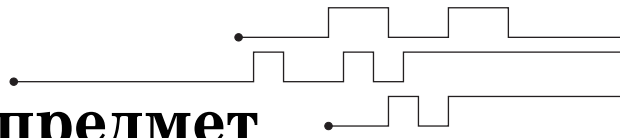


Глава 1

Введение в предмет



■ СОДЕРЖАНИЕ:

- 1.1. Численные представления
- 1.2. Цифровые и аналоговые системы
- 1.3. Цифровые системы счисления
- 1.4. Представление двоичных величин
- 1.5. Цифровые и логические схемы
- 1.6. Параллельная и последовательная передача информации
- 1.7. Память
- 1.8. Цифровые компьютеры

■ В ЭТОЙ ГЛАВЕ:

- различия между аналоговым и цифровым представлениями;
- преимущества и недостатки цифровой техники по сравнению с аналоговой;
- назначение аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП);
- основные характеристики двоичной цифровой системы;
- перевод двоичного числа в его десятичный эквивалент;
- счет в двоичной числовой системе;
- типичные цифровые сигналы и временные диаграммы сигналов;
- различие между параллельной и последовательной передачей информации;
- описание свойств памяти;
- описание основных компонентов цифровых компьютеров и их назначение;
- различие между аналоговыми микрокомпьютерами, микропроцессорами и микроконтроллерами.

■ ВВЕДЕНИЕ

В сегодняшнем мире термин *цифровой* стал частью нашего ежедневного общения благодаря повсеместному использованию цифровых систем и цифровой техники почти во всех областях жизни: в компьютерах, автоматике, робототехнике, в медицине и на производстве, транспорте, развлечениях, космических исследованиях и т.д. Вы находитесь в преддверии удивительного образовательного путешествия, на протяжении которого откроете фундаментальные принципы, понятия и операции, общие для всех цифровых систем, — от простейших ключей с двумя состояниями и до наиболее сложных компьютеров. В книге описаны принципы работы цифровых систем, а также даны практические рекомендации по анализу цифровых систем или их сбоям.

Начнем с представления базовых концепций, которые являются фундаментальной частью цифровых технологий; эти концепции будут расширены далее по ходу книги. Мы также представим некоторую терминологию, необходимую для ознакомления с новой областью знаний.

1.1. Численные представления

В науке, технологии, бизнесе и во многих других областях деятельности мы постоянно имеем дело с *величинами*. Величины измеряют, изучают, записывают, над ними производят арифметические операции, за ними наблюдают, т.е. используют тем или иным способом в большинстве физических систем. Важно, что при работе с различными величинами мы можем представить их значения точно и эффективно. Существуют два основных способа представления численных значений величин: **аналоговый** и **цифровой**.

Аналоговое представление

При **аналоговом представлении** величина отображается напряжением, током или движением стрелки измерительного прибора пропорционально значению данной величины. В качестве примера может служить автомобильный спидометр, в котором

отклонение стрелки прибора пропорционально скорости машины. Угловое положение стрелки отображает значение скорости автомобиля, при этом стрелка следит за любыми изменениями этой величины при разгоне или торможении автомобиля.

Другой пример — ртутный термометр, в котором высота столбика ртути пропорциональна температуре в комнате. Как только температура повышается или понижается, ртуть также пропорционально поднимается или опускается так, что ее уровень отображает значение температуры.

В качестве еще одного примера аналоговой величины можно привести обычный микрофон. В этом приборе выходное напряжение генерируется пропорционально амплитуде звуковых волн, попадающих в микрофон. Изменения выходного напряжения в точности повторяют изменения входного звука.

Перечисленные выше аналоговые величины имеют общую важную характеристику: *они могут варьироваться в непрерывном диапазоне значений*. Скорость автомобиля может иметь *любое* значение между 0 и, скажем, 100 километрами в час. Точно так же и выходной сигнал микрофона может иметь любое значение в диапазоне от 0 до 10 мВ (например, 1 мВ; 2,3724 мВ; 9,9999 мВ).

Цифровое представление

При **цифровом представлении** величины отображаются не пропорциональными величинами, а символами, которые называются *разрядами*. В качестве примера возьмем электронные часы, которые показывают время суток в форме десятичных разрядов, соответствующих часам и минутам (иногда и секундам). Как известно, время суток изменяется постоянно, что нельзя сказать о показаниях электронных часов, — они меняются с шагом 1 за минуту (или за секунду). Другими словами, такое цифровое представление времени суток изменяется *дискретными* шагами по сравнению со временем на аналоговых часах, где показания циферблата меняются непрерывно.

Главную разницу между аналоговыми и цифровыми величинами можно записать так:

Аналоговый = непрерывный

Цифровой = дискретный (шаг за шагом)

Благодаря дискретной природе цифрового представления нет никакой двусмысленности при чтении значения цифровой величины, тогда как значение аналоговой величины часто может иметь различные интерпретации.

Пример 1.1

Какие из приведенных ниже величин аналоговые, а какие цифровые?

- а) переключатель с десятью различными позициями;
- б) ток в электрической розетке;
- в) температура комнаты;
- г) песчинки на пляже;
- д) спидометр автомобиля?

Решение

- а) цифровая;
- б) аналоговая;
- в) аналоговая;
- г) цифровые, так как песчинки могут иметь только дискретные (целочисленные) значения, а не любое возможное значение в непрерывном диапазоне;
- д) аналоговая, если спидометр со стрелкой; цифровая, если он индикаторный.

Контрольные вопросы*

1. Кратко опишите основную разницу между аналоговыми и цифровыми величинами.

1.2. Цифровые и аналоговые системы

Цифровая система — это комбинация устройств, разработанных для обработки логической информации или физических величин, которые представлены в цифровой форме. Эти устройства чаще всего электронные, но могут быть механическими, магнитными или пневматическими. Наиболее распространенные цифровые системы в мире — это цифровые компьютеры и калькуляторы, цифровое оборудование по обработке аудио- и видеоданных, телефонные системы.

Аналоговая система содержит устройства, которые оперируют с физическими величинами, представленными в аналоговой форме. В аналоговой системе амплитуда выходного сигнала в колонке радиоприемника может иметь любое значение между нулем и максимальным пределом. Другие обычные аналоговые системы — это усилители звука, устройства записи и воспроизведения на магнитной ленте, обычный плавный (реостатный) выключатель света.

Преимущества цифровой техники

Все большее число приложений в электронике, как, впрочем, и большинство других технологий используют цифровую технику, чтобы осуществлять операции, которые когда-то выполнялись при помощи аналоговой техники. Основные причины роста популярности цифровых технологий заключаются в следующем.

1. *Цифровые системы, как правило, легче разрабатывать.* Так происходит потому, что используемые схемы принадлежат к *ключевым схемам*, в которых важны не точные значения напряжения или тока, а лишь диапазон (*высокий* или *низкий* сигнал), в который они попадают.
2. *Легко осуществить хранение информации.* Хранение осуществляется с помощью специальных устройств и схем, которые могут считывать цифровую информацию и сохранять ее сколь угодно долго. Запоминающие устройства сверхбольшой емкости могут хранить миллиарды бит информации на сравнительно малом физическом пространстве. Аналоговые устройства хранения информации, наоборот, имеют крайне ограниченные возможности.
3. *Большая точность.* Цифровые системы могут оперировать любым необходимым количеством десятичных знаков путем простого увеличения числа ключевых схем. В аналоговых системах точность обычно ограничена тремя или четырьмя знаками, потому что значения тока или напряжения непосредственно зависят от номиналов компонент схемы и подвержены влиянию случайных флуктуаций напряжения (шумов).
4. *Возможность запрограммировать действие.* Достаточно легко спроектировать цифровые системы, в которых работа контролируется набором хранящихся команд, или *программой*. Аналоговые системы также можно *программировать*, но разнообразие и сложность имеющихся в распоряжении операций строго ограничены.

* Ответы к контрольным вопросам приведены в конце той главы, к которой они относятся.

5. *Цифровые схемы менее подвержены шумам.* Паразитные флуктуации напряжения (шумы) не критичны для цифровых систем, потому что точные значения напряжения для них не столь важны (шум не настолько большой, чтобы нельзя было отличить *высокий* уровень сигнала от *низкого*).
6. *Большее количество схемотехнических решений может быть изготовлено на интегральных схемах (ИС).* Конечно, и аналоговая схемотехника выиграла от бурного развития ИС-технологий, но ее относительная сложность, а также использование компонентов, которые не могут быть эффективно интегрированы (высокоемкие конденсаторы, прецизионные резисторы, катушки индуктивности, трансформаторы), помешали аналоговым системам добиться такой же высокой степени интеграции.

Ограничения цифровой техники

У цифровой техники есть один важный недостаток:

Реальный мир в основном аналоговый.

Большинство физических величин аналоговые по своей природе — это именно те величины входных и выходных наблюдаемых сигналов, с которыми оперирует и которые контролирует система. В качестве примеров можно привести температуру, давление, координату, скорость, уровень жидкости, скорость потока и т.д. У нас вошло в привычку выражать эти величины в *цифровом* виде, например, когда мы говорим, что температура равна 64° ($63,8^\circ$, если требуется большая точность), то на самом деле мы делаем цифровое приближение аналоговой по своей сути величины.

Чтобы воспользоваться преимуществами цифровой техники при работе с аналоговыми входными и выходными сигналами, надо следовать трем следующим инструкциям:

1. Перевести реальные аналоговые входные сигналы в цифровую форму.
2. Обработать цифровую информацию.
3. Перевести цифровые выходные сигналы обратно в реальную аналоговую форму.

На рис. 1.1 показана блок-схема такого алгоритма для типичной системы контроля температуры. После измерения аналоговой температуры полученное значение конвертируется в цифровую величину с помощью **аналого-цифрового преобразователя (АЦП)**. Цифровая величина затем обрабатывается цифровыми устройствами, которые могут включать или не включать цифровой компьютер. Его цифровой выходной сигнал конвертируется обратно в аналоговую величину с помощью **цифро-аналогового преобразователя (ЦАП)**. Этот аналоговый выходной сигнал подается на контроллер, который выполняет некоторые действия по корректировке температуры.

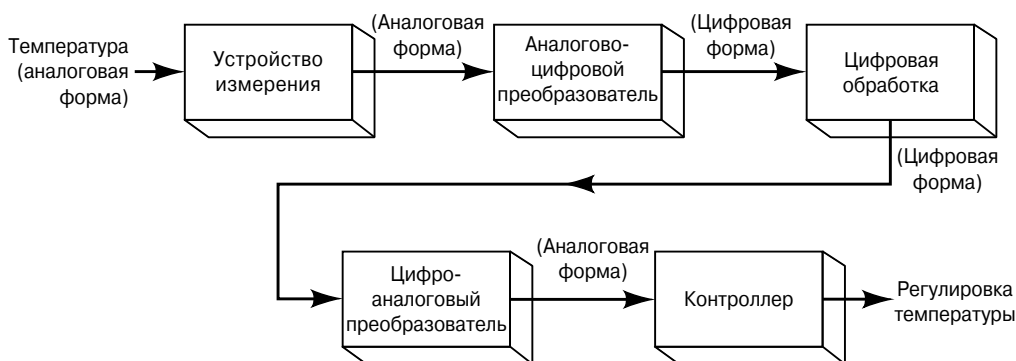


Рис. 1.1. Блок-схема системы контроля температуры, которая требует аналого-цифрового преобразования, для использования устройства цифровой обработки

Еще один наглядный пример преобразования между аналоговой и цифровой формами — аудиозапись. Компакт-диски (CD) завоевали индустрию звукозаписи благодаря гораздо более эффективным средствам для записи и воспроизведения музыки. Процесс состоит главным образом в следующем: (1) звуки инструментов и человеческий голос продуцируют аналоговый сигнал в микрофоне; (2) этот аналоговый сигнал конвертируется в цифровую форму с использованием аналого-цифрового преобразования; (3) цифровая информация хранится на поверхности компакт-диска; (4) во время воспроизведения проигрыватель компакт-дисков считывает цифровую информацию с поверхности диска и преобразовывает ее в аналоговый сигнал, который затем усиливается и подается на громкоговорители, используемые для прослушивания.

Потребность в преобразовании между аналоговой и цифровой формами информации можно рассматривать как недостаток, потому что аппаратура становится более сложной и дорогой. Другой фактор, который иногда также важен, — дополнительное время, необходимое для описанных выше преобразований. Однако во многих приложениях эти факторы компенсируются многочисленными преимуществами цифровой техники, так что преобразование между аналоговыми и цифровыми величинами стало в современных технологиях практически всеобщим.

В некоторых ситуациях, напротив, использование аналоговой техники проще и экономически оправдано. Например, процесс генерирования и поступления электричества в дома и офисы в основном осуществляется с помощью аналоговой схемотехники.

На практике очень часто можно видеть и цифровые, и аналоговые методы, используемые в одной и той же системе, для получения преимуществ каждой из них. В таких *гибридных* системах одна из наиболее важных задач на этапе разработки заключается в определении того, какие части системы будут аналоговыми, а какие цифровыми.

Цифровое будущее

Достижения в сфере цифровой технологии в течение трех последних десятилетий были феноменальными, но это только начало. Число областей применения цифровых систем продолжает расти, и, вероятно, что к тому моменту, когда вы прочитаете эти строки, некоторые из “технологий будущего” уже станут обычным явлением. Возможно, ваш автомобиль уже оснащен встроенным компьютером, который превращает приборную панель в центр беспроводной коммуникации, информации и навигации. Вы уже можете использовать голосовые команды для отсылки или получения электронной почты, вызова информации о ситуации на дорогах, проверки технического состояния машины, отправки факса, заказа еды в дорогу и просто переключе-

ния радиостанций или смены компакт-дисков — и все это без единого движения руками или отрыва внимания от дороги. Или, например, у хронически больного ребенка может быть вшитый в руку микропроцессорный датчик, который позволяет врачам следить за его пульсом, кровяным давлением, температурой, активностью иммунной системы и другими биологическими данными независимо от того, где находится ребенок. Данные могут отслеживаться и просматриваться докторами или медсестрами по радиосканеру, расположенному отдельно (как делал, например, доктор Мак-Кой из сериала StarTrek) — лечение назначается так быстро, как только в нем возникает необходимость и с минимальной задержкой.

Если эти плоды цифровой эры еще не материализованы, не волнуйтесь — они близко... вместе с еще большими достижениями такого же рода. Уже скоро ваши записки или сержки смогут взаимодействовать при помощи низкоорбитальных спутников и иметь большие вычислительные мощности, чем ваш сегодняшний домашний или офисный компьютер. Телефоны смогут получать, сортировать и, возможно, отвечать на входящие звонки так же, как это делают высококлассные секретари. Дети в школах смогут делиться мыслями со сверстниками и собирать информацию по всему миру. Когда вы захотите посмотреть определенную телевизионную программу в удобное для вас время, вся информация, которую вы увидите, будет передана в ваш дом за одну секунду и сохранена в памяти вашего телевизора или компьютера. Читая о какой-либо местности, расположенной в 5000 километрах от дома, вы сможете физически ощутить там свое присутствие. И это лишь верхушка айсберга!

Другими словами, цифровая технология не только продолжит свое сверхскоростное вторжение во все области нашей жизни, но и прорубит окно туда, где мы еще не были даже в мечтах. Поэтому сейчас наша первоочередная задача — узнать как можно больше о цифровой технологии и, уверенно чувствуя себя в седле, наслаждаться поездкой.

Контрольные вопросы

1. В чем преимущества цифровой техники по сравнению с аналоговой?
2. Каковы основные ограничения при использовании цифровой техники?

1.3. Цифровые системы счисления

Цифровые технологии используют разнообразные системы счисления. Наиболее распространены десятичная, двоичная, восьмеричная и шестнадцатеричная. Десятичная система счисления, естественно, наиболее знакома для нас, потому что мы пользуемся ею каждый день. Изучение некоторых характеристик десятичной системы поможет лучше понять другие системы счисления.

Десятичная система

Десятичная система состоит из 10 цифр-символов: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9; используя их в качестве *разрядов* числа, можно выразить любую величину. Десятичная система, также называемая системой *по основанию 10*, развилась естественным путем (10 цифр — 10 пальцев у человека; кстати, слово “разряд” (digit) означает “палец” по-латыни).

Десятичная система — это *позиционная система*, в которой значение разряда зависит от его положения. Например, рассмотрим десятичное число 453. Цифра 4 представляет собой четыре *сотни*, 5 — пять *десятков*, а 3 — три *единицы*. По существу, 4 несет на себе основной вес всех трех разрядов; оно является *старшим значащим разрядом (СЗР)*. Число 3 несет наименьший вес и называется *младшим значащим разрядом (МЗР)*.

Рассмотрим другой пример — число 27,35. Это число равно 2 десяткам плюс 7 единиц плюс 4 десятым плюс 5 сотым, или $2 \times 10 + 7 \times 1 + 3 \times 0,1 + 5 \times 0,01$. Десятичная точка (запятая в русском языке) используется для того, чтобы отделить целую часть числа от дробной.

Говоря более строго, различные позиции относительно десятичной точки несут вес, выражаемый степенью 10. Это показано на рис. 1.2, где для примера приведено число 2745,214. Десятичная запятая отделяет положительные степени 10 от отрицательных. Число 2745,214 равно $(2 \times 10^{+3}) + (7 \times 10^{+2}) + (4 \times 10^{+1}) + (5 \times 10^{+0}) + (2 \times 10^{-1}) + (1 \times 10^{-2}) + (4 \times 10^{-3})$.

Таким образом, любое число — это сумма произведений каждого разряда на его позиционную величину.

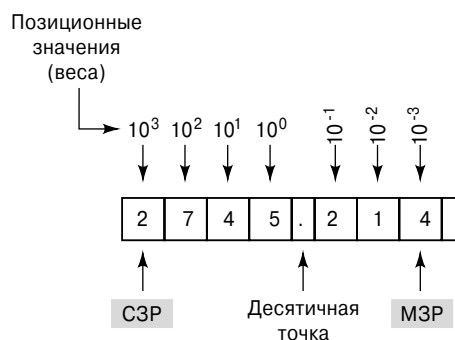


Рис. 1.2. Значение положения величины в десятичной системе как степени 10

Десятичный счет

Счет в десятичной системе начинается с 0 в позиции единиц и каждый символ (разряд) увеличивается до 9. Затем прибавляем 1 к следующей более старшей позиции и снова начинаем счет с 0 на первой позиции (рис. 1.3). Этот процесс продолжается до 99. Затем прибавляем 1 к третьей позиции и начинаем заново с 0 на двух первых позициях. Та же схема используется непрерывно до любой величины, которую мы хотим посчитать.

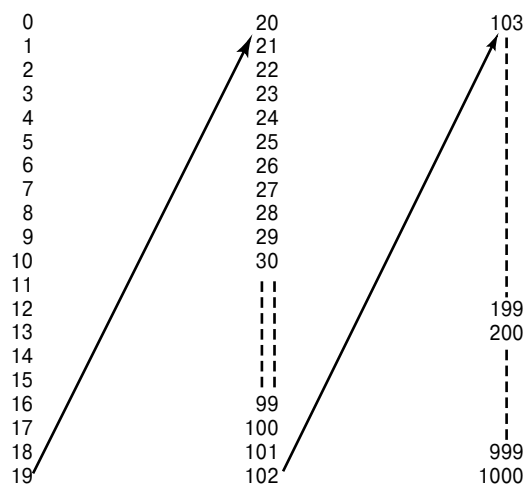


Рис. 1.3. Десятичный счет

Важно заметить, что при десятичном счете позиция единиц (младший значащий разряд) меняется с каждым шагом счета, позиция десятков меняется вверх каждые 10 шагов, сотен — каждые 100 шагов и т.д.

Другая характеристика десятичной системы заключается в том, что, используя только два десятичных знакоместа, можно просчитать $10^2 = 100$ различных чисел (от 0 до 99)*, с помощью трех знакомест можно просчитать 1000 чисел (от 0 до 999) и т.д. Таким образом, с помощью N знакомест можно просчитать 10^N различных чисел начиная с нуля. Максимальным числом при этом всегда будет $10^N - 1$.

Двоичная система

К сожалению, десятичная система счисления не применяется при реализации цифровых систем. Очень сложно, в частности, спроектировать электронное оборудование таким образом, чтобы оно работало с десятью различными уровнями напряжения (каждый представлял бы один десятичный символ от 0 до 9). С другой стороны, очень легко спроектировать простую и точную электронную схему, которая бы работала только с двумя уровнями напряжения. По этой причине почти каждая цифровая система использует двоичную (по основанию 2) систему счисления в качестве базовой системы счисления для всех операций, хотя часто в сочетании с двоичной применяются и другие системы счисления.

В двоичной системе существует всего два символа или возможных значений разряда — 0 и 1, но даже при этом система с основанием 2 может быть использована для представления любой величины, выраженной в десятичной или другой системе. Однако чтобы выразить данную величину, потребуется большее количество двоичных разрядов.

Все вышеизложенные замечания, касающиеся десятичной системы, применимы и к двоичной системе. Двоичная система также позиционная, т.е. каждый двоичный разряд имеет свое собственное значение или вес, выраженный степенью 2. (рис. 1.4). Позиции слева от двоичной точки (аналога десятичной точки) являются положительными степенями 2, а места справа — отрицательными. На рисунке показано двоичное число 1011,101. Чтобы найти его эквивалент в десятичной системе, нужно взять сумму произведений каждого значения разряда (0 и 1) и его позиционного значения:

* Ноль тоже считается числом.

$$1011,101_2 = (1 \times 2^3) + (0 \times 2^2) + (1 \times 2^1) + (1 \times 2^0) + (1 \times 2^{-1}) + (0 \times 2^{-2}) + (1 \times 2^{-3}) = 8 + 0 + 2 + 1 + 0,5 + 0 + 0,125 + 11,625_{10}$$

Заметьте, что здесь нижние индексы (2 и 10) использованы, чтобы показать основание, в котором выражено данное число. Такая договоренность используется, чтобы избежать ошибки при работе с более чем двумя системами счисления.

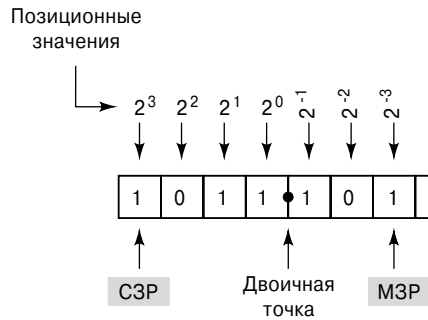


Рис. 1.4. Значения двоичных позиций в виде степеней 2

В двоичной системе термин *двоичный разряд* часто обозначается термином *бит*, который с этого момента будет использоваться в книге. Таким образом, в числе, показанном на рис. 1.4, четыре бита слева от двоичной точки представляют его целую часть, а три бита справа от точки — его дробную часть. Самый левый бит — старший значащий бит (СЗБ), у него наибольший вес, а младшим значащим битом (МЗБ) выступает самый правый бит с наименьшим весом. Старший значащий бит здесь имеет вес 2^3 , а младший значащий бит — 2^{-3} .

Двоичный счет

Имея дело с двоичными числами, мы обычно ограничиваемся определенным числом бит. Это ограничение обусловлено схемотехникой, используемой для представления двоичных чисел. Рассмотрим порядок двоичного счета на примере четырехбитовых двоичных чисел.

Последовательность действий (показана на рис. 1.5) начинается, когда во всех битах стоят 0; это положение называется *нулем отсчета*. Для каждого последующего счета разряд единиц (2^0) *переключается*, т.е. меняет свое двоичное значение на противоположное. Всякий раз, когда бит единиц меняется с 1 на 0, переключается (меняет свое состояние) разряд двоек (2^1); когда меняется с 1 на 0 бит двоек, переключается (меняет свое состояние) разряд четверок (2^2); при переключении с 1 на 0 бита четверок переключается разряд восьмерок (2^3). Этот процесс продолжается до старших разрядов, если двоичное число имеет больше, чем четыре бита.

Веса →	$2^3=8$	$2^2=4$	$2^1=2$	$2^0=1$	Десятичный эквивалент
	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	1
	0	0	1	0	2
	0	0	1	1	3
	0	1	0	0	4
	0	1	0	1	5
	0	1	1	0	6
	0	1	1	1	7
	1	0	0	0	8
	1	0	0	1	9
	1	0	1	0	10
	1	0	1	1	11
	1	1	0	0	12
	1	1	0	1	13
	1	1	1	0	14
	1	1	1	1	15

↑ МЗБ

Рис. 1.5. Порядок двоичного счета

Важная характеристика последовательности операций при двоичном счете показана на рис. 1.5. Бит единиц (младший значащий бит) меняется или с 0 на 1 или с 1 на 0 при *каждом* отсчете. Второй бит (разряд двоек) остается 0 на протяжении двух отсчетов, а потом 1 на протяжении тех же двух отсчетов, затем опять 0 и т.д. Третий бит (разряд четверок) остается 0 на протяжении четырех отсчетов, потом на протяжении четырех отсчетов остается в состоянии 1 и т.д. Четвертый бит (разряд восьмерок) остается 0 уже восемь отсчетов, потом восемь отсчетов — равным 1. Если продолжать считать дальше и добавит больше разрядов, эта зависимость продолжалась бы — 0 и 1 попеременно менялись бы с частотой 2^{N-1} отсчетов. Например, при использовании кода из пяти бит пятый бит менял бы свое значение каждые шестнадцать отсчетов: шестнадцать 0, потом шестнадцать 1 и т.д.

Для двоичной системы, как и для десятичной, тоже справедливо утверждение, что при использовании N бит или разрядов проходит 2^N отсчета. Например, для числа из двух бит пройдет $2^2 = 4$ отсчета (от 00_2 до 11_2), а для числа из четырех бит пройдет $2^4 = 16$ отсчетов (от 0000_2 до 1111_2) и т.д. Последний отсчет всегда будет представлен всеми единицами и будет равен $2^N - 1$ в десятичном представлении. При использовании четырех бит, например, последний отсчет будет $1111_2 = 2^4 - 1 = 15_{10}$.

Пример 1.2

Какое максимальное число можно представить, используя восемь бит?

Решение

$$2^N - 1 = 2^8 - 1 = 255_{10} = 11111111_2.$$

На данном этапе было изложено краткое введение в систему двоичных чисел и их соотношение с десятичными числами. В следующих главах книги эти две системы, а также некоторые другие рассматриваются более детально.

Контрольные вопросы

1. Назовите десятичный эквивалент числа 1101011_2 .

2. Какое следующее двоичное число идет за 10111_2 при двоичном счете?
3. Какое максимальное десятичное значение можно выразить, используя 12 бит?

1.4. Представление двоичных величин

В цифровых системах обрабатываемая информация обычно переводится в двоичную форму. Двоичные величины могут быть представлены любым устройством, которое имеет только два рабочих состояния или возможных режима. Например, у переключателя только два состояния: включен или выключен. Произвольно сопоставив включенному переключателю двоичный 0 и выключенному — двоичную 1, можно представлять любое двоичное число так, как показано на рис. 1.6, а, где состояния различных переключателей показывают число 10010_2 .

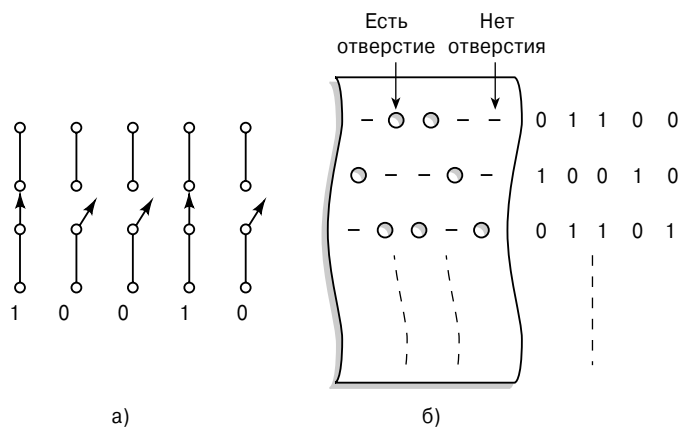


Рис. 1.6. а) Включенные и выключенные переключатели; б) отсутствие или наличие отверстий в бумажной ленте представляет, соответственно, нули и единицы

Другой пример показан на рис. 1.6, б. Здесь отверстия, пробитые в бумаге, используются для представления двоичных чисел. Пробитое отверстие является двоичной единицей, а отсутствие отверстия — двоичным нулем.

Существует множество других устройств, имеющих только два рабочих состояния, т.е. они могут работать только в двух противоположных режимах. Среди этих устройств можно назвать электрические лампочки (светящиеся или темные), диоды (есть проводимость или нет проводимости), реле (включенные или выключенные), транзисторы (в режиме отсечки или режиме насыщения), фотоэлементы (освещенные или затемненные), термостаты (открытые или закрытые), механические тиски (сжатые или раскрученные), участки на магнитном диске (намагниченные или размагниченные).

В электронных цифровых системах двоичная информация отображается с помощью напряжений (или токов) на входах или выходах различных схем. Обычно двоичные нуль и единица представляются двумя номинальными уровнями напряжения. Например, нуль вольт (0 В) может представлять двоичный 0, а +5 В может представлять двоичную 1. В реальных системах ввиду разнообразия схем 0 и 1 представляются диапазонами напряжений. Этот принцип показан на рис. 1.7, а. Напряжения от 0

до 0,8 В представляют 0, а напряжения от 2 до 5 В представляют 1. Все входные и выходные сигналы обычно попадают в один из этих диапазонов значений, не учитывая промежуточного перехода из одного диапазона в другой.

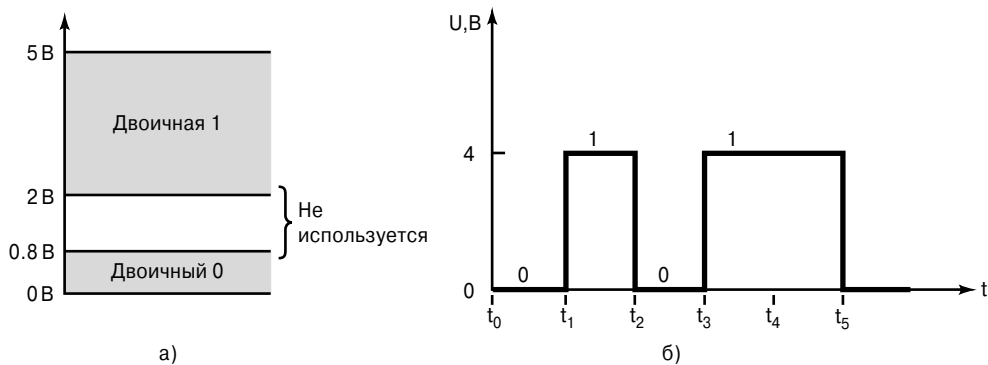


Рис. 1.7. а) Типичное распределение напряжений в цифровой системе; б) типичная временная диаграмма цифрового сигнала

Теперь становится очевидным еще одно отличие цифровых и аналоговых систем. В цифровых системах точное значение напряжения *не* важно; например, если присвоить напряжениям такие значения, как на рис. 1.7, а, то напряжение 3,6 В будет означать ту же самую величину, что и напряжение 4,3 В. В аналоговых системах, напротив, точное значение *важно*. Например, если аналоговое напряжение пропорционально температуре, измеренной датчиком, то 3,6 В будет представлять совсем другую температуру, чем 4,3 В. Другими словами, значение напряжения здесь несет *необходимую* информацию. Эта характеристика означает, что проектирование точных аналоговых устройств в общем более сложное по сравнению с цифровыми вследствие такого различного влияния на точные значения напряжений номиналов компонент, температуры, шумов (случайных флуктуаций напряжения).

Цифровые сигналы и временные диаграммы

На рис. 1.7, б изображен типичный цифровой сигнал и его распределение во времени. Эта зависимость напряжения от времени (t) называется **временной диаграммой**. Горизонтальная шкала (время) размечена с равными интервалами начиная с t_0 , затем t_1, t_2 и т.д. На приведенной временной диаграмме сигнал начинается с 0 В (двоичный 0) в момент t_0 , и остается на этом уровне до момента t_1 . В момент t_1 сигнал делает резкий переход (скачок) до 4 В (двоичная 1). В момент t_2 он уменьшается до 0 В. Такие же переходы происходят в моменты t_3 и t_5 . Обратите внимание, что в момент t_4 сигнал не изменяется, а остается на уровне 4 В от t_3 до t_5 .

На этой временной диаграмме переходы показаны вертикальными линиями, т.е. мгновенными, хотя на самом деле это не так. Во многих ситуациях время переключения оказывается настолько коротким по сравнению с периодами между переключениями, что его можно условно свести до вертикальной линии на диаграмме. Позже мы столкнемся с ситуациями, в которых придется показать переключения более строго — на расширенной временной шкале.

С помощью временных диаграмм можно показать, как меняются цифровые сигналы во времени, а также определить отношение между двумя или несколькими сигналами в одной и той же схеме или системе. Показывая один или несколько цифровых сигналов на *осциллографе* или на *анализаторе логических состояний*, можно сравнить эти сигналы с ожидаемыми для них временными диаграммами. Это очень важно при исследовании схем или поиске неполадок в цифровых системах.

1.5. Цифровые и логические схемы

Цифровые схемы проектируются для того, чтобы генерировать выходные напряжения, попадающие в диапазоны, назначенные для 0 и 1, как, скажем, на рис. 1.7. Цифровые схемы разрабатываются таким образом, чтобы уверенно различать входные напряжения по назначенным для 0 и 1 диапазонам. Это значит, что цифровая схема реагирует одинаково на все входные напряжения, попадающие в диапазон нулевых значений; и точно так же она не различает входные напряжения, лежащие в диапазоне, назначенном для единицы.

Этот принцип представлен на рис. 1.8. — типичная цифровая схема показана с входным сигналом v_i и выходным v_o . Выходной сигнал используется для двух различных форм входного сигнала. Обратите внимание, что сигнал v_o одинаков в обоих случаях, потому что входные сигналы хотя и отличаются точными значениями напряжений, но имеют одинаковые двоичные значения.

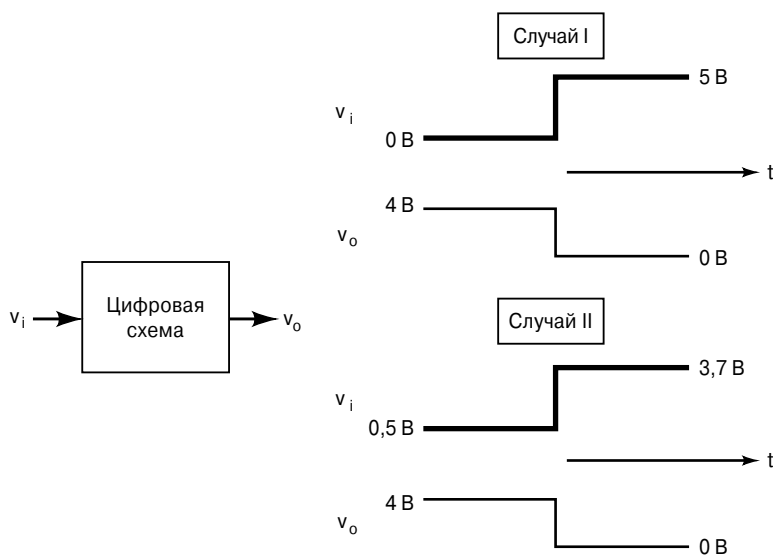


Рис. 1.8. Цифровая схема реагирует на двоичное значение входного сигнала (0 или 1), а не на фактическое значение напряжения

Логические схемы

Принцип, которому подчиняется реакция цифровой схемы на входной сигнал, называется *логикой* схемы. Каждый тип цифровой схемы следует определенному набору правил, благодаря чему цифровые схемы также называют **логическими схемами** (в книге используются оба этих термина). В главе 3 понятие "логика схемы" раскрыто более детально.

В книге представлены все типы логических схем, используемых в цифровых системах в настоящее время. Сначала внимание уделяется только логическим операциям, которые осуществляют схемы, т.е. взаимосвязи между входными и выходными сигналами. Внутренняя работа логической схемы рассматривается после основательного разбора логических функций.

Цифровые интегральные схемы

Почти все цифровые схемы, используемые в современных цифровых системах, являются интегральными схемами (ИС). Значительное разнообразие логических интегральных схем дало возможность конструировать сложные цифровые системы, меньшие по размерам и более надежные, чем их аналоги на дискретных элементах.

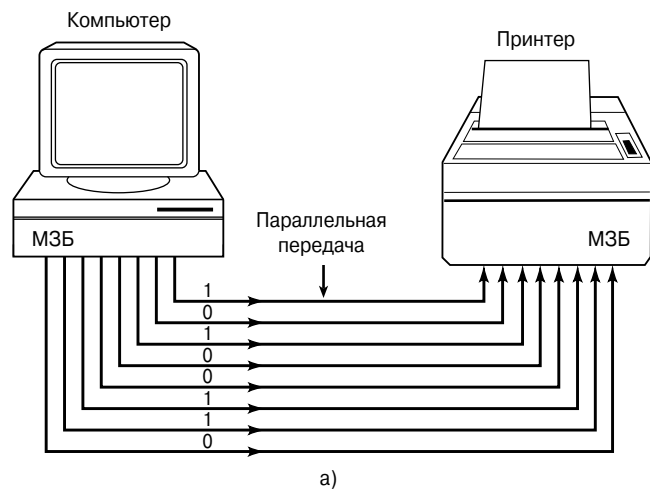
В производстве цифровых ИС используется несколько технологий изготовления интегральных схем, наиболее распространены ТТЛ, КМОП и n-канальные МОП-технологии, ЭСЛ. Каждая из них отличается по типу схемотехнических инструментов, используемых при осуществлении логических операций. Например, ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика) использует в качестве основного элемента биполярный транзистор, а КМОП (комплементарная металл-оксидная полупроводниковая логика) использует канальный полевой униполярный МОП-транзистор (MOSFET) в режиме обогащения. Мы изучим различные ИС-технологии, их характеристики, а также сравним их преимущества и недостатки до того, как будут представлены основные типы логических схем.

Контрольные вопросы

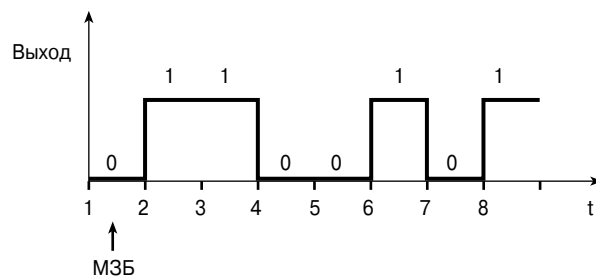
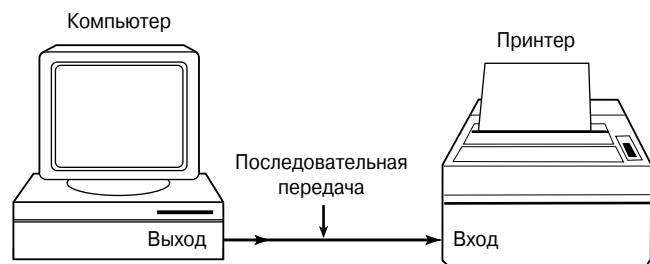
1. Проверьте истинность высказывания. Точное значение входного напряжения является критическим параметром для цифровой схемы.
2. Может ли цифровая схема выдавать одинаковое выходное напряжение для различных значений входных напряжений?
3. Цифровая схема также может называться _____ схемой.
4. График, показывающий изменение одного или нескольких цифровых сигналов во времени, называется _____.

1.6. Параллельная и последовательная передача информации

Одна из наиболее распространенных операций, выполняемых цифровой системой, — это передача информации из одного места в другое. Информацию можно передавать на расстояние от нескольких миллиметров (на плате той же схемы) до многокилометровых пространств, когда оператор компьютерного терминала связывается с компьютером в другом городе. Передаваемая информация имеет двоичную форму и обычно представляется в виде напряжений на выходе передающей схемы, присоединенной ко входу приемной схемы. На рис. 1.9 показаны два основных метода передачи цифровой информации: **параллельный** и **последовательный**.



а)



б)

Рис. 1.9. а) Параллельная передача использует по одной линии связи на каждый бит, при этом все биты передаются одновременно; б) последовательная передача использует только одну линию связи, так что каждый бит передается последовательно (по одному за единицу времени)

На рис. 1.9, а показано, как передается с компьютера на принтер двоичное число 10100110 при использовании *параллельной передачи*. Каждый бит двоичного числа представлен в виде одного из выходных сигналов компьютера и присоединен к соответствующему входу принтера, так что все восемь бит передаются одновременно (параллельно).

На рис. 1.9, б показано, что при использовании *последовательной передачи* между компьютером и принтером существует только одна линия связи. С выхода компь-

ютера поступает цифровой сигнал, уровень напряжения которого изменяется через разные промежутки времени соответственно передаваемому двоичному числу. Иными словами, за единицу времени на вход принтера передается только один бит (последовательно). Сопроводительная временная диаграмма объясняет, как изменяется уровень сигнала во времени. Обратите внимание, что сначала передается младший значащий бит — это типично для последовательной передачи.

Зачастую требуется найти компромисс между параллельной и последовательной передачей — между скоростью и простотой схемы. Передача двоичных данных из одной части цифровой схемы в другую осуществляется быстрее с помощью параллельной передачи, так как все биты передаются одновременно, тогда как при последовательной передаче только по одному за единицу времени. Однако с другой стороны, параллельная передача требует больше линий связи между передатчиком и приемником двоичных данных. Другими словами, параллельная передача быстрее, а последовательная требует меньшего количества линий связи. В дальнейшем мы еще не раз затронем вопрос сравнения параллельного и последовательного методов передачи двоичной информации.

Контрольные вопросы

1. Опишите преимущества параллельного и последовательного методов передачи двоичной информации.

1.7. Память

В большинстве устройств или схем сигнал на выходе при подаче входного сигнала изменяется в зависимости от входного, а когда входной сигнал прекращается — выходной возвращается к первоначальному состоянию. Такие схемы не демонстрируют свойства *памяти*, поскольку их выходные сигналы возвращаются в нормальное состояние. Однако в цифровой схемотехнике определенные типы устройств и схем обладают памятью. Когда на такую схему поступает входной сигнал, выходной сигнал также меняется, но при этом он остается в новом состоянии даже после прекращения входного сигнала. Это свойство сохранять отклик на кратковременное входное возмущение называется *памятью*. На рис. 1.10 показана работа схемы с памятью и без нее.

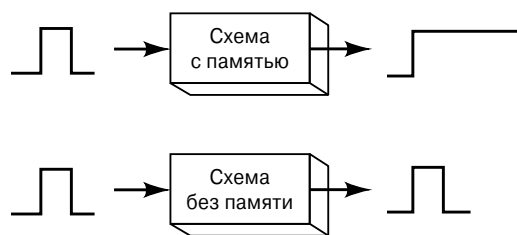


Рис. 1.10. Сравнение работы схем с памятью и без нее

Устройства и схемы памяти играют важную роль в цифровых системах, потому что они являются средством хранения двоичных чисел, как временного, так и постоянного, а также способны изменять хранящуюся информацию в любое время. О разнообразных элементах памяти, магнитных и оптических, а также использующих электронные схемы-защелки (регистры-защелки и триггеры), читатель узнает позже.

1.8. Цифровые компьютеры

Цифровая техника внедрилась в бесчисленное количество технологий, но область автоматических **цифровых компьютеров** является, безусловно, наиболее заметной и расширяющейся. Несмотря на то, что цифровые компьютеры оказывают влияние на все стороны нашей жизни, большинство людей вряд ли точно знают обо всех возможностях компьютера. Проще говоря, *компьютер — это система аппаратного обеспечения, осуществляющая арифметические операции, обрабатывающая данные (обычно в двоичной форме) и принимающая решение.*

В основном человек может выполнять все то, что делает компьютер, но компьютеры работают с гораздо большими скоростями и точностью. И это несмотря на тот факт, что они осуществляют все операции по одному шагу за единицу времени (такт). Если, например, человек может, взяв список из 10 чисел, найти их сумму сразу, располагая числа одно за другим и складывая их поразрядно, то компьютер будет складывать числа только по два, так что на ту же самую операцию ему потребуется девять шагов. Однако тот факт, что компьютеру требуется только несколько наносекунд на каждый шаг, легко компенсирует этот недостаток.

Компьютер работает быстрее и точнее человека, но, в отличие от нас, он требует полного набора инструкций (команд), которые бы указывали *точно*, что делать на каждом шагу. Этот набор инструкций называется **программой** и подготавливается одним или несколькими операторами для любой работы, выполняемой компьютером. Программы размещаются в запоминающем устройстве компьютера в виде двоичного кода, где каждая команда имеет свой уникальный код. Компьютер считывает коды команд из памяти *по одному за такт* и осуществляет действие, вызываемое кодом.

Основные элементы компьютера

Существует несколько типов компьютерных систем, причем отдельно взятый тип можно разбить на несколько функциональных устройств. Каждое из них осуществляет специфические операции, и при выполнении инструкций, заданных программой, все они функционируют вместе. На рис. 1.11 изображены пять главных функциональных элементов цифрового компьютера и их взаимодействие. Сплошными линиями показан поток данных и информации. Пунктирными линиями — поток управляющих и синхронизирующих сигналов.

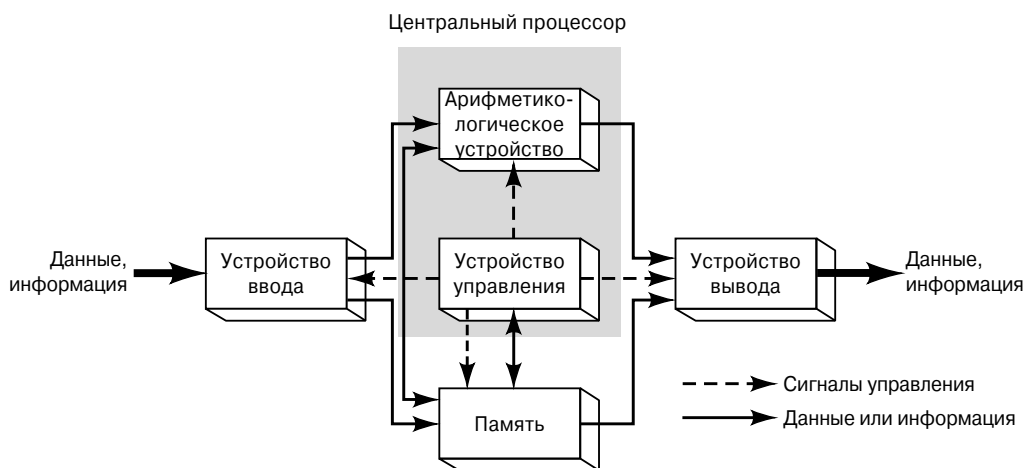


Рис. 1.11. Функциональная схема цифрового компьютера

Основные функции каждого из компонентов описаны ниже.

1. **Устройство ввода.** Через это устройство в компьютерную систему и запоминающее устройство подаются полный набор команд и данные для их хранения. Информация обычно поступает в устройство ввода с клавиатуры или диска.
2. **Запоминающее устройство.** Память хранит команды и данные, полученные от устройства ввода. Она также хранит результаты арифметических операций, полученные от арифметического устройства. Запоминающее устройство снабжает информацией устройство вывода.
3. **Устройство управления.** Это устройство извлекает команды из запоминающего устройства по одному за такт и расшифровывает их, а затем отправляет соответствующие сигналы во все другие устройства для выполнения конкретной команды.
4. **Арифметико-логическое устройство.** Все арифметические расчеты и логические операции осуществляются именно в этом устройстве, которое затем отправляет результаты в запоминающее устройство для хранения.
5. **Устройство вывода.** Это устройство извлекает данные из запоминающего устройства и распечатывает, отображает или каким-то другим способом представляет информацию оператору (либо руководит процессом в случае вычислительной машины для управления технологическими процессами).

Центральное процессорное устройство

На схеме (рис. 1.11) показано устройство управления и арифметико-логическое устройство, которые часто рассматриваются как одно целое и называются **центральным процессором (ЦП)**. ЦП содержит весь набор схем для вызова, а также интерпретации команд, управления и осуществления различных операций, вызванных командами.

Типы компьютеров

Все компьютеры состоят из основных частей, описанных выше, но могут различаться как размерами, быстродействием, емкостью памяти, вычислительной мощностью, так и другими характеристиками. Компьютеры часто классифицируют по физическому размеру, что обычно, хотя и не всегда, является показателем их относительных способностей. Три основных группы, от самых маленьких до самых больших, составляют: микрокомпьютеры, миникомпьютеры (рабочие станции) и большие ЭВМ. Микрокомпьютеры становятся все более и более мощными, поэтому грань между ними и миникомпьютерами стала довольно размытой и уже различают теперь только два типа компьютеров: маленькие, которые стоят в офисе, на столе или располагаются просто на коленях, и большие, размер которых не позволяет разместить их подобным образом. В этой книге мы будем иметь дело преимущественно с микрокомпьютерами.

Микрокомпьютер — самая маленькая разновидность компьютеров. Обычно микрокомпьютер состоит из нескольких плат ИС и включает **микропроцессор**, память, платы интерфейса ввода-вывода для совмещения с устройствами ввода-вывода: клавиатурой, видеодисплеем, принтером и дисковыми накопителями. Микрокомпьютеры появились как результат огромного прогресса в технологии изготовления ИС, позволившего размещать все больше и больше цифровых схем на маленьком чипе. Чип с микропроцессором, например, содержит как минимум все те схемы, которые составляют в компьютере центральный процессор — устройство управления и арифметико-логическое устройство. Другими словами, микропроцессор — это “ЦП на одном чипе”.

Большинство из нас знакомы с микрокомпьютерами общего назначения, такими как IBM PC и его клоны, или Apple Macintosh, используемыми дома и в офисах. Эти микрокомпьютеры могут работать с широким спектром задач в зависимости от уста-

новленного на них программного обеспечения. Существует более узкоспециализированный тип микрокомпьютеров, который называется **микроконтроллером** и не является компьютером общего назначения. Скорее он спроектирован для использования в специализированном или встроенном контроллере, помогающем отслеживать и контролировать действия машины, оборудования или процесса. Микроконтроллеры — это микрокомпьютеры, потому что они, как и ЦП, используют микропроцессор, но микроконтроллеры намного меньше микрокомпьютеров общего назначения, поскольку они взаимодействуют с намного меньшими устройствами ввода-вывода. Фактически, некоторые из этих устройств ввода-вывода (как и память) располагаются на том же чипе, что и микропроцессор. Такие однокристалльные микроконтроллеры задействованы в огромном количестве задач: управляющих приборах, металлообрабатывающих машинах, видеомагнитофонах, банкоматах, фотокопировальных аппаратах, автомобильных системах зажигания, антиблокировочных тормозных системах, медицинском оборудовании и многих других областях.

Даже если у вас нет персонального компьютера и вы используете его только на работе или в школе, ваша жизнь ежедневно связана с микрокомпьютерами, потому что невероятно много современных потребительских электронных устройств, приборов, офисного оборудования и т.п. основаны именно на встроенных микроконтроллерах.

Контрольные вопросы

1. Объясните, в чем отличие цифровых схем с памятью и цифровых схем без памяти.
2. Назовите пять основных функциональных частей компьютера.
3. Из каких двух частей состоит ЦП?
4. Чип ИС, содержащий центральный процессор, называется _____.

Резюме

1. Существует два основных способа представления числового значения физических величин: аналоговый (непрерывный) и цифровой (дискретный).
2. Большая часть реальных величин — аналоговые, но цифровая техника превосходит аналоговую, и многочисленные прогнозируемые достижения произойдут именно в области цифровой техники.
3. Двоичная система (0 и 1) является базовой для цифровой технологии.
4. Цифровые, или логические, схемы работают с напряжениями в определенных диапазонах, представляющих двоичный 0 или двоичную 1.
5. Существует два основных способа передачи цифровой информации: параллельный (все биты одновременно) и последовательный (по одному биту за единицу времени).
6. Главные составные части компьютера — это устройство ввода, управляющее устройство, запоминающее устройство, арифметико-логическое устройство, устройство вывода.
7. Комбинация арифметико-логического устройства и управляющего устройства называется центральным процессором (ЦП).
8. Микрокомпьютер обычно имеет однокристалльный центральный процессор, который еще называется микропроцессором.
9. Микроконтроллер — это микрокомпьютер, спроектированный для узкоспециализированного (в отличие от устройств общего назначения) применения.

Основные термины*

аналоговое представление	память
цифровое представление	цифровой компьютер
цифровая система	программа
аналоговая система	устройство ввода
аналого-цифровой преобразователь (АЦП)	управляющее устройство
цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП)	запоминающее устройство
десятичная система	арифметико-логическое устройство
двоичная система	устройство вывода
бит	центральный процессор (ЦП)
временная диаграмма	микрокомпьютер
цифровая/логическая схема	микропроцессор
параллельный	микроконтроллер
последовательный	

Упражнения

Раздел 1.2

- 1.1. Какие из приведенных ниже величин аналоговые, а какие — цифровые:
- количество атомов в образце материала;
 - высота полета самолета;
 - давление в велосипедной шине;
 - ток, протекающий через громкоговоритель;
 - показания таймера микроволновой печи.

Раздел 1.3

- 1.2. Преобразуйте следующие двоичные числа в их десятичные эквиваленты:
- 11001_2 ;
 - $1001,1001_2$;
 - $10011011001,10110_2$.
- 1.3. Используя шесть бит, покажите порядок двоичного счета от 000000 до 111111.
- 1.4. Какого максимального числа можно достичь при счете, если пользоваться 10 битами?
- 1.5. Сколько бит потребуется, чтобы досчитать до 511?

Раздел 1.4

- 1.6. Нарисуйте временную диаграмму цифрового сигнала, который непрерывно меняется от 0,2 В (двоичный 0) до 4,4 В (двоичная 1), если он остается на этих уровнях 2 и 4 мс соответственно.

Раздел 1.6

- 1.7. Целые десятичные значения от 0 до 15 необходимо передать в двоичной форме.
- Сколько линий связи потребуется при параллельной передаче?
 - Сколько линий потребуется при последовательной передаче?

* Эти термины выделены жирным шрифтом, их можно найти в тексте главы. Значения терминов приведены в словаре в конце книги.

Разделы 1.7 и 1.8

- 1.8. Чем различаются микропроцессор и микрокомпьютер?
- 1.9. В чем отличие микроконтроллера от микрокомпьютера?

Ответы к контрольным вопросам

Раздел 1.1

1. Аналоговые величины могут принимать любые значения в непрерывном диапазоне, а цифровые величины — только дискретные значения.

Раздел 1.2

1. Цифровую технику легче проектировать; с ее помощью удобнее хранить информацию; она имеет большую точность и возможность программирования; менее подвержена шумам; существует возможность достичь более высокой степени интеграции.
2. Реальные физические величины являются аналоговыми.

Раздел 1.3

1. 107_{10} ;
2. 11000_2 ;
3. 4095_{10} .

Раздел 1.5

1. Неправильно.
2. Да — в случае, если оба напряжения соответствуют одному логическому уровню.
3. Логическая.
4. Временная диаграмма.

Раздел 1.6

1. Параллельная передача быстрее; последовательная требует только одной линии связи.

Раздел 1.8

1. Реагируя на входной кратковременный сигнал, схема с памятью изменит выходной сигнал и останется в этом положении.
2. Устройство ввода, управляющее устройство, запоминающее устройство, арифметико-логическое устройство, устройство вывода.
3. Управляющее и арифметико-логическое устройства.
4. Микропроцессор.