

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	7
<b>Глава 1. Знакомство с семейством T1ny</b> .....	<b>9</b>
1.1. Общие сведения .....	9
1.2. Отличительные особенности .....	9
1.3. Характеристики процессора .....	10
1.4. Характеристики подсистемы ввода/вывода .....	10
1.5. Периферийные устройства .....	10
1.6. Архитектура ядра .....	11
1.7. Цоколевка и описание выводов .....	12
<b>Глава 2. Архитектура микроконтроллеров семейства T1ny</b> .....	<b>32</b>
2.1. Общие сведения .....	32
2.2. Организация памяти .....	44
2.2.1. Память программ .....	45
2.2.2. Память данных .....	46
2.2.3. Энергонезависимая память данных (EEPROM) .....	67
2.3. Счетчик команд и выполнение программы .....	72
2.3.1. Счетчик команд .....	72
2.3.2. Функционирование конвейера .....	73
2.3.3. Команды типа «проверка/пропуск» (Test & Skip) .....	74
2.3.4. Команды условного перехода .....	75
2.3.5. Команды безусловного перехода .....	75
2.3.6. Команды вызова подпрограмм .....	76
2.3.7. Команды возврата из подпрограмм .....	77
2.4. Стек .....	77
<b>Глава 3. Система команд</b> .....	<b>80</b>
3.1. Общие сведения .....	80
3.2. Операнды .....	80
3.3. Типы команд .....	82
3.3.1. Команды логических операций .....	82
3.3.2. Команды арифметических операций и команды сдвига .....	83
3.3.3. Команды битовых операций .....	83

3.3.4. Команды пересылки данных	84
3.3.5. Команды передачи управления	84
3.3.6. Команды управления системой	86
3.4. Сводные таблицы команд	86
3.5. Описание команд	92
<b>Глава 4. Тактирование, режимы пониженного энергопотребления и сброс</b>	<b>156</b>
4.1. Общие сведения	156
4.2. Тактовый генератор	157
4.2.1. Генератор с внешним резонатором	160
4.2.2. Низкочастотный кварцевый генератор	161
4.2.3. Внешний сигнал синхронизации	162
4.2.4. Генератор с внешней RC-цепочкой	162
4.2.5. Внутренний калиброванный RC-генератор	163
4.2.6. Внутренний RC-генератор на 128 кГц	165
4.2.7. Схема ФАПЧ	165
4.2.8. Управление тактовой частотой	166
4.3. Управление электропитанием	167
4.3.1. Режимы пониженного энергопотребления	167
4.3.2. Управление тактовыми сигналами модулей	172
4.3.3. Общие рекомендации по уменьшению энергопотребления	173
4.4. Сброс	175
4.4.1. Сброс по включению питания	178
4.4.2. Аппаратный сброс	179
4.4.3. Сброс от сторожевого таймера	180
4.4.4. Сброс при снижении напряжения питания	180
4.4.5. Управление схемой сброса	183
<b>Глава 5. Прерывания</b>	<b>195</b>
5.1. Общие сведения	195
5.2. Таблица векторов прерываний	195
5.3. Обработка прерываний	199
5.4. Внешние прерывания	200
<b>Глава 6. Порты ввода/вывода</b>	<b>207</b>
6.1. Общие сведения	207
6.2. Регистры портов ввода/вывода	208
6.3. Конфигурирование портов ввода/вывода	209
6.4. Аппаратный модулятор	220
<b>Глава 7. Таймеры</b>	<b>225</b>
7.1. Общие сведения	225
7.2. Назначение выводов таймеров/счетчиков	226
7.3. Прерывания от таймеров/счетчиков	226
7.4. Пределители таймеров/счетчиков	230

7.4.1. Управление предделителями . . . . .	232
7.4.2. Использование внешнего тактового сигнала . . . . .	233
7.5. Таймер/счетчик T0 . . . . .	234
7.5.1. Управление тактовым сигналом . . . . .	240
7.5.2. Режимы работы . . . . .	240
7.6. Таймер/счетчик T1 . . . . .	247
7.6.1. Таймер/счетчик T1 в модели ATtiny15L . . . . .	247
7.6.2. Таймер/счетчик T1 в моделях ATtiny2313x и ATtiny24x/44x/84x . . . . .	253
7.6.3. Таймер/счетчик T1 в моделях ATtiny25x/45x/85x и ATtiny26x . . . . .	271
7.7. Сторожевой таймер . . . . .	285
<b>Глава 8. Аналоговый компаратор . . . . .</b>	<b>291</b>
8.1. Общие сведения . . . . .	291
8.2. Функционирование компаратора . . . . .	292
<b>Глава 9. Аналого-цифровой преобразователь . . . . .</b>	<b>297</b>
9.1. Общие сведения . . . . .	297
9.2. Функционирование модуля АЦП . . . . .	298
9.3. Результат преобразования . . . . .	313
9.4. Повышение точности преобразования . . . . .	314
9.5. Параметры АЦП . . . . .	315
<b>Глава 10. Универсальный синхронный/асинхронный приемо-передатчик . . . . .</b>	<b>317</b>
10.1. Общие сведения . . . . .	317
10.2. Использование модуля USART . . . . .	317
10.2.1. Скорость приема/передачи . . . . .	322
10.2.2. Формат кадра . . . . .	326
10.2.3. Передача данных . . . . .	327
10.2.4. Прием данных . . . . .	329
10.3. Мультипроцессорный режим работы . . . . .	333
<b>Глава 11. Универсальный последовательный интерфейс USI . . . . .</b>	<b>335</b>
11.1. Общие сведения . . . . .	335
11.2. Основные сведения об интерфейсе SPI . . . . .	336
11.3. Основные сведения об интерфейсе TWI . . . . .	339
11.4. Использование модуля USI . . . . .	345
11.5. Режимы работы модуля USI . . . . .	349
11.5.1. Трехпроводный режим . . . . .	349
11.5.2. Двухпроводный режим . . . . .	352
11.5.3. Альтернативное использование модуля USI . . . . .	355
<b>Глава 12. Программирование микроконтроллеров AVR семейства Tiny . . . . .</b>	<b>356</b>
12.1. Общие сведения . . . . .	356
12.1.1. Защита кода и данных . . . . .	357
12.1.2. Конфигурационные ячейки . . . . .	358

12.1.3. Идентификатор . . . . .	362
12.1.4. Калибровочные ячейки . . . . .	362
12.1.5. Страничная организация памяти программ и данных . . . . .	363
12.2. Последовательное программирование при высоком напряжении . . . . .	364
12.2.1. Управление процессом программирования . . . . .	366
12.3. Программирование по последовательному каналу . . . . .	377
12.3.1. Переключение в режим программирования . . . . .	384
12.3.2. Управление процессом программирования FLASH-памяти . . . . .	384
12.3.3. Управление процессом программирования EEPROM-памяти . . . . .	385
12.4. Параллельное программирование . . . . .	386
12.4.1. Переключение в режим параллельного программирования . . . . .	392
12.4.2. Стирание кристалла . . . . .	392
12.4.3. Программирование FLASH-памяти . . . . .	393
12.4.4. Программирование EEPROM-памяти . . . . .	396
12.4.5. Программирование конфигурационных ячеек . . . . .	396
12.4.6. Программирование ячеек защиты . . . . .	398
12.4.7. Чтение конфигурационных ячеек и ячеек защиты . . . . .	398
12.4.8. Чтение ячеек идентификатора и калибровочных ячеек . . . . .	399
12.5. Самопрограммирование микроконтроллеров семейства Tiny . . . . .	400
12.5.1. Общие сведения . . . . .	400
12.5.2. Функционирование загрузчика . . . . .	400
<b>Приложения . . . . .</b>	<b>404</b>
Приложение 1. Сводная таблица микроконтроллеров AVR семейства Tiny . . . . .	404
Приложение 2. Чертежи корпусов микроконтроллеров AVR семейства Tiny . . . . .	412
Приложение 3. Электрические параметры микроконтроллеров AVR семейства Tiny . . . . .	415

## Предисловие

Книга, которую вы держите в руках, посвящена одному из семейств микроконтроллеров AVR фирмы Atmel. Эти 8-битные RISC-микроконтроллеры для встраиваемых приложений являются, пожалуй, наиболее интересным направлением, развиваемым фирмой. Они представляют собой мощный инструмент, прекрасную основу для создания современных высокопроизводительных и экономичных встраиваемых контроллеров многоцелевого назначения.

Несмотря на то что микроконтроллеры AVR появились на рынке около 10 лет назад, их популярность до сих пор очень высока. С каждым годом они захватывают все новые и новые ниши на рынке. Не последнюю роль в этом играет соотношение показателей цена/быстродействие/энергопотребление, до сих пор являющееся едва ли не лучшим на рынке 8-битных микроконтроллеров. Кроме того, постоянно растет число выпускаемых сторонними производителями разнообразных программных и аппаратных средств поддержки разработок устройств на их основе. Все это позволяет говорить о микроконтроллерах AVR как об индустриальном стандарте среди 8-битных микроконтроллеров.

В настоящее время в рамках единой базовой архитектуры микроконтроллеры AVR подразделяются на несколько семейств:

- Tiny AVR;
- Mega AVR;
- Mega AVR для специальных применений;
- ASIC/FPGA AVR.

Данная книга посвящена первому семейству — Tiny. Характерными особенностями микроконтроллеров этого семейства являются:

- небольшие корпуса с малым количеством выводов;
- малые объемы FLASH-памяти программ (1...8 Кбайт) и ОЗУ;
- довольно ограниченная периферия.

Таким образом эти микроконтроллеры предназначены для так называемых бюджетных решений, принимаемых в условиях жестких финансовых ограничений. Область применения этих микроконтроллеров — интеллек-

туальные датчики различного назначения (контрольные, пожарные, охранные), игрушки, различная бытовая техника и другие подобные устройства.

В новых моделях семейства появились узлы, отсутствующие даже в микроконтроллерах более развитого семейства Mega. Этими узлами являются:

- температурный датчик, позволяющий измерять температуру кристалла с точностью  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ;
- схема ФАПЧ, позволяющая повысить внутреннюю тактовую частоту микроконтроллера до 64 МГц при использовании внешнего кварцевого резонатора на частоту 8 МГц;
- генератор времени запаздывания, позволяющий осуществлять безопасное управление силовыми ключами в системах управления двигателями и предотвращать возникновение в них сквозных токов.

Микроконтроллеры семейства Tiny поддерживают несколько режимов пониженного энергопотребления, имеют блок прерываний, сторожевой таймер и допускают программирование непосредственно в готовом устройстве.

В предлагаемой вашему вниманию книге представлена вся информация, необходимая для изучения микроконтроллеров AVR семейства Tiny. Однако следует заметить, что всеобъемлющим справочником данная книга не является, хотя и написана на основе документации, предоставляемой фирмой Atmel. Поэтому, прежде чем приступить к практическому использованию рассматриваемых микроконтроллеров, рекомендуется обратиться к официальной информации, размещенной на Web-сайтах фирмы ([www.atmel.com](http://www.atmel.com), [www.atmel.ru](http://www.atmel.ru)).

## 1.1. Общие сведения

Как и все микроконтроллеры AVR фирмы Atmel, микроконтроллеры семейства Tiny являются 8-битными микроконтроллерами, предназначенными для использования во встраиваемых приложениях. Они изготавливаются по малопотребляющей КМОП-технологии, которая в сочетании с усовершенствованной RISC-архитектурой позволяет достичь наилучшего соотношения стоимость/быстродействие/энергопотребление. Удельное быстродействие этих микроконтроллеров может достигать значения 1 MIPS/МГц (1 миллион операций в секунду на 1 МГц тактовой частоты). Микроконтроллеры описываемого семейства предназначены, в первую очередь, для низкостоимостных («бюджетных») приложений, не требующих большого объема аппаратных ресурсов, и соответственно являются самыми дешевыми из всех микроконтроллеров AVR. Важной особенностью этих микроконтроллеров является эффективное использование выводов кристалла. Например, в 8-выводном корпусе все выводы (кроме, разумеется, выводов питания) могут использоваться в качестве линий ввода/вывода.

## 1.2. Отличительные особенности

Перечислю вкратце основные особенности микроконтроллеров AVR семейства Tiny:

- FLASH-память программ объемом от 1 до 8 Кбайт (число циклов стирания/записи не менее 10 000);
- оперативная память (статическое ОЗУ) объемом до 512 байт;
- память данных на основе ЭСППЗУ (EEPROM) объемом от 64 до 51 байт (число циклов стирания/записи не менее 100 000);
- возможность защиты от внешнего чтения и модификации памяти программ и EEPROM;
- возможность программирования большинства моделей непосредственно в системе через последовательный интерфейс;
- возможность самопрограммирования;

- различные способы синхронизации: встроенный *RC*-генератор (основной режим работы), встроенный генератор с внешним резонатором, внешний сигнал синхронизации;
- наличие нескольких режимов пониженного энергопотребления;
- наличие детектора пониженного напряжения питания (*Brown-Out Detector* — *BOD*).

### 1.3. Характеристики процессора

Основными характеристиками процессора микроконтроллеров AVR семейства *Tiny* являются:

- полностью статическая архитектура, минимальная тактовая частота равна нулю;
- арифметико-логическое устройство (АЛУ) подключено непосредственно к регистрам общего назначения (32 регистра);
- большинство команд выполняются за один период тактового сигнала;
- векторная система прерываний, поддержка очереди прерываний;
- до 16 источников прерываний (до 13 внешних).

### 1.4. Характеристики подсистемы ввода/вывода

Подсистема ввода/вывода микроконтроллеров AVR семейства *Tiny* имеет следующие особенности:

- программное конфигурирование и выбор портов ввода/вывода;
- выводы могут быть запрограммированы как входные или как выходные независимо друг от друга;
- входные буферы с триггером Шмитта на всех выводах;
- на всех входах имеются индивидуально отключаемые внутренние подтягивающие резисторы сопротивлением 35...120 кОм (старые модели) и 20...50 кОм (новые модели).

### 1.5. Периферийные устройства

Набор периферийных устройств, имеющих в составе того или иного микроконтроллера, зависит от конкретной модели и может быть определен по сводной таблице, приведенной в Приложении I. Вообще же в составе микроконтроллеров семейства встречаются следующие периферийные устройства:

- один или два 8-битных таймера/счетчика;
- один 16-битный таймер/счетчик;



- одно- и двухканальные генераторы 8-битного ШИМ-сигнала (один из режимов работы 8-битных таймеров/счетчиков);
- двухканальный генератор ШИМ-сигнала регулируемой разрядности (один из режимов работы 16-битного таймера/счетчика). Разрешение формируемого сигнала может составлять от 1 до 16 бит;
- сторожевой таймер WDT;
- аналоговый компаратор;
- многоканальный (от 4 до 11 каналов) 10-битный АЦП последовательного приближения, имеющий как несимметричные, так и дифференциальные входы;
- аппаратный модулятор для управления матрицей светодиодов;
- универсальный асинхронный приемо-передатчик (UART);
- универсальный последовательный интерфейс USI, который может использоваться в качестве интерфейса SPI или I<sup>2</sup>C. Кроме того, USI может использоваться в качестве полудуплексного UART или 4/12-битного счетчика.

## 1.6. Архитектура ядра

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

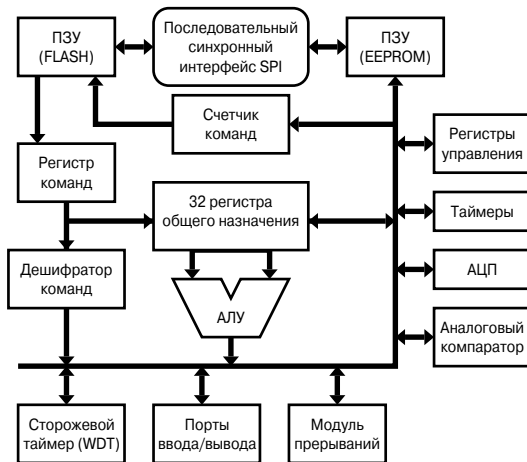


Рис. 1.1. Архитектура ядра микроконтроллеров AVR

Арифметико-логическое устройство (АЛУ), выполняющее все вычисления, подключено непосредственно 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 такт. Кроме того, практически каждая из команд (за исключением команд, у которых одним из операндов является 16-битный адрес) занимает одну ячейку памяти программ.

В микроконтроллерах AVR реализована Гарвардская архитектура, характеризующаяся отдельной памятью программ и данных, каждая из которых имеет собственные шины доступа к ним. Такая организация позволяет одновременно работать как с памятью программ, так и с памятью данных. Разделение информационных шин позволяет использовать для каждого типа памяти шины различной разрядности, причем способы адресации и доступа к каждому типу памяти также различаются. В сочетании с двухуровневым конвейером команд такая архитектура позволяет достичь производительности в 1 MIPS на каждый МГц тактовой частоты.

## 1.7. Цоколевка и описание выводов

В семейство Tiny на сегодняшний день входит в общей сложности 13 моделей микроконтроллеров, которые можно условно разделить на четыре группы.

1. Микроконтроллеры в 8-выводных корпусах типа DIP и SOIC (некоторые модели также выпускаются в 20-выводных корпусах типа MLF). Максимальное количество контактов ввода/вывода этих микроконтроллеров равно 6:
  - ATtiny11, ATtiny11L (**Рис. 1.2**) — имеют FLASH-память программ объемом 1 Кбайт;
  - ATtiny12, ATtiny12L, ATtiny12V (**Рис. 1.3**) — имеют FLASH-память программ объемом 1 Кбайт и EEPROM-память данных объемом 64 байт;
  - ATtiny13, ATtiny13V (**Рис. 1.4**) — имеют FLASH-память программ объемом 1 Кбайт, ОЗУ объемом 64 байт и EEPROM-память данных объемом 64 байт. Эти модели рекомендуется использовать вместо ATtiny11х/12х в новых разработках;
  - ATtiny15L (**Рис. 1.5**) — имеет FLASH-память программ объемом 1 Кбайт и EEPROM-память данных объемом 64 байт;
  - ATtiny25, ATtiny25V (**Рис. 1.8**) — имеют FLASH-память программ объемом 2 Кбайт, ОЗУ объемом 128 байт и EEPROM-память данных объемом 128 байт;

- ATtiny45, ATtiny45V (**Рис. 1.8**) — имеют FLASH-память программ объемом 4 Кбайт, ОЗУ объемом 256 байт и EEPROM-память данных объемом 256 байт;
  - ATtiny85, ATtiny85V (**Рис. 1.8**) — имеют FLASH-память программ объемом 8 Кбайт, ОЗУ объемом 512 байт и EEPROM-память данных объемом 512 байт.
2. Микроконтроллеры в 14-выводных корпусах типа DIP и SOIC (также выпускаются в 20-выводных корпусах типа MLF). Максимальное количество контактов ввода/вывода этих микроконтроллеров равно 12:
- ATtiny24, ATtiny24V (**Рис. 1.7**) — имеют FLASH-память программ объемом 2 Кбайт, ОЗУ объемом 128 байт и EEPROM-память данных объемом 128 байт;
  - ATtiny44, ATtiny44V (**Рис. 1.7**) — имеют FLASH-память программ объемом 4 Кбайт, ОЗУ объемом 256 байт и EEPROM-память данных объемом 256 байт;
  - ATtiny84, ATtiny84V (**Рис. 1.7**) — имеют FLASH-память программ объемом 8 Кбайт, ОЗУ объемом 512 байт и EEPROM-память данных объемом 512 байт.
3. Микроконтроллеры в 20-выводных корпусах типа DIP и SOIC (также выпускаются в 32-выводных корпусах типа MLF):
- ATtiny2313, ATtiny2313V (**Рис. 1.6**) — имеют FLASH-память программ объемом 2 Кбайт, ОЗУ объемом 128 байт и EEPROM-память данных объемом 128 байт. Максимальное количество контактов ввода/вывода равно 18. Эти модели по цоколевке и функционально обратны совместимы со снятыми с производства микроконтроллерами семейства Classic AT90S2100 и AT90S2313 и могут использоваться для их замены в новых разработках;
  - ATtiny26, ATtiny26L (**Рис. 1.9**) — имеют FLASH-память программ объемом 2 Кбайт, ОЗУ объемом 128 байт и EEPROM-память данных объемом 128 байт. Максимальное количество контактов ввода/вывода равно 16<sup>1)</sup>.
4. Микроконтроллеры в 28-выводных корпусах типа DIP (также выпускаются в 32-выводных корпусах типа TQFP и MLF):
- ATtiny28L, ATtiny28V (**Рис. 1.10**) — имеют FLASH-память программ объемом 2 Кбайт. Количество контактов ввода/вывода равно 20 (из них 11 — контакты ввода/вывода общего назначения, 1 — выход с повышенной нагрузочной способностью и 8 — входные контакты).

---

<sup>1)</sup> Также планируются к выпуску модели ATtiny46x и ATtiny86x, имеющие память программ объемом соответственно 4 и 8 Кбайт.



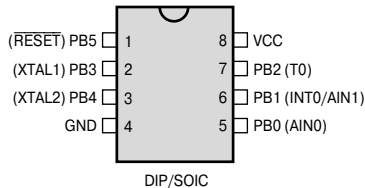
**Таблица 1.1. Основные параметры микроконтроллеров AVR семейства Tiny (продолжение)**

Обозначение	Память программ (FLASH) [Кбайт]	Память данных (ОЗУ) [байт]	Память данных (EEPROM) [байт]	Количество контактов ввода/вывода	Напряжение питания [В]	Тактовая частота [МГц]	Тип корпуса
ATtiny44	4	128	128	12	2.7...5.5	0...10	DIP-14 SOIC-14 MLF-20
ATtiny44V					4.5...5.5	0...20	
ATtiny45	4	128	128	6	2.7...5.5	0...10	DIP-8 SOIC-8 MLF-20
ATtiny45V					4.5...5.5	0...20	
ATtiny84	4	128	128	12	2.7...5.5	0...10	DIP-14 SOIC-14 MLF-20
ATtiny84V					4.5...5.5	0...20	
ATtiny85	4	128	128	6	2.7...5.5	0...10	DIP-8 SOIC-8 MLF-20
ATtiny85V					4.5...5.5	0...20	

В Табл. 1.2...1.10 для каждой линейки 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.



**Рис. 1.2.** Расположение выводов (вид сверху) моделей ATtiny11/11L