

Оглавление

Предисловие	9
Часть 1. Микроконтроллеры семейства T1ny	
Глава 1. Знакомство с семейством T1ny	
1.1. Общие сведения	12
1.2. Отличительные особенности	12
1.3. Характеристики процессора	13
1.4. Характеристики подсистемы ввода/вывода	13
1.5. Периферийные устройства	14
1.6. Архитектура ядра	14
1.7. Цоколевка и описание выводов	15
Глава 2. Архитектура микроконтроллеров семейства T1ny	
2.1. Общие сведения	21
2.2. Организация памяти	26
2.2.1. Память программ	26
2.2.2. Память данных	28
2.2.3. Энергонезависимая память данных (EEPROM)	38
2.3. Счетчик команд и выполнение программы	42
2.3.1. Функционирование конвейера	42
2.3.2. Задержки в конвейере	43
2.3.3. Счетчик команд	44
2.3.4. Команды типа «проверка/пропуск» (Test & Skip)	44
2.3.5. Команды условного перехода	44
2.3.6. Команда безусловного перехода	45
2.3.7. Команда вызова подпрограмм	45
2.3.8. Команды возврата из подпрограмм	46
2.4. Стек	46
Глава 3. Устройство управления микроконтроллеров семейства T1ny	
3.1. Общие сведения	48
3.2. Тактовый генератор	49
3.2.1. Кварцевый генератор	49
3.2.2. Внешний сигнал синхронизации	50
3.2.3. Встроенный генератор с внешней или внутренней RC-цепочкой	50
3.3. Режимы пониженного энергопотребления	52
3.3.1. Режим Idle	53
3.3.2. Режим Power Down	53
3.3.3. Режим ADC Noise Reduction	54
3.4. Сброс	54

Оглавление

3.4.1. Сброс по включению питания	55
3.4.2. Аппаратный сброс	57
3.4.3. Сброс от сторожевого таймера	57
3.4.4. Сброс при снижении напряжения питания	58
3.4.5. Управление схемой сброса	59
3.5. Прерывания	66
3.5.1. Таблица векторов прерываний	66
3.5.2. Обработка прерываний	67
3.5.3. Внешние прерывания. Регистры GIMSK и GIFR	69
3.5.4. Прерывания от таймеров. Регистры TIMSK и TIFR	71
3.5.5. Управление прерываниями в микроконтроллерах ATtiny28x. Регистры ICR и IFR	73
Глава 4. Порты ввода/вывода	
4.1. Общие сведения	76
4.2. Обращение к портам ввода/вывода	77
4.3. Конфигурирование портов ввода/вывода	78
4.4. Аппаратный модулятор	81
Глава 5. Таймеры в микроконтроллерах семейства Tiny	
5.1. Общие сведения	86
5.2. Назначение выводов таймеров/счетчиков	86
5.3. Таймер/счетчик T0	87
5.4. Таймер/счетчик T1	90
5.4.1. Выбор источника тактового сигнала	93
5.4.2. Режим таймера	94
5.4.3. Режим ШИМ	95
5.5. Сторожевой таймер	97
Глава 6. Аналоговый компаратор	
6.1. Общие сведения	100
6.2. Функционирование компаратора	100
Глава 7. Аналого-цифровой преобразователь	
7.1. Общие сведения	104
7.2. Функционирование модуля АЦП	104
7.3. Повышение точности преобразования	111
7.4. Параметры АЦП	112
Часть 2. Микроконтроллеры семейства Mega	
Глава 8. Знакомство с семейством Mega	
8.1. Общие сведения	114
8.2. Отличительные особенности	114
8.3. Характеристики процессора	115
8.4. Характеристики подсистемы ввода/вывода	115
8.5. Периферийные устройства	116

8.6. Архитектура ядра	116
8.7. Цоколевка и описание выводов.....	117
Глава 9. Архитектура микроконтроллеров семейства Mega	
9.1. Введение	148
9.2. Организация памяти	148
9.2.1. Память программ	150
9.2.2. Память данных.....	153
9.2.3. Энергонезависимая память данных (EEPROM)	189
9.3. Счетчик команд и выполнение программы	193
9.3.1. Счетчик команд	193
9.3.2. Функционирование конвейера	193
9.3.3. Команды типа «проверка/пропуск» (Test & Skip).....	194
9.3.4. Команды условного перехода.....	195
9.3.5. Команды безусловного перехода	195
9.3.6. Команды вызова подпрограмм	197
9.3.7. Команды возврата из подпрограмм	198
9.4. Стек.....	198
Глава 10. Тактирование, режимы пониженного энергопотребления и сброс	
10.1. Общие сведения	200
10.2. Тактовый генератор	200
10.2.1. Тактовый генератор с внешним резонатором.....	203
10.2.2. Низкочастотный кварцевый генератор.....	204
10.2.3. Внешний сигнал синхронизации	205
10.2.4. Внешняя RC-цепочка	205
10.2.5. Встроенный генератор с внутренней RC-цепочкой	206
10.2.6. Управление тактовой частотой.....	209
10.3. Режимы пониженного энергопотребления.....	210
10.4. Сброс.....	217
10.4.1. Сброс по включению питания	219
10.4.2. Аппаратный сброс.....	221
10.4.3. Сброс от сторожевого таймера	221
10.4.4. Сброс при снижении напряжения питания	222
10.4.5. Управление схемой сброса.....	223
Глава 11. Прерывания	
11.1. Общие сведения	230
11.2. Таблица векторов прерываний	230
11.3. Обработка прерываний	239
11.4. Внешние прерывания.....	240
Глава 12. Порты ввода/вывода	
12.1. Общие сведения	248
12.2. Регистры портов ввода/вывода.....	249
12.3. Конфигурирование портов ввода/вывода	250

Глава 13. Таймеры

13.1. Общие сведения	255
13.2. Назначение выводов таймеров/счетчиков	256
13.3. Прерывания от таймеров/счетчиков.....	257
13.4. Предделители таймеров/счетчиков	261
13.4.1. Управление предделителями.....	262
13.4.2. Использование внешнего тактового сигнала	263
13.5. Таймеры/счетчики T0 и T2.....	264
13.5.1. Управление тактовым сигналом	269
13.5.2. Режимы работы	270
13.5.3. Асинхронный режим	276
13.6. Таймеры/счетчики T1 и T3.....	279
13.6.1. Обращение к 16-разрядным регистрам	287
13.6.2. Управление тактовым сигналом	288
13.6.3. Режимы работы	288
13.7. Сторожевой таймер.....	300

Глава 14. Аналоговый компаратор

14.1. Введение	305
14.2. Функционирование компаратора	306

Глава 15. Аналого-цифровой преобразователь

15.1. Общие сведения	310
15.2. Функционирование модуля АЦП	311
15.3. Результат преобразования	320
15.4. Повышение точности преобразования	321
15.5. Параметры АЦП	323

Глава 16. Универсальный асинхронный (синхронный/асинхронный) приемопередатчик

16.1. Общие сведения	324
16.2. Использование модулей USART/UART	326
16.2.1. Скорость приема/передачи	333
16.2.2. Формат кадра	336
16.2.3. Передача данных	338
16.2.4. Прием данных	340
16.3. Мультипроцессорный режим работы	345

Глава 17. Последовательный периферийный интерфейс SPI

17.1. Введение	347
17.2. Функционирование модуля SPI	347
17.3. Режимы передачи данных	352
17.4. Использование вывода \overline{SS}	353

Глава 18. Последовательный двухпроводный интерфейс

18.1. Общие сведения	355
----------------------------	-----

18.2. Принципы обмена данными по шине TWI	356
18.3. Обзор модуля TWI	361
18.4. Взаимодействие прикладной программы с модулем TWI	367
18.5. Режимы работы модуля TWI	370
18.5.1. Режим «Ведущий передатчик»	370
18.5.2. Режим «Ведущий приемник»	374
18.5.3. Режим «Ведомый приемник»	378
18.5.4. Режим «Ведомый передатчик»	382
18.5.5. Комбинирование различных режимов	385
18.5.6. Арбитраж	386
18.6. Параметры интерфейса TWI	387
Часть 3. Команды микроконтроллеров семейств Tiny и Mega	
Глава 19. Общие сведения о системе команд	
19.1. Введение в систему команд	390
19.2. Операнды	390
19.3. Типы команд	392
19.3.1. Команды логических операций	392
19.3.2. Команды арифметических операций и команды сдвига	393
19.3.3. Команды операций с битами	393
19.3.4. Команды пересылки данных	394
19.3.5. Команды передачи управления	394
19.3.6. Команды управления системой	397
19.4. Сводные таблицы команд	397
Глава 20. Описание команд	403
Часть 4. Программирование микроконтроллеров семейств Tiny и Mega	
Глава 21. Введение в программирование микроконтроллеров AVR	
21.1. Общие сведения	472
21.2. Защита кода и данных	473
21.3. Конфигурационные ячейки	475
21.4. Идентификатор	479
21.5. Калибровочная ячейка	480
21.6. Организация памяти программ и данных микроконтроллеров семейства Mega	480
Глава 22. Последовательное программирование при высоком напряжении	
22.1. Общие сведения	482
22.2. Управление процессом программирования	483
Глава 23. Программирование по последовательному каналу	
23.1. Общие сведения	489
23.2. Переключение в режим программирования	492
23.3. Управление процессом программирования FLASH-памяти	496
23.4. Управление процессом программирования EEPROM-памяти	497

Глава 24. Параллельное программирование

24.1. Общие сведения	498
24.2. Переключение в режим параллельного программирования	504
24.3. Стирание кристалла	505
24.4. Программирование FLASH-памяти	505
24.5. Программирование EEPROM-памяти	508
24.6. Конфигурирование микроконтроллеров	510
24.6.1. Программирование конфигурационных ячеек	510
24.6.2. Программирование ячеек защиты	511
24.6.3. Чтение конфигурационных ячеек и ячеек защиты	511
24.6.4. Чтение ячеек идентификатора и калибровочной константы	512

Глава 25. Программирование по интерфейсу JTAG

25.1. Общие сведения	514
25.2. Использование интерфейса JTAG для программирования кристалла. Команды JTAG	517
25.2.1. AVR_RESET (код команды \$0C)	518
25.2.2. PROG_ENABLE (код команды \$04)	518
25.2.3. PROG_COMMANDS (код команды \$05)	518
25.2.4. PROG_PAGELOAD (код команды \$06)	519
25.2.5. PROG_PAGEREAD (код команды \$07)	519
25.2.6. Алгоритм программирования	519

Глава 26. Самопрограммирование микроконтроллеров семейства Mega

26.1. Общие сведения	528
26.2. Области RWW и NRWW	530
26.3. Функционирование загрузчика	531
26.3.1. Управление процессом самопрограммирования	531
26.3.2. Изменение памяти программ	535
26.3.3. Изменение ячеек защиты загрузчика	536
26.3.4. Чтение конфигурационных ячеек и ячеек защиты	536
26.3.5. Пример реализации программы-загрузчика	537

Приложения

Приложение 1. Сводная таблица микроконтроллеров AVR семейства Tiny	542
--	-----

Приложение 2. Сводная таблица микроконтроллеров AVR семейства Mega	544
--	-----

Приложение 3. Чертежи корпусов микроконтроллеров AVR

семейств Tiny и Mega	549
----------------------------	-----

Приложение 4. Электрические параметры микроконтроллеров AVR

семейств Tiny и Mega	552
----------------------------	-----

Предметный указатель	554
----------------------------	-----

Предисловие

Книга, которую вы держите в руках, — это вторая книга, посвященная микроконтроллерам AVR фирмы «Atmel». Эти 8-разрядные RISC-микроконтроллеры для встраиваемых приложений являются, пожалуй, наиболее интересным и прогрессивным направлением, развиваемым фирмой. Микроконтроллеры этой серии представляют собой мощный инструмент, прекрасную основу для создания современных высокопроизводительных и экономичных встраиваемых контроллеров многоцелевого назначения.

Популярность микроконтроллеров AVR постоянно увеличивается. Не последнюю роль в этом играет соотношение показателей «цена/быстродействие/энергопотребление», являющееся одним из лучших на рынке 8-разрядных 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 о новом индустриальном стандарте среди 8-разрядных микроконтроллеров общего применения.

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

- Classic AVR;
- Mega AVR;
- Tiny AVR.

Микроконтроллеры семейства Classic были описаны в первой книге серии, а данная книга посвящена двум последним семействам — Tiny и Mega.

Микроконтроллеры семейства Tiny имеют небольшие объемы памяти программ (1...2 Кбайта) и весьма ограниченную периферию. Практически все они выпускаются в 8-выводных корпусах и предна-

значены для т. н. «бюджетных» решений, принимаемых в условиях жестких финансовых ограничений. Область применения этих микроконтроллеров — интеллектуальные датчики различного назначения (контрольные, пожарные, охранные), игрушки, зарядные устройства, различная бытовая техника и другие подобные устройства.

Микроконтроллеры семейства Mega, напротив, имеют наиболее развитую периферию, наибольшие среди всех микроконтроллеров AVR объемы памяти программ и данных. Они предназначены для использования в мобильных телефонах, контроллерах различного периферийного оборудования (принтеры, сканеры, современные дисковые накопители, приводы CD-ROM/DVD-ROM и т. п.), сложной офисной технике и т. д.

Микроконтроллеры обоих семейств 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 семейств Tiny и Mega. 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, настоятельно рекомендуется обратиться к официальной информации, размещенной на Web-сайтах фирмы (www.atmel.com, www.atmel.ru).

Часть 1

Микроконтроллеры семейства Tiny

- | | |
|----------------|--|
| Глава 1 | Знакомство
с семейством Tiny |
| Глава 2 | Архитектура микроконтроллеров
семейства Tiny |
| Глава 3 | Устройство управления
микроконтроллеров
семейства Tiny |
| Глава 4 | Порты ввода/вывода |
| Глава 5 | Таймеры в микроконтроллерах
семейства Tiny |
| Глава 6 | Аналоговый компаратор |
| Глава 7 | Аналого-цифровой преобразователь |

Глава 1. Знакомство с семейством Tiny

1.1. Общие сведения

Как и все микроконтроллеры AVR фирмы «Atmel», микроконтроллеры семейства Tiny являются 8-разрядными микроконтроллерами, предназначенными для встраиваемых приложений. Они изготавливаются по малопотребляющей КМОП-технологии, которая в сочетании с усовершенствованной RISC-архитектурой позволяет достичь наилучшего соотношения быстродействие/энергопотребление. Удельное быстродействие этих микроконтроллеров может достигать значения 1 MIPS/МГц (1 миллион операций в секунду на 1 МГц тактовой частоты). Модели микроконтроллеров семейства Tiny и их основные параметры приведены в приложениях 1 и 4. Микроконтроллеры описываемого семейства предназначены в первую очередь для низкостоимостных («бюджетных») приложений 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

Перечислим вкратце основные особенности микроконтроллеров семейства Tiny:

- возможность вычислений со скоростью до 1 MIPS/МГц;
- FLASH-память программ объемом 1...2 Кбайт (число циклов стирания/записи не менее 1000);
- оперативная память (статическое ОЗУ) объемом 1...2 Кбайт;

- память данных на основе ЭСППЗУ (EEPROM) объемом до 64 байт (число циклов стирания/записи не менее 100000);
- возможность защиты от внешнего чтения и модификации памяти программ и данных (в EEPROM);
- возможность программирования непосредственно в системе через последовательный интерфейс*;
- различные способы синхронизации: встроенный генератор с внутренней или внешней времязадающей RC-цепочкой; встроенный генератор с внешним резонатором (пьезокерамическим или кварцевым); внешний сигнал синхронизации;
- наличие двух или трех режимов пониженного энергопотребления;
- некоторые модели микроконтроллеров могут работать при пониженном до 1.8 В напряжении питания.

1.3. Характеристики процессора

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 выполняются за один машинный цикл;
- многоуровневая система прерываний; поддержка очереди прерываний;
- 5...8 источников прерываний (из них до 2-х внешних)**;
- трехуровневый аппаратный стек.

1.4. Характеристики подсистемы ввода/вывода

Основными характеристиками подсистемы ввода/вывода являются:

- программное конфигурирование и выбор портов ввода/вывода;
- выходы могут быть запрограммированы как входные или как выходные независимо друг от друга;
- входные буферы с триггером Шмитта на всех выводах;
- возможность подключения к входам внутренних подтягивающих резисторов (сопротивление резисторов составляет 35...120 кОм).

* Не во всех моделях.

** Зависит от конкретной модели микроконтроллера.

1.5. Периферийные устройства

Набор периферийных устройств, имеющихся в составе того или иного микроконтроллера, зависит от конкретной модели и может быть определен по сводной таблице, приведенной в Приложении 1. Вообще же в составе микроконтроллеров семейства встречаются следующие периферийные устройства:

- 8-разрядный таймер/счетчик с предделителем (таймер T0)*;
- второй 8-разрядный таймер/счетчик с предделителем (таймер T1)**;
- сторожевой таймер WDT*;
- одноканальный генератор сигнала с ШИМ разрядностью 8 бит (один из режимов работы таймера T1);
- аналоговый компаратор*;
- 10-разрядный АЦП (4 канала);
- аппаратный модулятор.

1.6. Архитектура ядра

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

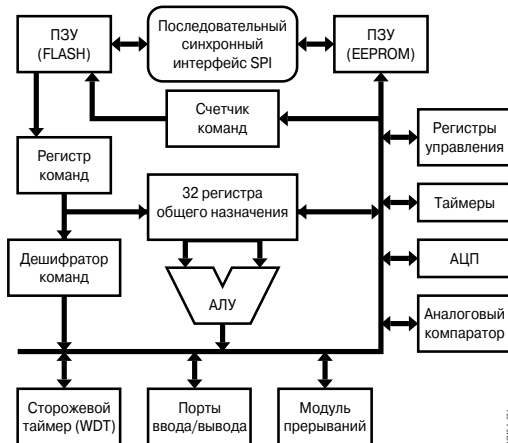


Рис. 1.1. Архитектура ядра микроконтроллеров AVR семейства Tiny

* Присутствует во всех моделях.

** Присутствует только в модели ATtiny 15L.

Арифметико-логическое устройство (АЛУ), выполняющее все вычисления, подключено непосредственно к 32-м 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. Кроме того, в микроконтроллерах семейства Tiny каждая из команд занимает только одну ячейку памяти программ.

В микроконтроллерах AVR реализована Гарвардская архитектура, которая характеризуется раздельной 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 шин доступа позволяет использовать для каждого типа памяти шины различной разрядности, а также реализовать конвейеризацию. Конвейеризация заключается в том, что во время исполнения текущей команды производится выборка из памяти и дешифрация кода следующей команды.

В отличие от RISC-микроконтроллеров других фирм, в микроконтроллерах AVR используется 2-уровневый конвейер, а длительность машинного цикла составляет всего один период кварцевого резонатора. В результате, при более низкой тактовой частоте они могут обеспечивать ту же производительность, что и RISC-микроконтроллеры других фирм.

1.7. Цоколевка и описание выводов

В семейство Tiny входит в общей сложности 8 моделей микроконтроллеров, которые составляют 4 группы:

- ATtiny11, ATtiny11L (**Рис. 1.2**) имеют FLASH-память программ объемом 1 Кбайт. Максимальное количество контактов ввода/вывода равно 6 (вывод 1 может использоваться только как входной);
- ATtiny12, ATtiny12L, ATtiny12V (**Рис. 1.3**) имеют FLASH-память программ объемом 1 Кбайт и EEPROM-память данных объемом 64 байт. Максимальное количество контактов ввода/вывода равно 6;
- ATtiny15L (**Рис. 1.4**) имеет FLASH-память программ объемом 1 Кбайт и EEPROM-память данных объемом 64 байт. Максимальное количество контактов ввода/вывода равно 6;
- ATtiny28L, ATtiny28V (**Рис. 1.5**) имеют FLASH-память программ 2 Кбайт. Количество контактов ввода/вывода равно 19 (из них 11 — контакты ввода/вывода общего назначения, а 8 — входные контакты).

Пока книга готовилась к печати, фирма «Atmel» выпустила еще две модели микроконтроллеров семейства — ATtiny26/ATtiny26L. Эти микроконтроллеры имеют FLASH-память программ объемом 2 Кбайт, ОЗУ

Часть 1. Микроконтроллеры семейства Tiny

объемом 128 байт и EEPROM-память данных объемом 128 байт. Количество контактов ввода/вывода в этих моделях равно 16. В данной книге эти модели по понятным причинам не описываются, однако основные их параметры приведены в Приложении 1.

Для сравнения в **Табл. 1.1** приводятся основные параметры микроконтроллеров, такие, как объем памяти (программ и данных), количество контактов ввода/вывода, тип корпуса, диапазон рабочих частот и напряжение питания. Полная информация по каждой модели приведена в Приложении 1. Дополнительно следует отметить, что все микроконтроллеры семейства Tiny 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 Tiny

Обозначение	Память программ (FLASH) [Кбайт]	Память данных (EEPROM) [байт]	Количество линий ввода/вывода	Напряжение питания [В]	Тактовая частота [МГц]	Тип корпуса
ATtiny11	1	—	6	4.0...5.5	0...6	DIP-8
						SOIC-8
ATtiny11L	1	—	6	2.7... 5.5	0...2	DIP-8
						SOIC-8
ATtiny12	1	64	6	4.0...5.5	0...8	DIP-8
						SOIC-8
ATtiny12L	1	64	6	2.7... 5.5	0...4	DIP-8
						SOIC-8
ATtiny12V	1	64	6	1.8...5.5	0...1.2	DIP-8
						SOIC-8
ATtiny15L	1	64	6	2.7...5.5	0...1.2	DIP-8
						SOIC-8
ATtiny28L	2	—	19	2.7...5.5	0...4	DIP-28
						TQFP-32
						MLF-32
ATtiny28V	2	—	19	1.8...5.5	0...1.2	DIP-28
						TQFP-32
						MLF-32

В **Табл. 1.2...1.5** 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.

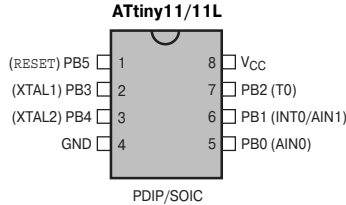


Рис. 1.2. Расположение выводов (вид сверху) моделей ATtiny11/11L

Таблица 1.2. Описание выводов модели ATtiny11/11L

Обозначение	Номер вывода	Тип вывода	Описание
PB0 (AIN0)	5	I/O	0-й разряд порта В (Положительный вход компаратора)
PB1 (INT0/AIN1)	6	I/O	1-й разряд порта В (Вход внешнего прерывания/Отрицательный вход компаратора)
PB2 (T0)	7	I/O	2-й разряд порта В (Вход внешнего тактового сигнала таймера/счетчика T0)
PB3 (XTAL1)	2	I/O	3-й разряд порта В (Вход тактового генератора)
PB4 (XTAL2)	3	I/O	4-й разряд порта В (Выход тактового генератора)
PB5 (RESET)	1	I	5-й разряд порта В (Вход сброса)
GND	4	P	Общий вывод
V _{CC}	8	P	Вывод источника питания

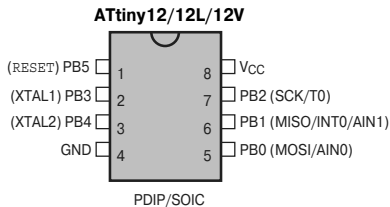


Рис. 1.3. Расположение выводов (вид сверху) моделей ATtiny12/12L/12V