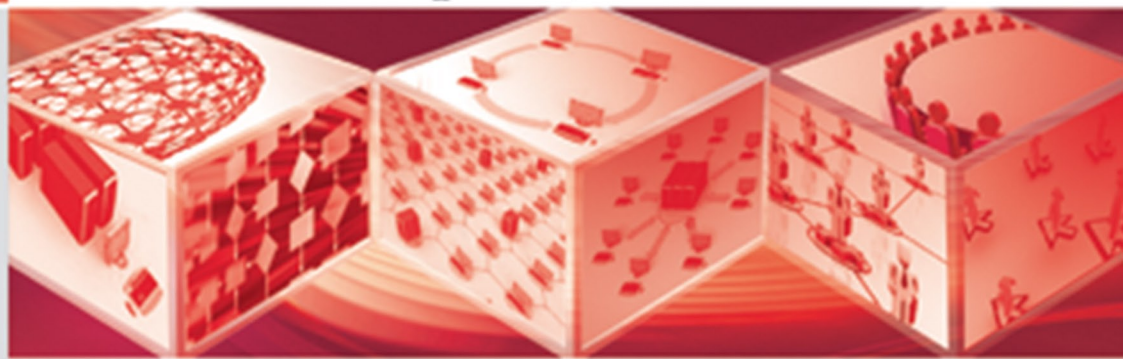


*УЧЕБНИК
ДЛЯ ВУЗОВ*

ПИТЕР®

В. Л. Бройдо О. П. Ильина



Вычислительные системы, сети и телекоммуникации

4-е издание

**ДОПУЩЕНО
МИНИСТЕРСТВОМ ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ**

ББК 32.973.202

УДК 004.3

Б88

Рецензенты:

Трофимов В. В., завкафедрой информатики Санкт-Петербургского государственного университета экономики и финансов, д.т. н., профессор;

Соколов Р. В., профессор кафедры информационных систем в экономике Санкт-Петербургского государственного инженерно-экономического университета, д. э. н., профессор.

Бройдо В. Л., Ильина О. П.

Б88 Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: Учебник для вузов. 4-е изд. — СПб.: Питер, 2011. — 560 с.: ил.

ISBN 978-5-49807-875-5

Вычислительные машины, системы и сети уже давно выполняют задачи, выходящие за рамки обычных вычислений. Ключевыми словами в наши дни становятся «информация», «обработка информации». Более того, информация — это самый ценный ресурс в современном мире. Устройства ее хранения, организации, передачи и обработки и посвящена эта книга. Фактически речь в ней идет обо всей совокупности вычислительного оборудования и решаемых им задач, то есть об информационных системах. В книге обсуждаются не только организация, устройство и принципы функционирования вычислительных устройств, но и такие темы, как их эффективность и качество.

Учебник предназначен для студентов, изучающих дисциплины «Вычислительные системы, сети и телекоммуникации» специальности 080801 (351400) «Прикладная информатика в экономике» гуманитарной прикладной области и «Вычислительные машины, сети и системы телекоммуникаций» специальности 071900 «Информационные системы в экономике», а также для слушателей институтов повышения квалификации, аспирантов и преподавателей, обеспечивающих учебный процесс по данным дисциплинам. Издание будет также полезно специалистам, связанным с современными информационными технологиями, и широкому кругу пользователей компьютеров.

Допущено Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Прикладная информатика» и «Информационные системы в экономике».

ББК 32.973.202

УДК 004.3

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Информация, содержащаяся в данной книге, получена из источников, рассматриваемых издательством как надежные. Тем не менее, имея в виду возможные человеческие или технические ошибки, издательство не может гарантировать абсолютную точность и полноту приводимых сведений и не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 978-5-49807-875-5

© ООО Издательство «Питер», 2011

Краткое содержание

Введение	17
Часть I. Вычислительные системы	19
Глава 1. Архитектура вычислительных систем	20
Глава 2. Становление и эволюция ЭВМ	29
Глава 3. Информационно-логические основы построения вычислительных машин	56
Часть II. Персональные компьютеры	81
Глава 4. Функциональная и структурная организация ПК . . .	82
Глава 5. Микропроцессоры.	93
Глава 6. Системные платы и чипсеты	120
Глава 7. Интерфейсная система ПК	130
Глава 8. Основная память ПК	149
Глава 9. Внешние запоминающие устройства.	166
Глава 10. Видеотерминальные устройства.	193
Глава 11. Внешние устройства ПК	216
Глава 12. Средства мультимедиа	243
Глава 13. Портативные компьютеры	254
Часть III. Программное управление	273
Глава 14. Программное управление — основа автоматизации вычислительного процесса	274

Глава 15. Элементы программирования на языке ассемблер	297
Часть IV. Компьютерные сети	333
Глава 16. Основы построения компьютерных сетей	334
Глава 17. Локальные вычислительные сети	383
Глава 18. Корпоративные компьютерные сети	412
Часть V. Системы телекоммуникаций	437
Глава 19. Системы и каналы передачи данных	438
Глава 20. Радиотелефонная связь	450
Глава 21. Компьютерные системы оперативной связи.	479
Часть VI. Качество и эффективность информационных систем	491
Глава 22. Надежность информационных систем	493
Глава 23. Достоверность информационных систем	505
Глава 24. Безопасность информационных систем	518
Глава 25. Эффективность информационных систем	534
Заключение. Перспективы развития информационных систем	541
Литература.	545
Алфавитный указатель.	549

Часть I

**Вычислительные
системы**

Глава 1

Архитектура вычислительных систем

Первые компьютеры (автоматические электронные вычислительные машины с программным управлением) были созданы в конце 40-х годов XX века и представляли собой гигантские вычислительные монстры, использовавшиеся только для вычислительной обработки информации. По мере развития компьютеры существенно уменьшились в размерах, но обросли дополнительным оборудованием, необходимым для их эффективного использования. В 70-х годах компьютеры из вычислительных машин сначала превратились в *вычислительные системы*, а затем в *информационно-вычислительные системы*. В табл. 1.1 показана эволюция технологий использования компьютерных систем.

Таблица 1.1. Эволюция компьютерных информационных технологий

Параметр	Этапы развития технологии				
	50-е годы	60-е годы	70-е годы	80-е годы	Настоящее время
Цель использования компьютера (преимущественно)	Научно-технические расчеты	Технические и экономические расчеты	Управление и экономические расчеты	Управление, предоставление информации	Телекоммуникации, информационное обслуживание и управление
Режим работы компьютера	Однопрограммный	Пакетная обработка	Разделение времени	Персональная работа	Сетевая обработка
Интеграция данных	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая	Сверхвысокая
Расположение пользователя	Машинный зал	Отдельное помещение	Терминальный зал	Рабочий стол	Произвольное мобильное
Тип пользователя	Инженеры-программисты	Профессиональные программисты	Программисты	Пользователи с общей компьютерной подготовкой	Малообученные пользователи
Тип диалога	Работа за пультом компьютера	Обмен перфоносителями и машинограммами	Интерактивный (через клавиатуру и экран)	Интерактивный с жестким меню	Интерактивный экранного типа «вопрос — ответ»

Как видно из таблицы, в настоящее время основные цели использования компьютеров — информационное обслуживание и управление, сейчас вычислительные машины и системы, по существу, выполняют функции информационно-вычислительных систем. Рассмотрим более подробно внутреннюю архитектуру вычислительных систем (ВС).

Вычислительная система — это совокупность одного или нескольких компьютеров или процессоров, программного обеспечения и периферийного оборудования, организованная для совместного выполнения информационно-вычислительных процессов. В вычислительной системе компьютер может быть один, но агрегированный с многофункциональным периферийным оборудованием. Стоимость периферийного оборудования часто во много раз превосходит стоимость компьютера. В качестве распространенного примера одомашинной ВС можно привести *систему телеобработки информации*. Но все же классическим вариантом ВС является многомашинный и многопроцессорный варианты.

Первые ВС создавались с целью увеличить быстродействие и надежность работы путем параллельного выполнения вычислительных операций. Как это ни парадоксально, «тормозом» в дальнейшем увеличении быстродействия компьютера является конечная скорость распространения электромагнитных волн — скорость света, равная 299 792 458 м/с. Время распространения сигнала между элементами ВС может значительно превышать время переключения электронных схем. Поэтому строго последовательная модель выполнения операций, характерная для классической структуры компьютера — структуры фон Неймана, не позволяет существенно повысить быстродействие ВС.

Параллелизм выполнения операций существенно повышает быстродействие системы; он может также значительно повысить и надежность (при отказе одного компонента системы его функции может взять на себя другой), и достоверность функционирования системы, если операции будут дублироваться, а результаты их выполнения сравниваться или мажоритироваться.

Для современных ВС, за исключением суперкомпьютеров, критерии обоснования их необходимости уже несколько иные — важно само информационное обслуживание пользователей, сервис и качество этого обслуживания. Для суперкомпьютеров, представляющих собой многопроцессорные ВС, важнейшими показателями являются их производительность и надежность.

Укрупненная блок-схема классического компьютера показана на рис. 1.1.

1. **Процессор** (*центральный процессор*) — основной вычислительный блок компьютера, содержит важнейшие функциональные устройства:
 - *устройство управления* с интерфейсом процессора (системой сопряжения и связи процессора с другими узлами машины);
 - *арифметико-логическое устройство*;
 - *процессорную память*.Процессор, по существу, является устройством, выполняющим все функции элементарной вычислительной машины.
2. **Оперативная память** — запоминающее устройство, используемое для оперативного хранения и обмена информацией с другими узлами машины.
3. **Каналы связи** (внутримашинный интерфейс) служат для сопряжения центральных узлов машины с ее внешними устройствами.



Рис. 1.1. Блок-схема компьютера

4. **Внешние устройства** обеспечивают эффективное взаимодействие компьютера с окружающей средой: пользователями, объектами управления, другими машинами. В состав внешних устройств обязательно входят внешняя память и устройства ввода-вывода.

Вычислительная система может строиться на основе целых компьютеров — **многомашинная ВС**, либо отдельных процессоров — **многопроцессорная ВС**.

Вычислительные системы бывают:

- однородные;
- неоднородные.

Однородная ВС строится на основе однотипных компьютеров или процессоров, позволяет использовать стандартные наборы программных средств, типовые протоколы (процедуры) сопряжения устройств. Их организация значительно проще, облегчается обслуживание систем и их модернизация.

Неоднородная ВС включает в свой состав различные типы компьютеров или процессоров. При построении системы приходится учитывать их различные технические и функциональные характеристики, что существенно усложняет создание и обслуживание таких систем.

Вычислительные системы работают в:

- оперативном режиме (*on-line*);
- неоперативном режиме (*off-line*).

Оперативные системы функционируют в реальном масштабе времени, в них реализуется оперативный режим обмена информацией — ответы на запросы посту-

пают незамедлительно. В *неоперативных* ВС допускается режим «отложенного ответа», когда результаты выполнения запроса можно получить с некоторой задержкой (иногда даже в следующем сеансе работы системы).

Различают ВС с *централизованным* и *децентрализованным* управлением. В первом случае управление выполняет выделенный компьютер или процессор, во втором — эти компоненты равноправны и могут брать управление на себя.

Кроме того, ВС могут быть:

- территориально-сосредоточенными* (все компоненты размещены в непосредственной близости друг от друга);
- распределенными* (компоненты могут располагаться на значительном расстоянии, например, вычислительные сети);
- структурно одноуровневыми* (имеется лишь один общий уровень обработки данных);
- многоуровневыми* (иерархическими) структурами. В иерархических ВС машины или процессоры распределены по разным уровням обработки информации, некоторые машины (процессоры) могут специализироваться на выполнении определенных функций.

Наконец, ВС делятся на:

- одномашинные;
- многомашинные;
- многопроцессорные.

Многомашинные и многопроцессорные ВС

Вычислительные системы могут строиться на основе целых компьютеров или отдельных процессоров. В первом случае ВС будет *многомашинной*, во втором — *многопроцессорной*.

Многомашинная ВС содержит некоторое число компьютеров, информационно взаимодействующих между собой. Машины могут находиться рядом друг с другом, а могут быть удалены друг от друга на некоторое, иногда значительное расстояние (вычислительные сети).

В *многомашинных* ВС каждый компьютер работает под управлением своей операционной системы (ОС). А поскольку обмен информацией между машинами выполняется под управлением ОС, взаимодействующих друг с другом, динамические характеристики процедур обмена несколько ухудшаются (требуется время на согласование работы самих ОС). Информационное взаимодействие компьютеров в многомашинной ВС может быть организовано на уровне:

- процессоров;
- оперативной памяти (ОП);
- каналов связи.

При непосредственном взаимодействии процессоров друг с другом информационная связь реализуется через регистры процессорной памяти и требует наличия в ОС весьма сложных специальных программ.

Взаимодействие на уровне ОП сводится к программной реализации общего поля оперативной памяти, что несколько проще, но также требует существенной

модификации ОС. Под общим полем имеется в виду равнодоступность модулей памяти: все модули памяти доступны всем процессорам и каналам связи.

На уровне каналов связи взаимодействие организуется наиболее просто и может быть достигнуто внешними по отношению к ОС программами-драйверами, обеспечивающими доступ от каналов связи одной машины к внешним устройствам других (формируется общее поле внешней памяти и общий доступ к устройствам ввода-вывода).

Все вышесказанное иллюстрируется схемой взаимодействия компьютеров в двух-машинной ВС, представленной на рис. 1.2.

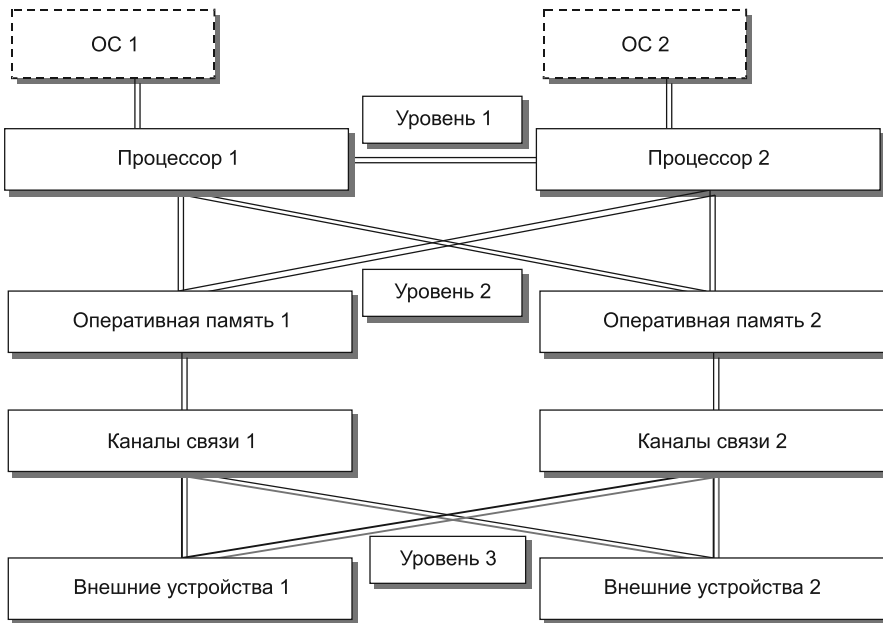


Рис. 1.2. Схема взаимодействия компьютеров в ВС

Ввиду сложности организации информационного взаимодействия на 1-м и 2-м уровнях в большинстве многомашинных ВС используется 3-й уровень, хотя и динамические характеристики (в первую очередь быстродействие), и показатели надежности таких систем существенно ниже.

В **многопроцессорной ВС (МПВС)** имеется несколько процессоров, информационно взаимодействующих между собой либо на уровне регистров процессорной памяти, либо на уровне оперативной памяти. Этот тип взаимодействия принят в большинстве случаев, так как организуется значительно проще и сводится к созданию общего поля оперативной памяти для всех процессоров. Общий доступ к внешней памяти и к устройствам ввода-вывода обеспечивается обычно через каналы ОП. Важным является и то, что многопроцессорная вычислительная система работает под управлением единой операционной системы, общей для всех процессоров. Это существенно улучшает динамические характеристики ВС, но требует наличия специальной, весьма сложной операционной системы.

Схема взаимодействия процессоров в ВС показана на рис. 1.3.

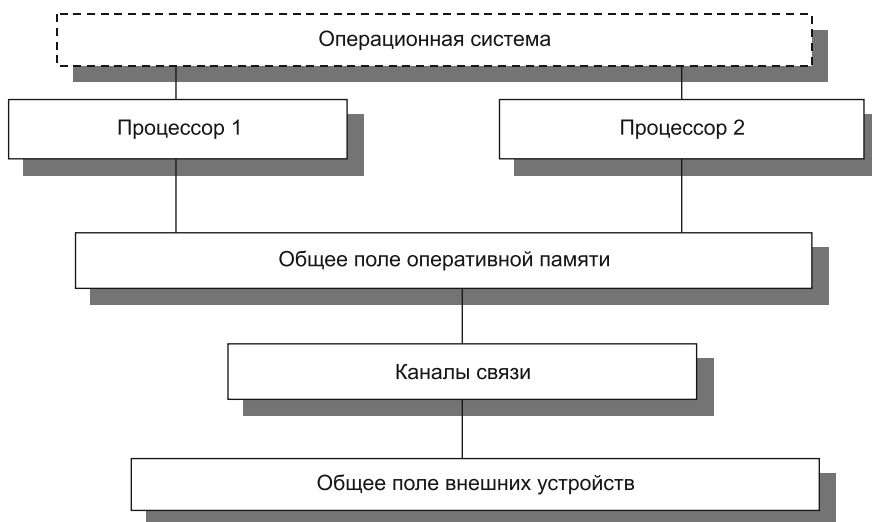


Рис. 1.3. Схема взаимодействия процессоров в ВС

Быстродействие и надежность многопроцессорных ВС по сравнению с многомашиными, взаимодействующими на 3-м уровне, существенно повышаются, во-первых, ввиду ускоренного обмена информацией между процессорами, более быстрого реагирования на ситуации, возникающие в системе, во-вторых, вследствие большей степени резервирования устройств системы (система сохраняет работоспособность, пока работоспособны хотя бы по одному модулю каждого типа устройств).

Типичным примером массовых многомашиных ВС могут служить **компьютерные сети**, примером многопроцессорных ВС — *суперкомпьютеры*.

Создать высокопроизводительные компьютеры на одном микропроцессоре (МП) не представляется возможным ввиду ограничения, обусловленного конечным значением скорости распространения электромагнитных волн (300 000 км/с), поскольку время распространения сигнала на расстояние нескольких миллиметров (линейный размер стороны МП) при быстродействии 100 миллиардов операций в секунду становится соизмеримым со временем выполнения одной операции. Поэтому суперкомпьютеры создаются в виде высокопараллельных многопроцессорных вычислительных систем (МПВС).

Высокопараллельные многопроцессорные вычислительные системы

Высокопараллельные МПВС (их иногда называют *ВС с массовым параллелизмом*) имеют несколько разновидностей.

1. **Магистральные** (конвейерные) МПВС, у которых процессор одновременно выполняет разные операции над последовательным потоком обрабатываемых данных. По принятой классификации такие МПВС относятся к системам с много-

кратным потоком команд и однократным потоком данных (МКОД, или MISD – Multiple Instruction Single Data).

- Векторные МПВС**, у которых все процессоры одновременно выполняют одну команду над различными данными – однократный поток команд с многократным потоком данных (ОКМД, или SIMD – Single Instruction Multiple Data).

ПРИМЕЧАНИЕ

Принцип SIMD используется и для повышения производительности микропроцессоров – суперскалярные (векторные) МП Pentium III, Pentium 4, PowerPC и др.

- Матричные МПВС**, у которых микропроцессор одновременно выполняет разные операции над последовательными потоками обрабатываемых данных – многократный поток команд с многократным потоком данных (МКМД, или MIMD – Multiple Instruction Multiple Data).

Условные структуры однопроцессорной (SISD) и упомянутых многопроцессорных ВС показаны на рис. 1.4.

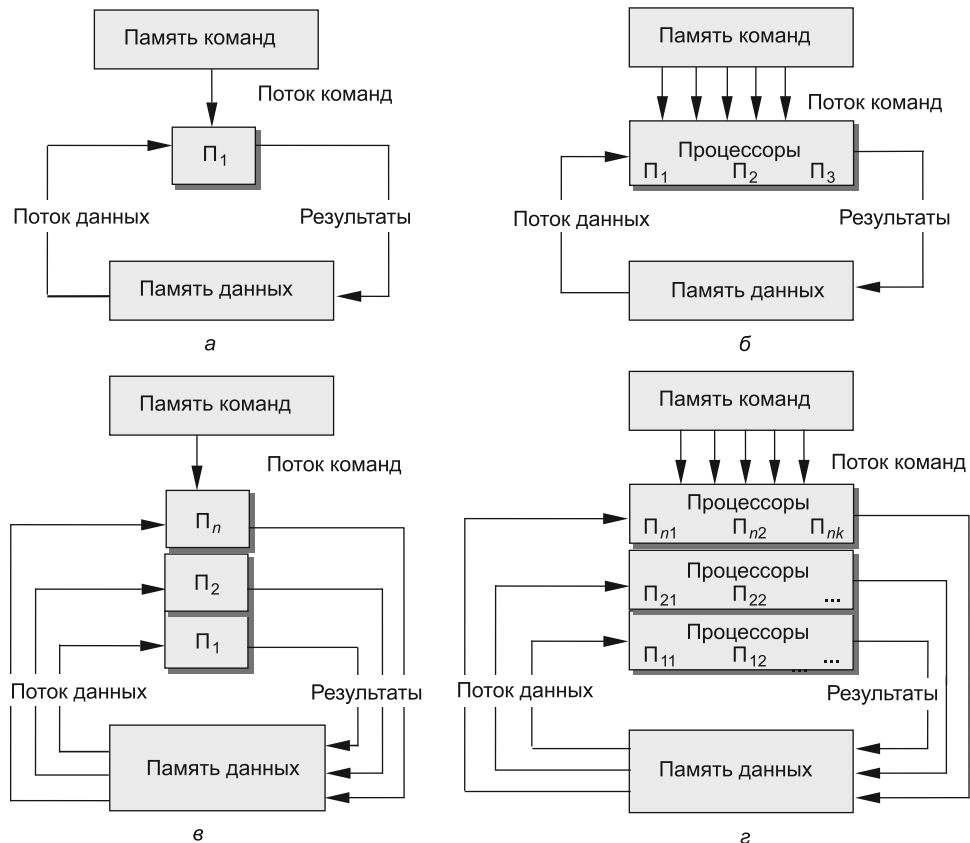


Рис. 1.4. Условные структуры МПВС

Ассоциативные и потоковые ВС

Ассоциативные (АВС) и *потоковые* (ПВС) вычислительные системы являются разновидностями высокопараллельных МПВС.

Ассоциативные вычислительные системы

АВС строится на базе организованной в виде массива ассоциативной памяти — ассоциативно-запоминающего устройства (АЗУ). Доступ к ячейкам АЗУ осуществляется не по адресу, а по их содержанию, точнее — по ассоциативному признаку (поисковому образу), соответствующему хранимой в ячейке информации. Если в ячейке содержится информация, содержащая заданный признак, эта информация считывается.

Поиск ассоциативного признака выполняется по всем ячейкам массива памяти, считывание осуществляется одновременно из всех найденных ячеек массива памяти. Определенные группы ячеек массива памяти имеют свои локальные процессоры, позволяющие при считывании выполнять логические и арифметические операции над считываемой информацией. Запись в АЗУ производится в любую свободную ячейку (у ячейки имеется признак: свободная она или нет).

Отметим, что ячейки АЗУ должны допускать считывание без разрушения информации, так как считывание выполняется сразу из нескольких ячеек и автоматически выполнить перезапись считанной информации, как это делается в обычных адресных ОЗУ, невозможно (или, по крайней мере, очень сложно). Ячейки могут маскироваться своими локальными процессорами и, если это необходимо, не подвергаться считыванию без предъявления пароля.

Элементы ассоциативной выборки данных используются для заполнения КЭШ-памяти в микропроцессорах.

Потоковые вычислительные системы

Эффективной технологией, поддерживающей параллельность вычислений в ВС, является технология управления последовательностью выполнения команд программы потоком данных. В традиционных фон неймановских машинах последовательность выполнения команд управляется счетчиком команд; команды выполняются строго в той последовательности, в которой они следуют в программе, то есть в последовательности их записи в памяти машины (естественно, если нет команд передачи управления). Это затрудняет организацию параллельного выполнения сразу нескольких команд программы.

Теоретически существует несколько моделей управления последовательностью исполнения команд в машине:

- последовательностью следования команд в программах;
- потоком данных: команда выполняется, как только доступны все ее операнды;
- по запросу: команда выполняется, как только результаты ее исполнения требуются другим командам.

Управление потоком данных естественно поддерживает параллельность вычислений, ибо, как только появятся исходные данные для выполнения нескольких команд, эти команды могут параллельно одновременно выполняться. Вычислительные системы, в которых последовательность выполнения команд программы управляется потоком данных, называются **потоковыми** ВС.

Элементы потокового управления используются и в микропроцессорах. Так, в МП Pentium при конвейерной обработке инструкции выполняются параллельно, причем не в порядке, установленном в программе, а по мере готовности операндов и при наличии свободных функциональных устройств.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое «система»? Перечислите и кратко определите основные понятия, используемые для характеристики системы.
2. Дайте определение информационной системы.
3. Приведите многоаспектную классификацию информационных систем.
4. Назовите и поясните основные функции информационной системы.
5. Перечислите и поясните основные функциональные и обеспечивающие подсистемы ИС.
6. Что такое «вычислительные системы» и каковы их разновидности?
7. В чем особенности архитектуры многомашинных, многопроцессорных ВС?
8. Для чего создаются ВПВС — высокопараллельные ВС?
9. Рассмотрите особенности построения высокопараллельных ВС.
10. Дайте общую характеристику MISD — магистральных ВПВС.
11. Дайте общую характеристику SIMD — векторных ВПВС.
12. Дайте общую характеристику MIMD — матричных ВПВС.
13. Дайте общую характеристику ассоциативных ВПВС.
14. Дайте общую характеристику потоковых ВПВС.

Глава 2

Становление и эволюция ЭВМ

Электронная вычислительная машина (ЭВМ), компьютер — комплекс технических средств, предназначенных для автоматической обработки информации в процессе решения вычислительных и информационных задач.

По *принципу действия* вычислительные машины делятся на три больших класса: аналоговые, цифровые и гибридные (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Классификация вычислительных машин по принципу действия

Критерием деления вычислительных машин на эти три класса является форма представления информации, с которой они работают (рис. 2.2).

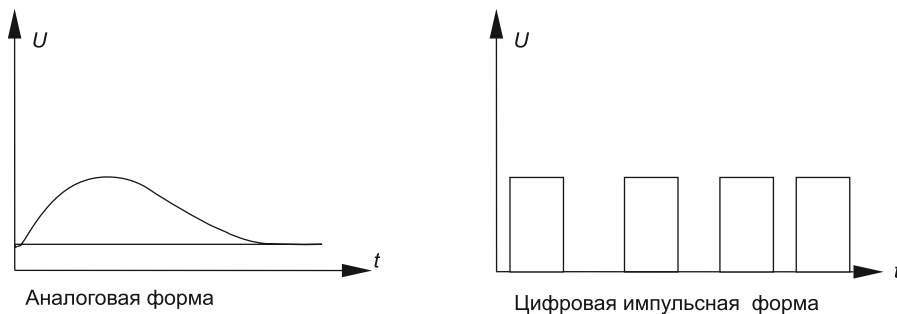


Рис. 2.2. Две формы представления информации в машинах

- *ЦВМ* — *цифровые вычислительные машины*, или вычислительные машины дискретного действия, работают с информацией, представленной в дискретной, а точнее, в цифровой форме.
- *АВМ* — *аналоговые вычислительные машины*, или вычислительные машины непрерывного действия, работают с информацией, представленной в непрерывной (аналоговой) форме, то есть в виде непрерывного ряда значений какой-либо физической величины (чаще всего электрического напряжения).

ПРИМЕЧАНИЕ

АВМ весьма просты и удобны в эксплуатации; программирование задач для решения их на этих машинах, как правило, не трудоемкое. Скорость решения задач изменяется по желанию оператора и может быть сделана сколь угодно большой (больше чем у ЦВМ), но точность решения задач очень низкая (относительная погрешность до 2–5%). На АВМ эффективно решаются математические задачи, содержащие дифференциальные уравнения, не требующие сложной логики.

Первая электромеханическая аналоговая вычислительная машина была создана в Массачусетском технологическом институте в 1930 году под руководством профессора Ванневара Буша. В конце 30-х годов появились уже и электронные АВМ (на 10 лет раньше, чем электронные ЦВМ).

- *ГВМ* — *гибридные вычислительные машины*, или вычислительные машины комбинированного действия, работают с информацией, представленной и в цифровой, и в аналоговой форме; они совмещают в себе достоинства АВМ и ЦВМ. ГВМ целесообразно использовать для решения задач управления сложными быстродействующими техническими комплексами.

В экономике (да и в науке и в технике) получили подавляющее применение ЦВМ с электрическим представлением дискретной информации — электронные цифровые вычислительные машины, обычно называемые просто *электронными вычислительными машинами* (ЭВМ), без упоминания об их цифровом характере.

В вычислительных системах используются практически только ЭВМ (исключение составляют некоторые специальные системы научного и оборонного назначения, где аналоговые вычислительные машины используются достаточно активно, в частности для моделирования сложных систем и процессов).

В связи с вышесказанным далее мы будем рассматривать только ЭВМ.

Становление ЭВМ

Первая электронная вычислительная машина на основе электронных вакуумных ламп была создана по заказу артиллеристов в Пенсильванском университете в 1946 году — машина ENIAC (Electronic Numeral Integrator and Computer). Это была машина с программным управлением, но программа вводилась путем шнуровой коммутации, как в табуляторах.

ЭВМ ENIAC весила более 30 тонн; имела быстродействие несколько сотен операций в секунду; оперативную память емкостью 20 чисел; занимала огромный зал площадью около 150 м².

В середине 40-х годов появились теоретические разработки, указывающие, что более эффективными могут быть машины с хранимой программой. По этому направлению следует отметить в первую очередь работы Н. Винера и Дж. фон Неймана.

Основные рекомендации по созданию эффективных электронных вычислительных машин были предложены Винером в докладной записке В. Бушу, под руководством которого они вместе с Дж. фон Нейманом работали в Принстонском институте, а затем изложены в книге «Кибернетика».

Винер писал: «В настоящее время существует два типа вычислительных машин:

- машины, подобные дифференциальному анализатору Буша, именуемые аналоговыми машинами. В них данные изображаются величинами, измеряемыми по какой-либо непрерывной шкале, так что точность машины определяется точностью построения этой шкалы;
- машины, подобные обычному арифмометру, которые называются цифровыми машинами; в них данные изображаются серией выборов из нескольких возможностей, а точность определяется четкостью различения отдельных возможностей при каждом выборе и числом сделанных выборов.

Мы видим, что для точных вычислений цифровые машины, во всяком случае, лучше, а из них лучше всего машины с двоичной системой, у которой при каждом выборе предоставляется лишь две возможности. Употребление нами машин с десятичной шкалой обусловлено просто той исторической случайностью, что десятичная система, основанная на числе пальцев, уже была в употреблении, когда индусы сделали свое великое открытие, выявив значение нуля и преимущество позиционной системы счисления» [18, с. 148]. И чуть дальше: «В случае идеальной вычислительной машины все данные должны быть введены в машину в начале работы, и затем она должна по возможности быть свободна от человеческого вмешательства до конца работы. Это означает, что в машину должны быть введены вначале не только все цифровые данные, но и все правила их сочетания в виде инструкций, учитывающих любую ситуацию, которая может возникнуть в ходе вычислений. Поэтому вычислительная машина должна быть не только арифметической, но также и логической машиной, и должна комбинировать возможности согласно систематическому алгоритму. Существует много алгоритмов, которые можно использовать для комбинирования возможностей; но простейший из них известен как алгебра логики, или булева алгебра» [18, с. 149].

Широко известная концепция построения ЭВМ, предложенная профессором Принстонского института Дж. фон Нейманом, во многом перекликается с концепцией Винера.

Основные принципы организации ЭВМ Дж. фон Неймана:

1. Принцип двоичного кодирования. Электронные машины должны работать не в десятичной, а в двоичной системе счисления.
2. Принцип программного управления. Машина выполняет вычисления по программе. Программа состоит из набора команд, которые исполняются автоматически друг за другом в определенной последовательности.
3. Принцип хранимой программы. В процессе решения задачи программа ее исполнения должна размещаться в запоминающем устройстве машины, обладающем высокой скоростью выборки и записи.
4. Принцип однотипности представления чисел и команд. Программа, так же как и числа, с которыми оперирует машина, записывается в двоичном коде. Таким образом, по форме представления команды и числа однотипны, а это дает возможность машине исполнять операции над командами программы.

5. Принцип иерархичности памяти. Сложность реализации единого емкого быстродействующего запоминающего устройства требует иерархического построения памяти. По меньшей мере, должно быть два уровня иерархии: основная память и внешняя память.
6. Принцип адресности основной памяти. Основная память должна состоять из пронумерованных ячеек, каждая из которых доступна программе в любой момент времени по ее двоичному адресу или по присвоенному ей имени (имя ячейке присваивается в программе, и соответствующий этому имени адрес должен храниться в основной памяти на протяжении всего времени выполнения программы).

Структура ЭВМ, предложенная Дж. фон Нейманом, должна содержать следующие устройства: управляющее устройство, арифметическое устройство, основную (оперативную) и внешнюю память, устройство ввода программ и данных, устройство вывода результатов расчетов, пульт ручного управления.

Структура фон неймановской ЭВМ показана на рис. 2.3.

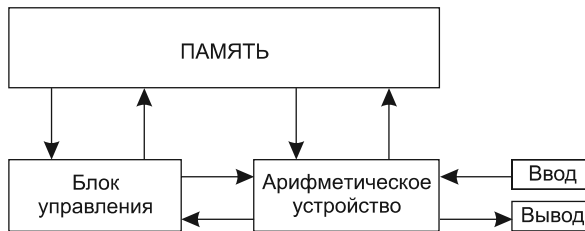


Рис. 2.3. Структура фон неймановской ЭВМ

Концепции Винера и фон Неймана быстро нашли свое воплощение в новых ЭВМ, созданных уже в конце 40-х — начале 50-х годов. В первую очередь следует отметить американские ЭВМ: ЭДСАК, СЕАК, ЭДВАК и первые, поступившие в открытую продажу серийные машины с хранимой программой, УНИВАК (1949 г.) и IBM 701.

Какие же основные характеристики имел первоначально изготовленный по заказу бюро переписи населения США компьютер УНИВАК (UNIVAC — UNIVersal Automatic Computer)?

- Ввод данных осуществлялся с магнитной ленты емкостью 1,4 Мбайт и с перфокарт.
- Машинное слово — 78 бит, емкость ОЗУ — 1000 слов, для хранения которых использовалось 100 ртутных линий задержки (ЛЗ) с обратной связью (импульсы с выхода ЛЗ подаются обратно на ее вход, и таким образом машинное слово непрерывно циркулирует по линии задержки).
- Производительность: сложение за 500 мкс, умножение за 2,5 мс. Имелся контроль достоверности преобразований информации, основанный на сравнении результатов работы наиболее важных задублированных схем и на контроле четности.

В начале 50-х годов к американским машинам присоединились и советские: по заказу атомщиков в 1951 году в Киеве под руководством академика С. А. Лебедева была создана первая отечественная машина МЭСМ (Малая Электронная Счетная Машина); в 1952 году — машина БЭСМ (Быстродействующая ЭСМ, имевшая позже продолжения: БЭСМ 2, БЭСМ 4, БЭСМ 6, — рис. 2.4).

Популярная машина БЭСМ 2 имела следующие характеристики.

- ❑ Разрядность машины 39 бит. Числа с плавающей запятой имеют разрядность: мантисса — 32 бита, порядок — 5 бит, по 1 биту знаки мантиссы и порядка. Диапазон представления чисел — от 10^{-9} до 10^9 . В формате с фиксированной запятой представляются только дробные числа меньше 1.
- ❑ Возможность двоично-кодированного представления десятичных чисел.
- ❑ Быстродействие — до 10 000 операций в секунду.
- ❑ В машине используются одно-, двух-, трехадресные и безадресные команды. Разрядность адресов — 11 бит, код операции — 6 бит. Всего 32 команды: 9 арифметических операций, 6 логических операций, 8 — передачи кодов, 9 операций управления.
- ❑ Запоминающие устройства: ОЗУ на ферритовых сердечниках емкостью 2048 39-разрядных чисел со временем обращения 10 мкс. ОЗУ на магнитных барабанах: 2 барабана по 5000 чисел со средним временем доступа 40 мс и скоростью считывания 800 чисел/с. ВЗУ на магнитных лентах: 4 шт. по 30 000 чисел со скоростью считывания 400 чисел/с.
- ❑ Ввод с перфоленты со скоростью 20 кодов/с. Печать — 20 чисел/с.



Рис. 2.4. Блок-схема БЭСМ

Машина содержит 4000 электронных ламп, 5000 полупроводниковых диодов, 200 000 ферритовых сердечников. Потребляемая мощность — 35 кВт (без мощности вентиляторов).

В 50–60-е годы XX века были разработаны еще более десятка советских ЭВМ: «Стрела», «Урал», «Минск», М-20, М-220 и другие.

У истоков создания советской вычислительной техники стояли такие крупные отечественные ученые, как **С. А. Лебедев**, **Б. И. Рамеев**, **Ю. А. Базилевский**,

И. С. Брук, А. А. Ляпунов, А. И. Китов, Н. А. Кринитский, М. Р. Шура-Бура, М. А. Гаврилов, А. И. Берг, А. Н. Колмогоров, В. М. Глушков, Б. Н. Наумов и другие.

ПРИМЕЧАНИЕ

В составе большинства указанных ЭВМ можно назвать и различные их модификации. Так, модельный ряд машин «Минск» — одних из лучших отечественных ЭВМ того времени — включал: «Минск 1», «Минск 2», «Минск 22», «Минск 23», «Минск 32». Следует также отметить одну из немногих машин, полностью основанных на отечественной разработке, интересную ЭВМ «Рута-110», не получившую широкого распространения из-за специфического программного обеспечения.

Эволюция ЭВМ

Начиная с 1950 года каждые 7–10 лет кардинально обновлялись конструктивно-технологические и программно-алгоритмические принципы построения и использования ЭВМ. В связи с этим правомерно говорить о поколениях вычислительных машин. Условно каждому поколению можно отвести 10 лет.

Первое поколение ЭВМ: 1950–1960-е годы

Логические схемы создавались на дискретных радиодеталях и электронных вакуумных лампах с нитью накала. В оперативных запоминающих устройствах использовались магнитные барабаны, акустические ультразвуковые ртутные и электромагнитные линии задержки, электронно-лучевые трубки (ЭЛТ, позже — магнитные сердечники). В качестве внешних запоминающих устройств применялись накопители на магнитных лентах, перфокартах, перфолентах и штекерные коммутаторы.

Напряжения питания компьютерных схем составляли десятки-сотни вольт, а в случае использования ЭЛТ и киловольты. Машины потребляли несколько десятков киловатт. ЭВМ имели центральное устройство управления (УУ), обеспечивающее строго последовательную работу всех основных устройств. Тактовая частота работы УУ была в пределах десятков-сотен килогерц. Ввод-вывод информации осуществлялся с перфокарт, перфолент, магнитных лент или с клавиатуры.

Программирование работы ЭВМ этого поколения выполнялось в двоичной системе счисления на машинном языке, то есть программы были жестко ориентированы на конкретную модель машины и «умирали» вместе с этими моделями.

ПРИМЕЧАНИЕ

О трудоемкости программирования на машинном языке можно судить по американской статистике: для разработки и отладки программы размером 10 000 машинных команд затрачивалось примерно 10 000 человеко-часов работы программистов. То есть программист на формирование, логическое согласование и отладку одной машинной команды тратил в среднем один час!

Только в середине 50-х годов появились машинно-ориентированные языки типа языков символического кодирования (ЯСК), позволявшие вместо двоичной записи команд и адресов использовать их сокращенную словесную (буквенную) запись и десятичные числа. В 1956 году был создан первый язык программирования высокого уровня для математических задач Фортран, а в 1958 году — универсальный язык программирования Алгол. Использовались машины первого поколения, по образному выражению академика В. М. Глушкова, как «большие арифмометры»,

ибо и программы и данные вводились в память ЭВМ непосредственно перед решением каждой конкретной задачи, результаты решения сразу же выводились из машины для дальнейшего неавтоматизированного использования. ЭВМ были ориентированы на численное решение научно-технических задач, для которых характерны малый объем входной и выходной информации и большое количество вычислительных операций по ее обработке.

Надежность машин первого поколения была крайне низкой — несколько десятков часов наработки на отказ. Для поддержания приемлемой надежности машины требовали регулярного ежесуточного, еженедельного и ежемесячного профилактического обслуживания, во время которого выявлялись и заменялись потенциально ненадежные элементы (еженедельное обслуживание было более тщательным, нежели ежесуточное, а ежемесячное — еще более трудоемким). Работал на машине непосредственно программист, чуть позже — оператор, но и тот и другой общались с ЭВМ посредством громадного пульта, имевшего большое число переключателей (тумблеров) и световых индикаторов (лампочек), отображавших информацию в двоичной системе счисления («горит — не горит» лампочка). Организационно ЭВМ эксплуатировались в составе вычислительных центров, причем для эффективного использования каждой ЭВМ необходим был штат из 10–20 программистов (программы с одной машины на другую, как правило, не переносились). В те годы количество программистов существенно превышало количество имевшихся ЭВМ (в 1960 году во всем мире насчитывалось всего несколько тысяч машин).

Названные ранее ЭВМ, начиная от UNIVAC и заканчивая БЭСМ 2 и первыми моделями «Минск» и «Урал», относятся к первому поколению вычислительных машин.

Второе поколение ЭВМ: 1960–1970-е годы

Логические схемы строились на дискретных полупроводниковых¹ и магнитных элементах (диоды, биполярные транзисторы, тороидальные ферритовые микро-трансформаторы). В качестве конструктивно-технологической основы использовались схемы с печатным монтажом (платы из фольгированного гетинакса). Широко стал использоваться блочный принцип конструирования машин, который позволяет подключать к основным устройствам большое число разнообразных внешних устройств, что обеспечивало большую гибкость использования компьютеров.

Тактовые частоты работы электронных схем повысились до сотен кГц. Напряжение питания схем снизилось до 10–15 В, потребляемая мощность — до сотен ватт. Надежность работы ЭВМ существенно возросла — до нескольких сотен часов наработки на отказ. Регулярное профилактическое обслуживание по-прежнему требовалось.

В оперативных запоминающих устройствах чаще всего использовались миниатюрные тороидальные ферритовые сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса (для хранения одного бита информации требовались 1 или 2 сердечника с наружным диаметром 1–1,2 мм). Постоянные запоминающие устройства были трансформаторные (один тороидальный сердечник наружным диаметром 3–4 мм использовался для хранения битов одного разряда нескольких сотен чисел; для хра-

¹ Транзистор был изобретен сотрудниками Bell Laboratories (США) Д. Бардином, У. Браттейном и У. Шокли в 1949 году, за что в 1956 году они были удостоены Нобелевской премии.

нения кода «1» провод «прошивался» в отверстие сердечника, для хранения кода «0» провод проходил мимо сердечника).

Стали применяться внешние накопители на жестких магнитных дисках¹ и на флоппи-дисках — промежуточный уровень памяти между накопителями на магнитных лентах и оперативной памятью.

В 1964 году появился первый монитор для компьютеров — IBM-2250. Это был монохромный дисплей с экраном 12 × 12 дюймов и разрешением 1024 × 1024 пикселей. Он имел частоту кадровой развертки 40 Гц. Устройство управления ЭВМ поддерживало систему прерываний программ, многопрограммную работу и параллельность использования устройств машины.

Появились первые операционные системы, новые языки программирования: машинно-ориентированные низкоуровневые (ассемблеры) и алгоритмические высокоуровневые (Кобол, Бейсик и другие). Программы стали переносимыми с одного типа компьютера на другой.

Устройства машин и их программы стали больше ориентированы на обработку массивов информации. ЭВМ второго поколения стали применяться не только для решения научно-технических задач, но и для автоматизации процессов технологического и организационного (административного) управления. На базе полупроводниковых ЭВМ стали успешно создаваться автоматизированные системы управления предприятиями (АСУП) и системы автоматического управления технологическими процессами. Создаваемые на базе компьютеров системы управления требовали от ЭВМ более высокой производительности, а главное — надежности. В компьютерах стали широко использоваться коды с обнаружением и исправлением ошибок, встроенные схемы контроля. В машинах второго поколения были впервые реализованы режимы пакетной обработки и телеобработки информации.

Первой ЭВМ, в которой частично использовались полупроводниковые приборы вместо электронных ламп, была машина SEAC (Standarts Eastern Automatic Computer), созданная в 1951 году. Одними из первых полностью полупроводниковых машин были:

- TRADIC (TRAnsistor Digital Computer) — 1956 г. (малая машина);
- TX-0 (Transistor eXperimental computer — 0) — 1957 г. (малая машина)²;
- IBM 7070 — 1957 г.³ (большая машина);
- Philco — 1957 г. (большая машина);
- Recomp 2 — 1957 г. (малая машина);
- Univac Solid State — 1958 г. (большая машина);

¹ Первый накопитель на жестких магнитных дисках RAMAC 305 создала фирма IBM в 1956 году. «Винчестер» — такое неофициальное его название, позже ставшее почти официальным, было присвоено ввиду случайного совпадения его формальных параметров с калибром английской охотничьей винтовки «винчестер». Накопитель RAMAC 305 содержал 50 магнитных дисков диаметром около метра каждый и обладал суммарной емкостью около 5 Мбайт.

² Машина была создана в Массачусетском технологическом институте под руководством К. Ольсена, который в 1967 году основал занимающую ведущее положение в мире по производству малых компьютеров PDP компанию DEC (Digital Equipment Corporation). DEC наряду с фирмами IBM и Intel предложила много эффективных нововведений в компьютерные технологии.

³ Первую ламповую ЭВМ — SSEC (Selective Sequence Electronic Calculator) фирма IBM выпустила в 1948 году.

- National Cash-304 — 1958 г. (большая машина);
- Ramington Rand USS — 1958 г. (малая машина);
- IBM 7090 — 1959 г. (большая машина);
- IBM 1401 — 1959 г. (малая машина);
- Univac 3 — 1959 г. (большая машина).

Стоимость больших машин составляла от \$500 000 до \$2 300 000, малых машин до \$300 000. Заслуживает внимания и первая (1961 год) супермалая полупроводниковая машина IBM 1620, размещавшаяся (без накопителя на магнитной ленте) на конторском столе (стоимость этой машины была \$75 000).

В начале 60-х годов полупроводниковые машины стали производиться и в СССР. Основные характеристики некоторых полупроводниковых отечественных машин представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Характеристики отечественных ЭВМ 2-го поколения

Модель ЭВМ	Производительность, операц./с ¹	Разрядность, бит	Адресность ²	Емкость ОЗУ, К чисел	Цикл ОЗУ, мкс
Минск 22	5·10 ³	37	2	8	24
Минск 32	4·10 ⁴	37	2	64	5
БЭСМ 4	2·10 ⁴	45	3	8	10
БЭСМ 6	10 ⁶	48	1	32	2
М 220	7·10 ⁴	48	3	32	6
Урал 14	5·10 ⁴	24	1	64	9
Урал 16	5·10 ⁴	48	1	512	3

В середине 60-х годов мировое количество ЭВМ возросло по сравнению с 50-ми годами на порядок. Так, в 1966 году количество установленных машин составляло:

- в США — 27 000;
- в Западной Европе — 6000;
- в Японии — 1900.

В середине 60-х и у нас в стране и за рубежом внимание впервые акцентировали на надежности ЭВМ и их системном использовании. Поэтому в СССР было принято постановление ЦК КПСС о разработке семейств ЭВМ на базе крупных компьютерных предприятий и о создании строгой системы унификации схем и узлов ЭВМ. Стали разрабатываться программно и технически совместимые системы вычислительных машин. До этого, ввиду дефицита выпускаемых ЭВМ и длительного (иногда несколько лет) срока с момента заказа и до получения машины, ЭВМ часто разрабатывались и создавались небольшими группами специалистов на непрофильных предприятиях, что, естественно, не гарантировало их качества.

¹ Коротких операций типа сложения с фиксированной запятой.

² Адресность определяется количеством адресов в команде ЭВМ (безадресные, одно-, двух-, трехадресные команды).

Что касается системного применения ЭВМ, то в середине 60-х годов существенно изменилась технология их использования. Появились технологии создания больших баз данных в памяти ЭВМ, осуществлялась выдвинутая академиком Глушковым программа «АСУПизации», массового создания АСУП (автоматизированных систем управления предприятиями). В связи с этим рекомендовалось и программы, и данные постоянно хранить в памяти машины и использовать их по мере надобности.

Итак, перечислим основные направления совершенствования ЭВМ второго поколения.

1. Переход на полупроводниковую элементную базу и печатный монтаж.
2. Блочный принцип конструирования и унификация ячеек и блоков ЭВМ.
3. Облегчение программирования для ЭВМ.
4. Ориентация ЭВМ не только на вычислительную работу, но и на работу с массивами информации.
5. Повышение надежности работы машин, использование кодов с обнаружением и исправлением ошибок и встроенных схем контроля.
6. Расширение областей применения ЭВМ.
7. Системное использование ЭВМ в составе автоматизированных систем управления.

Третье поколение ЭВМ: 1970–1980-е годы

В 1958 году Р. Нойс изобрел малую кремниевую интегральную схему, в которой на небольшой площади можно было размещать десятки транзисторов. Эти схемы позже стали называться схемами с малой степенью интеграции (Small Scale Integrated circuits – SSI).

ПРИМЕЧАНИЕ

Интегральная схема – электронная схема специального назначения, выполненная в виде единого полупроводникового кристалла, объединяющего большое число активных элементов (диодов и транзисторов).

Уже в конце 60-х годов интегральные схемы стали применяться в компьютерах. Логические схемы ЭВМ 3-го поколения уже полностью строились на малых интегральных схемах. Тактовые частоты работы электронных схем повысились до единиц мегагерц. Снизились напряжение питания (единицы вольт) и потребляемая машиной мощность. Существенно повысились надежность и быстродействие ЭВМ.

В оперативных запоминающих устройствах использовались миниатюрные ферритовые сердечники, ферритовые пластины и магнитные пленки с прямоугольной петлей гистерезиса. В качестве внешних запоминающих устройств широко стали использоваться дисковые накопители. Появилось еще два уровня запоминающих устройств: сверхоперативные запоминающие устройства на триггерных регистрах, имеющие огромное быстродействие, но небольшую емкость (десятки чисел), и быстродействующая кэш-память. Операционная система поддерживает технологию использования виртуальной памяти. Ввиду существенного усложнения как аппаратной, так и логической структуры, ЭВМ третьего поколения часто стали называть системами.

Первыми ЭВМ этого поколения стали модели систем IBM (ряд моделей IBM 360) и PDP (PDP 1). В Советском Союзе в содружестве со странами Совета Экономической Взаимопомощи (Польша, Венгрия, Болгария, ГДР и другие) стали выпускаться модели Единой Системы (ЕС) и Системы Малых (СМ) ЭВМ. Основные характеристики некоторых моделей ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ показаны в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Характеристики некоторых моделей ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ

Модель	Производительность, операцион./с	Разрядность, бит	Основная адресность	Емкость ОЗУ, Кбайт	Цикл ОЗУ, мкс
Ряд 1 ¹ ЕС-1020	$2 \cdot 10^4$	8	2	256	2
Ряд 1 ЕС-1030	$6 \cdot 10^4$	32	2	512	1,5
Ряд 1 ЕС-1040	$4 \cdot 10^5$	64	2	1024	1
Ряд 1 ЕС-1050	$5 \cdot 10^5$	64	2	1024	1
Ряд 2 ЕС-1025	$6 \cdot 10^4$	64	2	256	1,5
Ряд 2 ЕС-1035	$1,5 \cdot 10^5$	64	2	512	1
Ряд 2 ЕС-1045	$8 \cdot 10^5$	64	2	4096	1
Ряд 2 ЕС-1055	$6 \cdot 10^5$	64	2	2048	1
Ряд 1 ЕС-1060	$1,6 \cdot 10^6$	64	2	8192	0,6
Ряд 3 ЕС-1066	$4,5 \cdot 10^6$	64	2	16384	0,4
СМ-2	$2,5 \cdot 10^5$	16	2	256	2
СМ-4	$2,5 \cdot 10^5$	16	2	256	2
СМ-1300	$5 \cdot 10^5$	16	2	64	1
СМ-1600	$5 \cdot 10^5$	16	2	256	1
СМ-1800	$5 \cdot 10^5$	8	2	64	1

¹ Ряд 1 — аналог серии IBM 360, ряд 2 — IBM 370, ряд 3 — IBM 390.

В 1972 году была создана ЭВМ нового тогда класса — класса суперкомпьютеров. Первый суперкомпьютер ILLIAC 4 имел производительность 20 MFLOPS (миллионов сложений чисел с плавающей запятой в секунду). Начиная с 1975 года фирмой Cray Research стали выпускаться суперкомпьютеры Cray (Cray 1 имел оперативную память емкостью 8 Мбайт и производительность 160 MFLOPS).

В вычислительных машинах третьего поколения значительное внимание уделяется уменьшению трудоемкости программирования, эффективности исполнения программ в машинах и улучшению общения оператора с машиной. Это обеспечивается мощными операционными системами, развитой системой автоматизации программирования, эффективными системами прерывания программ, режимами работы с разделением машинного времени, режимами работы в реальном времени,