

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
Структура книги .....	6
<b>1. Обзор 16-битных PIC-микроконтроллеров .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Архитектура микроконтроллеров PIC24F .....</b>	<b>10</b>
<b>3. Система команд и основы программирования микроконтроллеров PIC24F .....</b>	<b>18</b>
3.1. Программная модель микроконтроллеров PIC24F .....	18
3.2. Режимы адресации и система команд .....	20
3.2.1. Команды перемещения и адресация данных .....	23
3.2.2. Команды сравнения/выбора и условного перехода .....	28
3.2.3. Команды работы с битами .....	32
3.2.4. Команды сдвига и циклического сдвига .....	35
3.2.5. Команды математических и логических операций .....	37
3.2.6. Команды условных/безусловных переходов .....	44
3.3. Разработка и отладка программ на ассемблере в среде MPLAB IDE .....	46
3.4. Особенности разработки и отладки программ на MPLAB C для PIC24 .....	59
<b>4. Программирование портов ввода/вывода .....</b>	<b>73</b>
4.1. Аппаратно-программная архитектура портов ввода/вывода .....	73
4.2. Программирование портов ввода/вывода .....	77
4.3. Модуль регистрации событий .....	81
<b>5. Программирование прерываний .....</b>	<b>89</b>
<b>6. Программирование таймеров .....</b>	<b>100</b>
6.1. Практическое использование 16-битных таймеров .....	104
6.2. Работа таймеров в 32-битном режиме .....	114
6.3. Часы реального времени .....	118

---

<b>7. ИНТЕРФЕЙС SPI МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ PIC24F</b> .....	120
7.1. Аппаратно-программная реализация SPI в микроконтроллерах PIC24F ....	121
7.2. Практическое программирование обмена данными по SPI .....	127
<b>8. ИНТЕРФЕЙС I<sup>2</sup>C МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ PIC24F</b> .....	140
8.1. Принципы функционирования интерфейса I <sup>2</sup> C .....	140
8.2. Модуль интерфейса I <sup>2</sup> C микроконтроллеров PIC24F .....	143
8.3. Практическое использование интерфейса I <sup>2</sup> C .....	147
<b>9. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА RMP</b> .....	159
9.1. Режимы работы RMP .....	161
9.2. Практические примеры программирования интерфейса RMP .....	164
<b>10. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕЙС МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ PIC24F</b> .....	182
10.1. Аппаратно-программная архитектура UART .....	183
10.2. Практическое использование последовательного порта .....	184
<b>11. ОБРАБОТКА АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ В МИКРОКОНТРОЛЛЕРАХ PIC24F</b> .....	198
11.1. Программная модель интегрированного АЦП .....	201
11.2. Практическое использование модуля АЦП .....	205
11.3. Использование внешнего АЦП .....	217
<b>12. ГЕНЕРАЦИЯ АНАЛОГОВЫХ И ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ</b> .....	221
12.1. Модуль генерации цифровых сигналов .....	221
12.2. Аналоговые компараторы в микроконтроллерах PIC24F .....	229
Заключение .....	239

## ВВЕДЕНИЕ

Системы управления и контроля на однокристальных микроконтроллерах в настоящее время используются практически во всех сферах человеческой деятельности, причем каждый день появляются все новые и новые области применения таких систем. В последнее время, в связи с бурным развитием электроники расширились возможности и самих микроконтроллеров, позволяющих выполнять многие задачи, ранее недоступные для реализации, такие, например, как обработка и синтез аналоговых аудио- и видеосигналов. Одним из наиболее популярных семейств микроконтроллеров являются устройства, выпускаемые фирмой Microchip и известные под аббревиатурой PIC. В последние годы были разработаны и запущены в производство 16- и 32-битные модели, позволившие существенно расширить области применения систем на базе микроконтроллеров PIC. Для облегчения миграции от 8- к 16-битным устройствам фирма Microchip обеспечила максимальный уровень совместимости аппаратно-программных функций этих микроконтроллеров.

Эта книга посвящена практическим аспектам разработки систем на базе 16-битных микроконтроллеров PIC24F. В книге приводятся основные сведения по аппаратно-программной архитектуре микроконтроллеров PIC24F, а также многочисленные проекты систем обработки данных на базе микроконтроллеров этого семейства. Все примеры, приведенные в книге, разработаны и протестированы на плате «Explorer 16 Development Board» производства Microchip с установленным микроконтроллером PIC24FJ128GA010. Тем не менее, для тестирования приведенных примеров и разработки собственных проектов читатели могут использовать и более дешевую систему начального уровня «MPLAB Starter Kit for PIC24F» той же фирмы или отладочные платы других фирм. Для разработки программного обеспечения проектов, представленных в книге, использовалась интегрированная среда разработки MPLAB IDE версии 8.00 и бесплатная студенческая версия компилятора языка Си, известного под названием MPLAB C для PIC24. Кроме того, при изучении системы команд микроконтроллера PIC24F, а также при анализе процесса отладки некоторых программ на языке Си используется довольно эффективный симулятор/отладчик MPLAB SIM.

Книга рассчитана на широкий круг читателей — от начинающих до опытных разработчиков — и может оказаться полезной для всех, кто желает самостоятельно изучить аппаратно-программную архитектуру 16-битных микроконтроллеров PIC24F и применить эти знания на практике.

## СТРУКТУРА КНИГИ

Структура книги рассчитана на последовательное изучение материала, хотя опытные разработчики систем на базе микроконтроллеров PIC могут изучать материал выборочно. Теоретический материал большинства глав подкреплен практическими примерами, что позволяет существенно облегчить изучение.

Книга состоит из 12 глав, краткие сведения о каждой из них приведены далее:

- Глава 1. «Обзор 16-битных PIC-микроконтроллеров». В этой главе рассматриваются общие характеристики 16-битных микроконтроллеров фирмы Microchip и дается краткий обзор инструментальных средств разработки программного обеспечения.
- Глава 2. «Архитектура микроконтроллеров PIC24F». Материал этой главы посвящен обзору аппаратной архитектуры микроконтроллеров PIC24F, организации памяти и функционирования периферийных модулей устройства.
- Глава 3. «Система команд и основы программирования микроконтроллеров PIC24F». В этой главе детально проанализированы принципы реализации системы команд микроконтроллеров PIC24F и приведены многочисленные примеры программного кода на языке ассемблера. Значительная часть главы посвящена вопросам разработки и отладки программного обеспечения в среде MPLAB IDE.
- Глава 4. «Программирование портов ввода/вывода». Эта глава содержит материал по архитектуре и программированию цифровых портов ввода/вывода микроконтроллеров PIC24F. Теоретический материал сопровождается примерами программ на языке Си с детальным анализом программного кода.
- Глава 5. «Программирование прерываний». Материал главы посвящен аппаратно-программной реализации системы прерываний микроконтролле-

ров PIC24F. На многочисленных примерах программного кода проанализированы различные механизмы вызова и обработки пользовательских прерываний.

- Глава 6. «Программирование таймеров». Глава содержит материал по аппаратно-программной архитектуре модулей таймеров микроконтроллеров PIC24F. Рассматриваются различные режимы работы таймеров и их настройка. Теоретический материал сопровождается примерами программ на языке Си с детальным анализом программного кода.
- Глава 7. «Интерфейс SPI микроконтроллеров PIC24F». В главе рассмотрены принципы функционирования и аппаратно-программная реализация модуля интерфейса SPI, а также приведены примеры программирования систем ввода/вывода дискретных данных с использованием данного интерфейса. Все примеры сопровождаются детальным анализом программного кода.
- Глава 8. «Интерфейс I<sup>2</sup>C микроконтроллеров PIC24F». Материал главы посвящен рассмотрению принципов функционирования и аппаратно-программной конфигурации модуля интерфейса I<sup>2</sup>C в микроконтроллерах PIC24F. Теоретический материал сопровождается примерами программирования обмена данными по шине I<sup>2</sup>C на языке Си с детальным анализом программного кода.
- Глава 9. «Программирование интерфейса PMP». В главе рассматривается аппаратно-программная реализация 8-битного параллельного интерфейса обмена данными PMP. Приводятся примеры разработки систем ввода/вывода цифровых данных с использованием этого интерфейса.
- Глава 10. «Последовательный интерфейс микроконтроллеров PIC24F». В этой главе рассматриваются принципы реализации и настройки модуля последовательного интерфейса микроконтроллеров PIC24F. Теоретический материал сопровождается примерами программирования обмена данными с использованием этого модуля, разработанными на языке Си, с детальным анализом программного кода.
- Глава 11. «Обработка аналоговых сигналов в микроконтроллерах PIC24F». Эта глава посвящена методам обработки аналоговых сигналов в микроконтроллерах PIC24F. Здесь рассматривается широкий круг вопросов, связанных с настройкой и использованием модуля аналого-цифрового преобразователя, а также приводятся примеры программирования ввода данных посредством АЦП.
- Глава 12. «Генерация аналоговых и цифровых сигналов». В этой главе рассматривается широкий круг вопросов, связанных с генерацией цифровых и аналоговых сигналов в микроконтроллерах PIC24F. Теоретические аспекты иллюстрируются примерами программного кода на языке Си.

Автор благодарит коллектив издательства «ДМК Пресс» за помощь при подготовке книги к изданию. Особую признательность автор выражает своей жене Юлии за поддержку и помощь при написании книги.

## ОБЗОР 16-БИТНЫХ PIC-МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ

Разработанные фирмой Microchip 16-битные микроконтроллеры являются очередным шагом на пути повышения производительности и эффективности встроенных и мобильных приложений. Эта 16-битная архитектура изначально разрабатывалась как альтернатива 8-битным решениям и призвана заменить в ближайшее время 8-битные микроконтроллеры в большинстве приложений.

Разработанная фирмой Microchip 16-битная платформа реализована в двух семействах 16-битных микроконтроллеров и в двух семействах цифровых сигнальных контроллеров. Все эти семейства объединяет ряд общих характеристик:

- совместимость по назначению выводов различных 16-битных устройств;
- возможность использования для всех устройств одних и тех же инструментальных средств разработки программного обеспечения;
- аппаратно-программная совместимость всех одноименных периферийных модулей микроконтроллеров;
- общая базовая система команд процессора, используемая во всех семействах.

Выбор той или иной модели микроконтроллера или сигнального контроллера зависит от требований к разрабатываемому приложению. Для большинства недорогих устройств средней производительности подходят микроконтроллеры PIC24F, максимальная производительность которых составляет 16 MIPS. Для устройств, требующих высокой производительности, можно использовать микроконтроллеры PIC24H с максимальным быстродействием 40 MIPS. Микроконтроллеры семейств PIC24F и PIC24H работают с одним и тем же набором инструкций процессора, включают одни и те же периферийные модули, имеют одну и ту же цоколевку, и для работы с ними используются одни и те же инструментальные средства для разработки программного обеспечения.

Если требуются дополнительные возможности по обработке сигналов, то вместо микроконтроллеров семейств PIC24F/H можно применить цифровые сигнальные контроллеры семейства dsPIC30F, которые могут помимо всего прочего работать при напряжении питания 5 В, или высокопроизводительные (40 MIPS) контроллеры dsPIC33F, которые имеют большой объем памяти и используют низковольтное (3.3 В) питание. В качестве инструментального

средства разработки программного обеспечения 16-битных микроконтроллеров и цифровых сигнальных контроллеров используется свободно распространяемая интегрированная среда разработки (ИСП) MPLAB IDE фирмы Microchip, которая позволяет разрабатывать и отлаживать 8-, 16- и 32-битные приложения. Программа MPLAB IDE работает под управлением операционных систем Windows 2000/XP/Vista и позволяет выполнить все этапы разработки и отладки программного обеспечения для целевой системы. Среда MPLAB IDE позволяет выполнять тестирование и отладку программ с использованием мощного программного симулятора MPLAB SIM. Кроме того, для разработки программного обеспечения для 16-битных систем в среде MPLAB IDE можно использовать следующие инструментальные средства:

- ассемблер ASM30 — полнофункциональный макроассемблер, в котором можно создавать пользовательские макросы и использовать условное ассемблирование. Многочисленные директивы языка делают макроассемблер очень мощным средством разработки программ;
- компилятор программ, написанных на языке Си, который называется MPLAB C для PIC24. Этот компилятор используется для компиляции и оптимизации программ, написанных для 16-битных микроконтроллеров PIC24F/H и цифровых сигнальных контроллеров dsPIC30/33. Он совместим со стандартом ANSI C и включает полную библиотеку стандартных функций ANSI C, в числе которых функции манипулирования строками, функции работы с динамической памятью, функции преобразования даты/времени и математические функции. В компиляторе MPLAB C для PIC24 имеется мощный оптимизатор, позволяющий почти в 1,5 раза уменьшить размер программного кода по сравнению с компиляторами других фирм-производителей;
- визуальный генератор кода инициализации MPLAB VDI, позволяющий значительно упростить процесс создания инициализационного кода программы. С помощью VDI можно в графическом виде сконфигурировать устройство и по завершении вставить сгенерированный программный код инициализации в программу на языке Си или ассемблере;
- библиотеку периферийных модулей, включающую более чем 270 функций для работы с различными периферийными модулями;
- библиотеку математических функций, совместимую со стандартом IEEE-754, которая включает ряд функций для выполнения операций над обычными вещественными числами и вещественными числами с двойной точностью. Функции этой библиотеки могут использоваться как в программах на языке Си, так и на ассемблере.

Кроме инструментальных средств разработки и отладки программного обеспечения фирмы-производителя на рынке присутствуют и программные средства, выпускаемые многими известными фирмами (Hi-Tech, CCS и т.д.). Из аппаратных средств разработки наиболее известна и популярна отладочная плата «Explorer 16 Development Board» фирмы Microchip, хотя другие фирмы также приступили к выпуску отладочных плат на базе 16-битных микроконтроллеров.