
ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ГЛАВА 1. ЗНАКОМСТВО С СЕМЕЙСТВОМ CLASSIC	9
1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	9
1.2. ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ	9
1.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДРА МИКРОКОНТРОЛЛЕРА	10
1.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДСИСТЕМЫ ВВОДА/ВЫВОДА	10
1.5. ПЕРИФЕРИЙНЫЕ УСТРОЙСТВА	11
1.6. АРХИТЕКТУРА ЯДРА	11
1.7. ЦОКОЛЕВКА И ОПИСАНИЕ ВЫВОДОВ	13
ГЛАВА 2. АРХИТЕКТУРА МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ СЕМЕЙСТВА CLASSIC	27
2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	27
2.2. ОРГАНИЗАЦИЯ ПАМЯТИ	36
2.2.1. Память программ	36
2.2.2. Память данных	38
2.2.2.1. Статическое ОЗУ	39
2.2.2.2. Регистры общего назначения	44
2.2.2.3. Регистры ввода/вывода	46
2.2.2.4. Способы адресации памяти данных	57
2.2.3. Энергонезависимая память данных	63
2.2.3.1. Организация доступа	63
2.2.3.2. Меры предосторожности при работе	67
2.3. СЧЕТЧИК КОМАНД И ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОГРАММЫ	67
2.3.1. Функционирование конвейера	67

2.3.2. Задержки в конвейере	.69
2.3.3. Счетчик команд	.70
2.3.4. Команды типа «проверка/пропуск»	.70
2.3.5. Команды условного перехода	.71
2.3.6. Команды безусловного перехода	.71
2.3.7. Команды вызова подпрограмм	.73
2.3.8. Команды возврата из подпрограмм	.74
2.4. СТЕК	.74
2.4.1. Стек в микроконтроллере AT90S1200	.74
2.4.2. Стек в старших моделях микроконтроллеров	.76
ГЛАВА 3. СИСТЕМА КОМАНД	.77
3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	.77
3.2. ОПЕРАНДЫ	.77
3.3. ТИПЫ КОМАНД	.79
3.3.1. Команды логических операций	.79
3.3.2. Команды арифметических операций и команды сдвига	.80
3.3.3. Команды операций с битами	.80
3.3.4. Команды пересылки данных	.81
3.3.5. Команды передачи управления	.81
3.3.6. Команды управления системой	.83
3.4. СВОДНЫЕ ТАБЛИЦЫ КОМАНД	.84
3.5. ОПИСАНИЕ КОМАНД	.89
ГЛАВА 4. УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ	.147
4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	.147
4.2. ТАКТОВЫЙ ГЕНЕРАТОР	.148
4.3. РЕЖИМЫ ПОНИЖЕННОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ	.150
4.3.1. Режим Idle	.151
4.3.2. Режим Power Down	.151
4.3.3. Режим Power Save	.152
4.4. СБРОС	.153
4.4.1. Сброс по включении питания	.154
4.4.2. Аппаратный сброс	.157
4.4.3. Сброс от сторожевого таймера	.157
4.4.4. Сброс при снижении напряжения питания (Brown-Out)	.158
4.4.5. Управление схемой сброса	.159
4.5. ПРЕРЫВАНИЯ	.166
4.5.1. Таблица векторов прерываний	.167
4.5.2. Обработка прерываний	.168
4.5.3. Внешние прерывания; регистры GIMSK и GIFR	.170
4.5.4. Прерывания от таймеров; регистры TIMSK и TIFR	.172

ГЛАВА 5. ПОРТЫ ВВОДА/ВЫВОДА	177
5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	177
5.2. ОБРАЩЕНИЕ К ПОРТАМ ВВОДА/ВЫВОДА	178
5.3. КОНФИГУРИРОВАНИЕ ПОРТОВ ВВОДА/ВЫВОДА	182
ГЛАВА 6. ТАЙМЕРЫ	183
6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	183
6.2. НАЗНАЧЕНИЕ ВЫВОДОВ ТАЙМЕРОВ/СЧЕТЧИКОВ	184
6.3. ТАЙМЕР/СЧЕТЧИК T0	185
6.4. ТАЙМЕР/СЧЕТЧИК T1	187
6.4.1. Выбор источника тактового сигнала	192
6.4.2. Режим таймера	193
6.4.2.1. Функция захвата (Capture)	193
6.4.2.2. Функция сравнения (Compare)	195
6.4.3. Режим ШИМ	197
6.5. ТАЙМЕР/СЧЕТЧИК T2	200
6.5.1. Управление тактовым сигналом	202
6.5.2. Режим таймера	202
6.5.3. Режим ШИМ	203
6.5.4. Асинхронный режим работы	205
6.6. СТОРОЖЕВОЙ ТАЙМЕР	208
ГЛАВА 7. АНАЛОГОВЫЙ КОМПАРАТОР	211
7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	211
7.2. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ КОМПАРАТОРА	212
ГЛАВА 8. АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ	215
8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	215
8.2. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МОДУЛЯ АЦП	216
8.3. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ	221
8.4. ПАРАМЕТРЫ АЦП	223
ГЛАВА 9. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИК	225
9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	225
9.2. УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ UART	226
9.3. ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ	229
9.4. ПРИЕМ ДАННЫХ	230
9.5. МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ UART	233
9.6. СКОРОСТЬ ПРИЕМА/ПЕРЕДАЧИ	234

ГЛАВА 10. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ ПЕРИФЕРИЙНЫЙ ИНТЕРФЕЙС SPI	237
10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	237
10.2. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МОДУЛЯ SPI	238
10.3. РЕЖИМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ	242
10.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫВОДА F65	244
ГЛАВА 11. ПРОГРАММИРОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ	245
11.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	245
11.2. ЗАЩИТА КОДА И ДАННЫХ	246
11.3. КОНФИГУРАЦИОННЫЕ ЯЧЕЙКИ	246
11.4. ИДЕНТИФИКАТОР	247
11.5. РЕЖИМ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ	248
11.5.1. Переключение в режим параллельного программирования	252
11.5.2. Стирание кристалла	253
11.5.3. Программирование FLASH-памяти	254
11.5.4. Программирование EEPROM-памяти	256
11.5.5. Конфигурирование микроконтроллера	256
11.6. РЕЖИМЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ	258
11.6.1. Режим последовательного программирования при высоком напряжении (модели AT90S/LS2323 и AT90S/LS2343)	258
11.6.2. Программирование по последовательному каналу	264
ПРИЛОЖЕНИЯ	271
Приложение I. Сводная таблица микроконтроллеров AVR семейства Classic	272
Приложение II. Чертежи корпусов микроконтроллеров AVR семейства Classic	276
Приложение III. Электрические параметры микроконтроллеров AVR семейства Classic	279
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	282

ПРЕДИСЛОВИЕ

Российские специалисты, занимающиеся разработкой электронной аппаратуры, несомненно, знакомы с продукцией фирмы «Atmel». Основанная в 1984 г., фирма «Atmel Corp.» (США) на данный момент является одним из признанных лидеров в области производства широкого спектра микроэлектронных компонентов: микросхем энергонезависимой памяти, микроконтроллеров общего назначения и микросхем программируемой логики.

Начиная с середины 90-х годов, фирма «Atmel» начала активно развивать новое направление в своей деятельности — производство высокопроизводительных 8-разрядных RISC-микроконтроллеров для встраиваемых приложений, объединенных общим названием AVR. Книга, которую вы держите сейчас в руках, является первой из серии, посвященной этим микроконтроллерам.

За последние годы микроконтроллеры AVR приобрели большую популярность, привлекая разработчиков достаточно выгодным соотношением показателей «цена/быстродействие/энергопотребление», удобными режимами программирования, доступностью программно-аппаратных средств поддержки и широкой номенклатурой выпускаемых кристаллов. Микроконтроллеры этой серии представляют собой удобный инструмент для создания современных высокопроизводительных и экономичных встраиваемых контроллеров многоцелевого назначения. В частности, они используются в автомобильной электронике, бытовой технике, сетевых картах и материнских платах компьютеров, в мобильных телефонах нового поколения и т.д.

В рамках единой базовой архитектуры AVR-микроконтроллеры подразделяются на три семейства:

- Classic AVR — базовая линия микроконтроллеров;
- Mega AVR — микроконтроллеры для сложных приложений, требующих большого объема памяти программ и данных;
- Tiny AVR — низкостоимостные микроконтроллеры в 8-выводном исполнении.

Данная книга посвящена первому из них — семейству Classic. В составе этого семейства имеются микроконтроллеры с различным сочетанием периферийных узлов, различными объемами встроенной памяти и различным количеством выводов. Это дает разработчику возможность выбрать именно то, что ему нужно, и не переплачивать за неиспользуемые узлы. При этом все микроконтроллеры семейства поддерживают несколько режимов пониженного энергопотребления, имеют блок прерываний, сторожевой таймер и допускают программирование непосредственно в готовом устройстве через последовательный интерфейс SPI (к модели AT90C8534 последнее не относится).

В предлагаемой вашему вниманию книге представлена вся информация, необходимая для изучения микроконтроллеров AVR семейства Classic. Однако следует заметить, что справочником данная книга не является, хотя и написана на основе документации, предоставленной фирмой «Atmel». Поэтому, прежде чем приступить к практическому использованию рассматриваемых микроконтроллеров, настоятельно рекомендуется обратиться к официальной информации, расположенной на Web-сайтах фирмы (www.atmel.com, www.atmel.ru).

Глава 1. Знакомство с семейством CLASSIC

1.1. Общие сведения

Микроконтроллеры этого семейства (впрочем, как и все микроконтроллеры AVR фирмы «Atmel») являются 8-разрядными микроконтроллерами, предназначенными для встраиваемых приложений. Микроконтроллеры изготавливаются по малопотребляющей КМОП-технологии, которая в сочетании с усовершенствованной RISC-архитектурой позволяет достичь наилучшего соотношения показателей быстродействие/энергопотребление. Благодаря тому, что подавляющее большинство команд выполняется за один такт, быстродействие этих микроконтроллеров может достигать значения 1 MIPS (миллионов операций в секунду) на 1 МГц тактовой частоты. В семейство Classic входят микроконтроллеры с различным сочетанием периферийных устройств, различными объемами встроенной памяти и различным количеством выводов. Такое разнообразие дает разработчику возможность сделать оптимальный выбор и использовать именно тот микроконтроллер, который наилучшим образом подходит для его нужд.

1.2. Отличительные особенности

Основные особенности микроконтроллеров данного семейства:

- возможность вычислений со скоростью до 1 MIPS/МГц;
- FLASH-память программ объемом от 1 до 8 Кбайт (число циклов стирания/записи не менее 1000);
- память данных на основе статического ОЗУ (SRAM) объемом до 512 байт;
- память данных на основе ЭСППЗУ (EEPROM) объемом от 64 до 512 байт (число циклов стирания/записи не менее 100000);

1. Знакомство с семейством Classic

- возможность защиты от чтения и модификации памяти программ и данных (в EEPROM);
- программирование в параллельном (с использованием программатора) либо в последовательном (непосредственно в системе через последовательный SPI-интерфейс) режимах¹;
- различные способы синхронизации: встроенный RC-генератор, внешний сигнал синхронизации или внешний резонатор (пьезокерамический или кварцевый)²;
- наличие нескольких режимов пониженного энергопотребления.

1.3. Характеристики ядра контроллера

Основными характеристиками центрального процессора микроконтроллеров рассматриваемого семейства являются:

- полностью статическая архитектура; минимальная тактовая частота равна нулю;
- АЛУ подключено непосредственно к регистрам общего назначения;
- большинство команд выполняется за один машинный цикл;
- многоуровневая система прерываний; поддержка очереди прерываний;
- от 3 до 16 источников прерываний³ (из них до 2 внешних);
- наличие программного стека⁴.

1.4. Характеристики подсистемы ввода/вывода

Основными характеристиками подсистемы ввода/вывода являются:

- программное конфигурирование и выбор портов ввода/вывода;
- каждый вывод может быть запрограммирован как входной или как выходной независимо от других;
- входные буферы с триггером Шмитта на всех выводах;
- возможность подключения ко всем входам внутренних подтягивающих резисторов (сопротивление резисторов составляет 35...120 кОм);
- нагрузочная способность всех выходов составляет до 20 мА, что позволяет непосредственно управлять светодиодными индикаторами.

¹ Кроме AT90C8534; эта модель допускает программирование только в параллельном режиме.

² Зависит от конкретной модели микроконтроллера.

³ Зависит от конкретной модели микроконтроллера.

⁴ Кроме AT90S1200, в этой модели имеется 3-уровневый аппаратный стек.

1.5. Периферийные устройства

Микроконтроллеры семейства Classic обладают достаточно развитой периферией. Набор периферийных устройств, имеющихся в составе того или иного микроконтроллера, зависит от конкретной модели и может быть определен по сводной таблице **Приложения 1**. Перечислим все периферийные устройства, так или иначе встречающиеся в микроконтроллерах семейства:

- 8-разрядный таймер/счетчик с предделителем (таймер T0)¹;
- 16-разрядный таймер/счетчик с предделителем (таймер T1);
- 8-разрядный таймер/счетчик с возможностью работы в асинхронном режиме (таймер T2);
- сторожевой таймер (WDT)¹;
- одно- или двухканальный 8...10-разрядный генератор сигнала с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ)²;
- одноканальный 8-разрядный генератор сигнала с ШИМ³;
- аналоговый компаратор;
- 10-разрядный АЦП (6 или 8 каналов);
- полнодуплексный универсальный асинхронный приемопередатчик (UART);
- последовательный синхронный интерфейс SPI.

1.6. Архитектура ядра

Ядро микроконтроллеров AVR выполнено по усовершенствованной RISC (enhanced RISC) архитектуре (**Рис. 1.1**), в которой используется ряд решений, направленных на повышение быстродействия микроконтроллеров.

Арифметико-логическое устройство (АЛУ), выполняющее все вычисления, непосредственно подключено к 32 рабочим регистрам, объединенным в регистровый файл. Благодаря этому АЛУ выполняет одну операцию (чтение содержимого регистров, выполнение операции и запись результата обратно в регистровый файл) за один машинный цикл.

В микроконтроллерах AVR практически все команды (за исключением команд, у которых одним из операндов является 16-разрядный адрес) занимают одну ячейку памяти программ.

¹ Присутствует во всех моделях.

² Один из режимов работы таймера T1.

³ Один из режимов работы таймера T2.

1.7. Цоколевка и описание выводов

В семейство Classic входит в общей сложности 17 моделей микроконтроллеров. Все они выпускаются в корпусах различных типов, что позволяет выбрать модель, наилучшим образом отвечающую требованиям по компоновке. Все модели микроконтроллеров можно условно разделить на 7 групп (модели, входящие в одну группу, имеют одинаковый набор периферийных устройств, но разные объемы памяти программ и данных):

- AT90S1200 (**Рис. 1.2**) имеет FLASH-память программ объемом 1 Кбайт и EEPROM-память данных объемом 64 байта. Количество контактов ввода/вывода равно 15;
- AT90S2313 (**Рис. 1.3**) имеет FLASH-память программ объемом 2 Кбайт, EEPROM-память данных объемом 128 байт и ОЗУ объемом 128 байт. Количество контактов ввода/вывода равно 15;
- AT90S2323/AT90LS2323, AT90S2343/AT90LS2343 (**Рис. 1.4**) имеют FLASH-память программ объемом 2 Кбайт, EEPROM-память данных объемом 128 байт и ОЗУ объемом 128 байт. Количество контактов ввода/вывода равно 3 (AT90xx2323) или 5 (AT90xx2343);
- AT90S2333/AT90LS2333, AT90S4433/AT90LS4433 (**Рис. 1.5**) имеют FLASH-память программ объемом 2 или 4 Кбайт, EEPROM-память данных объемом 128 или 256 байт и ОЗУ объемом 128 байт. Количество контактов ввода/вывода равно 20;
- AT90S4434/AT90LS4434, AT90S8535/AT90LS8535 (**Рис. 1.6**) имеют FLASH-память программ объемом 4 или 8 Кбайт, EEPROM-память данных объемом 256 или 512 байт и ОЗУ объемом 256 или 512 байт. Количество контактов ввода/вывода равно 32;
- AT90S4414, AT90S8515 (**Рис. 1.7**) имеют FLASH-память программ объемом 4 или 8 Кбайт, EEPROM-память данных объемом 256 или 512 байт и ОЗУ объемом 256 или 512 байт. Количество контактов ввода/вывода равно 32;
- AT90C8534 (**Рис. 1.8**) имеют FLASH-память программ объемом 8 Кбайт, EEPROM-память данных объемом 512 байт и ОЗУ объемом 256 байт. Количество контактов ввода/вывода равно 15.

Для сравнения различных моделей вашему вниманию предлагается **Табл. 1.1**, в которой приводятся такие основные параметры микроконтроллеров, как объем памяти (программ и данных), количество контактов ввода/вывода, тип корпуса, диапазон рабочих частот и напряжение питания.

1. Знакомство с семейством Classic

Полная информация по каждой модели приведена в **Приложении I**. Дополнительно следует отметить, что все микроконтроллеры семейства Classic выпускаются как в коммерческом (диапазон рабочих температур 0...+70°C), так и в промышленном (диапазон рабочих температур –40...+85°C) исполнениях.

Таблица 1.1. Основные параметры микроконтроллеров AVR семейства Classic

Обозначение	Память программ (FLASH)	Память данных (EEPROM)	Объем ОЗУ	Количество контактов ввода/вывода	Напряжение питания	Тактовая частота	Тип корпуса
	[Кбайт]	[байт]	[байт]				
AT90S1200	1	64	—	15	2.7...6.0	0...12	DIP-20, SOIC-20, SSOP-20
AT90S2313	2	128	128	15	2.7... 6.0	0...10	DIP-20, SOIC-20
AT90S2323	2	128	128	3	4.0...6.0	0...10	DIP-8, SOIC-8
AT90LS2323	2	128	128	3	2.7...6.0	0...4	DIP-8, SOIC-8
AT90S2343	2	128	128	5	4.0...6.0	0...10	DIP-8, SOIC-8
AT90LS2343	2	128	128	5	2.7...6.0	0...4	DIP-8, SOIC-8
AT90S2333	2	128	128	20	4.0...6.0	0...8	DIP-28, TQFP-32
AT90LS2333	2	128	128	20	2.7...6.0	0...4	DIP-28, TQFP-32
AT90S4433	4	256	128	20	4.0...6.0	0...8	DIP-28, TQFP-32
AT90LS4433	4	256	128	20	2.7...6.0	0...4	DIP-28, TQFP-32
AT90S4434	4	256	256	32	4.0...6.0	0...8	DIP-40, PLCC-44, TQFP-44
AT90LS4434	4	256	256	32	2.7...6.0	0...4	DIP-40, PLCC-44, TQFP-44
AT90S8535	8	512	512	32	4.0...6.0	0...8	DIP-40, PLCC-44, TQFP-44
AT90LS8535	8	512	512	32	2.7...6.0	0...4	DIP-40, PLCC-44, TQFP-44
AT90S4414	4	256	256	32	2.7...6.0	0...8	DIP-40, PLCC-44, TQFP-44
AT90S8515	8	512	512	32	2.7...6.0	0...8	DIP-40, PLCC-44, TQFP-44
AT90C8534	8	512	256	15	3.3...6.0	0...1.5	VQFP-48

В **Табл. 1.2...1.8** для каждой группы микроконтроллеров приведены названия выводов и указаны их функции (как основные, так и дополнительные). Кроме того, для каждого вывода в таблицах указан его тип (вход, выход, вход/выход, вывод питания).

В таблицах использованы следующие обозначения:

I — вход;

O — выход;

I/O — вход/выход;

P — выводы питания.