

ЗаНумателъНо о МИКРОКОНТРОЛЛЕРАХ

Описание
внутреннего устройства
микропроцессоров

Разработка схем
на микроконтроллерах

Разработка и отладка программ
для микроконтроллеров
на языках Си и ассемблере

Александр Микушин



Александр Микушин

Заинтересованно о МИКРОКОНТРОЛЛЕРАХ

Санкт-Петербург

«БХВ-Петербург»

2006

УДК 681.3.06
ББК 32.973-04
М59

Микушин А. В.

М59 Занимательно о микроконтроллерах. — СПб.:
БХВ-Петербург, 2006. — 432 с.: ил.

ISBN 5-94157-571-8

Собраны материалы, затрагивающие различные аспекты проектирования микропроцессорной техники: от сведений о простейших логических элементах до изложения принципов разработки микропроцессорных систем и достаточно сложных многомодульных программ для них. Из всего многообразия микропроцессоров в качестве примера рассматриваются "классические", доступные и распространенные микроконтроллеры семейства MCS-51, поддерживаемые такими крупнейшими производителями, как Analog Devices и Texas Instruments. Большое внимание уделено построению структуры, принципам написания и отладке программ для микроконтроллеров на языках Си и ассемблере. Приведены готовые шаблоны для написания программ на ассемблере и показаны особенности применения языка Си для реализации конкретных устройств. При подготовке книги были использованы материалы лекций по микропроцессорам, читаемых автором в течение ряда лет в Сибирском государственном университете телекоммуникаций и информатики.

Для широкого круга радиолюбителей и программистов

УДК 681.3.06
ББК 32.973-04

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Игорь Шишигин</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Владимир Харитонов</i>
Компьютерная верстка	<i>Наталья Смирновой</i>
Корректор	<i>Наталья Першакова</i>
Дизайн обложки	<i>Елены Беляевой</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 31.05.06.
Формат 70x100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 34,83.
Тираж 3000 экз. Заказ №
"БХВ-Петербург", 194354, Санкт-Петербург, ул. Есенина, 5Б.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию № 77.99.02.953.Д.006421.11.04
от 11.11.2004 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 5-94157-571-8

© Микушин А. В., 2006
© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2006

Оглавление

Введение.....	1
Как пользоваться книгой.....	2
Глава 1. Что такое микроконтроллеры, микропроцессоры и сигнальные процессоры.....	3
Классификация микропроцессоров.....	3
Универсальные процессоры.....	7
Микроконтроллеры	10
Сигнальные процессоры	12
Итак, подведем итоги.....	14
Глава 2. Цифровая техника	15
Простейшие логические элементы	16
Принципы реализации цифровых устройств по произвольной таблице истинности.....	20
Сумматоры.....	23
Дешифраторы	28
Мультиплексоры	31
Демультимплексоры	33
Шинные формирователи	34
Итак, подведем итоги.....	39
Глава 3. Запоминающие устройства	41
Постоянные запоминающие устройства	41
Триггеры	52
Регистры.....	56
Статические оперативные запоминающие устройства (ОЗУ)	60
Динамические оперативные запоминающие устройства (ОЗУ).....	65
Итак, подведем итоги.....	71

Глава 4. Принципы работы микропроцессора	73
Виды двоичных кодов	73
Беззнаковые двоичные коды	74
Прямые знаковые двоичные коды	74
Знаковые обратные двоичные коды	75
Знаковые дополнительные двоичные коды.....	76
Представление рациональных чисел в двоичном коде с фиксированной запятой	80
Представление рациональных чисел в двоичном коде с плавающей запятой	81
Представление десятичных чисел	84
Суммирование двоично-десятичных чисел	85
Представление текстовых данных в памяти процессора	86
Арифметико-логические устройства	86
Классификация микропроцессоров.....	91
Операционный блок микропроцессора	94
Блок микропрограммного управления	97
Команды микропроцессора	98
Микропрограммирование	101
Итак, подведем итоги.....	105
 Глава 5. Принципы работы микропроцессорной системы	 107
Системная шина	108
Адресное пространство микропроцессорного устройства	109
Способы расширения адресного пространства микропроцессора	112
Согласование быстродействия памяти и универсальных микропроцессоров.....	117
Подключение внешних устройств к микропроцессору	119
Принципы построения параллельного порта.....	123
Принципы построения последовательного порта.....	127
Синхронные последовательные порты.....	127
Асинхронные последовательные порты.....	131
Принципы построения таймеров	134
Итак, подведем итоги.....	138
 Глава 6. Принципы работы микроконтроллеров	 139
Семейство микроконтроллеров MCS-51	140
Архитектура микроконтроллеров MCS-51	142

Система команд микроконтроллеров MCS-51	147
Арифметические команды.....	148
Логические команды с байтовыми переменными.....	149
Команды пересылки данных	149
Битовые команды	150
Команды ветвления и передачи управления	151
Способы адресации операндов	154
Устройство параллельных портов микроконтроллеров MCS-51.....	156
Особенности построения памяти микроконтроллеров семейства MCS-51.....	164
Память программ микроконтроллеров MCS-51.....	165
Внешняя память данных микроконтроллеров MCS-51	167
Внутренняя память данных микроконтроллеров MCS-51	169
Регистры специальных функций.....	172
Внутренние таймеры микроконтроллера, особенности их применения	173
Режим 0	175
Режим 1	176
Режим 2	178
Режим 3	179
Управление таймерами/счетчиками	180
Использование таймера в качестве измерителя длительности импульсов	182
Использование таймера в качестве частотомера	183
Последовательный порт микроконтроллеров семейства MCS-51	185
Скорость приема/передачи информации через последовательный порт.....	187
Режим 0. Синхронный режим работы последовательного порта	189
Режим 1. Асинхронный 8-битовый режим	192
Режим 2. Асинхронный 9-битовый режим с фиксированной скоростью передачи.....	197
Режим 3. Асинхронный 9-битовый режим	199
Итак, подведем итоги.....	200
Глава 7. Принципы создания программ для микроконтроллеров	201
Языки программирования для микроконтроллеров.....	202
Виды программ-трансляторов.....	204
Виды компиляторов.....	205
Применение подпрограмм.....	206
Стек, его организация и структура.....	208

Подпрограммы-процедуры и подпрограммы-функции	210
Применение комментариев	212
Структурное программирование.....	214
Линейная цепочка операторов.....	217
Условное выполнение операторов.....	220
Конструкция управления циклическим выполнением оператора с проверкой условия после тела цикла	225
Структурная конструкция циклического выполнения оператора с проверкой условия до тела цикла.....	228
Понятие многофайлового и многомодульного программирования	230
Многофайловые программы.....	231
Многомодульные программы.....	237
Программа-монитор	241
Использование таймера для организации параллельных программных потоков	258
Использование прерываний для ввода информации о кратковременных сигналах и событиях, наступающих в произвольный момент времени	261
Итак, подведем итоги.....	265
Глава 8. Язык программирования ASM-51	267
Исходный текст программы на языке программирования ASM-51	269
Символы языка ASM-51	271
Идентификаторы	272
Ключевые слова.....	273
Встроенные имена	274
Определяемые имена	274
Числа и литеральные строки.....	275
Директивы языка программирования ASM-51.....	277
Управляющие команды.....	283
Реализация подпрограмм на языке ASM-51	285
Реализация подпрограмм-процедур на языке ASM-51.....	285
Передача переменных-параметров в подпрограмму.....	286
Реализация подпрограмм-функций на языке ASM-51.....	289
Реализация подпрограмм обработки прерываний на языке ASM-51	290
Структурное программирование на языке ASM-51	293
Многомодульные программы	298
Использование сегментов в языке программирования ассемблер.....	301
Итак, подведем итоги.....	308

Глава 9. Язык программирования C-51	309
Структура программ C-51	314
Элементы языка C-51	317
Используемые символы алфавита	317
Лексические единицы, разделители и использование пробелов	320
Идентификаторы	321
Ключевые слова	323
Константы	323
Использование комментариев в тексте программы	327
Типы данных языка программирования C-51 и их объявление	328
Категории типов данных	331
Целочисленный тип данных	332
Числа с плавающей запятой	333
Переменные перечислимого типа	333
Указатели	336
Указатели общего вида	337
Специализированные указатели	339
Массивы	340
Структуры	342
Битовые поля	344
Объединения (смеси)	345
Определение типов	346
Инициализация данных	347
Выражения	349
Операнды и операции	350
Преобразования типов при вычислении выражений	357
Операции унарного минуса, логического и поразрядного отрицания	358
Операции разадресации и вычисления адреса	359
Операция <i>sizeof</i>	360
Мультипликативные операции	360
Аддитивные операции	361
Операции сдвига	363
Поразрядные операции	363
Логические операции	364
Операция последовательного вычисления	365
Условная операция	365
Операции инкремента и декремента	366
Простое присваивание	367

Составное присваивание	367
Приоритеты операций и порядок вычислений	368
Побочные эффекты	368
Преобразование типов	369
Операторы	372
Оператор-выражение	372
Пустой оператор	373
Составной оператор	373
Оператор <i>if</i>	374
Оператор <i>switch</i>	376
Оператор <i>break</i>	379
Оператор цикла <i>for</i>	379
Оператор цикла <i>while</i>	381
Оператор цикла <i>do-while</i>	382
Оператор <i>continue</i>	383
Оператор возврата из функции <i>return</i>	383
Оператор безусловного перехода <i>goto</i>	384
Использование функций в языке программирования С-51	385
Определение и вызов функций	385
Итак, подведем итоги	393

Приложение. Справочные данные по системе команд микроконтроллера MCS-51 и кодировке символов	395
---	------------

Литература	418
-------------------------	------------

Предметный указатель	420
-----------------------------------	------------

Введение

Особенностью этой книги является то, что в одном месте собраны материалы, затрагивающие различные аспекты проектирования микропроцессорной техники: от сведений о простейших логических элементах до изложения принципов разработки микропроцессорных систем и достаточно сложных многомодульных программ для них. Такой подборки материала не встречается ни в одной книге (за исключением достаточно старых изданий, опубликованных на заре появления микропроцессоров). Книга не рассчитана на подготовленных читателей, для которых все это — элементарные вещи. Однако, как показывает мой опыт, обычно люди, работающие в этой сфере, владеют какой-то одной из приведенных областей разработки микроконтроллерных устройств. И даже опытные программисты микропроцессоров, прекрасно знакомые с особенностями построения аппаратуры, часто не владеют основами программирования, хорошо известными их коллегам, пишущим программы для универсальных компьютеров.

Достаточно часто препятствием в освоении микропроцессорной техники становится непонимание того, как работает сам микропроцессор или микроконтроллер. В этой книге сделана попытка объяснить принципы устройства этих микросхем на рассмотрении примеров упрощенных вариантов внутренней структуры. Только после этого происходит переход к обсуждению особенностей применения реально существующего семейства микросхем.

Почему в качестве примера выбрано семейство микроконтроллеров MCS-51? Да потому что оно наиболее распространено в мире. Даже на территории России производится несколько типов микросхем, выполненных по этой архитектуре. Это семейство стало классикой микроконтроллеров. Разобраться с работой этих микросхем проще всего, а подобрать подходящую для конкретной задачи — тем более. Даже если один из многочисленных производителей микроконтроллеров семейства MCS-51 прекратит их производство, то всегда найдутся десятки других, которые с радостью предоставят вам свою продукцию, так что усилия, затраченные на изучение предлагаемого материала, не пропадут даром.

Еще одной важной особенностью данной книги является то, что в ней рассматриваются не только особенности разработки схем с использованием микропроцессоров, но и принципы написания программ для этих микроконтроллеров. При этом большое внимание уделяется тому, что

некоторые задачи элементарно решаются схемотехническими методами, но при этом требуют невероятных усилий при использовании для их решения программных подходов. И наоборот, другие функции устройства элементарно решаются программными методами, но при попытке схемной реализации требуют невероятных усилий от разработчика схемы.

В книге максимальное внимание уделено принципам написания и отладке программ, требующих минимальных усилий от программиста. С самого начала уделяется большое внимание построению структуры программы, которая позволила бы увеличивать свою сложность по мере необходимости и не требовала бы переписывания заново при малейшем изменении исходного задания разрабатываемого устройства.

Даются готовые шаблоны для написания программ на ассемблере. Это позволяет упростить программирование на ассемблере и приблизить по сложности к разработке программ на языках высокого уровня.

Программирование на языке высокого уровня рассматривается на примере С-51. При этом большое внимание уделяется особенностям применения этого языка программирования для реализации конкретных устройств (а не вычислительных задач). Рассматриваются влияние выбора типов переменных и операторов этого языка на эффективность и размер конечной программы, т. е. вопросы, чрезвычайно важные для микропроцессорных устройств.

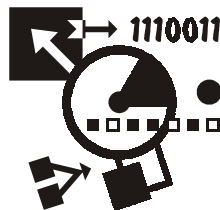
Как пользоваться книгой

Книга организована по принципу перехода от простого к сложному. Основной целью является преодоление порога, с которым сталкивается любой разработчик или пользователь аппаратуры, построенной с применением микропроцессорной техники.

Материал начинается с рассмотрения простейших логических элементов, а заканчивается обсуждением особенностей разработки микропроцессорных систем и написания программ для микропроцессоров, примененных в данной системе.

В зависимости от уровня подготовки и интересов читателя можно пропускать отдельные главы, однако материал подобран так, что каждая последующая глава опирается на предыдущую. Более того, поскольку для понимания принципов работы микропроцессоров нужно знать все разделы цифровой схемотехники и основы программирования, то имеет смысл после прочтения последующих глав возвращаться к предыдущим. В результате те части материала, что, возможно, показались непонятными при первом прочтении, при повторном обращении к ним могут оказаться элементарными.

Глава 1



Что такое микроконтроллеры, микропроцессоры и сигнальные процессоры

Слово «микропроцессоры» у всех на слуху. Сигнальные процессоры известны меньшему кругу людей, однако и это понятие достаточно распространено. Что же такое микроконтроллеры? Микроконтроллеры, как и остальные виды процессоров, в настоящее время выполняются в виде одной микросхемы. Микросхемы микроконтроллеров предназначены для управления различными объектами. В качестве таких объектов могут выступать радиостанции, приемники, сотовые телефоны, телевизоры и т. д. Обычно микроконтроллеры выполняются в виде готовых однокристальных ЭВМ. Прежде чем заняться микроконтроллерами более подробно, рассмотрим, к какой области техники относятся микросхемы этого класса, и какой круг задач они решают.

Классификация микропроцессоров

Современные электронные устройства, в том числе и микроконтроллеры, выполняются на основе интегральных микросхем. Основные разновидности применяемых в настоящее время микросхем показаны на рис. 1.1.

Все микросхемы разделяются на две большие группы: аналоговые и цифровые. Преимущества и недостатки каждой из них известны. Аналоговые микросхемы характеризуются максимальным быстродействием при малом потреблении энергии и сравнительно малой стабильностью параметров. Цифровые микросхемы обладают прекрасной повторяемостью

параметров, меньшей чувствительностью к воздействию помех. В последние годы, при применении цифровых микросхем для построения приемопередающих устройств, а также устройств обработки звука и изображения удалось достигнуть большего по сравнению с аналоговой техникой динамического диапазона. Эти преимущества и привели к быстрому развитию цифровой техники в последние годы.

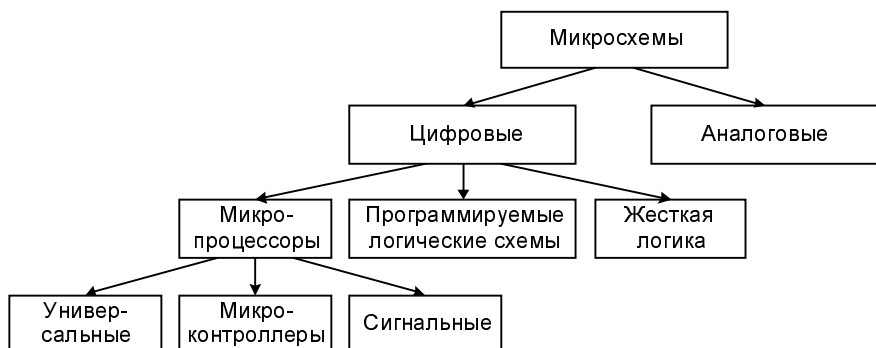


Рис. 1.1. Место, занимаемое микропроцессорами среди микросхем

По мере развития цифровых микросхем их быстродействие достигло впечатляющих результатов. Наиболее быстрые обладают временем переключения порядка 3–5 нс (серия микросхем 74ALS), а внутри кристалла микросхемы, где нет больших емкостей нагрузки, время переключения измеряется пикосекундами. Таким быстродействием обладают программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и заказные большие интегральные схемы (БИС). В этих микросхемах алгоритм решаемой задачи воплощен в их внутренней структуре.

Часто для решаемой задачи не требуется такого быстродействия, каким обладают современные цифровые микросхемы. Однако за быстродействие приходится платить. Это выражается в следующем:

- быстродействующие микросхемы потребляют значительный ток, что ограничивает их сложность (уровень интеграции);
- для решения задачи приходится использовать много микросхем, что выливается в высокую стоимость и большие габариты устройства.

Напомню основные характеристики различных видов цифровых микросхем.

Наибольшим быстродействием и наименьшей помехоустойчивостью обладали ЭСЛ-микросхемы (эмиттерно-связанная логика). Однако прин-

ципиальная особенность работы этих микросхем, заключающаяся в работе входящих в их состав транзисторов в активном режиме, приводит к тому, что микросхемы такого типа обладают пониженной помехоустойчивостью. Это затрудняет построение микросхем, надежно реализующих достаточно сложные алгоритмы работы. В настоящее время ЭСЛ-микросхемы практически не применяются.

Следующий вид цифровых микросхем — это ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика). Современные ТТЛ-микросхемы обладают почти таким же быстродействием, как традиционная ЭСЛ. В связи с особенностями внутреннего устройства ТТЛ-микросхемы потребляемый ею ток питания не зависит от скорости переключения логических вентилях.

И работая на пределе быстродействия, и переключаясь только несколько раз в секунду, микросхема потребляет одинаковый ток. Поэтому выпускается несколько различных серий ТТЛ-микросхем, обладающих различным быстродействием и, соответственно, различным током потребления.

В современном мире наибольшее распространение получили КМОП-микросхемы, построенные на комплементарных транзисторах с изолированным затвором. Их особенностью является то, что используется двухтактная схема. В статическом состоянии, если один из двух последовательно включенных транзисторов с разным типом проводимости открыт, то второй закрыт. Это означает, что ток через логический вентиль не протекает ни при формировании на выходе логической единицы, ни при формировании логического нуля. То есть в статическом состоянии через микросхему протекают только токи утечки транзисторов и из цепи питания практически ничего не потребляется. Потребляемый ток возрастает только при увеличении скорости переключения логических КМОП-вентилей. На предельных скоростях работы КМОП-микросхемы ее потребление становится сравнимым с аналогичным параметром ТТЛ-микросхем и даже может превосходить его.

Итак, задачу потребления минимального тока, обеспечивающего требуемое в данный момент быстродействие, решает применение КМОП-микросхем (например, серий 1564, 74НС, 74АНС, универсальных микропроцессоров AMD или PENTIUM). Именно поэтому в настоящее время преимущественное распространение получили КМОП-микросхемы.

Задачу уменьшения стоимости и габаритов решают несколькими способами. Для жесткой логики — это разработка специализированных БИС. Их использование позволяет уменьшить габариты устройства, но стоимость его снижается только при крупносерийном производстве, таком как производство радио- или телевизионной аппаратуры. Для среднего и малого объемов производства такое решение неприемлемо. Тем не менее,

для крупносерийного производства альтернативы этой технологии нет, так как при этом получается наименьшая стоимость микросхем.

Еще одним решением уменьшения габаритов и стоимости устройства является применение программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). В этих микросхемах присутствуют как бы два слоя. Один слой — это набор цифровых модулей, способных решить практически любую задачу. Второй слой хранит структуру связей между модулями первого слоя. Эту структуру можно программировать, и тем самым менять схему устройства, а значит и решаемую микросхемой задачу. Это направление активно развивается в настоящее время, но оно не входит в рамки рассмотрения данной книги.

Третий способ решения задачи уменьшения габаритов и стоимости заключается в том, что можно заставить одно очень быстродействующее устройство со сложной внутренней структурой, допускающей реализацию большого числа элементарных операций, последовательно решать различные задачи. Этот подход воплощают **микропроцессоры**. В микропроцессорах **возможен обмен предельного быстродействия на сложность реализуемого в этой микросхеме устройства**. Быстродействие микропроцессоров стараются максимально увеличить — это позволяет реализовывать все более сложные устройства в одном и том же объеме полупроводникового кристалла. Более того! В одном процессоре можно реализовать несколько устройств одновременно! Именно этот вариант решения задачи уменьшения габаритов и стоимости устройств и рассматривается в предлагаемой вашему вниманию книге.

В современном мире трудно найти область техники, где не применялись бы микропроцессоры. Они используются для вычислений, выполняют функции управления, обрабатывают звук и изображение. В зависимости от области применения микропроцессора варьируются требования к нему. Это накладывает отпечаток на его внутреннюю структуру. В настоящее время определилось три основных направления развития микропроцессоров, подразумевающих различную внутреннюю структуру этих устройств:

- универсальные микропроцессоры;
- микроконтроллеры;
- сигнальные микропроцессоры.

Универсальные микропроцессоры служат для построения вычислительных машин. В них используются самые передовые решения, направленные на повышение быстродействия; при этом не обращают особого внимания на габариты, стоимость и потребляемую энергию. Компьютеры не только работают у вас дома или в офисе, но и используются для управ-

ления системами или устройствами, обладающими большими габаритами и стоимостью. Для всех этих приложений массогабаритные и энергетические показатели не имеют особого значения.

Микроконтроллеры. Для управления малогабаритными и дешевыми устройствами используются однокристалльные микроЭВМ, которые в настоящее время называют микроконтроллерами. В микроконтроллерах максимальное внимание уделяется именно уменьшению габаритов, стоимости и потребляемой энергии.

Сигнальные процессоры. Еще один класс микропроцессоров решает задачи, которые традиционно выполняли аналоговые электронные устройства. К сигнальным процессорам предъявляются специфические требования. От них требуются максимальное быстродействие и малые габариты, простая стыковка с аналого-цифровыми и цифроаналоговыми преобразователями, большая разрядность обрабатываемых данных и небольшой набор математических операций, обязательно включающий операцию умножения-накопления и аппаратную организацию циклов.

Рассмотрим более подробно каждую из упомянутых категорий микропроцессоров.

Универсальные процессоры

Универсальные процессоры разрабатывают для применения в составе компьютеров, однако это не значит, что они могут использоваться только для вычислений. Эти процессоры с успехом применяют для построения игровых приставок, устройств коммутации в составе компьютерных сетей, а также в различных измерительных или медицинских приборах.

Значимой составляющей стоимости любого устройства является разработка и изготовление его схемы, и чем крупнее серийность изделия, тем меньшую часть в его стоимости занимает эта составляющая. В настоящее время серийность изготовления универсальных компьютеров достигла невероятных размеров. Поэтому возникает желание воспользоваться компьютером в качестве основы для изготовления различных устройств. При этом в состав их цены будет входить стоимость готового компьютера, минимизированная за счет крупной серийности! Разработка и изготовление элементов, функции которых будет выполнять универсальный компьютер, не потребуют затрат времени и денег! Разработка нового устройства сведется к созданию специализированной программы и элементов, отсутствующих в универсальном компьютере.

Для управления автоматическими телефонными станциями, системами сотовой связи или кораблями часто используют универсальные компьютеры. Обычно для построения такого типа устройств управления требуются специфические модули сбора информации или вывода управляющих воздействий. Такие модули выполняют в виде отдельных блоков, подключаемых к компьютеру через один из стандартных портов, таких как LPT, USB или COM-порт. В тех случаях, когда нет жестких требований к электромагнитной совместимости, дополнительные блоки могут выполняться в виде плат, подключаемых непосредственно к внутренним шинам компьютера. При этом не нужно изготавливать отдельные корпуса и блоки питания для дополнительных модулей, да и размеры нового устройства ограничиваются габаритами самого компьютера. Довольно часто для реализации нового прибора достаточно приобрести платы аналого-цифрового или цифроаналогового преобразователя или подключить плату согласования с телевизионной камерой и написать программу для этого прибора.



Рис. 1.2. Примеры использования универсальных компьютеров для реализации различной аппаратуры

По мере ужесточения требований к приборам готовый компьютер перестает подходить для их реализации, но можно использовать отдельные блоки от компьютера, такие как материнские платы или платы аналого-цифровых преобразователей. Кроме того, существуют промышленные варианты материнских плат компьютеров, рассчитанные на работу в более

тяжелых условиях реального производства. Часто они имеют одноплатное исполнение, что благоприятно сказывается на габаритах и энергопотреблении. Пример такого одноплатного промышленного компьютера приведен на рис. 1.3.

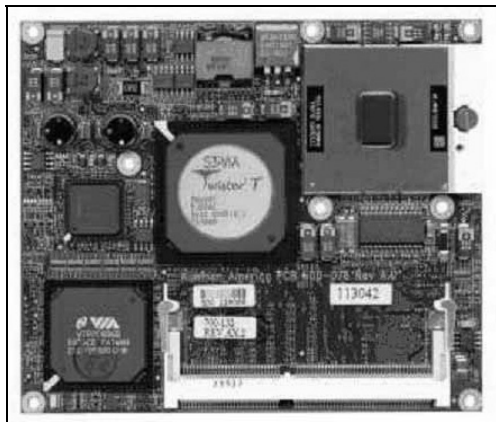


Рис. 1.3. Пример одноплатного встраиваемого компьютера

В качестве примера устройств, для реализации которых использованы готовые одноплатные компьютеры, можно назвать приборы, выпускаемые фирмой Rohde & Schwarz. На рис. 1.4 приведена фотография спектроанализатора этой фирмы.



Рис. 1.4. Спектроанализатор фирмы Rohde & Schwarz

Микроконтроллеры

Термин «контроллер» образовался от английского слова *to control* — управлять. Контроллеры можно реализовать на устройствах различного принципа действия: от механических или оптических до электронных, аналоговых или цифровых элементов. Механические устройства управления (контроллеры) обладают низкой надежностью и высокой стоимостью по сравнению с электронными, поэтому в дальнейшем мы их рассматривать не будем. Электронные аналоговые устройства имеют недостаточно стабильные параметры и потому требуют периодической подстройки и регулировки, что увеличивает стоимость их эксплуатации. Поэтому такие устройства к настоящему времени стараются не использовать. Наиболее распространенными на сегодняшний день являются электронные устройства управления, построенные на основе цифровых микросхем.

В зависимости от стоимости и габаритов устройства, которым требуется управлять, определяются и требования к контроллеру. Если объект управления занимает десятки квадратных метров, как, например, автоматические телефонные станции, базовые станции сотовых систем связи или радиорелейные линии связи, то в качестве контроллеров можно использовать универсальные компьютеры. Управление при этом можно осуществлять через их встроенные порты компьютера: LPT, COM, USB или ETHERNET. В оперативную память таких компьютеров при включении питания заносится управляющая программа, которая и превращает универсальный компьютер в контроллер.

Использование универсального компьютера в качестве контроллера позволяет в кратчайшие сроки производить разработку новых систем связи, легко их модернизировать (путем простой смены программы), а также использовать готовые, выпускаемые крупными сериями (а значит, дешевые) блоки.

Однако контроллеры требуются не только для больших систем, но и для малогабаритных радиоэлектронных устройств, таких как радиоприемники, радиостанции, магнитофоны или сотовые телефонные аппараты. В малогабаритных устройствах предъявляются жесткие требования к стоимости, габаритам и температурному диапазону работы контроллеров. Этим требованиям не могут удовлетворить даже промышленные варианты универсального компьютера. Приходится вести разработку контроллеров на основе однокристальных ЭВМ, которые получили название **микроконтроллеры**.

Контроллеры требуются практически во всех предметах и устройствах, которые окружают нас. В качестве примера на рис. 1.5 показаны узлы автомобиля, в которых применяются микроконтроллеры.

Автомобильная и носимая радиостанции, в которых тоже применяются однокристалльные микроконтроллеры, показаны на рис. 1.6 и 1.7.

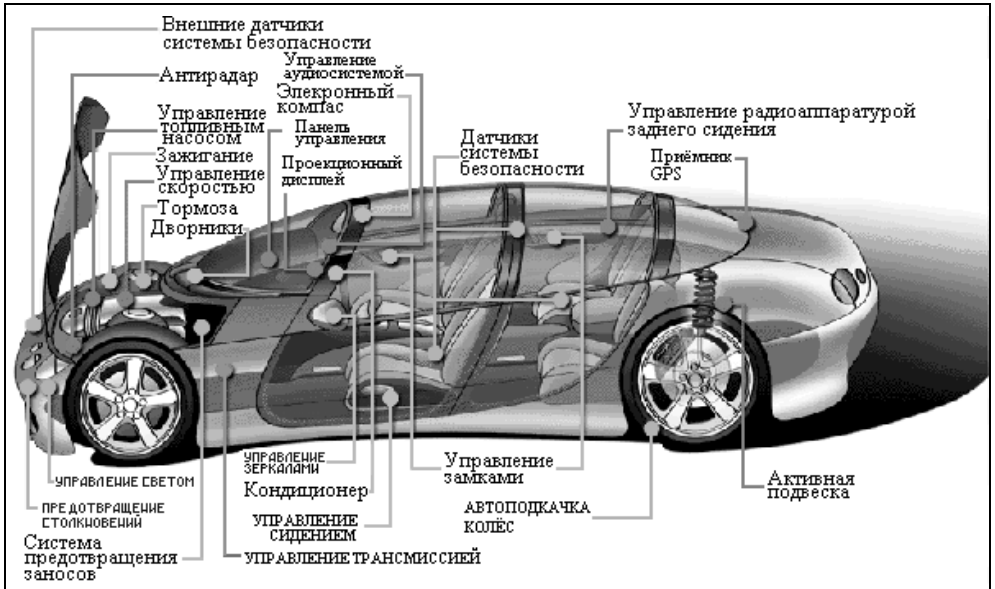


Рис. 1.5. Узлы автомобиля, в которых применяются микроконтроллеры



Рис. 1.6. Автомобильная радиостанция с применением микроконтроллеров



Рис. 1.7. Носимая радиостанция с применением микроконтроллеров

Как выглядит носимая радиостанция внутри, показывает фотография, приведенная на рис. 1.8. Практически во всех узлах радиостанции используются микроконтроллеры.

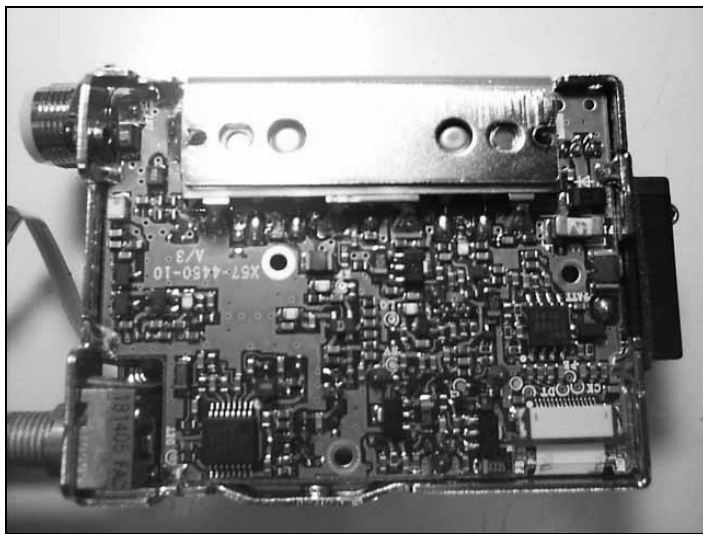


Рис. 1.8. Печатная плата приемопередатчика носимой радиостанции

Наиболее распространенными в настоящее время являются микроконтроллеры семейства MCS-51. Они выпускаются рядом фирм — производителей микросхем. Не менее распространенными в мире, но не в России являются микроконтроллеры фирмы Motorola. Это такие семейства 8-разрядных микроконтроллеров, как HC05, HC07, HC11 и многие другие. Пожалуй, не менее популярными являются микроконтроллеры AVR фирмы Atmel. Одно перечисление семейств микроконтроллеров может занять несколько страниц текста, поэтому ограничимся приведенным перечнем.

Сигнальные процессоры

Сигнальные процессоры, как следует из названия, предназначены для обработки сигналов. Важнейшей их задачей является реализация частотной фильтрации входного сигнала. При реализации этого алгоритма требуется обеспечить максимальное быстродействие. Для данного класса

микропроцессоров потребление энергии часто не является определяющим требованием.

Анализ алгоритмов цифровой обработки сигналов показывает, что основной вклад в вычислительные затраты вносит умножение отсчетов входного сигнала на весовые коэффициенты. Поэтому основным блоком для сигнального процессора является аппаратный умножитель.

Еще одной особенностью выполнения алгоритма фильтрации является возможная потеря точности при многократном суммировании результатов перемножения. Поэтому обычно в сигнальных процессорах используются многоразрядные перемножители, сумматоры и соответствующие им многоразрядные регистры-аккумуляторы. Обычно разрядность таких сумматоров составляет сорок двоичных разрядов.

При выполнении любого циклического алгоритма, а к этой категории, несомненно, относятся алгоритмы цифровой фильтрации, значительное время расходуется на организацию самого цикла. Требуется изменение счетчика циклов, проверка содержимого счетчика на равенство заданному значению, изменение содержимого указателей на текущий адрес памяти отсчетов сигнала цифрового фильтра и на текущий адрес памяти коэффициентов.

Внутренняя структура сигнальных процессоров построена так, что все перечисленные задачи выполняются за один машинный такт. Это позволяет значительно повысить алгоритмическое быстродействие сигнальных процессоров. Именно наличие модулей умножения с накоплением вместе с аппаратной поддержкой циклического выполнения алгоритма позволяет отнести микропроцессор к классу сигнальных процессоров.

Чрезвычайно важной для сигнального процессора является также возможность легко соединяться с микросхемами аналого-цифровых (АЦП) и цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). В ряде относительно дешевых сигнальных процессоров используются встроенные АЦП и ЦАП, но системы, построенные на таких микросхемах, обычно обладают средними характеристиками.

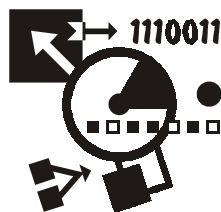
Первоначально сигнальные процессоры подключали модули АЦП или ЦАП через системную шину (такой подход сохраняется до сих пор для очень высоких скоростей обмена информацией), однако в дальнейшем наибольшее распространение получило подключение через универсальный синхронный последовательный порт. Наличие параллельных портов, в отличие от микроконтроллеров, не является обязательным для сигнальных процессоров.

Наиболее сильные позиции на рынке сигнальных процессоров в настоящее время занимают такие фирмы, как Analog Devices и Texas Instruments. Именно они предлагают в настоящее время наиболее производительные модели сигнальных процессоров. Не менее сильными являются позиции фирмы Motorola, но в нашей стране процессоры этого производителя менее распространены.

Итак, подведем итоги

Разнообразие микропроцессоров поражает, но все они построены по одинаковым принципам, которые будут рассмотрены в данной книге. При этом микропроцессоры будут рассматриваться на примере микроконтроллеров. Причем микроконтроллеров очень распространенного в настоящее время семейства — MCS-51. Однако прежде чем начать подробное изучение принципов работы с микропроцессорами, рассмотрим основы работы цифровых систем, частью которых являются микропроцессоры.

Глава 2



Цифровая техника

Итак, рассмотрев какие виды микропроцессоров бывают и для решения каких видов задач они применяются, можно приступить к решению вопроса — как же они устроены? Как уже говорилось, микропроцессорная техника является частью цифровой техники. Поэтому, не зная основ цифровой техники, невозможно понять, как работает микропроцессор.

Начнем с самых элементарных вопросов: из каких элементов строятся цифровые схемы и как они устроены? Затем научимся реализовывать на основе этих простейших элементов цифровые устройства любой сложности. Следует отметить, что в данной книге вы не получите обзора всего разнообразия цифровых устройств. Будут рассмотрены только те цифровые устройства, которые используются непосредственно в микропроцессорной технике.

В данной главе будут рассмотрены только сумматоры и устройства коммутации цифровых сигналов. Однако, при необходимости, можно и разобраться в оставшихся за рамками данной книги разделах цифровой техники, применив рассмотренные методы построения цифровых устройств.

Обычно любые устройства предназначены для преобразования входных сигналов в выходные. Свойства аналоговых схем описываются рядом общепринятых параметров (например, коэффициентом усиления и динамическим диапазоном) и характеристик (амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики).

Иначе обстоит дело с параметрами цифровых микросхем. Для идеализированных цифровых устройств коэффициент усиления не нормируется — он реализуется достаточным для того, чтобы сигнал на выходе не затухал.

И только! Логические уровни на входе и выходе цифровых микросхем одинаковы. Если логический элемент обладает запасом по коэффициенту усиления, то выходной сигнал просто ограничивается. Конкретное зна-

чение логических уровней зависит от напряжения питания цифровых микросхем и примененной схмотехники, но это не меняет принципов работы цифрового устройства.

Цифровые схемы наиболее полно описываются таблицей истинности. Таблица истинности позволяет поставить выходные сигналы в соответствие входным сигналам. Обычно каждый из выходных сигналов цифрового устройства зависит от нескольких входных сигналов этого цифрового устройства. Поэтому в таблице истинности перечисляются все возможные комбинации входных сигналов и записывают соответствующий каждой комбинации входных сигналов выходной сигнал.

Достаточно часто одним и тем же комбинациям входных цифровых сигналов соответствуют несколько выходных сигналов. Тогда для всех выходных сигналов записывается одна таблица истинности.

Для простейших цифровых логических элементов таблица истинности состоит из одного выходного и одного или двух входных сигналов. Рассмотрим эти элементы.

Простейшие логические элементы

Любые цифровые устройства строятся на основе простейших логических элементов: «НЕ», «ИЛИ», «И». Самым простым логическим элементом является инвертор (элемент «НЕ»), который работает в соответствии с табл. 2.1. Он просто изменяет значение входного сигнала на прямо противоположное. В качестве инвертора можно использовать обычный транзисторный усилитель, построенный по схеме с общим эмиттером или общим истоком. Схемы, позволяющие реализовать функцию логического инвертирования, изображены на рис. 2.1. На рис. 2.1, *а* приведена схема инвертора на обычном биполярном транзисторе, а на рис. 2.1, *б* приведена схема инвертора, выполненного на комплементарных МОП-транзисторах.

Таблица 2.1. Таблица истинности логического инвертора

Вход	Выход
0	1
1	0

Условное графическое обозначение инвертора на схемах не зависит от схмотехники, использованной для его реализации, оно приведено на

рис. 2.2. С этого момента инвертор будет изображаться исключительно в таком виде.

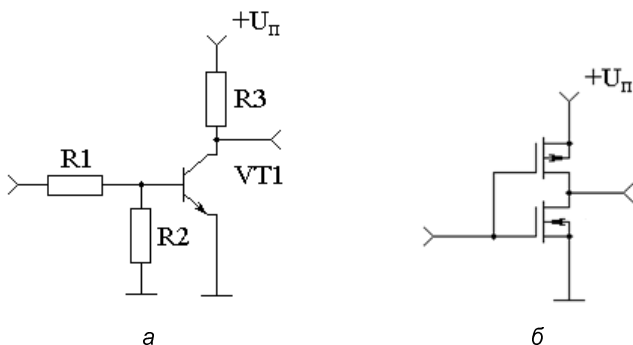


Рис. 2.1. Схемы, реализующие функцию логического инвертирования

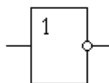


Рис. 2.2. Условное графическое обозначение инвертора

Следующий распространенный элемент цифровой техники реализует логическую операцию «И», однако чаще всего в качестве готовых микросхем существуют не отдельные схемы логического «И», а более сложные устройства, выполняющие одновременно две логические функции: «И» и «НЕ». Таблица истинности элемента, выполняющего логическую функцию «2И-НЕ», приведена в табл. 2.2.

Проще всего построить такой элемент на самых обыкновенных ключах, как это показано на рис. 2.3, а. В этой схеме ток будет протекать только в том случае, если оба ключа окажутся замкнутыми (будем считать, что такое их состояние достигается при управлении логической единицей). Это означает, что нулевой уровень на выходе схемы появится только при двух логических единицах на входе, т. е. приведенная схема реализует логическую функцию «2И-НЕ» (табл. 2.2). Точно таким же образом выполняется элемент «2И-НЕ» и в микросхемах, построенных на КМОП-транзисторах, только в качестве ключа используется транзистор. Схема

логического элемента «2И-НЕ», выполненного на комплементарных МОП-транзисторах, приведена на рис. 2.3, б.

Таблица 2.2. Таблица истинности схемы, выполняющей логическую функцию «2И-НЕ»

Вход X	Вход Y	Выход
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

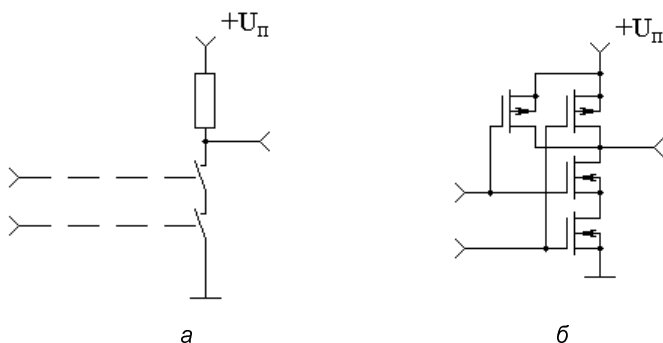


Рис. 2.3. Принципиальные схемы цифровых элементов, реализующих логическую функцию «2И-НЕ»

Условное графическое обозначение элемента, выполняющего логическую функцию «2И-НЕ», приведено на рис. 2.4, и с этого момента элементы, выполняющие данную функцию, будут изображаться именно в таком виде. Это обозначение не зависит от конкретной схемы построения цифрового элемента.

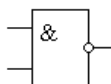


Рис. 2.4. Условное графическое обозначение цифрового элемента, выполняющего логическую функцию «И-НЕ»

Точно так же, как редко можно встретить отдельный элемент логического «И», практически не производятся отдельные элементы логического «ИЛИ». Чаще встречаются элементы «2ИЛИ-НЕ», таблица истинности которых приведена в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Таблица истинности цифрового элемента, выполняющего логическую функцию «2ИЛИ-НЕ»

Вход X	Вход Y	Выход
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Как и в предыдущем случае, воспользуемся для реализации элемента «2ИЛИ-НЕ» ключами. На этот раз соединим ключи параллельно. Схема, реализующая таблицу истинности табл. 2.3, приведена на рис. 2.5, а. Схема логического элемента «2ИЛИ-НЕ», выполненного на КМОП-транзисторах, показана на рис. 2.5, б. Как видно из приведенных схем, уровень логического нуля появится на выходе любой из этих схем, как только любой из ключей будет замкнут, т. е. приведенные схемы реализуют таблицу истинности табл. 2.3.

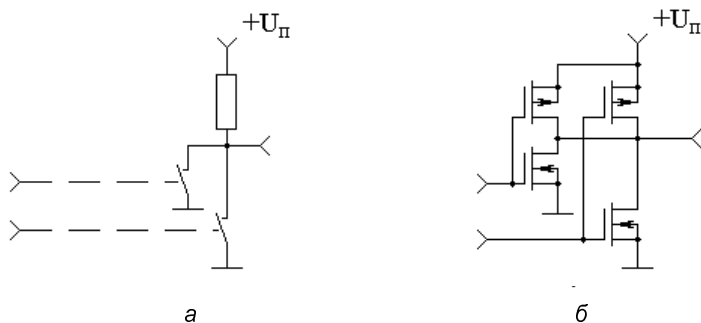


Рис. 2.5. Принципиальные схемы элемента, реализующего логическую функцию «2ИЛИ-НЕ»

Так как один и тот же логический элемент может быть реализован различными способами, для его изображения на схемах используется специальное условное графическое обозначение, приведенное на рис. 2.6.

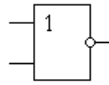


Рис. 2.6. Условное графическое обозначение элемента, выполняющего логическую функцию «ИЛИ-НЕ»

Принципы реализации цифровых устройств по произвольной таблице истинности

Любое цифровое устройство полностью описывается таблицей истинности. При построении сложных устройств с произвольной таблицей истинности используется сочетание простейших элементов: «И», «ИЛИ», «НЕ». Если устройство имеет несколько выходов, то формирование сигнала для каждого из них анализируется отдельно и для каждого из них строится отдельная схема.

Для реализации устройства можно воспользоваться как элементами «И», так и элементами «ИЛИ». В настоящее время наиболее распространены микросхемы, совместимые с ТТЛ, а в ТТЛ проще всего получить элементы «И», выходы которых объединены по функции «ИЛИ», поэтому рассмотрим способ реализации произвольной таблицы истинности, основанный на комбинации логических элементов «И-ИЛИ».

Для реализации таблицы истинности при помощи логических элементов «И» достаточно рассмотреть только те ее строки, которые содержат логические единицы в выходном сигнале. Строки, содержащие в выходном сигнале логический ноль, в построении схемы не участвуют. Каждая строка, содержащая в выходном сигнале логическую единицу, реализуется элементом логического «И» с количеством входов, совпадающим с количеством входных сигналов в таблице истинности.

Таблица 2.4. Произвольная таблица истинности

Входы				Выходы	
In0	In1	In2	In3	Out0	Out1
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0

Таблица 2.4 (окончание)

Входы				Выходы	
0	0	1	0	0	0
0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	0
0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	1	0
0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	0	0
1	0	1	1	0	0
1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	0	1

Входные сигналы, описанные в таблице истинности логической единицей, подаются на вход этого элемента непосредственно, а входные сигналы, описанные в таблице истинности логическим нулем, подаются на вход этого же элемента «И» через инверторы. Объединение сигналов с выходов элементов «И», реализующих отдельные строки таблицы истинности, производится при помощи элемента логического «ИЛИ». Количество входов элемента «ИЛИ» определяется количеством строк таблицы истинности, в которых в выходном сигнале присутствует логическая единица.

Для сокращения количества инверторов имеет смысл выделить их в отдельный блок, который сразу сформирует сигналы, инверсные по отношению к входным сигналам цифрового устройства. Теперь для реализации строки таблицы истинности достаточно соединить входы логического элемента «И» с соответствующими инвертированными и неинвертированными входными сигналами.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть необходимо реализовать устройство с таблицей истинности, приведенной в табл. 2.4. Для построения схемы, реализующей сигнал Out1, достаточно рассмотреть строки, выделенные жирным шрифтом. Эти строки реализуются микросхемой D2 на