересылки данных 118

Команды управления системой 122

Выполнение типовых процедур на ассемблере..... 123

О стеке, локальных и глобальных переменных..... 125

Глава 7. Арифметические операции 127

Стандартные арифметические операции 128

Умножение многоразрядных чисел 129

Деление многоразрядных чисел 131

Операции с дробными числами 134

Генератор случайных чисел 136

Операции с числами в формате BCD 138

Отрицательные числа в МК 143

Глава 8. Программирование таймеров 147

8- и 16-разрядные таймеры 147

Формирование заданного значения частоты 149

Отсчет времени 153

Точная коррекция времени 158

Частотомер и периодомер	160
Частотомер	160
Периодомер	164
Управление динамической индикацией	167
LED-индикаторы и их подключение	168
Программирование динамической индикации	171
Таймеры в режиме PWM.....	174
Глава 9. Использование EEPROM	179
Еще раз о сохранности данных в EEPROM.....	179
Запись и чтение EEPROM.....	181
Хранение констант в EEPROM.....	183
Глава 10. Аналоговый компаратор и АЦП.....	187
Аналого-цифровые операции и их погрешности	187
Работа с аналоговым компаратором	190
Интегрирующий АЦП на компараторе	193
Принцип работы и расчетные формулы.....	194
Программа интегрирующего АЦП	198
Встроенный АЦП.....	201
Пример использования АЦП	204
Программа	206
Глава 11. Программирование SPI	215
Основные операции через SPI	215
Аппаратный вариант	216
Программный вариант	218
О разновидностях энергонезависимой памяти.....	219
Запись и чтение flash-памяти через SPI	221
Программа обмена с памятью 45DB011B по SPI.....	224
Запись и чтение flash-карт.....	225
Подключение карт MMC.....	225
Подача команд и инициализация MMC	228
Запись и чтение MMC.....	232
Глава 12. Интерфейс TWI (I²C) и его практическое использование	237
Базовый протокол I ² C.....	237
Программная эмуляция протокола I ² C.....	240
Запись данных во внешнюю энергонезависимую память	241
Режимы обмена с памятью AT24	241
Программа	243
Часы с интерфейсом I ² C	247
Запись данных	255
Чтение данных	259
Глава 13. Программирование UART/USART	261
Инициализация UART	262
Передача и прием данных	263
Пример установки часов DS1307 с помощью UART	266

Приемы защиты от сбоев при коммуникации	271
Проверка на четность	271
Как организовать корректный обмен	273
Дополнительные возможности USART	274
Реализация интерфейсов RS-232 и RS-485	276
Преобразователи уровня для RS-232	280
RS-485	283
Глава 14. Режимы энергосбережения и сторожевой таймер	285
Программирование режима энергосбережения	286
Пример прибора с батарейным питанием	287
Доработка программы	289
Использование сторожевого таймера	293
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	299
Приложение 1. Основные параметры микроконтроллеров Atmel AVR.....	301
Приложение 2. Команды Atmel AVR	309
Арифметические и логические команды	310
Команды операций с битами.....	311
Команды сравнения	312
Команды передачи управления.....	313
Команды безусловного перехода и вызова подпрограмм	313
Команды проверки-пропуска и команды условного перехода.....	314
Команды переноса данных.....	315
Команды управления системой	316
Приложение 3. Тексты программ	317
Демонстрационная программа обмена данными с flash-памятью 45DB011B по интерфейсу SPI.....	317
Процедуры обмена по интерфейсу I ² C.....	321
Приложение 4. Обмен данными с персональным компьютером и отладка программ через UART.....	329
Работа с COM-портом в Delphi.....	329
Установка линии RTS в DOS и Windows.....	335
Программа COM2000	337
Отладка программ с помощью эмулятора терминала	339
Приложение 5. Словарь часто встречающихся аббревиатур и терминов.....	341
Литература	347
Предметный указатель	349

ВВЕДЕНИЕ

Микроконтроллеры, их возникновение и применение

Говорят, что в 1960-е годы, наблюдая за участниками студенческих демонстраций протеста, Гордон Мур заметил: "Истинные революционеры — это мы". Ученик и сотрудник одного из изобретателей транзистора У. Шокли, в числе прочего считающегося основателем знаменитой Кремниевой долины, в свою очередь основатель и лидер компаний, которым суждено было сыграть ведущую роль в развитии микроэлектроники, Мур знал, что говорил. Парадоксальным образом именно изобретения Мура и его сотрудников было суждено стать основой того мира, в котором впоследствии сконцентрировалась деятельность "бунтующей молодежи" 1960-х. Современные хакеры (не компьютерные хулиганы из газет, а настоящие увлеченные своим делом компьютерщики) — прямые идеологические наследники сорбоннских студентов и американских демонстрантов, сменившие девиз "Make love not war"¹ на "Не пишите лозунги — пишите код". Неслучайно многие известные деятели электронно-компьютерной индустрии, авторы изобретений, сформировавших лицо современного мира, — выходцы из среды, близкой той самой "бунтующей молодежи".

Наша история о микроконтроллерах началась с того, что в 1957 г. Гордон Мур совместно с Робертом Нойсом, ставшим впоследствии одним из изобретателей микросхемы, и еще шестью сотрудниками Shockley Semiconductor Labs (Шокли назвал их "предательской восьмеркой"), основал компанию Fairchild Semiconductor. Ей мы обязаны не только развитием полупроводникового рынка и внедрением микросхем в инженерную практику, но и тем, что она стала своеобразной кузницей кадров и генератором идей для молодой отрасли.

Вот только некоторые из исторических фактов. Сам Мур с Нойсом в конце 1960-х создали фирму Integrated Electronics, которая под сокращенным названием Intel сейчас знакома каждому школьнику. Джереми Сандерс, основатель другой известнейшей компании — AMD, также вышел из Fairchild, где отличился открытием современной экономической модели производства и продаж полупроводниковых компонентов, в которой себестоимость изделия стремится к нулю по мере повыше-

¹ "Занимайтесь любовью, а не войной" — лозунг хиппи 1960-х, протестующих против войны во Вьетнаме.

ния объема партии. Чарли Спорк, один из ключевых менеджеров Fairchild, в 1967 г. стал директором National Semiconductor, которой впоследствии руководил четверть века. Половина "предательской восьмерки" — Джин Хоерни, Евгений Клайнер, Джей Ласт и Шелдон Робертс — в 1961 г. основала компанию Amelco, из которой впоследствии выросли всем известные теперь Intersil, Maxim и Ixys. Сотруднику Fairchild Роберту Видлару мы обязаны изобретением операционных усилителей — разновидности микросхем, и по сей день уступающей по популярности разве что микропроцессорам. Мало того, с историей Fairchild связано возникновение известной венчурной (т. е. "рисковой") модели финансирования, сыгравшей определяющую роль в развитии всех отраслей, связанных с электроникой, компьютерами и телекоммуникациями. Недаром Fairchild нередко называют "праматерью всей электроники".

Предыстория микроконтроллеров

Из всего этого урагана событий для нашего повествования важно то, что в числе прочих инноваций сотрудники Fairchild первыми стали продвигать полупроводниковую память. Сейчас, в век CD и DVD, жестких дисков и flash-карточек, нам трудно представить себе, что в начале 1960-х годов программы для компьютеров хранились в основном на картонных листочках (перфокартах), конструкторы ломали голову над дорогущими модулями ОЗУ на ртутных линиях задержки, осциллографических трубках и ферритовых колечках, где каждый бит "прошивался" вручную. Самое компактное в те годы электронное устройство для хранения данных на магнитных дисках под названием RAMAC 305 емкостью 5 Мбайт было размером с промышленный холодильник и сдавалось в аренду за 5 тыс. долларов в месяц.

Единственным "лучом света" в темном царстве этих монстров стало изобретение сотрудника корпорации American Bosch Arma Йен Чоу, который в 1956 г. получил патент на устройство, известное теперь как "однократно программируемое ROM" (OTP ROM¹). В этом патенте, между прочим, впервые был употреблен термин "прожиг" (burn) — микромодуль состоял из матрицы с плавкими перемычками, которые при программировании пережигались подачей на них большого напряжения. OTP ROM долгое время оставались единственными устройствами для компактного хранения данных, и не потеряли своего значения до самого последнего времени — не меньше четверти микроконтроллеров в мире, особенно из тех, что попроще, до сих пор выпускается именно с такой однократно программируемой встроенной памятью, ввиду крайней ее дешевизны. И лишь в последние годы "прожигаемая" память стала постепенно вытесняться более удобной flash-памятью, когда последняя подешевела настолько, что смысл в использовании OTP ROM почти пропал.

Но вернемся в 1960-е. Компактная полупроводниковая память была нужна абсолютно всем — от военных и NASA до изготовителей бытовых приборов. Сначала Fairchild предложила то, что сегодня называется DRAM, в частности, на таких микросхемах (32 768 чипов емкостью 256 бит каждый) была построена память знаме-

¹ Расшифровку некоторых аббревиатур см. в *приложении 5*.

нитого суперкомпьютера ILLIAC-IV, конкурента отечественной БЭСМ-6. Почувяв, откуда дует ветер, в 1968 г. Мур с Нойсом оставили Fairchild и основали Intel, как специализированную компанию по разработке и производству памяти. Они еще не ведали, что самым популярным детищем Intel станет вовсе не память, а небольшой приборчик (рис. В1), названный микропроцессором, разработка которого первоначально затевалась как вспомогательный этап в проектировании обычного калькулятора.

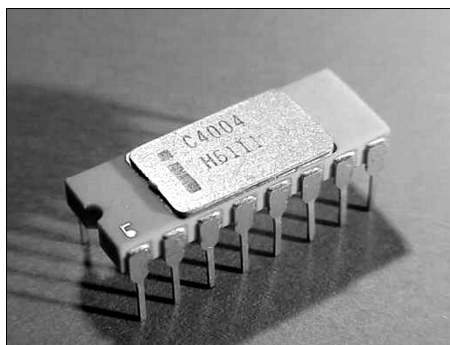


Рис. В1. Микропроцессор Intel 4004

ИЗОБРЕТЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРА

В 1969 г. в Intel появились несколько человек из Busicom — молодой японской компании, занимающейся производством калькуляторов. Им требовался набор из 12 интегральных схем в качестве основного элемента нового дешевого настольного калькулятора. Проект был разработан Масатоши Шима, который и представлял японскую сторону. Тед Хофф (Marcian E. Ted Hoff, р. 1937 г.), руководитель отдела, занимавшегося разработкой применений для продукции Intel, ознакомившись с проектом, понял, что вместо того, чтобы создавать калькулятор с некоторыми возможностями программирования, можно сделать наоборот, компьютер, программируемый для работы в качестве калькулятора. Развивая идею, в течение осени 1969 г. Хофф определился с архитектурой будущего микропроцессора. Весной в отдел Хоффа пришел (все из той же уже известной нам Fairchild) новый сотрудник Фредерик Фэггин (Federico Faggin), который и придумал название для всей системы: "семейство 4000". Семейство состояло из четырех 16-выводных микросхем: 4001 содержал ROM на 2 Кбайта; 4002 — RAM с 4-битовым выходным портом для загрузки программ; 4003 представлял собой 10-битовый расширитель ввода-вывода с последовательным вводом и параллельным выводом для связи с клавиатурой, индикатором и другими внешними устройствами; наконец 4004 был 4-битовым ЦПУ (центральным процессорным устройством). Это ЦПУ содержало 2300 транзисторов и работало на тактовой частоте 108 кГц. 15 ноября 1971 г. было объявлено о создании первого микропроцессора. Busicom приобрела разработку, заплатив Intel \$60 000. Но в Intel решили возвратить Busicom эти деньги, чтобы вернуть себе права на микропроцессор.

i4004 обладал вычислительной мощностью, сравнимой с первым электронным компьютером ENIAC (1946). Свое первое практическое применение 4004-й нашел в системах управления дорожными светофорами и анализаторах крови. Этот микропроцессор был использован в бортовой аппаратуре межпланетного зонда Pioneer-10, который поставил рекорд долгожительства среди подобных аппаратов: он был запущен в 1972 г., а к сентябрю 2001 г. Pioneer-10 удалился от Земли на 11,78 млрд км и все еще работал и, вполне вероятно, работает по сей день, хотя в феврале 2003 г. NASA официально с ним попрощалось.

Так началось победное шествие микропроцессоров, которые позднее разделились на несколько разновидностей, в основном относящихся к двум главным группам: собственно микропроцессорам (МП) и микроконтроллерам (МК). Первые предназначены для использования в составе вычислительных систем, самые распространенные из которых — персональные компьютеры (ПК), поэтому их еще часто называют "процессорами для ПК" (хотя к этой группе обычно относят также и производительные МП для серверов и некоторые другие). МК отличаются от МП тем, что они в первую очередь предназначены для управления различными системами, поэтому при относительно более слабом вычислительном ядре они включают в себя много дополнительных узлов. То, что для обычного МП предполагается размещать во внешних чипсетах или дополнительных модулях (память, порты ввода-вывода, таймеры, контроллеры прерываний, узлы для обработки аналоговых сигналов и пр.), в МК располагается прямо на кристалле, отчего их когда-то было модно называть "микро-ЭВМ".

И действительно, в простейшем случае для построения полностью функционирующего компьютера достаточно единственной микросхемы МК с подсоединенными к ней устройствами ввода-вывода. Современные модели рядовых однокристальных МК превышают вычислительные возможности IBM PC AT на 286-м процессоре образца второй половины 1980-х. Есть области, где границу между МП и МК провести трудно: таковы, например, процессоры для мобильных устройств, от телефонов и карманных компьютеров до цифровых камер, в которых процессорный узел должен обладать развитыми вычислительными функциями и управлять многочисленными внешними компонентами.

Электроника в греческом стиле

В 1962 г. в Калифорнии появилась семья Перлегос, греческих эмигрантов, уроженцев города Триполис. Родители занялись, как и на родине, виноградарством, а сыновья, Джордж и Гюст Перлегос, выбрали модную специальность инженера-электронщика: оба окончили вначале университет Сан-Хозе, а затем Стэнфордский университет. В 1974 г. в возрасте 24 лет младший из братьев Джордж Перлегос начал работать в компании Intel, где попал на одно из самых передовых направлений: разработку электрически стираемой памяти для замены "прожигаемой" OTP ROM. Еще до Перлегоса, почти одновременно с изобретением микропроцессора в 1971 г., сотрудник Intel Дон Фрохман изобрел "плавающий" затвор и создал первую УФ-стираемую EPROM объемом 2К (256×8).

ЗАМЕТКИ НА ПОЛЯХ

В "обычной" жизни употреблять сокращение для единиц информации из одной буквы "К" (так же, как и "М") не рекомендуется: очень трудно иногда понять, идет ли речь о килобитах, килобайтах, "килословах" или вообще килобитах в секунду. Тем не менее такие сокращения часто встречаются, в том числе и в технической документации, и нам придется иногда следовать этому примеру. Для определенности примем следующие правила: одиночная прописная буква "К" означает двоичные килобиты (1024 бита), "М" — двоичные мегабиты (1024 кбита). Хотя в литературе часто еще принято килобайты сокращать, как "КБ", а килобиты, как "Кб", мы постараемся избежать этой путаницы, и во

всех остальных случаях писать полностью: кбайт и Мбайт, кбит/с, Мбайт/с. Исключение составит обозначение объема памяти программ микроконтроллеров, если он измеряется в двухбайтовых словах: например, 4К слов будет обозначать 4096 ячеек слов (8 кбайт).

Джордж Перлегос активно включился в этот процесс и сначала при его участии, а затем и под его непосредственным руководством были созданы две технологии, ставшие точкой роста для всей отрасли по производству flash-памяти — одного из главных столпов современной "цифровой революции". Это было сначала изобретение чипа 2716 — 16К (2048×8) EPROM с одним напряжением питания +5 В, а затем 2816 — первой EEPROM, электрически стираемого ПЗУ, ставшего прообразом flash-памяти.

В 1981 г. Перлегос покидает Intel и с несколькими сотрудниками (в числе которых был Гордон Кэмпбелл, будущий создатель другой известной фирмы Chips & Technologies) создает компанию Seeq. Это было время спада в электронной промышленности и через три года компанию пришлось покинуть в связи с претензиями инвесторов. Не доверяя им больше, Джордж с братом Гюстом и еще несколькими сотрудниками Seeq в 1984 г. создает в складчину на личные средства компанию, полное название которой звучит как Advanced Technology Memory and Logic или сокращенно — Atmel.

Сначала продукцией Atmel были микросхемы энергонезависимой памяти всех разновидностей — как OTP EPROM и EEPROM с последовательным и параллельным доступом, так и Flash. В 1985 г. Atmel выпустила первую в мире EEPROM по доминирующей ныне КМОП-технологии, а в 1989 г. — первую flash-память с питанием от одного напряжения +5 В. В конце 1980-х Intel вознамерилась наказать ряд компаний-производителей EPROM, в том числе и Atmel, якобы за нарушение патентов, но, в конце концов, удалось договориться об обмене лицензиями. Причем в конечном итоге Atmel перепала лицензия на производство классического микроконтроллера 8051, от поддержки которого Intel уже в то время постепенно отходила, сосредоточившись на процессорах для ПК.

Подробности

Напомним, что EEPROM отличается от flash-памяти тем, что первая допускает раздельный доступ к любой произвольной ячейке, а вторая — лишь к целым блокам. Поэтому EEPROM меньше по объему (характерный объем специализированных микросхем EEPROM — от единиц килобит до единиц мегабит) и дороже, в настоящее время ее используют в основном для хранения данных, в том числе в составе микроконтроллеров. Flash-память проще и дешевле, и к тому же дает значительный выигрыш в скорости при больших объемах информации, особенно при потоковом чтении/записи, характерном для медиаустройств (вроде цифровых камер или MP3-плееров). В составе микроконтроллеров flash-память служит для хранения программ. Некоторые подробности о различных типах памяти и их функционировании см. в *главе 11*.

Так Atmel оказалась "втянута" в число производителей микроконтроллеров, в котором очень быстро оказалась на первых позициях: в 1993 г. началось производство первых в отрасли МК AT89C51 со встроенной flash-памятью программ. Это означало начало переворота во всей инженерной практике, потому что существовавшие ранее МК обладали либо однократно программируемой OTP-памятью, либо

УФ-стираемой, которая значительно дороже в производстве и работа с ней приводит к большим потерям времени разработчиков. Число циклов перезаписи для УФ ПЗУ не превышает нескольких десятков, а прямой дневной свет, попавший на такой кристалл, может привести к стиранию информации. Поэтому даже мелкосерийные устройства приходилось изготавливать преимущественно с использованием OTP ROM, что значительно рискованнее: изменить в случае даже малейшей ошибки записанную программу уже было невозможно. Появление flash-памяти изменило весь "ландшафт" в этой области: именно в результате ее внедрения стали возможными такие вещи, как программное обновление BIOS компьютера или "перешивка" управляющих программ для бытовых электронных устройств.

В 1995 г. два студента Норвежского университета науки и технологий в г. Тронхейме, Альф Боген и Вегард Воллен, выдвинули идею 8-разрядного RISC-ядра, которую предложили руководству Atmel. Имена разработчиков вошли в название архитектуры AVR: Alf + Vergard + RISC. Идея настолько понравилась, что в 1996 г. был основан исследовательский центр Atmel в Тронхейме и уже в конце того же года выпущен первый опытный микроконтроллер новой серии AVR под названием AT90S1200. Во второй половине 1997 г. корпорация Atmel приступила к серийному производству семейства AVR.

Почему AVR?

У AVR-контроллеров "с рождения" есть две особенности, которые отличают это семейство от остальных МК. Во-первых, система команд и архитектура ядра AVR разрабатывались совместно с фирмой-разработчиком компиляторов с языков программирования высокого уровня IAR Systems. В результате появилась возможность писать AVR-программы на языке C без большой потери в производительности по сравнению с программами, написанными на языке ассемблера. Подробнее этот вопрос мы обсудим в *главе 5*.

Во-вторых, одним из существенных преимуществ AVR стало применение конвейера. В результате для AVR не существует понятия машинного цикла: большинство команд выполняется за один такт. Для сравнения отметим, что пользующиеся большой популярностью МК семейства PIC выполняют команду за 4 такта, а классические 8051 — вообще за 12 тактов (хотя есть и современные модели x51 с машинным циклом в один такт).

Правда, при этом пришлось немного пожертвовать простотой системы команд, особенно заметной в сравнении с x51, где, например, любые операции пересылки данных внутри контроллера, независимо от способа адресации, выполняются единственной командой `mov` в различных вариантах, в то время как в AVR почти для каждого способа своя команда, к тому же иногда с ограниченной областью действия. Есть некоторые сложности и в области операций с битами. Тем не менее это не приводит к заметным трудностям при изучении AVR-ассемблера: наоборот, тексты программ получаются короче и больше напоминают программу на языке высокого уровня. Следует также учесть, что из общего числа команд от 90 до 130, в зависимости от модели, только 50–60 уникальных, остальные взаимозаменяемые.

И, наконец, этот недостаток полностью нивелируется при использовании языка С, фактически уравнивающего разные архитектуры с точки зрения особенностей программирования.

Огромное преимущество AVR-архитектуры — наличие 32 оперативных регистров, не совсем равноправных, но позволяющих в ряде случаев вообще не обращаться к оперативной памяти и не использовать стек (что в принципе невозможно в том же семействе x51), более того, в младших моделях AVR стек вообще недоступен для программиста. Потому структура ассемблерных программ для AVR стала подозрительно напоминать программы на языке высокого уровня, где операторы работают не с ячейками памяти и регистрами, а с абстрактными переменными и константами.

Еще одна особенность AVR со схемотехнической точки зрения — все выводы в них могут пребывать в трех состояниях (вход — отключено — выход) и электрически представляют собой КМОП-структуры (т. е. имеет место симметрия выходных сигналов и высокое сопротивление для входных). В общем случае это значительно удобнее портов x51 (двустабильных и TTL-совместимых) и предполагает лучшую помехозащищенность (по крайней мере, от помех по шине "земли").

Суммировав мнения из различных источников и опираясь на собственный опыт, автор пришел примерно к такому подразделению областей применения трех самых распространенных семейств контроллеров.

- ❑ Контроллеры классической архитектуры x51 (первые микросхемы семейства 8051 были выпущены еще в начале 1980-х) лучше всего подходят для общего изучения предмета. Отметим, что кроме Atmel, x51-совместимые изделия выпускают еще порядка десятка фирм, включая такие гиганты, как Philips и Siemens, есть и отечественные аналоги (серии 1816, 1830 и др.), что делает эту архитектуру наиболее универсальной.
- ❑ Семейство AVR рекомендуется для начинающих электронщиков-практиков, в силу простоты и универсальности устройства, преемственности структуры для различных типов контроллеров, простоты схемотехники и программирования (в данном случае под "программированием" понимается процесс записи программ в микросхему).
- ❑ PIC фирмы Microchip идеально подходят для проектирования несложных устройств, особенно предназначенных для тиражирования.

Эта классификация во многом субъективна, и автор не будет оспаривать другие точки зрения: различные семейства МК постепенно сближаются по параметрам, становятся полностью взаимозаменяемыми и, как и во всей современной электронике, выбор того или иного семейства часто носит характер "религиозного".

К тому же три упомянутых семейства МК — лишь наиболее распространенные среди универсальных контроллеров, но далеко не самые массовые вообще. Общее количество существующих семейств микроконтроллеров оценивается приблизительно в 100 с лишним, причем ежегодно появляются все новые и новые. Каждое из этих семейств может включать десятки разных моделей. При этом первое место среди производителей 8-разрядных МК традиционно принадлежит фирме Motorola, в основном за счет контроллеров для мобильных устройств. Компания Microchip со