

Лекция №4

Способы построения конвейерных, матричных и ассоциативных компьютерных систем. Суперкомпьютеры и кластерные структуры

План

1. Системы с конвейерной обработкой .
2. Матричные системы.
3. Ассоциативные системы.
4. Функционально распределенные системы.
5. Системы с перестраиваемой структурой.
6. Однородные системы и среды.
7. Суперкомпьютеры и особенности их архитектуры.
8. Кластерные структуры.

1. Системы с конвейерной обработкой

Одновременное выполнение отдельных операций достигается организацией магистрали из процессорных блоков. Такая магистраль представляет собой группу процессоров, связанных между собой в виде последовательной структуры. Каждый выполняет присущие только ему функции, выходная информация каждого блока является входной для следующего. На входе первого блока – исходные данные, а выход последнего – результат обработки.

Магистральные системы относятся к классу MISD. Принцип магистральной (конвейерной) обработки нашел широкое применение в таких мощных универсальных системах, как STAR 100, ASC, CRAY , AMDAHL 470 и более ранних CDC 6600, CDC 7600, IBM 360, IBM 370.

Принцип конвейерной обработки может применяться на различных уровнях иерархии вычислительного процесса, начиная с уровня построения логических схем устройств. В зависимости от уровня применения можно выделить, рассматривая уровни снизу вверх, арифметико-магистральные, командно-магистральные и макромагистральные системы, а в зависимости от типа применяемых команд обработки среди магистральных

систем можно выделить системы с обычными и векторными командами.

В качестве основных уровней реализации магистрального принципа можно выделить уровень устройств выполнения элементарных операций над битами данных, уровень АЛУ и уровень управляющих устройств, которым сопоставляются арифметико-магистральная, командно-магистральная и макро-магистральная обработка соответственно.

Функциональные возможности магистральной обработки наиболее полно проявляются при векторной обработке данных, когда при помощи так называемых векторных команд выполняются однотипные операции над упорядоченной группой данных. Векторная структура магистральных систем характерна наличием одной или более многофункциональных магистралей в исполнительном устройстве и соответствующих средств управления в процессоре.

Магистральные системы можно различать и по типу конфигурации магистрали – статические и динамические с аппаратной или с программной перестройкой.

2. Матричные системы

Основной особенностью матричных операций является то, что одна и та же команда выполняется над большой совокупностью элементарных связанных между собой некоторым образом данных. Часто эту операцию можно производить над всеми данными одновременно. В таком случае достаточно иметь одно устройство управления, которое могло бы дешифровать одиночный поток команд и вырабатывать управляющие сигналы некоторой совокупности (матрицы) элементарных процессоров (ЭП). Так как отдельные ЭП не являются законченными центральными процессорами и не могут работать самостоятельно, рассматриваемые структуры являются скорее параллельными системами, чем мультипроцессорами.

Единственная степень свободы ЭП состоит в том, что он может выполнять или не выполнять некоторую частную коман-

ду. Сигналы, реализующие эту возможность, вырабатываются и распределяются сигнальным управляющим процессором.

3. Ассоциативные системы

К числу систем класса ОКМД относятся ассоциативные системы. Эти системы, как и матричные, характеризуются большим числом операционных устройств, способных одновременно, по командам одного управляющего устройства вести обработку нескольких потоков данных. Но эти системы существенно отличаются от матричных способами формирования потоков данных. В ассоциативных системах информация на обработку поступает от ассоциативных запоминающих устройств (АЗУ), характеризующихся тем, что информация из них выбирается не по определенному адресу, а по ее содержанию.

Запоминающий массив, как и в адресных ЗУ, разделен на m -разрядные ячейки, число которых n . Практически для любого типа АЗУ характерно наличие следующих элементов: запоминающего массива; регистра ассоциативных признаков (РгАП); регистра маски (РгМ); регистра индикаторов адреса со схемами сравнения на входе.

Выборка информации из АЗУ происходит следующим образом. В РгАП из устройства управления передается код признака искомой информации. Код может иметь произвольное число разрядов – от 1 до m . Если код признаков используется полностью, то он без изменения поступает на схему сравнения, если же необходимо использовать только часть кода, тогда ненужные разряды маскируются с помощью РгМ. Перед началом поиска информации в АЗУ все разряды регистра индикаторов адреса устанавливаются в состояние 1. После этого производится опрос первого разряда всех ячеек ЗМ и содержимое сравнивается с первым разрядом РгАП. Если содержимое первого разряда i -й ячейки не совпадает с содержимым первого разряда РгАП, то соответствующий этой ячейке разряд регистра индикаторов адреса T_i сбрасывается в состояние 0, если совпадает, – на T_i остается 1. Затем эта операция повторяется со вто-

рым, третьим и последующими разрядами до тех пор, пока не будет произведено сравнение со всеми разрядами РГАП. После поразрядного опроса и сравнения в состоянии 1 останутся те разряды регистра индикаторов адреса, которые соответствуют ячейкам, содержащим информацию совпадающую с записанной в РГАП. Эта информация может быть считана в той последовательности, которая определяется устройством управления.

Принцип работы АЗУ поясняет схема:

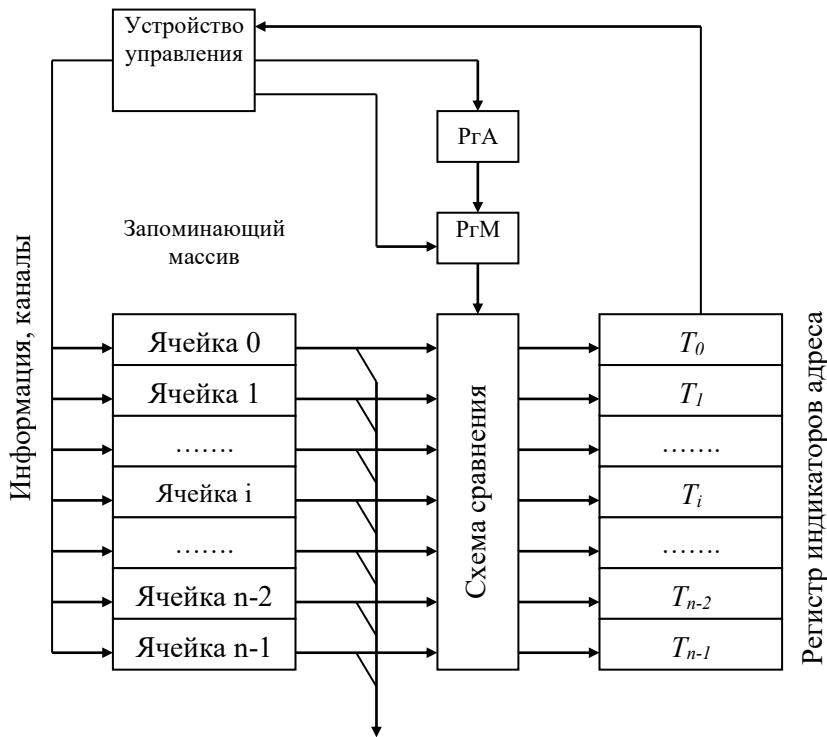


Рис. 4.1. Ассоциативное запоминающее устройство

Время поиска информации в ЗМ по ассоциативному признаку зависит только от числа разрядов признака и от скорости опроса разрядов, но совершенно не зависит от числа ячеек

ЗМ. Этим и определяется главное преимущество АЗУ перед адресными ЗУ: в адресных ЗУ при операции поиска необходим перебор всех ячеек запоминающего массива.

Запись новой информации в ЗМ производится без указания номера ячейки. Обычно один из разрядов каждой ячейки используется для указания ее занятости. Тогда при записи в АЗУ новой информации устанавливается признак 0 в соответствующем разряде РгАП и определяются все ячейки ЗМ, которые свободны для записи. В одну из них устройство управления помещает новую информацию.

Нередко АЗУ строятся таким образом, что кроме ассоциативных допускается и прямая адресация данных, что представляет определенные удобства при работе с периферийными устройствами.

Запоминающие элементы АЗУ в отличие от элементов адресуемых ЗУ должны не только хранить информацию, но и выполнять определенные логические функции, поэтому позволяют осуществить поиск не только по равенству содержимого ячейки заданному признаку, но и по другим условиям: содержимое ячейки больше (меньше) признака РгАП, а также больше или равно (меньше или равно).

4. Функционально распределенные системы

Высокопроизводительные системы общего назначения создаются на основе многопроцессорных комплексов. Использование в таких системах однотипных процессоров, аналогичных процессорам ЭВМ общего назначения, оказывается неэкономичным, поскольку в каждом процессоре в каждый момент времени используется лишь часть ресурсов, обеспечивающих обработку данных одного типа. Наиболее экономичный способ построения многопроцессорной системы общего назначения – использование специализированных процессоров, ориентированных на реализацию определенных функций: обработки скалярных величин, текстов, матричной обработки, трансляции программ, управления данными и др. При этом значительно сокращаются затраты оборудования в процессоре и повышается

его производительность. Кроме того, совокупность таких процессоров представляет необходимый для решения задач набор функций, который можно изменять, по-разному комплектуя систему и приспособливая ее к рабочей нагрузке.

Многопроцессорные вычислительные системы, построенные на основе разнотипных процессоров, ориентированных на реализацию определенных функций, называются *функционально распределенными вычислительными системами* (ФРВС).

5. Системы с перестраиваемой структурой

В последние десятилетия ведутся интенсивные исследования в области создания параллельных распределенных открытых многомодульных *систем с перестраиваемой структурой*, на основе которых разработано большое число экспериментальных и рабочих систем повышенной производительности и надежности. Архитектура систем с рассматриваемыми свойствами имеет особое значение для использования микро-ЭВМ в качестве элементной базы. Для создания таких систем необходимо решить комплекс проблем системного управления. Среди этих проблем важнейшими являются:

- структурная организация систем, обеспечивающая образование ансамблей процессоров, запоминающих устройств и каналов обмена данными, соответствующих потребностям вычислительного процесса, при умеренных затратах ресурсов на их организацию и координацию;
- организация вычислительных процессов, обеспечивающая их параллелизм, распределение по системе модулей и координацию асинхронно выполняемых подпроцессов при умеренных издержках;
- создание языков высокого уровня, описывающих алгоритмы в системно-независимой форме и сохраняющих представление о параллелизме вычислительного процесса.

Вычислительные системы с перестраиваемой структурой строятся на основе микропроцессорных модулей. Модуль должен реализовать следующие функции: 1) обработку данных; 2) управление вычислительным процессом; 3) установление соеди-

нений с другими модулями и передачу данных между ними для обеспечения вычислительных процессов. С учетом указанных функций модуль вычислительной системы рассматривается как совокупность трех процессоров: обрабатывающего (ОП), управляющего (УП) и коммутационного (КП). Коммутационный процессор обеспечивает обслуживание нескольких (обычно двух-шести) каналов передачи данных. Физически модуль может реализоваться на основе одной микро-ЭВМ, выполняющей в мультипрограммном режиме функции обработки, управления процессами и передачи данных, или на основе нескольких микропроцессоров, между которыми разделяются вышеперечисленные функции.

6. Однородные системы и среды

Одно из направлений развития вычислительных систем – высокопараллельные устройства массовой обработки (на уровнях вплоть до самых элементарных операций), называемые *вычислительными средами*. Вычислительная среда представляет собой совокупность простейших одинаковых автоматов, одинаковым образом соединенных между собой и программно настраиваемых на выполнение некоторой функции.

В основу организации таких систем положены три принципа: *параллельность операций; переменность логической структуры; конструктивная однородность элементов и связей между ними*.

Первый принцип базируется на аксиоме параллельности задач и алгоритмов: всякая сложная задача может быть представлена в виде связанных между собой простых подзадач и для любой сложной задачи может быть предложен параллельный алгоритм, допускающий ее эффективное решение. Аксиома параллельности, таким образом, обеспечивает достижение высокой производительности за счет параллельной работы большого числа обрабатывающих устройств или элементов.

Второй принцип базируется на аксиоме переменности логической структуры: процесс решения сложной задачи может быть представлен некоторой структурной моделью, включающей в себя подзадачи и связи между ними. Это означает, что для

каждой сложной задачи можно предложить соответствующую структуру из обрабатывающих элементов, связанных между собой определенным образом.

Третий принцип базируется на аксиоме конструктивной однородности элементов и связей: все простые задачи получаются путем деления сложной задачи на части, а поэтому все эти простые задачи примерно одинаковы по объему вычислений и связаны между собой одинаковыми схемами обмена. Это означает, что система для решения сложной задачи может быть построена из одинаковых обрабатывающих элементов, связанных между собой одинаковым образом.

Таким образом, при соблюдении трех принципов вычислительная система может быть представлена как совокупность неограниченного числа одинаковых обрабатывающих устройств, однотипно связанных между собой. Эта совокупность перед решением задачи настраивается соответствующим образом. Такая однородная вычислительная система должна решать задачи неограниченной сложности и объема при высокой надежности и готовности, что обеспечивается избыточностью обрабатывающих устройств, унифицированностью связей между ними и легкостью перестройки системы.

7. Суперкомпьютеры и особенности их архитектуры

К суперкомпьютерам относятся мощные многопроцессорные вычислительные машины с быстродействием сотни миллионов — десятки миллиардов операций в секунду.

Типовая модель суперкомпьютера 2001 года:

- высокопараллельная многопроцессорная вычислительная система с быстродействием порядка 100 000 MFloPS;
- емкость: оперативной памяти 10 Гбайт, дисковой памяти 1 —10 Тбайт (1 Тбайт-1000 Гбайт);
- разрядность 64-128 бит.

В декабре 1996 года фирма Intel объявила о создании суперкомпьютера Sandia, впервые в мире преодолевшего терофлоппный барьер быстродействия. За 1 час 40 минут компьютер

выполнил 6,4 квадриллиона вычислений с плавающей запятой. Конфигурация, достигшая производительности 1060 MFloPS по тесту MP Linpack, представляла собой 57 шкафов, содержащих более 7000 процессоров Pentium Pro с тактовой частотой 200 МГц и оперативную память 454 Гбайт. Окончательный вариант суперкомпьютера имеет производительность 1,4 TFLoPS. Он состоит из 86 шкафов общей площадью 160 кв. м. В этих шкафах размещается 573 Гбайт оперативной и 2250 Гбайт дисковой памяти. Масса компьютера составляет около 45 тонн, а пиковое потребление энергии — 850 кВт.

В 1993 году японская фирма NEC Corporation сообщила о создании суперкомпьютеров SX-5, выполняющих 4 триллиона FloPS, содержащих 512 процессоров и обеспечивающих общую скорость передачи данных 32 Тбайт/с.

Наконец, недавно фирма IBM объявила о разработке нового суперкомпьютера, который будет содержать более миллиона микропроцессоров Pentium III и иметь быстродействие порядка 10^{15} операций/с.

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

Высокопроизводительные МПКС имеют несколько разновидностей.

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

многократным потоком команд и однократным потоком данных (МКОД или MISD - Multiple Instruction Single Data).

2. **Векторные** МПКС, 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).

Принцип SIMD используется и для повышения производительности микропроцессоров — суперскалярные (векторные) МП Pentium III, Pentium 4, Power PC и т. д.

3. **Матричные** МПКС, 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).

В суперкомпьютере используются все три варианта архитектуры МПКС:

- структура MIMD в классическом ее варианте (например, в суперкомпьютере BSP фирмы Burrought);
- параллельно-конвейерная модификация, иначе MMISD, то есть многопроцессорная: (Multiple) MISD-архитектура (например, в суперкомпьютерах «Эльбрус 3,4»);
- параллельно-векторная модификация, иначе MSIMD, то есть многопроцессорная SIMD архитектура (например, в суперкомпьютере Cray 2).

Наибольшую эффективность показала MSIMD-архитектура, поэтому в современных суперкомпьютерах чаще всего используется именно она (суперкомпьютеры фирмы Cray, Fujistu, NEC, Hitachi т.д.). Первый суперкомпьютер был задуман в 1960 и создан 1972 году (машина ILLIAC IVc производительностью 20 MFloPS), а начиная с 1974 года лидерство в разработке суперкомпьютеров захватила фирма Cray Research, выпустившая Cray 1 производительностью 160 MFloPS и объемом оперативной памяти 64 Мбайт, а в 1984 году -Cray 2. в полной мере реализовавший архитектуру

MSIMD и ознаменовавший появление нового поколения суперкомпьютеров. Производительность Cray 2 в — 2000 MFloPS, объем оперативной памяти — 2 Гбайт. Классическое соотношение, ибо критерий сбалансированности ресурсов компьютера — «каждому MFloPS производительности процессора должно соответствовать не менее 1 Мбайт оперативной памяти».

В настоящее время в мире насчитывается несколько тысяч суперкомпьютеров, начиная от простых офисных Cray EL до мощных Cray 3, Cray 4, Cray Y-MP C90 фирмы Cray Research, Cyber 205 фирмы Control Data, SX-3 и SX-X фирмы NEC, VP2000 фирмы Fujitsu (обе фирмы японские), VPP 500 фирмы Siemens (ФРГ) и т. д., производительностью несколько десятков тысяч MFloPS.

Среди лучших суперкомпьютеров можно отметить и отечественные суперкомпьютеры. В сфере производства суперкомпьютеров Россия, пожалуй, впервые, представила собственные оригинальные модели компьютеров (все остальные, включая и ПЭВМ, и малые ЭВМ, и универсальные компьютеры за редким исключением, например, ЭВМ «Рута 110», копировали зарубежные разработки и в первую очередь, разработки фирм США).

В СССР, а позднее в России была разработана и реализуется (сейчас, правда, почти заморожена) государственная программа разработки суперкомпьютеров. В рамках этой программы были разработаны и выпущены такие суперкомпьютеры, как повторяющие архитектуру Cray: «Электроника СС БИС»; оригинальные разработки: ЕС 1191, ЕС 1195, ЕС 1191.10, «Эльбрус 1,2,3». Разработка ЕС 1191 с производительностью 1200 MFloPS из-за нехватки средств заморожена; офисные варианты ЕС 1195, ЕС 1191.01 имеют производительность соответственно 50 MFloPS и 500 MFloPS; практически заморожена и разработка ЕС 1191.10 с производительностью 2000 MFloPS.

Основные характеристики суперкомпьютера «Эльбрус 3», разработанного в институте точной механики и вычислительной техники (ИТМ и ВТ, Москва):

- производительность 10 000 MFloPS;

- разрядность 64 бит (можно работать и с 128-разрядными словами);
- 16 магистральных процессоров по 7 арифметико-логических устройств и 16 Мбайт оперативной памяти в каждом (итого — 256 Мбайт);
- общая оперативная память - 8 блоков по 256 Мбайт (итого 2018 Мбайт);
- суммарная емкость оперативной памяти $16 * 16 + 8 * 256 = 2304$ (Мбайт);
- 8 процессоров ввода-вывода, каждый из которых имеет:
 - медленный канал;
 - быстрый канал;
 - дисковый канал для обмена данными, соответственно, с внешними устройствами, модульными комплексами телебработки и накопителями на магнитных дисках, часто с дисковыми массивами типа RAID.

Используются операционные системы «Эльбрус» и UNIX, поддерживающие большое число языков программирования: Эль, Фортран, Паскаль, Кобол, Пролог и т.д.

Суперкомпьютер «Эльбрус 3Б» медленно, но продолжает разрабатываться, ожидаемая его производительность - 20 000 MFloPS.

Для суперкомпьютера «Эльбрус» разработан один из первых в мире микропроцессор «Эль2К», имеющий VLIW - архитектуру.

8. Кластерные структуры

Как уже упоминалось выше, в настоящее время развивается технология построения больших и суперкомпьютеров на базе кластерных решений. По мнению многих специалистов, на смену отдельным, независимым суперкомпьютерам должны прийти группы высокопроизводительных серверов, объединяемых в кластер. Удобство построения кластерных КС заключается в том, что можно гибко регулировать необходимую производительность системы, подключая к кластеру с помощью специальных аппаратных и программных интерфейсов обычные серверы до тех пор,

пока не будет получен суперкомпьютер требуемой мощности. Кластеризация позволяет манипулировать группой серверов как одной системой, упрощая управление и повышая надежность.

Важной особенностью кластеров является обеспечение доступа любого сервера к любому блоку как оперативной, так и дисковой памяти. Эта проблема успешно решается, например, объединением систем SMP-архитектуры на базе автономных серверов для организации общего поля оперативной памяти и использованием дисковых систем RAID для памяти внешней (SMP — Shared Memory multiProcessing, технология мультипроцессирования с разделением памяти).

Программное обеспечение для кластерных систем уже выпускается. Примером может служить компонент Cluster Server операционной системы MS Windows NT/2000 Enterprise. Этот компонент, более известный под кодовым названием Wolfpack, обеспечивает как функции управления кластером, так и функции диагностирования сбоев и восстановления (Wolfpack определяет сбой программы или отказ сервера и автоматически переключает поток вычислений на другие работоспособные серверы).

На конференции Supercomputing 2000 несколько фирм (Dell, SunMicrosystem, IBM) уже продемонстрировали свои достижения в области суперкомпьютерных кластерных технологий (фирма IBM, например, продемонстрировала модель человеческого сердца, реализованную в кластере серверов RS/6000). Эта же фирма в 2001 году представила одну из самых мощных кластерных систем ASCI White, содержащую 8192 микропроцессора Power 3, основную память емкостью 6 Тбайт, дисковую память емкостью 160 Тбайт; общая производительность кластера 12,5 TFloPS (триллионов операций в секунду). Все фирмы отмечают существенное снижение стоимости кластерных систем по сравнению с локальными суперкомпьютерами, обеспечивающими ту же производительность. Основные достоинства кластерных суперкомпьютерных систем:

- высокая суммарная производительность;
- высокая надежность работы системы;
- наилучшее соотношение производительность/стоимость;
- возможность динамического перераспределения нагрузок

- между серверами;
- легкая масштабируемость, то есть наращивание вычислительной мощности путем подключения дополнительных серверов;
- удобство управления и контроля работы системы.

Список ключевых слов. Системы с конвейерной обработкой. Матричные системы. Ассоциативные системы. Функционально распределенные системы. Системы с перенастраиваемой структурой. Однородные системы и среды. Суперкомпьютеры и особенности их архитектуры. Кластерные структуры.

Контрольные вопросы

1. Какое другое название имеют конвейерные компьютерные системы?
2. Какое минимальное количество процессоров может теоретически быть использовано при построении конвейерных систем?
3. Какие особенности и какую структуру имеют матричные системы?
4. Какую структуру имеют ассоциативные системы и как они функционируют?
5. Какие особенности имеют функционально распределенные вычислительные системы?
6. Какие проблемы возникают при организации систем с перенастраиваемой структурой?
7. Какие функции должны реализовывать модули систем с перенастраиваемой структурой?
8. Какие типы процессоров должны иметь системы с перенастраиваемой структурой?
9. Какие пути организации систем с перенастраиваемой структурой Вы знаете?
10. Как обеспечивается мультипрограммный режим функционирования систем с перенастраиваемой структурой?
11. Как обеспечивается децентрализованное управление в системах с перенастраиваемой структурой?
12. Какие вычислительные системы называются вычислитель-

ными средами?

13. Какие принципы заложены в вычислительные среды и на каких аксиомах они базируются?
14. Какие компьютеры называются суперкомпьютерами?
15. Какие суперкомпьютеры созданы в настоящее время и какие характеристики они имеют?
16. Какие структуры называются кластерными структурами?
17. Какие достоинства имеют кластерные суперкомпьютерные системы?

Литература

1. Цилькер Б.Я. Организация ЭВМ и систем. Учебник для вузов – СПб. 2004.
2. Бродо В.Л. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации – СПб. 2003.
3. Ларионов А.М., Майоров С.А., Новиков Г.И. Вычислительные комплексы, системы и сети. - Л.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Смирнов А.Д. Архитектура вычислительных систем. - М.: Наука, 1990.
5. Вычислительные машины, системы и сети./Под ред. Пятибратова А.П. -М.:Финансы и статистика, 1991.