

В. Ф. МЕЛЕХИН, Е. Г. ПАВЛОВСКИЙ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ, СИСТЕМЫ И СЕТИ

Учебник

Рекомендовано

*Учебно-методическим объединением по образованию
в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники
и автоматизации в качестве учебника для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлению
подготовки бакалавров, магистров, специалистов
«Автоматизация и управление»*

3-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2010

УДК 681.3(075.8)
ББК 32.97я73
М473

Рецензенты:

зав. кафедрой «Вычислительная техника» Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, д-р техн. наук, проф. *Т. И. Алиев*;
проф. кафедры «Вычислительная техника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ), д-р техн. наук *А. И. Водяхо*

Мелехин В.Ф.

М473 Вычислительные машины, системы и сети : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.Ф. Мелехин, Е.Г. Павловский. — 3-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 560 с.

ISBN 978-5-7695-5840-5

Изложены основы организации, архитектура и схемотехника построения вычислительных машин, систем и сетей. Рассмотрены устройства вычислительных машин: процессоры, устройства памяти, интерфейсы, контроллеры. Приведены основные характеристики различных классов систем обработки данных и способы их оценки. Рассмотрены современные компьютеры, микропроцессорные системы на базе микроконтроллеров, вычислительные системы параллельной обработки данных, основы построения компьютерных сетей, а также тенденции развития архитектур, обусловленные успехами микроэлектроники и развитием информационных технологий.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 681.3(075.8)
ББК 32.97я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Мелехин В.Ф., Павловский Е.Г., 2006

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2006

ISBN 978-5-7695-5840-5

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2006

Настоящее время относят к информационной эре развития цивилизации и науки, в которой категория информации наряду с материей и энергией стала определяющей. Экспоненциальный рост объема используемой информации и влияние информационных процессов на все сферы жизни и деятельности людей предопределили важную роль технических средств, обеспечивающих автоматизацию сбора, хранения и обработки информации. Именно такими средствами и являются вычислительные машины (ВМ), системы и сети. В ВМ информация представлена в символическом виде. Это могут быть числа, текст, речь, музыка, графические изображения и т.д. В таком представлении информацию в ВМ называют «данными». Поэтому обобщенно ВМ, системы и сети называются системами обработки данных (СОД). Одним из существенных применений СОД является их использование в технических системах для автоматизации управления, контроля и диагностики.

Назначение настоящего учебника: формирование знаний об организации и архитектуре современных СОД — ВМ, систем и сетей; основных тенденциях и направлениях их развития; основных характеристиках этих систем и методах их оценки.

Учебник содержит три раздела: «Введение в организацию вычислительных машин и систем», «Вычислительные машины», «Вычислительные системы и сети».

В разделе I с позиций общей теории систем рассматриваются принципы организации ВМ и основные понятия вычислительной техники, поясняются основные предпосылки унификации средств вычислительной техники, рассматривается феномен персональных компьютеров (ПК) и их влияние на развитие компьютерной индустрии.

Во разделе II, основном по содержанию и самом большом по объему, рассматривается организация и функционирование современной ВМ, архитектура устройств ВМ: процессоров, памяти, периферийных устройств, методы и средства организации обмена данными между устройствами, а также основные характеристики ВМ и методы их количественных оценок.

В разделе III рассматриваются вычислительные системы (ВС) и сети. Рассмотрение ВС начинается с встраиваемых микропроцессорных систем и микроконтроллеров (МК). Они широко используются в технических системах для управления и контроля.

Далее рассматриваются основные принципы, архитектура и средства построения мультипроцессорных систем, а также системы на кристалле, особенно перспективные при переходе в производстве интегральных схем (ИС) на нанотехнологии. Последняя глава посвящена введению в компьютерные сети. Основные проблемы развития сетей и методы их решения поясняются на примерах простейших сетей. Достаточно подробно изложены принципы организации локальных вычислительных сетей. Рассматриваются основные принципы организации глобальной сети Internet.

Вопросы организации, архитектуры и тенденции развития ВМ, систем и сетей рассматриваются с единых позиций. При изложении материала подчеркивается преемственность принципов организации и взаимное влияние на архитектуру трех основных классов СОД. Большое внимание уделяется влиянию на организацию и архитектуру систем следующих факторов: развития технологии производства ИС, тенденций перехода от централизованной к распределенной обработке данных, распараллеливанию обработки на всех уровнях организации. В учебнике рассматривается только введение в телекоммуникационные вычислительные сети (ТВС), показывающее органическую связь ТВС с ВМ и ВС.

Прогресс в области СОД происходит ускоренными темпами, существенно влияя на развитие цивилизации. Наиболее важными характеристиками прогресса за последнее десятилетие стали следующие достижения:

1. Быстрое развитие субмикронной технологии производства ИС и переход к нанотехнологии с возможностями изготовления на одном кристалле десятков и сотен миллионов вентиляей.

2. Массовое производство ПК и применение их во всех сферах человеческой деятельности, причем не изолированно, а в составе компьютерных сетей.

3. Перестройка компьютерной индустрии с возрастающей ролью стандартов и международным разделением труда.

4. Превращение компьютерной индустрии и информационных технологий в самую высокодоходную область производства. Как следствие этого — огромные финансовые вложения, быстрый прогресс в области развития элементной базы и архитектуры, решающее влияние направления ПК на другие типы ВМ и систем: серверы, контроллеры, ВС с параллельной обработкой данных.

5. Появление на рынке большого числа типов МК с широким спектром вычислительной мощности и стоимости, а также «систем на кристалле».

6. Распространение промышленных систем с архитектурой процессоров, разработанных для ПК.

7. Быстрое развитие параллельной обработки данных как важнейший фактор повышения производительности.

8. Быстрое развитие компьютерных сетей и телекоммуникаций, их влияние на организацию и архитектуру процессоров, информационных и управляющих систем.

Значительный прогресс в рассматриваемых научных направлениях, а также переход к многоуровневому образованию в Российской Федерации привели к существенным изменениям в образовательных стандартах, рекомендуемых учебных планах, перечнях дисциплин и содержании программ. Это учтено при подготовке учебника.

Главы 1, 2, 3, 6, 8, 10 и 11 написал д-р техн. наук, проф. В. Ф. Мелехин, гл. 4, 5, 7, 9 — канд. техн. наук, доц. Е. Г. Павловский. Общее редактирование книги выполнил В. Ф. Мелехин.

Авторы выражают благодарность канд. техн. наук, доц. А. А. Авдюхину за представленные материалы для гл. 7 и О. М. КуССуль за помощь в подготовке рисунков.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АВМ — аналоговая вычислительная машина
АЛУ — арифметико-логическое устройство
АО — аппаратное обеспечение
АП — адресное пространство
АСНИ — автоматизированная система научных исследований
АСУ — автоматизированная система управления
АСУТП — автоматизированная система управления технологическим процессом
АЦП — аналого-цифровой преобразователь
БИС — большая интегральная схема
ВЗУ — внешнее запоминающее устройство
ВК — вычислительный комплекс
ВМ — вычислительная машина
ВП — внешняя память
ВС — вычислительная сеть
ГД — гибкий диск
ИС — интегральная схема
ЖД — жесткий диск
ЗЭ — запоминающий элемент
КА — конечный автомат
КК — контрольный код
КМОП — комплементарная структура металл-окисел-полупроводник
КОП — код операции
КС — комбинационная схема
ЛВС — локальная вычислительная сеть
МК — микроконтроллер
МП — микропроцессор
МПА — микропрограммный автомат
МЧМ — модифицированная частотная модуляция
ОА — операционный автомат
ОБ — операционный блок
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство
ОП — основная (оперативная) память
ОС — операционная система
ПДП — прямой доступ к памяти
ПЗУ — постоянное запоминающее устройство
ПК — персональный компьютер
ПКП — программируемый контроллер прерываний
ПЛ — программируемая логика
ПО — программное обеспечение
РОН — регистры общего назначения

- СБИС — сверхбольшая интегральная схема
- СК — счетчик команд
- СОЗУ — сверхоперативное запоминающее устройство
- СЧПУ — система числового программного управления
- ТВС — телекоммуникационная вычислительная техника
- УА — управляющий автомат
- УСО — устройство сопряжения с объектом
- ФНЧ — фильтр нижних (низких) частот
- ЦАП — цифроаналоговый преобразователь
- ЦВМ — цифровая вычислительная машина
- ЦПУ — центральное процессорное устройство
- ЧМ — частотная модуляция
- ШИМ — широтно-импульсная модуляция
- CD — Compact Dick — компакт-диск
- CISC — Complex Instruction Set Computer — компьютер с полным набором команд
- CPL — Current Privilege Level — текущий уровень привилегий
- CPU — Central Processing Unit — ЦП, центральный процессор
- DPI — Descriptor Privilege Level — дескриптор привилегированного уровня
- DRAM — Dynamic Random Access Memory — динамическое ОЗУ
- EEPROM — Electrical Erasable Programmable Read-Only Memory — электрически стираемое программируемое ПЗУ
- EPROM — Erasable Programmable Read-Only Memory — стираемое программируемое ПЗУ
- FPU — Floating Point Unit — устройство для выполнения операций с плавающей точкой
- MMX — Multimedia Extension — мультимедийное расширение, технология MMX
- MPP — Massive Parallel Processing — система с массовым параллелизмом
- NUMA — Non-Uniform Memory Architecture — архитектура мультипроцессорной системы с несимметричным использованием процессорами ОП
- PROM — Programmable ROM — программируемое ПЗУ
- RISC — Reduced Instruction Set Computer — процессор с сокращенным списком команд
- ROM — Read Only Memory — постоянное запоминающее устройство
- SIMD — Single Instruction Multiple Data — одиночный поток команд и множественный поток данных
- SP — Stack Pointer — указатель стека
- VLIW — Very Long Instruction Word — очень длинное слово команды

РАЗДЕЛ I. ВВЕДЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН И СИСТЕМ

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

1.1. Кибернетика, информатика и вычислительная техника

ВМ и ВС используются для работы с информацией. *Информация* — сведения о событиях, процессах, объектах, являющиеся предметом восприятия, передачи, преобразования, хранения. Информация — основное понятие кибернетики. *Кибернетика* изучает машины и живые организмы с точки зрения их способности воспринимать определенную информацию, сохранять ее в памяти, передавать по каналам связи, перерабатывать в сигналы, направляющие деятельность машин и организмов в определенном направлении.

Кибернетика — греческое слово, обозначающее искусство управления. Первым, кто употребил этот термин для управления в общем смысле, был Платон (IV в. до н.э.). А. Ампер предложил называть кибернетикой науку об управлении человеческим обществом (1834). Н. Винер назвал кибернетикой науку об управлении и связи в живом организме и машине. Началом развития этого научного направления считают выход книги Н. Винера «Кибернетика» (1948). Предметом исследований кибернетики как научного направления являются кибернетические системы. *Кибернетической системой* называется абстрактное представление реальных систем под определенным (информационным) углом зрения. При таком абстрагировании основным методом исследования стали моделирование и эксперимент на ВМ. Поэтому развитие кибернетики как направления в науке и технике стимулировало развитие двух других направлений — информатики и вычислительной техники.

Предмет исследований информатики — информационные технологии, а вычислительной техники — ВМ, вычислительные комплекты (ВК), ВС, сети.

ВМ, ВК, ВС и сети, на базе которых реализуются современные информационные технологии, с одной стороны, служат инструментарием для реализации основных методов исследования ки-

бернетики, с другой стороны, они рассматриваются как кибернетические системы и поэтому в их проектировании, сопровождении, развитии существенную роль играет научный метод, заложенный в кибернетике. Рассмотрим связь этих научных направлений с историей развития науки и техники.

В развитии цивилизации и науки выделяют три эры: сельскохозяйственную (до XVI в.), индустриальную (XVI—XX вв.), информационную (с 50-х гг. XX в.) [44]. В информационную эру категория информации стала определяющей. Экспоненциальный рост объема информации, быстрый рост энерговооруженности, интенсификация и ускорение технологических процессов и связанное с этим усиление роли и ответственности управления и контроля обусловили потребность в опережающем развитии средств вычислительной техники и базирующихся на них информационных технологий. В информационную эру происходит интенсивное перераспределение трудовых ресурсов. Если в начале XX в. более 90 % трудоспособного населения было занято в сфере материального производства и менее 10 % — в информационной сфере, то к концу XX в. соответственно 35 и 65 % [14]. Успехи в развитии средств вычислительной техники как средств автоматизации умственного труда и информационных процессов изменили ориентиры и способствовали переходу к новому этапу в промышленной революции. Если в начале XX в. основной задачей экономики было увеличение производства и удовлетворение потребностей в предметах массового спроса, то с начала 80-х гг. XX в. определяющим стало обеспечение роста качества и разнообразия выбора товаров. Основой реализации этой тенденции стало создание программно-управляемого технологического оборудования и комплексная автоматизация проектирования, производства и использования создаваемых изделий. В связи с этим в современных технических системах обязательно используются развитые подсистемы комплексного информационного обслуживания, обеспечивающие автоматизацию, управление, контроль, визуализацию протекающих процессов.

С наступлением информационной эры создаются информационное общество и информационная экономика. Информационная экономика служит основой существования информационного общества. Основой развития информационной экономики является создание и потребление информационных ресурсов или информационных ценностей различных категорий [11].

Информационная экономика по сравнению с индустриальной характеризуется рядом особенностей:

- основным предметом накопления становится накопление знаний;
- определяющими становятся наукоемкость и информация, а роль энергии и материи уменьшается;

- экономически целесообразным становится мелкосерийное производство;

- создается информационная инфраструктура производств;
- усиливаются интеграционные процессы.

Создание информационной инфраструктуры связано с использованием вычислительных машин и сетей, систем телекоммуникаций, развитием подготовки кадров в области информационных средств и технологий, развитием правовых основ.

В развитии вычислительной техники и информатики определяющим является опережающее развитие средств обработки, хранения и передачи информации.

1.2. Основные понятия вычислительной техники

ВМ и ВС предназначены для автоматизации процессов обработки, хранения и передачи информации. ВМ относятся к сложным системам, при их описании и проектировании используются понятия и принципы, определенные в общей теории систем: система, алгоритм, функция, структура, функциональная и структурная организации.

Система — это совокупность элементов или устройств, соединенных между собой для достижения определенной цели. Среди систем выделяют сложные системы. Это качественное понятие. Перечислим основные отличительные признаки сложных систем. Большая размерность — большое число элементов: сотни, тысячи. Разнородность элементов и узлов, как следствие этого — отсутствие единого математического аппарата для описания поведения этих элементов и узлов. Многокритериальность при оптимизации выбора вариантов построения системы.

Вычислительная машина — это система, выполняющая заданную, четко определенную последовательность операций (программу) в соответствии с выбранным алгоритмом обработки информации.

Алгоритм — набор предписаний, однозначно определяющий содержание и последовательность выполнения действий для систематического решения задачи. Для алгоритма можно выделить семь характеризующих его параметров: совокупность возможных исходных данных, совокупность возможных результатов, совокупность возможных промежуточных результатов, правило начала процесса обработки данных, правило непосредственной обработки, правило окончания процесса, правило извлечения результата. Алгоритм должен обладать свойствами массовости и результативности.

Массовость — применимость для решения задачи с любым набором исходных данных из совокупности возможных, результа-

тивность — получение результата из совокупности возможных за конечное число шагов.

Для наглядного представления ВМ и ВС изображаются в виде схем, состоящих из блоков и связей между ними. Такие схемы (функциональная, структурная) представляют собой ориентированный граф, вершины которого — блоки. В функциональной схеме блоки выделяются по функциональному признаку в ходе функциональной декомпозиции. В структурной схеме блоки соответствуют конструктивным компонентам — устройствам, конструктивным узлам, интегральным схемам. В частном случае отдельные блоки функциональной и структурной схем могут совпадать. С каждым блоком связаны входы, выходы и функция.

Функция определяет алгоритм работы блока, т.е. правила получения выходных последовательностей по входным последовательностям.

Структура показывает, как устроен блок, раскрывая его в виде схемы, содержащей блоки более низкого уровня иерархии.

Функциональная организация ВМ (ВС) — это представление ее как абстрактной системы в виде функциональной схемы, иллюстрирующей результат функциональной декомпозиции. В целях большей наглядности и простоты понимания для сложных систем (таких, как ВМ и ВС) используют иерархию представлений. При этом на некотором уровне иерархии функциональные схемы представляют функции отдельных блоков схемы более высокого уровня представления. Чем ниже уровень представления, тем проще функции соответствующих блоков.

Структурная организация — это представление системы (блока) в виде схемы, содержащей реально реализуемые устройства, узлы, элементы.

При описании, проектировании ВМ и управлении вычислительными процессами применяется иерархический подход. При его использовании обеспечивается возможность абстрагирования от ряда деталей при рассмотрении системы в целом. Возможности анализа по частям при переходе к более детальному описанию составляют суть того упрощения, которое дает иерархический подход.

Решению задачи на ВМ предшествуют алгоритмизация и программирование. *Алгоритмизация* — реализация причинно-следственных связей и других закономерностей в виде направленного процесса обработки информации по формальным правилам. *Программирование* — разработка программ для ВМ, реализующих заданный алгоритм. В ВМ управление процессами ввода, вывода и обработки информации осуществляется на основе программ. *Программа* — алгоритм, записанный в виде последовательности машинных команд — кодов, соответствующих некоторым соглашениям, принятым при разработке ВМ. Для уменьшения трудоем-

кости программирования в настоящее время программы разрабатываются на одном из алгоритмических языков высокого уровня. Далее перед исполнением такая программа транслируется в последовательность машинных команд.

На ранних этапах развития ВМ реализовали преимущественно вычислительные алгоритмы, что и нашло отражение в самом понятии «вычислительная машина». Обработка, хранение и коммутация сигналов в ВМ в основном реализуется электронными схемами. Поэтому для ВМ долгое время использовалась аббревиатура ЭВМ (электронная вычислительная машина). Этот термин появился у первых ЭВМ для их отличия от механических и электромеханических счетно-решающих устройств. В связи с успехами микроэлектроники использование в ВМ сложных электронных устройств — сверхбольших интегральных схем (СБИС) стало общепринятым и привычным. Поэтому слово «электронная» применительно к ВМ уже не несет существенной информации. Кроме того, ВМ содержат не только устройства обработки и хранения информации, но и устройства ввода и вывода. Если устройства обработки и хранения информации реализуют на базе СБИС, то устройства ввода и вывода наряду с электронными компонентами содержат электромеханические, оптоэлектронные и другие узлы. Поэтому в настоящее время предпочтительнее использовать термин «вычислительная машина».

По мере развития вычислительной техники и информационных технологий класс реализуемых алгоритмов существенно расширился. С помощью ВМ успешно решается широкий класс задач «невыхислительного» характера: обработка текстов и изображений, сжатие информации, распознавание образов, информационно-поисковые задачи и др. Однако, термин «вычислительная машина» сохранился.

Существуют два типа ВМ: аналоговые (АВМ) и цифровые (ЦВМ). В АВМ для представления информации используются непрерывные физические величины, чаще всего напряжение. В ЦВМ информация представлена двоичными кодами. При этом каждый разряд принимает два значения из набора $\{0, 1\}$. Для представления двоичной переменной используется дискретный сигнал. ЦВМ являются более универсальным средством обработки информации и по ряду наиболее важных общетехнических показателей превосходят АВМ. Поэтому они получили более широкое распространение. В дальнейшем изложении под ВМ будем подразумевать именно ЦВМ.

Отметим, что в настоящее время наряду с термином «вычислительная машина» в отечественной литературе часто используется американский термин «компьютер». Этим отдается дань широкому распространению нового класса вычислительной техники — персональным ВМ.

В связи с массовым применением компьютеров закономерности взаимодействия человека с ВМ стали предметом научных исследований. Результаты этих исследований воплощаются в так называемой *информационной технологии* — систематических методах и приемах применения ВМ в производственных процессах, управлении, образовании, научной работе, проектировании и других сферах деятельности. Практические применения информационных технологий обусловили создание быстро развивающегося сектора промышленности, получившего название «индустрии информатики» или «компьютерной индустрии».

1.3. Способы представления информации в вычислительных машинах

Определим основные понятия, связанные с представлением информации в ВМ.

Функциональные схемы ВМ и вычислительных устройств состоят из блоков, каждый из которых является преобразователем информации. *Преобразователь информации* — это некоторый блок, имеющий входы, на которые поступают входная информация, и некоторые выходы, на которых представлена выходная информация. Информация на входах и выходах блоков представлена сигналами.

Сигнал — это носитель информации в виде изменяющейся во времени физической величины, обеспечивающей передачу данных. Сигнал называется *дискретным*, если параметр сигнала может принимать лишь конечное число значений.

В настоящее время подавляющее большинство преобразователей информации представляют собой электронные схемы, содержащие соединенные определенным образом между собой электронные ключи — *вентили*. Эти электронные схемы реализуются с использованием технологий современной микроэлектроники в виде ИС. ИС может содержать от нескольких единиц до нескольких миллионов вентилях. Для работы ИС к ней подводится напряжение питания. При этом сигналы в ИС представлены уровнем напряжения. Для представления сигналов приняты всего два непересекающихся диапазона уровней напряжения. При напряжении питания 5 В: диапазон 0—0,4 В, соответствующий логическому значению сигнала «0», и диапазон 5—2,4 В, соответствующий значению сигнала «1». Промежуточные значения напряжения соответствуют неопределенному логическому значению сигнала. При исправной аппаратуре эти значения возникают кратковременно только при переключениях значений сигналов. В дисциплинах по организации и архитектуре информационных систем рассматриваются только логические значения сигнала.

лов. Такие дискретные сигналы представляют логические и двоичные переменные.

Переменные, имеющие всего два значения, используют как *логические переменные* («0» соответствует значению «ложь», а «1» — «истина»). Переменную с значениями («0» и «1») используют и как *двоичную переменную* для представления отдельных разрядов чисел в двоичной системе счисления. *Двоичная система* счисления — это позиционная система счисления с основанием 2.

Как уже отмечалось ранее, информацию, представленную в закодированном виде и используемую в устройствах ВМ, называют *данными*. Данные разбиваются на составляющие, называемые элементами данных. *Элемент данных* — это составная часть данных, воспринимаемая при разработке и использовании программ как неделимый объект. Элементы данных имеют различные *типы*. Указывая, к какому типу данных относится объект программы, программист определяет множество значений, которые данные могут принимать, и совокупность допустимых над ними операций. Примеры типов данных: целые и вещественные числа, логические (булевы) переменные. Для представления различных типов данных с использованием двоичных переменных применяют кодирование.

Код — это система условных знаков (символов) и правил их интерпретации, используемая для представления информации в виде данных.

Информационный обмен между устройствами в ВС, ВК и сетях осуществляется чаще всего передачей сообщений.

Сообщение — информация о ходе или состоянии вычислительного процесса, выдаваемая компонентами информационных систем. Сообщение содержит символы для представления информации.

Символ — это элемент допустимого информационной системой набора знаков, который может быть закодирован, введен в систему, отображен на дисплее. Пример символов — цифры в той или иной системе счисления, буквы из некоторого алфавита и пр. При информационных обменах каждый символ представлен (закодирован) упорядоченной совокупностью двоичных сигналов.

Поскольку любая алфавитная (буквенно-цифровая) информация может быть закодирована в двоичной форме, то подобным образом с использованием двоичных сигналов можно закодировать условия и реализовать решение для любых алгоритмически разрешимых задач.

Информация в ВМ представлена в виде кодов определенной фиксированной длины (машинных слов). Представленную таким образом информацию называют данными. Этот термин используется для закодированных чисел (аргументов и результатов вычи-

слений), программ, текстов, графических образов, звуков и др. Входные данные, поступающие из памяти и различных устройств ввода, под управлением команд программы в ВМ преобразуются в выходные данные, направляемые в память и (или) устройства вывода. При этом в процессы, связанные с получением, передачей, хранением и обработкой информации (данных), вовлекаются аппаратные и программные средства, называемые *вычислительными ресурсами*.

1.4. Основные принципы организации вычислительных машин и систем

Принципы организации вычислительного процесса, используемые и в большинстве современных ВМ, базируется на концепции Дж. фон Неймана, выдвинутой им во второй половине 40-х гг. XX в. [4]. Согласно этой концепции определена автономно работающая ВМ, содержащая устройство управления, арифметико-логическое устройство (АЛУ), память и устройства ввода, вывода (рис. 1.1). В связях, соединяющих устройства, выделены потоки данных, команд и управляющих сигналов. Преобразование данных осуществляется последовательно под централизованным управлением от программы, состоящей из команд. Набор (список) команд составляет машинный язык низкого уровня.

Для организации ВМ предложены следующие принципы:

1. Двоичное кодирование информации, разделение ее на слова фиксированной разрядности.
2. Линейно-адресная организация памяти (N ячеек по n разрядам). Аппаратные средства для записи, хранения и чтения слова из n двоичных разрядов называют ячейкой памяти. Ячейки пронумерованы по порядку $(0, 1, \dots, N - 1)$. Номер ячейки — ад-

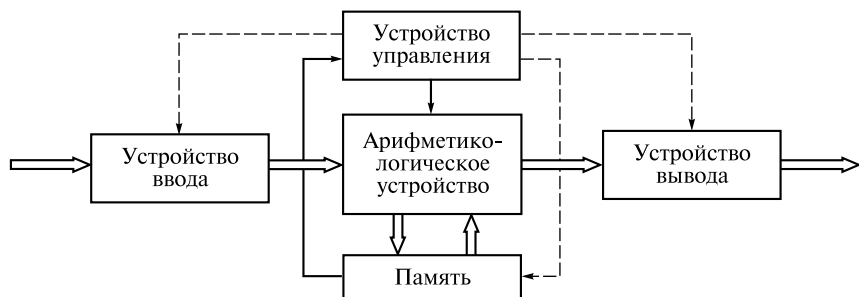


Рис. 1.1. Структура ВМ Дж. фон Неймана:

⇒ линии связи для данных; → линии связи для команд; - - → линии связи для управления

рес. В командах программы адрес является именем (идентификатором) переменной, хранящейся в соответствующей ячейке.

3. Представление алгоритма программой, состоящей из команд. Команда является предписанием, определяющим шаг процесса выполнения программы. Она содержит код операции, адреса операндов и другие служебные коды.

4. Хранение команд и данных в одной памяти. Различие их заключается только в способе использования и интерпретации считанного из памяти слова.

5. Вычислительный процесс организуется как последовательное выполнение команд в порядке, определяемом программой.

6. Жесткость архитектуры — неизменность в процессе работы ВМ, ее структуры, списка команд, методов кодирования данных.

При работе ВМ (см. рис. 1.1) наиболее интенсивное взаимодействие осуществляется между АЛУ и устройством управления. С развитием элементной базы в целях повышения производительности за счет уменьшения задержек в связях эти устройства объединили в один блок, называемый *процессором*.

Процессор считывает и выполняет команды программы, организует обращение к оперативной памяти (ОП), в нужных случаях инициирует работу устройств ввода и вывода.

Устройство ввода преобразует входные сигналы в сигналы, принятые для представления данных на шине, соединяющей устройство ввода с АЛУ.

В памяти хранятся команды и данные, которыми оперирует процессор. В нее же записываются результаты промежуточных вычислений. Результаты выполнения программы поступают в устройство вывода.

Устройство вывода преобразует выходные сигналы в форму, удобную для восприятия человеком (тексты, графические образы и др.).

Выборка команды из памяти и ее выполнение циклически повторяются. Цикл включает следующие фазы: выборку, дешифрацию и исполнение.

В фазе выборки команды содержимое ячейки памяти, адресуемое специальной схемой устройства управления (программным счетчиком), выбирается из памяти и помещается в специальный регистр процессора, называемый регистром команд. В фазе дешифрации код команды из регистра команд поступает в дешифратор команд процессора и преобразуется в последовательность управляющих сигналов, обеспечивающих настройку АЛУ для выполнения функции, определяемой командой. После этого в устройстве управления формируется адрес следующей команды. Следующей является фаза исполнения. После выполнения команды происходит возврат к первой фазе — выборке следующей команды.

Принципы Дж. фон Неймана имеют глубокую внутреннюю согласованность и в значительной мере используются в архитектуре современных компьютеров. На ранних этапах развития вычислительной техники (в первых моделях ВМ) существенным было требование максимальной простоты машинного языка и в соответствии с этим — устройств ВМ. В настоящее время это требование не является определяющим и наблюдается отход от исходных принципов. В значительной мере он связан с введением параллелизма на различных уровнях организации вычислительного процесса и расширением функций, реализуемых аппаратно. Эти изменения связаны с постоянным ростом сложности выполняемых преобразований и требований к скорости вычислений. Возможности реализации изменений обусловлены успехами микроэлектроники и совершенствованием элементной базы современных компьютеров.

1.5. Вычислительные машины, комплексы, системы и сети

Совокупность технических и программных средств, предназначенных для информационного обслуживания людей и технических объектов, называют обобщающим термином *система обработки данных* [31]. Другим обобщающим термином является *информационная система*.

Если информационная система используется для управления в технических системах, ее часто называют *информационно-управляющей системой*. Это наиболее общие названия для систем такого назначения.

ВМ — это один из классов информационных систем. Помимо класса ВМ к ним относятся ВК, ВС и сети. Рассмотрим основные отличительные признаки этих классов информационных систем.

ВМ предназначена для решения широкого круга задач пользователями, работающими в различных предметных областях (решение математических задач, обработка текстов, бухгалтерский учет, игры и др.). Основным блоком ВМ, осуществляющим преобразование информации и управление вычислительным процессом на основе программы, является процессор. (Слово «процессор» является производным от слова «процесс») Процессор инициализирует процесс исполнения программы и управляет им.

Вычислительный комплекс — это несколько ВМ (или вычислительных систем), информационно связанных между собой (обычно по последовательному каналу). При этом каждая ВМ самостоятельно управляет своими вычислительными процессами, и информационный обмен между ВМ комплекса не является интенсивным (в сравнении с информационным взаимодействием процессоров в мультипроцессорных системах). Особенно широкое

применение ВК получили в информационно-управляющих системах. Объекты управления в технических системах часто имеют значительную протяженность в пространстве и содержат большое число агрегатов, технологических установок и т. п. Примером может быть цех металлообработки, содержащий станки, обрабатывающие центры, роботы. Другой пример: корабль с общекорабельными системами, энергетическими системами, системой навигации и пр. Все эти технические средства снабжаются датчиками, характеризующими их состояние, исполнительными органами (двигателями, электромагнитами и пр.), сигнализаторами. Датчики, исполнительные органы, сигнализаторы, распределенные в пространстве, информационно по каналам связи связаны с информационно-управляющей системой. Для контроля и управления оборудованием технических систем желательно организовать распределенную обработку данных, рассредоточив отдельные ВМ по соответствующим помещениям. Это и приводит к организации ВК. Информационное взаимодействие между ВМ в комплексе организуется с использованием простейших средств ввода и вывода, разработанных для ВМ. По мере развития средств и технологий компьютерных сетей в информационно-управляющих системах используются современные телекоммуникационные средства, и информационно-управляющая система реализуется в виде локальной вычислительной сети, а не ВК.

Вычислительной системой называют информационную систему, настроенную на решение задач конкретной области применения, т. е. в ней имеется аппаратная и программная специализация, обеспечивающая повышение производительности и снижение стоимости. Часто ВС содержит несколько процессоров, между которыми в процессе работы происходит интенсивный обмен информацией, которые имеют единое управление вычислительными процессами. Такие системы называются *мультипроцессорными*. (Они рассматриваются в гл. 10.) Другим распространенным типом ВС являются *микропроцессорные системы*. Они строятся с использованием либо микропроцессора (МП), либо микроконтроллера, либо специализированного процессора цифровой обработки сигналов. Обычно такие системы специализированы для задач локального управления и контроля технологическим оборудованием в технических и бытовых системах. Соответствующие ВС часто называют *встраиваемыми ВС*. Примеры построения подобных систем рассмотрены в гл. 9.

Рассмотрим особенности сетей как класса информационных систем. Современные передовые компьютерные технологии базируются на ТВС (используются также другие равнозначные термины: компьютерные сети, информационно-вычислительные сети). ТВС — сеть обмена и распределенной обработки информации, образуемая множеством абонентских систем и телекоммуникаци-

онной подсистемой, реализующей информационное взаимодействие абонентских систем. Отличительной особенностью сетей как класса информационных систем являются развитые функции информационного взаимодействия. По подходам к организации информационного взаимодействия ВМ в сетях телекоммуникационная подсистема напоминает почтовую службу и систему телефонной связи между людьми. При этом набор соответствующих функций непрерывно расширяется, а средства и технологии их реализации совершенствуются.

Средства передачи и обработки информации в сети ориентированы на коллективное использование общесетевых ресурсов — аппаратных, информационных и программных. *Абонентская система* — это совокупность ВМ, программного обеспечения (ПО), периферийного оборудования, средств связи с телекоммуникационной подсистемой (коммуникационной подсетью). *Коммуникационная подсистема* — совокупность физической среды передачи информации, аппаратных и программных средств, обеспечивающих информационное взаимодействие абонентских систем. В качестве физической среды передачи информации используют витую пару, кабель, оптоволокно, электромагнитные волны.

Аппаратуру информационных систем, включающую устройства вычислительной техники и телекоммуникаций, называют *аппаратным обеспечением* (hardware).

Второй важной составляющей информационных систем является *математическое* (программное) *обеспечение* (software). Оно включает в себя: программы, обрабатываемые данные, языки программирования, документацию к ним.

Аппаратура ВМ и ПО — это сложные системы с определенной структурой, содержащей большое число модулей.

Средства вычислительной техники — аппаратные и программные модули, производимые компьютерной индустрией и используемые для построения вычислительных машин, комплексов, систем и сетей.

1.6. Этапы развития вычислительных машин. Феномен персональных компьютеров

Со времени появления первых ВМ (50-е гг. XX в.) сменилось пять поколений, отличающихся элементной базой, функциональными возможностями, быстродействием, архитектурой. В процессе развития расширялась сфера использования ВМ, совершенствовались информационные технологии, изменялись концептуальные принципы организации обработки данных. Статистический анализ показывает, что рост производства средств вычислительной техники (в стоимостном выражении) имеет экспоненциаль-

ный характер, но отмечаются периоды спада темпов роста [14]. Эти периоды связаны с пересмотром концепций развития и коренной технологической перестройкой производства средств вычислительной техники. Соответственно можно выделить три этапа.

На первом этапе (50—70-е гг. XX в.) преобладала централизованная обработка данных на универсальных ВМ в вычислительных центрах. Основной целью развития была экономия машинного времени.

Второй этап (с середины 70-х гг. до середины 80-х гг. XX в.) связан с массовым применением мини и микроЭВМ, созданием и совершенствованием МП и микропроцессорных средств. Основной задачей для использования быстро развивающихся средств вычислительной техники стала разработка эффективной технологии программирования. Этому способствовало создание средств автоматизации разработки программ: в первую очередь языков высокого уровня, режима разделения времени работы ВМ и интерактивных систем отладки.

Третий этап (со второй половины 80-х гг. XX в.) связан с массовым распространением ПК. Особенностью этого этапа стало создание высококачественного «доброжелательного» системного ПО. ПК в значительной мере ориентированы на использование готовых прикладных программ для информационного обслуживания в различных сферах деятельности. Для эффективного использования ПК во многих областях человеческой деятельности не требуется быть профессионалом-программистом.

Распространение ПК вызвало следующие процессы в общественном производстве: более широкую формализацию знаний в самых различных областях, массовое тиражирование накапливаемых профессиональных знаний в виде прикладных программ, ускорение темпов развития ведущих отраслей общественного производства за счет активного включения формализованных знаний в производственный процесс. Массовое применение ПК побудило перестройку компьютерной индустрии. Основой перестройки стало изменение принципов организации производства ВМ. Ранее полный комплекс работ по созданию определенного типа ВМ выполнялся одной фирмой. Наиболее известны фирмы IBM, DEC, HP, SUN. От такой организации перешли к разделению труда между специализированными фирмами по производству отдельных частей ВМ: МП, платформ, системного ПО, периферийного оборудования, приложений и др. Для обеспечения возможности комплексирования систем из подсистем и средств, разрабатываемых различными фирмами, большое значение приобрели международные стандарты.

Перестройка индустрии привела к расширению возможных вариантов при комплексировании компьютера, ускорению прогресса в области средств обработки информации, снижению удель-

ных затрат на обработку. Повышение производительности и расширение ресурсов ПК позволили улучшить интерфейс с пользователем и расширить его функции, включая трехмерную графику, видео, аудио, сетевые коммуникации. Таким образом, происходит превращение ПК в информационную «супермагистраль», соединяющую в себе функции компьютера, телевизора, телефона и обеспечивающего расширение возможностей и повышение качества информационного обслуживания. Все это привело к тому, что ПК стали предметом массового потребления, число их уже превысило число автомобилей и приближается к числу телевизоров [33].

Отмеченные особенности развития ПК и соответствующих средств вычислительной техники способствовало притоку больших инвестиций в эту область техники. Вложения в информационные технологии приносят 81 % годового дохода, в то время как в среднем в других областях — 6,3 %. Это способствовало развитию научных исследований и производства. Массовое производство аппаратных средств для ПК существенно повлияло на развитие таких направлений в вычислительной технике, как создание суперкомпьютеров, серверов, индустриальных систем.

ПК в настоящее время — самый распространенный тип СОД. В начале их развития решаемые задачи были относительно простыми: инженерные расчеты, работа с текстами, бухгалтерский учет и расчеты, игры и т.п. Быстрый рост числа ПК и расширение предъявляемых к ним требований стимулировали опережающий прогресс в области соответствующих МП, элементов памяти, энергонезависимой памяти, периферийных устройств. Ресурсов первых поколений ПК было недостаточно для решения более сложных задач информационного обслуживания, связанных с автоматизацией проектирования в различных областях техники, автоматизацией управления сложными объектами, поддержкой мощных баз данных и т.п. Для этого класса задач развивались рабочие станции, серверы различных классов. Для них создавались свои процессоры (такие, как SPARC, SuperSPARC, Alpha и др.). Однако быстрый прогресс в области ПК привел к тому, что они благодаря своим возможностям и более низкой цене в значительной мере вытесняют рабочие станции и серверы с рынка современных ВМ.

Характеристики современных ПК постоянно улучшаются. Однако, даже самый лучший ПК, обеспечивающий производительность порядка $10^8 - 10^9$ flops (операций с плавающей точкой в секунду), не может удовлетворить требованиям, предъявляемым к средствам обработки информации такими развивающимися научными направлениями как наука о земле, магнитогидродинамика, исследования вещества, элементарных частиц и их взаимодействий и др. Требуется производительность порядка $10^{12} - 10^{13}$ flops. Для

удовлетворения таким требованиям развиваются суперкомпьютеры на основе векторно-конвейерных процессоров. Альтернативным подходом является создание ВС с массовым параллелизмом. В них широко используются современные МП такие, как Pentium Pro, P3, P4, Alpha, UltraSPARC. В архитектуре этих процессоров заложены возможности объединения их в кластеры и далее в системы с массовым параллелизмом [12]. Большие возможности ПК и массовое производство соответствующих средств обусловило вытеснение рабочих станций с рынка серверов. Следует отметить также тенденции в развитии вычислений с использованием ПК. Уже в настоящее время вычисления становятся сетевыми (с использованием технологий клиент—сервер) и все «более визуальными».

Переход к вычислениям в составе сети, а не на изолированном ПК, обусловлен экономической и вычислительной целесообразностью. В частности, это снижает совокупную стоимость владения изолированным компьютером и расширяет возможности соответствующей ВС.

Отметим некоторые тенденции, связанные с использованием ВМ в технических системах. ВМ и другие средства вычислительной техники в технических системах используются не изолированно (для решения частных задач), а в составе различных по уровню и назначению автоматизированных систем. Для комплексной автоматизации, управления и контроля технических систем создаются иерархические системы комплексного информационного обслуживания, реализуемые в виде гетерогенных локальных вычислительных сетей, объединяющих ВМ с различной архитектурой.

На нижнем уровне часто используются встраиваемые системы на базе МК. На более высоких уровнях используются унифицированные платформы промышленных систем, архитектурно совместимые с ПК.

Информационные и управляющие системы, реализуемые на базе средств вычислительной техники, используются во всех фазах жизненного цикла технических систем. На этапе проектирования технических систем — системы автоматизированного проектирования (САПР) и автоматизированные системы научных исследований (АСНИ). На этапе производства — автоматизированные системы управления (АСУ) и автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП), в частности, системы числового программного управления станками и робототехническими комплексами. На этапе функционирования (эксплуатации) — системы автоматического и автоматизированного управления, контроля и диагностики.

Развитие этих сложных систем неразрывно связано с повышением качества информационного обслуживания.

Контрольные вопросы

1. Что является предметом исследований научных направлений: кибернетика, информатика, вычислительная техника? Какова связь между этими направлениями?
2. В чем заключаются отличительные черты информационной экономики?
3. Какие системы называются сложными? Назовите основные признаки сложной системы. Почему ВМ, ВС и сети относятся к сложным системам?
4. Что такое алгоритм, чем он характеризуется? В чем различие алгоритма и программы?
5. Что такое алгоритмически разрешимые задачи? Почему ВМ — универсальное средство для решения любых алгоритмически разрешимых задач?
6. Что такое информационные технологии? Какое научное направление изучают информационные технологии?
7. Определите понятия: информация, сигнал, символ, сообщение, код, данные, элементы данных, типы данных. Какие виды информации можно представить в виде данных? Почему в ВМ информация представлена в виде данных?
8. В чем отличительные признаки ВМ, ВС, ВК и сетей?
9. В чем заключаются принципы организации ВМ, предложенные Дж. фон Нейманом? От каких принципов наблюдается отход в современных компьютерах?
10. Что такое процессор? Что такое вычислительный процесс? Каковы функции процессора в организации работы ВМ?