Организация ЭВМ и ВС
Лекции 3–5. Архитектура вычислительных машин

Макаров П. А.

29 сентября, 13 и 27 октября 2026 г.

Содержание

1 Многоуровневая организация **2**

2 Классы вычислительных машин **5**
2.1 Классификация ВМ и их характеристики . . . 5
2.2 Поколения вычислительных машин . . . 7
2.2.1 I поколение . . . 7
2.2.2 II поколение . . . 10
2.2.3 III поколение . . . 12
2.2.4 IV поколение . . . 13
2.2.5 V поколение . . . 14

3 Базовые представления о структуре и архитектуре ВМ **15**
3.1 Общие определения . . . 15
3.2 Принципы фон Неймана . . . 16
3.3 Основные функциональные блоки ВМ . . . 17
3.4 Абстрактное центральное устройство . . . 20

4 Структурная организация ВМ **22**
4.1 Классическая архитектура фон Неймана (звезда) . . . 22
4.2 Иерархическая архитектура . . . 23
4.3 Магистральная структура . . . 24
4.4 Многошинные структуры компьютеров . . . 25
4.4.1 Мостовая архитектура . . . 25
4.4.2 Хабовая архитектура . . . 27

5 Вычислительные системы и суперкомпьютеры 29
5.1 Определение и основная классификация 29
5.2 Классификация архитектур компьютеров по Флинну 30
5.2.1 SISD 30
5.2.2 SIMD 30
5.2.3 MISD 31
5.2.4 MIMD 31
5.3 Другие подходы к классификации вычислительных систем 32

6 Контрольные вопросы и задания 33

1 Многоуровневая организация

В информатике широко используется принцип декомпозиции, который позволяет разбить сложную систему на несколько более простых подсистем. Применяя этот принцип к архитектуре ВМ, говорят о том, что компьютер — это сложная система, которую можно рассматривать как иерархию уровней, каждый из которых надстраивается над предыдущими. На рис. 1 приведена схема, иллюстрирующая многоуровневую организацию компьютерной архитектуры.

5. Язык высокого уровня.

4. Уровень языка ассемблера.

3. Уровень операционной системы.

2. Уровень архитектуры системы команд.

1. Микроархитектурный уровень.

0. Цифровой логический уровень.

-1. Уровень физических устройств.

Рис. 1: Многоуровневая организация компьютерной архитектуры

Уровень -1. На уровне физических устройств ВМ — это сложная радиоэлектронная схема, состоящая из диодов, транзисторов и других радиоэлектронных компонентов, которые программистом обычно не рассматриваются.

Уровень 0. На цифровом логическом уровне основные объекты компьютера называются логическими вентилями (см. примеры на рис. 2). У каждого из них есть один или несколько цифровых входов. Вентиль выполняет над входными данными

логические операции по правилам определяемым так называемой таблицей истинности. Принципы работы вентилей описываются алгеброй логики. Любая логическая переменная x при этом может принимать только два значения: «0» (ложь) и «1» (истина).

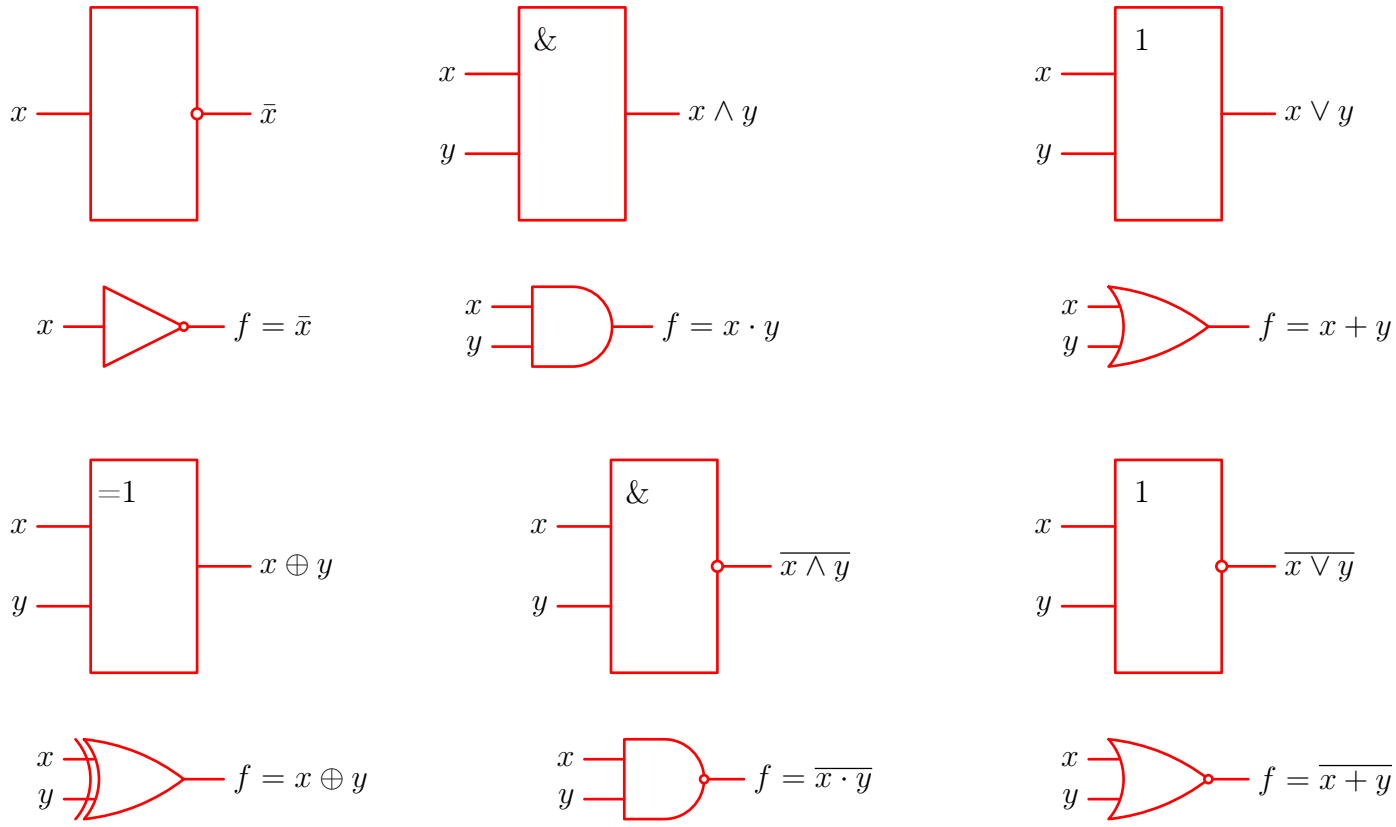


Рис. 2: Схемные обозначения некоторых вентилей

Простейший логический вентиль — инвертор (гейт NOT). Логическая функция, которую реализует инвертор описывается таблицей истинности 1. Таблица 2 представляет собой правила функционирования четырёх наиболее часто встречаемых бинарных логических операций.

x	$\bar{x}$
0	1
1	0

Таблица 1: Таблица истинности вентиля NOT

Каждый вентиль формируется из нескольких транзисторов. Схемы из вентилей, в свою очередь, образуют триггеры (см. пример на рис. 3) — логические элементы с двумя устойчивыми логическими состояниями («0» и «1»), которые можно исполь-

x	y	Конъюнкция $x \wedge y, \&, \cdot$ `AND x, y`	Дизъюнкция $x \vee y, \vert, +$ `OR x, y`	Исключение $x \oplus y$ `XOR x, y`	Импликация $x \to y$
0	0	0	0	0	1
0	1	0	1	1	1
1	0	0	1	1	0
1	1	1	1	0	1

Таблица 2: Основные бинарные логические операции

зовать как элементы памяти для хранения одного бита информации[1]. Триггеры, объединенные в группы по 8, 16, 32, 64, и т. д. составляют регистры. Таким образом, регистры могут хранить двоичное число определённой разрядности.

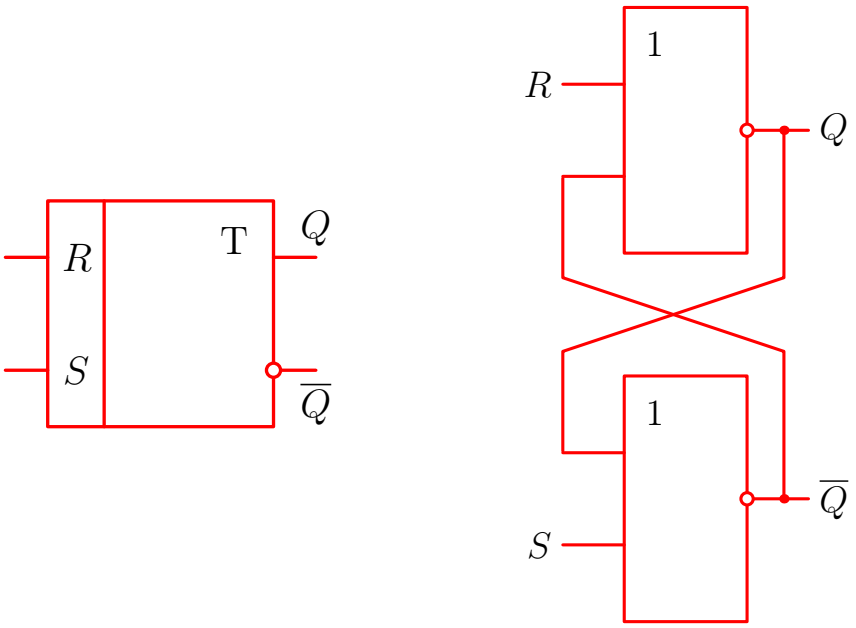


Рис. 3: Обозначение RS-триггера и его реализация в базисе ИЛИ-НЕ

Уровень 1. На микроархитектурном уровне ВМ представляет собой совокупность регистров, называемых регистровой памятью и арифметико-логического устройства (АЛУ). Из самого названия следует функция, которую АЛУ выполняет над значениями, хранящимися в регистрах. Регистры вместе с АЛУ формируют тракт данных, работа которого может контролироваться как аппаратно (т. е. непосредственно самим устройством), так и программно (при помощи т. н. микропрограмм).

Уровень 2. На уровне архитектуры команд ВМ представляет собой целостную систему, организованную определённым образом и полноценно доступную систем-

[1]Именно на триггерах реализуется так называемая статическая память с произвольным доступом (SRAM), используемая, в частности, в качестве кэш-памяти процессоров.

ному программисту. Одна из самых распространённых архитектур ВМ в настоящее время является развитием архитектуры IBM PC, но бывают и другие.

Уровень 3. Уровень ОС является гибридным, т. к. для него характерны как команды, исполняемые аппаратным обеспечением, так и интерпретируемые ОС.

Рассмотренные выше уровни коструируются не для того, чтобы с ними работал прикладной программист, — они нужны для работы интерпретаторов и трансляторов, поддерживающих более высокие уровни организации. Трансляторы и интерпретаторы разрабатываются системными программистами, которые специализируются на построении новых ВМ.

Уровни 4 и 5 предназначены для прикладных программистов, решающих пользовательские задачи (хотя 4-й в гораздо меньшей степени используется непосредственно человеком). Кроме того, программы написанные на уровнях 1, 2 и 3, представляют собой машинные коды, специфические для каждой конкретной архитектуры ВМ. Начиная с четвёртого уровня языки программирования содержат слова и сокращения, понятные человеку.

Так, уровень 4 представляет собой символическую форму одного из языков более низкого уровня[2]. Программа, написанная на этом уровне транслируется в более низкоуровневую при помощи ассемблера.

Уровень 5 представлен языками, разработанными для прикладных программистов.

2 Классы вычислительных машин

2.1 Классификация ВМ и их характеристики

Подходы к классификации ВМ могут быть различными.

- Физический способ представления информации.
  - Аналоговые;
  - Цифровые;
  - Гибридные.
- Поколение.
  - **I поколение.** 1940-е – середина 1950-х. Построены на электронных лампах.
  - **II поколение.** Середина 1950-х – середина 1960-х. На транзисторах и печатных платах.

[2]Раньше часто использовали словосочетание “ассемблерные мнемоники”, подчёркивая тот факт, что ассемблер — это более удобная для человека форма машинного языка, позволяющая легче запоминать смысл тех или иных инструкций.

- **III поколение.** Середина 1960-х – середина 1970-х. На микросхемах малой степени миниатюризации.
- **IV поколение.** Середина 1970-х – начало 1990-х (часто современнные машины тоже относят к этому поколению). На микросхемах большой степени миниатюризации.
- **V поколение.** С начала 1990-х — на микросхемах сверхбольшой степени миниатюризации.

- Назначение.
  - **Вычислительные системы.** Характеризуются относительно небольшими объёмами входной и выходной информации и сложными алгоритмами её обработки. Такие ВМ должны иметь высокую производительность и небольшое количество устройств ввода-вывода.
  - **Системы обработки данных.** Характеризуются большим количеством внешних запоминающих устройств, способных хранить большой объём информации и сравнительно несложными алгоритмами обработки этой информации.
  - **Управляющие компьютеры.** Предназначены для управления в реальном времени объектами и производственными процессами. Для связи с объектами управления такие ВМ снабжаются датчиками, преобразователями и т. п. устройствами.

- Способ организации вычислительного процесса.
  - Однозадачные.
  - Многозадачные.

- Область применения.
  - **Универсальные.** Ориентированы на решение широкого круга задач путём применения соответствующего программного обеспечения. Характерные особенности универсальных ЭВМ: наличие высокопроизводительного процессора, большой объём оперативной памяти, использование универсальной ОС общего назначения.
  - **Специализированные.** Предназначены для решения конкретного круга задач. Как правило, не требуют разработки и сопровождения программного обеспечения, не относящегося к решению непосредственных задач. Специализированные ВМ проще и дешевле универсальных.

Приведём важнейшие характеристики ВМ, которые можно использовать в качестве дополнительного основания для их классификации.

- **Быстродействие.** Это способность ВМ выполнять определённые типы операций (пересылка данных между регистрами, суммирование, сравнение) за единицу времени. Быстродействие ограничивается скоростью протекания переходных процессов в элементной базе и обычно характеризуется тактовой частотой внешнего генератора, которая согласует действия устройств и узлов ВМ.

- **Производительность.** Способность ВМ обрабатывать некоторый тестовый массив различных команд (смеси Гибсона) за единицу времени. Производительность во многом зависит от применяемых архитектурных решений.

- **Разрядность машинного слова.** Влияет на диапазон представимых в ВМ чисел, адресность системы команд, скорость пересылки данных.

- **Максимально возможный размер адресного пространства.** Определяет максимально доступный объём оперативной памяти, возможности по её виртуальному расширению.

- **Система команд.**

- **Типы адресации.**

- **Тип интерфейса связи ядра ВМ с периферией**. Шины или каналы связи, характеризующиеся разрядностью (шириной параллельного кода, передаваемого единовременно) и частотой, с которой эта передача осуществляется.

- **Надёжность.** Измеряется средней наработкой на отказ (средним временем безотказной работы), скоростью восстановления и пр.

- **Потребляемая мощность.**

- **Стоимость.**

2.2 Поколения вычислительных машин

Идея делить машины на поколения вызвана к жизни тем, что за время недолгой истории развития компьютерная техника прошла большой путь как в аспекте элементной базы (лампы, транзисторы, микросхемы и др.), так и с точки зрения изменения структуры, появления новых возможностей, расширения областей применения и характера использования.

2.2.1 I поколение

К этому поколению относят машины, созданные на рубеже 50-х гг. и базирующиеся на электронных лампах (см. рис. 4). Лампы потребляли значительное количество

Параметр	Поколение				
	I	II	III	IV	V
Цель	научно-технические расчёты	технические и экономические расчёты	управление и экономические расчёты	управление и доступ к информации	телекоммуникации, информационное обслуживание
Режим работы	одно-программный	пакетная обработка	разделение времени	персональная работа	сетевая обработка
Интеграция данных	низкая	средняя	высокая	очень высокая	сверх-высокая
Тип пользователя	инженеры-программисты	профессиональные программисты	программисты	пользователи с общей подготовкой	малообученные пользователи
Расположение пользователя	машинный зал	отдельное помещение	терминальный зал	рабочий стол	произвольное мобильное

Таблица 3: Этапы развития компьютеров

электроэнергии и выделяли много тепла. Как следствие, эти ЭВМ были громоздкими и слишком дорогими, и их могли приобретать только крупные корпорации и правительства. Кроме того, такие машины характеризовались низкой надёжностью, необходимостью программирования в машинных кодах и малой автоматизацей рабочего процесса (ОС в современном смысле слова ещё не существовали).



Рис. 4: Примеры электровакуумных ламп производства СССР

Примеры машин первого поколения: Z3[3] (1941, Германия); Colossus (1944, Вели-

[3]Строго говоря, этот компьютер “ещё не совсем ЭВМ”, так как его основным схемотехническим элементом были электромеханические реле, а не электровакуумные лампы.

кобритания); ENIAC — Electronic Numerical Integrator and Computer (1945, США, см. рис. 5); EDVAC — Electronic Discrete Variable Automatic Computer (1949, США); Mark I и EDSAC — Electronic Delay Storage Automatic Calculator (1949, Великобритания); UNIVAC I — Universal Automatic Computer (1951, США). Отечественные машины первого поколения: МЭСМ (малая электронная счётная машина); БЭСМ; Стрела; Урал; М-20.

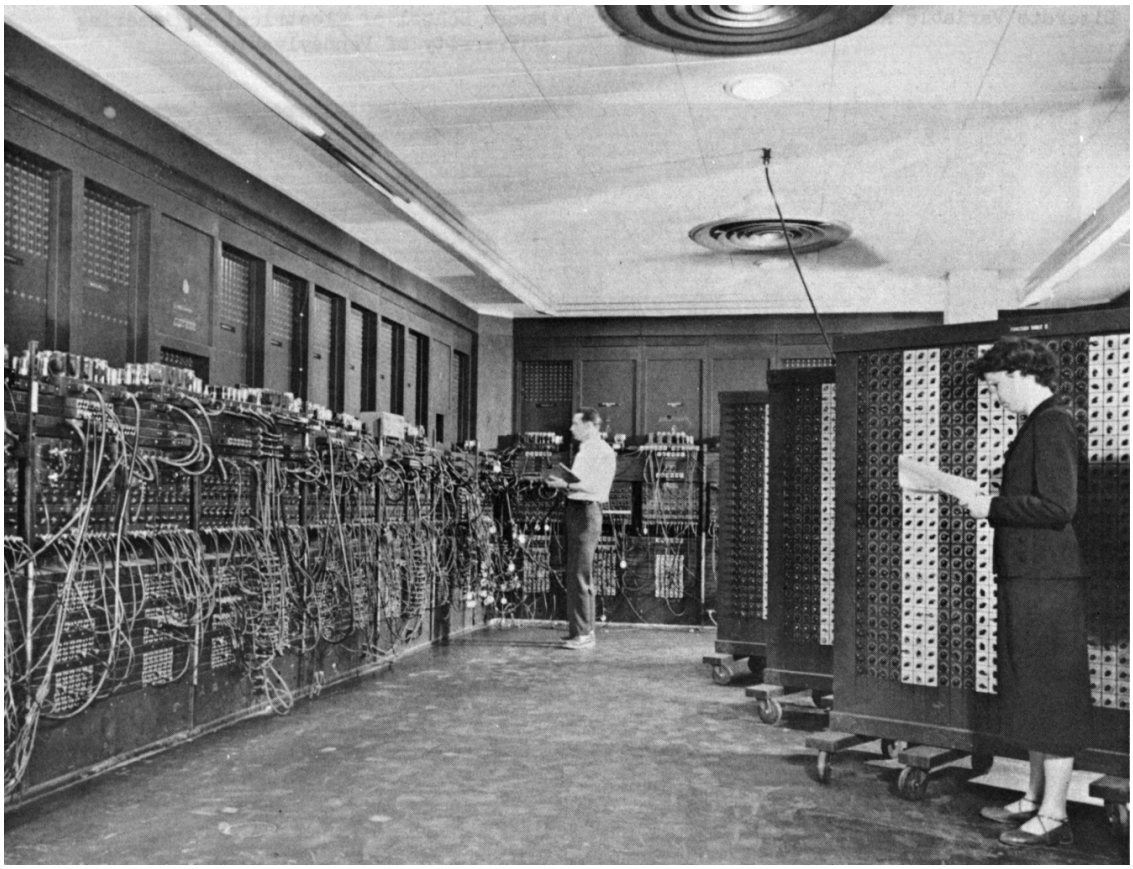
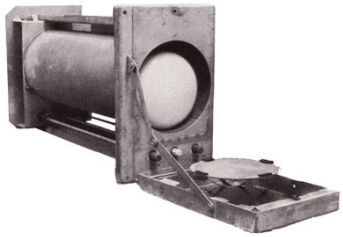
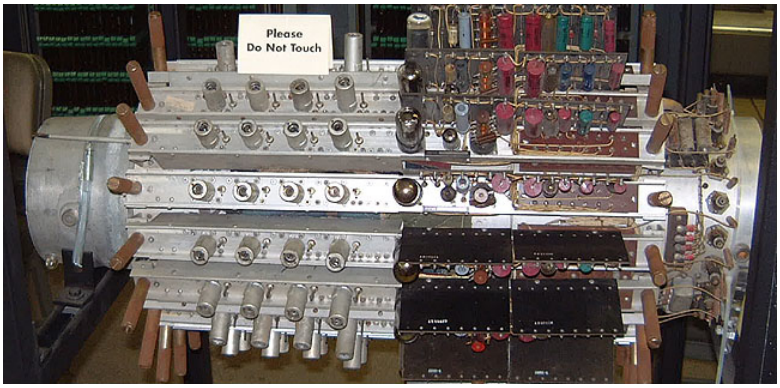


Рис. 5: Глен Бэк и Бэтти Снайдер программируют машину ENIAC — Electronic Numerical Integrator and Computer

Набор команд машин первого поколения был ограничен, схемы арифметико-логического устройства и устройства управления достаточно просты, программное обеспечение практически отсутствовало. Показатели объёма оперативной памяти и быстродействия по современным меркам — очень скромные (примеры используемых видов памяти приведены на рис. 6). Так, максимальная производительность составляла порядка 10 – 20 тыс. операций в секунду (10 – 20 kFLOPS). Для ввода-вывода использовались перфоленты, перфокарты, магнитные ленты и барабаны, а также печатающие устройства.

Программы писались на языке конкретной машины. Математик, составивший программу, садился за пульт управления, вводил и отлаживал программы и производил по ним счёт. Процесс отладки был весьма длительным по времени. Несмотря на ограниченность возможностей, эти машины позволяли выполнять сложнейшие





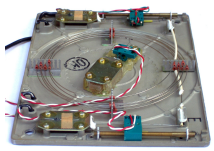


Рис. 6: Некоторые виды памяти, используемые в ранних компьютерах: запоминающая электронно-лучевая трубка (трубка Уильямса); запоминающее устройство на ртутных акустических линиях задержки в UNIVAC I (1951 год); проволочная линия задержки со сдвиговой волной (кручения)

расчёты, необходимые для прогнозирования погоды, решения задач атомной энергетики и др.

Опыт использования машин первого поколения показал, что существует огромный разрыв между временем, затрачиваемым на разработку программ, и самим временем счёта. Эти проблемы начали преодолевать путём создания средств автоматизации программирования, а также интенсивной разработкой обслуживающих программ, упрощающих работу на машине и увеличивающих эффективность её использования. Это, в свою очередь, потребовало значительных изменений в структуре компьютеров, направленных на то, чтобы приблизить её к требованиям, возникшим из опыта эксплуатации.

2.2.2 II поколение

Второе поколение компьютерной техники — машины, сконструированные в 1955 – 65 гг. Характеризуются использованием в них как электронных ламп, так и дискретных транзисторных логических элементов (см. рис. 7). Их оперативная память чаще всего была построена на магнитных сердечниках (см. рис. 8), что являлось большим технологическим прорывом. Эти машины характеризуются быстродействием до сотен тысяч операций в секунду, ёмкостью памяти — до нескольких десятков тысяч машинных слов. В это время стал расширяться диапазон применяемого оборудования ввода-вывода, появились высокопроизводительные устройства для работы с магнитными лентами (НМЛ), магнитные барабаны (НМБ) и первые магнитные диски.

Появляются языки высокого уровня, средства которых допускают описание всей необходимой последовательности вычислительных действий в наглядном, легко воспринимаемом виде. Поскольку смысл программы, подготовленной на алгоритмическом языке, недоступен компьютеру, воспринимающему только язык своих собственных команд, появляются специальные программы, которые называются транслято-

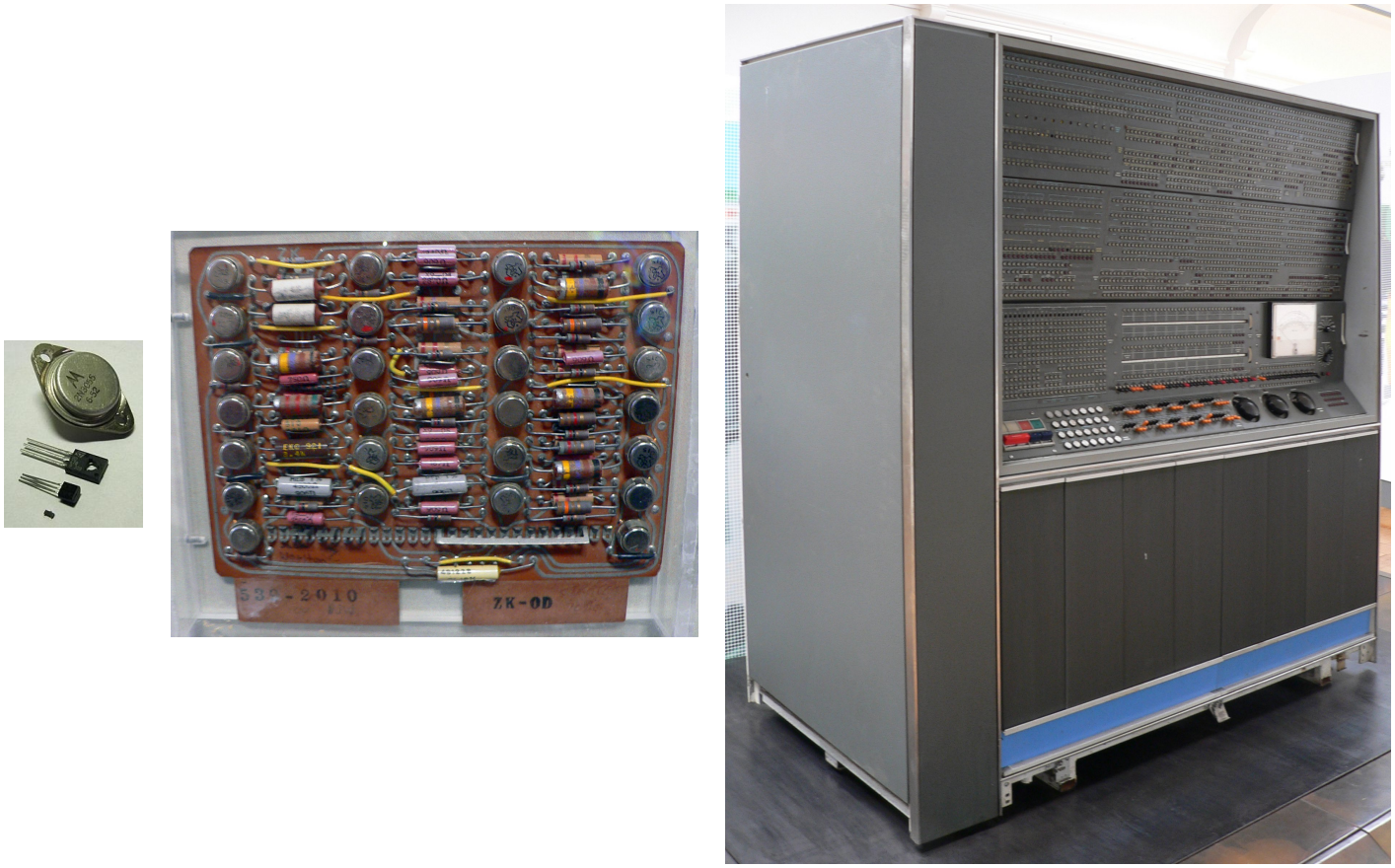


Рис. 7: Транзисторы и компьютер IBM 7030

рами, предназначенные переводить (транслировать) программу с алгоритмического на машинный язык.

Вместе с этом создаётся широкий набор библиотечных программ для решения разнообразных задач, а также мониторные системы, управляющие режимом трансляции и исполнения программ, из которых в дальнейшем выросли современные операционные системы.

Таким образом, операционная система — это важнейшая часть программного обеспечения компьютера, предназначенная для автоматизации планирования и организации процесса обработки программ, ввода-вывода и управления данными, распределения ресурсов, подготовки и отладки программ и других вспомогательных операций обслуживания.

Важная проблема. Машинам второго поколения была свойственна программная несовместимость, которая затрудняла организацию крупных информационных систем. Поэтому в середине 60-х гг. наметился переход к созданию компьютеров, совместимых программно и построенных на микроэлектронной технологической базе.

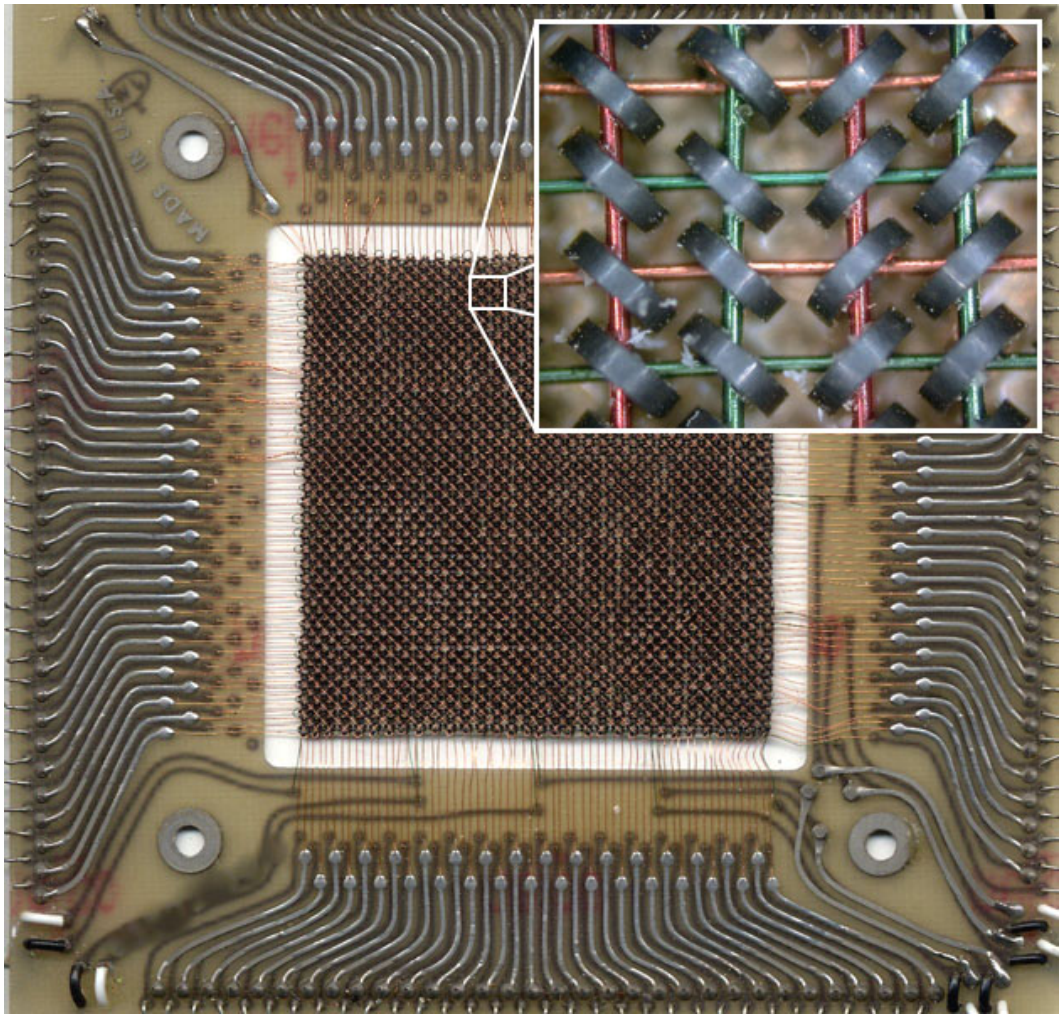


Рис. 8: Память на магнитных сердечниках

2.2.3 III поколение

Третье поколение представляет собой ряд семейств машин с единой архитектурой, т. е. совместимых программно. В качестве элементной базы в них используются интегральные схемы, которые также называются микросхемами. Быстродействие машин внутри поколения изменяется от нескольких десятков тысяч до миллионов операций в секунду. Ёмкость оперативной памяти достигает нескольких сотен тысяч слов.

Машины третьего поколения создавались примерно после 60-х гг., имели развитые операционные системы и обладали возможностями мультипрограммирования, т. е. параллельного выполнения нескольких программ. Многие задачи управления памятью, устройствами и ресурсами стала брать на себя операционная система или же непосредственно сама машина.

Примеры машин третьего поколения: семейства IBM/360, IBM/370, PDP-11, VAX, ЕС ЭВМ (Единая система ЭВМ), СМ ЭВМ (Семейство малых ЭВМ) и др. (см. примеры на рис. 9).

Появление System/360 закрепило такие стандарты как 8-битный байт (в отличие





Рис. 9: Мейнфрейм IBM System/360 Model 20, его аналог ЕС-1035 и миникомпьютер DEC PDP-11/40

от 4 или 6 бит и байтов переменной длины), память с байтовой адресацией (в отличие от памяти с побитовой или словной адресацией), использование процессоров с микрокодированием (когда сложные команды выполняются с помощью микропрограмм, а не с помощью отдельных схем). Шестнадцатеричная система счисления, широко применявшаяся в документации IBM/360, практически вытеснила ранее доминировавшую восьмеричную. Также IBM/360 была первой 32-разрядной компьютерной системой. Старшие модели семейства IBM/360 и последовавшее за ними семейство IBM/370 были одними из первых компьютеров с виртуальной памятью и первыми серийными компьютерами, поддерживающими реализацию виртуальных машин.

2.2.4 IV поколение

Четвёртое поколение — это основной контингент современной компьютерной техники, разработанной после 70-х гг. Наиболее важный в концептуальном отношении критерий, по которому эти компьютеры можно отделить от машин третьего поколения, состоит в том, что машины четвёртого поколения проектировались в расчёте на эффективное использование современных высокоуровневых языков и упрощённый для конечного пользователя процесс программирования. В аппаратурном отношении для них характерно широкое использование в качестве элементной базы интегральных схем (см. примеры на рис. 10), а также наличие быстродействующих запоминающих устройств с произвольной выборкой ёмкостью в десятки мегабайт.

С точки зрения структуры, машины этого поколения представляют собой многопроцессорные и многомашинные комплексы, работающие на общую память и общее ппространство внешних устройств.

Для систем четвёртого поколения характерным является:

- форм-фактор персонального компьютера (один из первых примеров представлен на рис. 11);

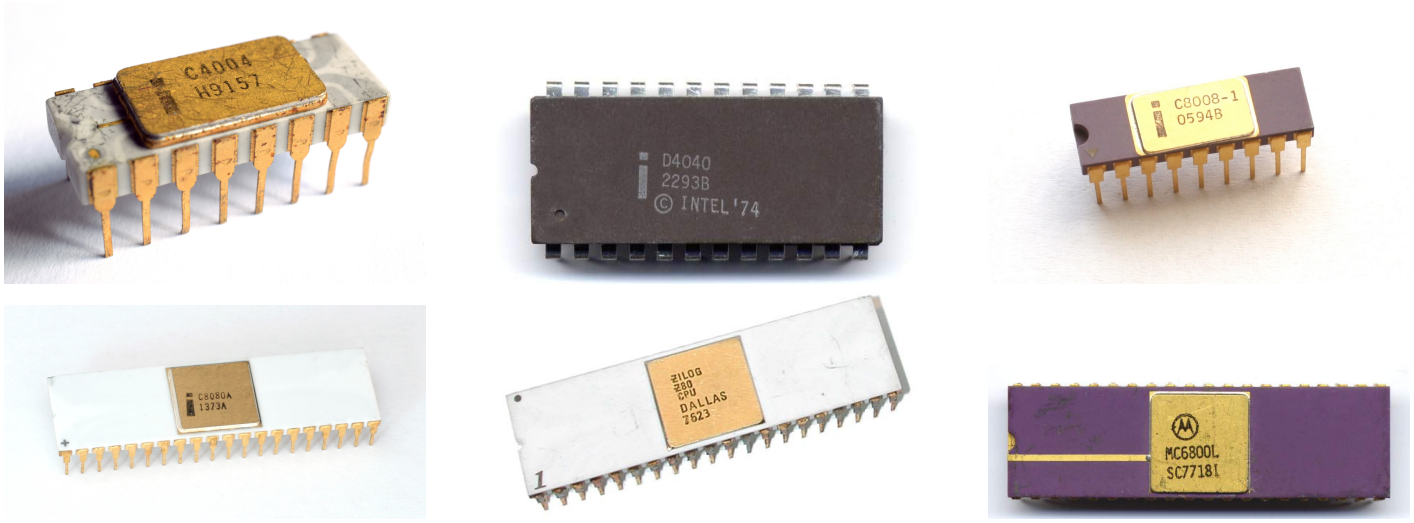


Рис. 10: Одни из первых процессоров, выполненных по интегральной технологии

- телекоммуникационная обработка данных и широкое применение компьютерных сетей;
- существенное использование систем управления базами данных;
- элементы интеллектуального поведения систем обработки данных и устройств.

2.2.5 V поколение

Наиболее чёткая и общепринятая классификация ВМ по поколениям существует только для первых четырёх этапов. Для пятого поколения в научной и учебной литературе нет единого мнения. Так, часть авторов не выделяет это поколение в принципе, считая все современные компьютеры представителями четвёртого поколения.

Некоторые источники выделяют в пятое поколение машины, построеные на микросхемах свехбольшой степени интеграции (см. по этому поводу датировку на стр. 5). Однако такое рассмотрение выглядит несколько искусственным, поскольку все отличия между машинами четвёртого и пятого поколений с этой точки зрения сводятся только к конкретным численным значениям тех или иных параметров. Структура же, принципы функционирования, элементная база самих компьютеров при этом не претерпевают никаких принципиальных изменений.

Значительное число исследователей связывают термин “пятое поколение ЭВМ” не со сменой элементной базы, а с продвижением новой целевой концепции, начавшей активное развитие с конца 1980-х годов (см. в связи с этим последнюю колонку таблицы 3). Главной целью компьютерной индустрии пятого поколения при этом считается создание компьютеров для интеллектуальных вычислений — машинного обучения, распознавания образов, понимания естественного языка, параллельной обработки больших данных. Эта цель сегодня реализуется с помощью технологий,



Рис. 11: IBM PC — один из первых успешных массовых персональных компьютеров

основанных на тех же принципах сверхбольших интегральных схем четвёртого поколения и активно стимулирует развитие новых парадигм вычислений: нейронных сетей, искусственного интеллекта, квантовых и оптических вычислений.

3 Базовые представления о структуре и архитектуре ВМ

3.1 Общие определения

Определение 1. ***Структура компьютера*** *— это совокупность его функциональных элементов и связей между ними.*

Элементами при этом могут быть самые различные устройства — от основных логических узлов компьютера до простейших схем. Структура компьютера графически представляется в виде структурных схем, с помощью которых можно дать описание компьютера на любом уровне детализации.

Определение 2. ***Архитектурой компьютера*** *называется его представление на некотором общем уровне, включающее описание пользовательских возможностей программирования, системы команд, системы адресации, организации памяти и т. д.*

Архитектура определяет принципы действия, информационные связи и взаимное соединение основных логических узлов компьютера: процессора, оперативного запо-

минающего устройства, внешних запоминающих и других периферийных устройств. Общность архитектуры разных компьютеров обеспечивает их совместимость с точки зрения пользователя.

3.2 Принципы фон Неймана

Большинство современных ВМ функционируют согласно принципам, сформулированным в 1945 году Джоном фон Нейманом.

1. **Принцип двоичного кодирования.** Для представления данных и команд используется двоичная система счисления (а не десятичная, как например в машине ENIAC).

2. **Принцип жёсткости архитектуры.** ВМ состоит из блока управления, АЛУ, памяти, устройств ввода/вывода и в процессе её работы топология, архитектура, система команд остаются неизменными.

3. **Принцип адресуемости памяти.** Память представляет собой массив пронумерованных ячеек, доступ к которым осуществляется по их адресам. Процессору в произвольный момент времени доступна любая ячейка. Отсюда следует возможность давать имена областям памяти так, чтобы к запомненным в них значениям можно было впоследствии обращаться или менять их в процессе выполнения программ с использованием присвоенных имен.

4. **Принцип однородности памяти.** Для хранения и управляющих команд, и данных используется одна и та же общая память. Поэтому компьютер не различает, что хранится в данной ячейке памяти — число, текст или команда. Над командами можно выполнять такие же действия, как и над данными. Например, программа в процессе своего выполнения также может подвергаться переработке, что позволяет задавать в самой программе правила получения некоторых её частей (так в программе организуется выполнение циклов и подпрограмм).

5. **Принцип последовательного программного управления.** Все команды выполняются последовательно, одна после другой, в строгом соответствии с алгоритмом. Таким образом, программа состоит из набора команд, которые выполняются процессором автоматически друг за другом в определённой последовательности. Выборка программы из памяти осуществляется с помощью счётчика команд — специального регистра процессора, который последовательно увеличивает хранимый в нём адрес каждой очередной исполняемой инструкции. Если после выполнения команды следует перейти не к следующей, а к какой-то другой, используются команды условного или безусловного переходов, которые заносят в счётчик команд номер ячейки памяти, содержащей следующую команду.

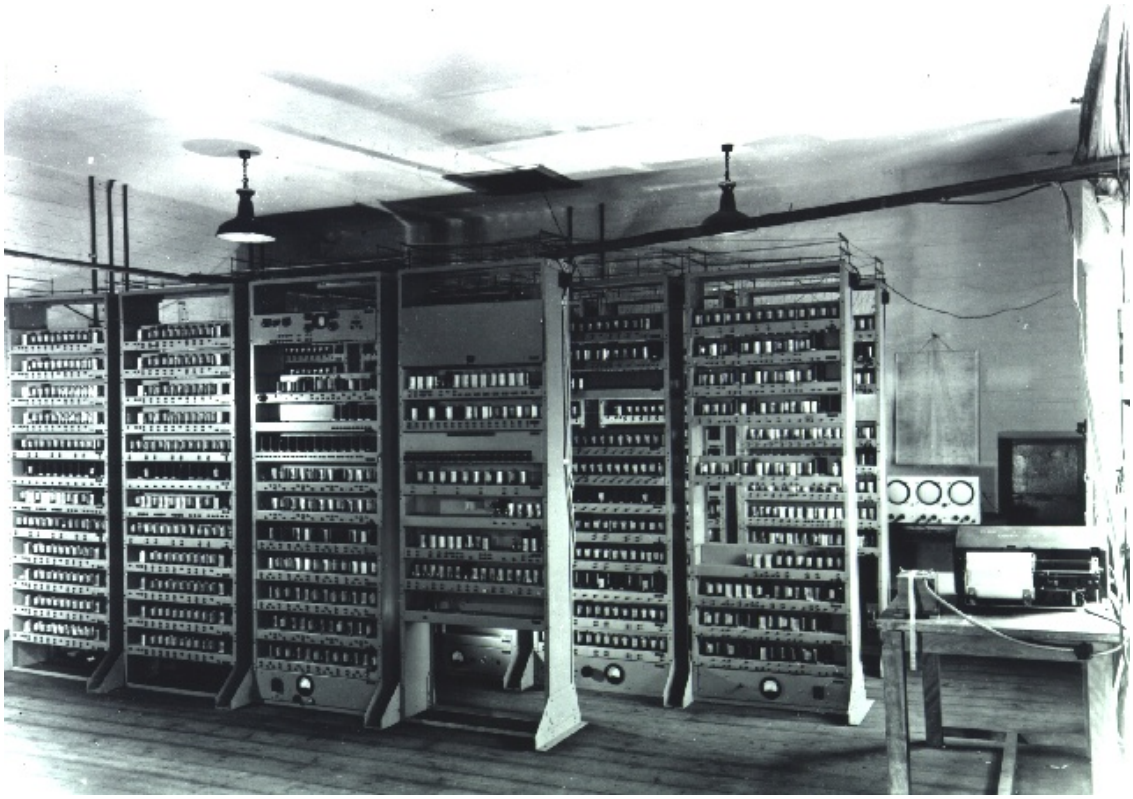


Рис. 12: Машина EDSAC — пример одной из первых реализаций архитектуры фон Неймана

Замечание 1. *Существуют ВМ, построенные и не на архитектуре фон Неймана (часто встречаются, например, представители гарвардской, потоковой, суперскалярной и т. п. архитектур).*

Пример 1. *В ассоциативных компьютерах может не выполняться принцип программного управления, поскольку каждая команда здесь содержит адрес следующей (т. е. они могут работать без счётчика команд, указывающего на выполняемую команду программы).*

3.3 Основные функциональные блоки ВМ

Основные функциональные блоки компьютера условно показаны на рис. 13.

Центральный процессор (ЦП, CPU — Central Processor Unit) непосредственно реализует операции обработки информации и управления вычислительным процессом, осуществляя выборку машинных команд и данных из оперативной памяти (ОП), их выполнение и запись результатов в ОП, включение и отключение ВМ. Основными блоками процессора являются:

- устройство управления (УУ) с интерфейсом процессора (системой сопряжения и связи процессора с другими узлами машины);

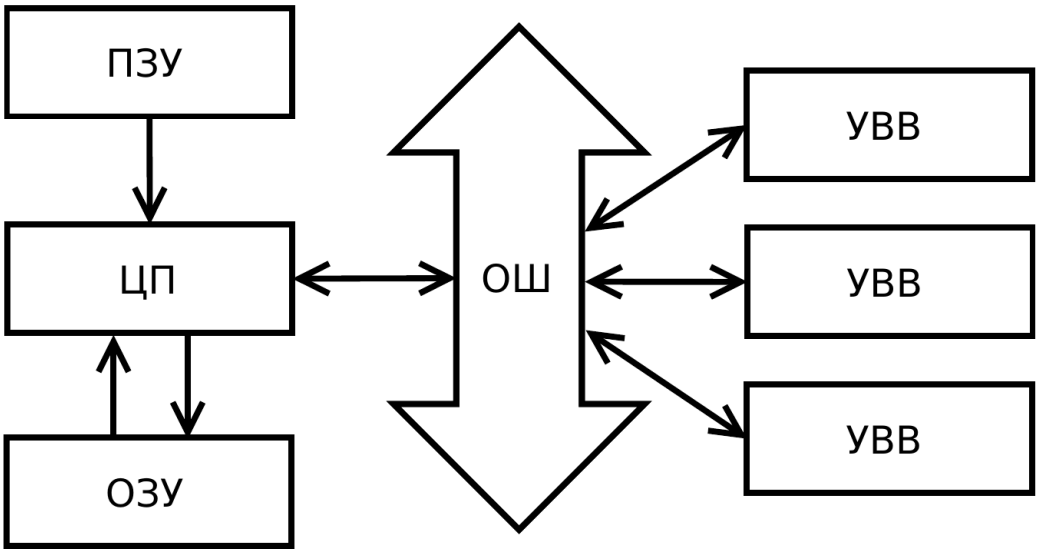


Рис. 13: Функциональное устройство компьютера

- арифметико-логическое устройство (АЛУ);
- блок регистров;
- процессорная память (внутренний кэш).

Арифметико-логическое устройство — это часть процессора, выполняющая арифметические, логические и некоторые другие (в том числе сдвиги и преобразования) операции над данными. Чаще всего АЛУ реализует набор самых простых операций только над целочисленными операндами[4]. Арифметической операцией называют процедуру обработки данных, аргументы и результат которой являются числами (сложение, вычитание, умножение, деление). Логической операцией именуют процедуру, осуществляющую построение сложного высказывания (операции И, ИЛИ, НЕ). АЛУ состоит из сумматора, соответствующих логических схем и блока управления выполняемым процессом. Устройство работает в соответствии с сообщаемыми ему кодами операций, которые должны быть выполнены над переменными, помещаемыми в регистры.

Оперативная память (ОЗУ — оперативное запоминающее устройство, Main Memory или RAM — Random Access Memory) предназначена для временного хранения данных и машинных инструкций в процессе функционирования компьютера.

Постоянная память (ПЗУ — постоянное запоминающее устройство или ROM — Read-Only Memory) предназначена для хранения программ и параметров конфигурации, обеспечивающих первоначальное функционирование ВМ до загрузки ОС.

[4]Для операций над числами с плавающей запятой, как правило, используется или специально выделенная часть процессора или отдельное устройство, называемые и в том, и в другом случае математическим сопроцессором.

Пример 2. *(очень приблизительный) Микросхема энергонезависимой памяти NVRAM (Flash-память)*[5]*, хранящая код UEFI (Unified Extensible Firmware Interface — унифицированный расширяемый интерфейс прошивки) — современная прошивка, заменившая BIOS.*

Устройства ввода/вывода (УВВ или внешние устройства) обеспечивают эффективное взаимодействие компьютера с окружающей средой — пользователями, объектами управления, другими машинами.

В специализированных управляющих ЭВМ (технологические процессы, связь, ракеты и пр.) внешними устройствами ввода являются датчики (температуры, давления, расстояния и пр.), устройствами вывода — манипуляторы (гидро-, пневмо-, сервоприводы рулей, вентилей и др.). В универсальных ЭВМ (человеко-машинная обработка информации) в качестве УВВ выступают терминалы, принтеры и др. устройства.

Однотипные центральные устройства и устройства хранения данных могут использоваться в различных типах машин. Известны примеры того, как фирмы, начавшие свою деятельность с производства управляющих машин, совершенствуя свою продукцию, перешли к выпуску систем, которые в зависимости от конфигурации УВВ могут исполнять роль как универсальных, так и управляющих машин (машины HP — Hewlett-Packard и DEC — Digital Equipment Corporation).

Интерфейс общей шины. Интерфейсы (каналы связи) служат для сопряжения центральных узлов машины с её внешними устройствами. Шина — это система проводников, предназначенная для электрического соединения устройств. В интерфейсе общей шины все одноименные контакты в разъёмах соединены между собой, т. е. внешнее устройство может быть включено в любой свободный разъём и обращение к нему происходит по его физическому адресу. Такое решение является аппаратной реализацией принципа физической адресации УВВ.

В компьютерной технике встречается также и принцип географической адресации, когда внешнее устройство работоспособно только при подключении к некоторому конкретному выделенному порту. Более сложным случаем, сочетающим физическую и географическую адресацию, является шина PCI, для которой можно изменить логику работы по прерываниям для кадого конкретного разъёма.

В общей шине выделяют три основных группы сигналов по назначению:

- `A` (шина адреса),
- `D` (шина данных),
- и `C` (шина управления).

[5] В старых компьютерах на материнской плате присутствовали две микросхемы сходного назначения, но другого типа: микросхема ROM/EPROM, предназначенная для хранения BIOS — Basic Input Output System и микросхема статической (SRAM) CMOS-памяти.

Существует также шина питания, но программисты о ней, как правило, обычно умалчивают.

В зависимости от устройства шин адреса и данных возможны построения с двух- и трёхшинной организацией. При трёхшинной организации шины адреса, данных и управления — раздельные, т. е. под них физически выделены отдельные группы проводников и соответствующие контакты в разъёмах подключения устройств. При двухшинной организации шины адреса и данных используют одну и ту же группу проводников и контактов. Такая шина называется мультиплексируемой (`A/D`).

Пример 3. *ISA — трёхшинная организация. PCI — мультиплексируемая шина.*

3.4 Абстрактное центральное устройство

Часто удобно описывать архитектуру ВМ используя понятие центрального устройства.

Определение 3. ***Центральное устройство*** *представляет собой основную часть ЭВМ и включает в себя два функциональных блока — ЦП и ОП.*

Рассмотрим структуру и функции абстрактного центрального устройства ВМ, АЛУ которого предназначено для обработки целых чисел и битовых строк. Соответствующая схема приведена на рис. 14. Кроме того, перечислим основные понятия, тесно связанные с функционированием центрального устройства.



Рис. 14: Структура простейшего центрального устройства ВМ

Машинная команда/инструкция (instruction) — это машинное слово (фактически — число определённой разрядности), кодирующее одну из операций, выполняемых центральным устройством. Каждая машинная команда характеризуется форматом, который определяет её структуру. Типичная инструкция содержит содержит следующие элементы:

- код операции (КОП), характеризующий тип выполняемого действия;
- адресную часть, которая в общем случае включает:
  - номера (адреса) индексного (ИР) и базисного (БР) регистров;
  - адреса операндов — A1, A2 и т. д.

Как правило, машинные инструкции достаточно сложны с точки зрения исполнения на аппаратном уровне, поэтому их представляют в виде последовательности элементарных действий — микроопераций или микрокоманд (μOps, micro-actions). Каждая микрооперация реализуется определенной логической цепью (схемой) процессора в течении одного машинного такта.

Такт работы процессора — промежуток времени между соседними импульсами синхронизации (tick of the internal clock) генератора тактовых импульсов. Частоту импульсов синхронизаци называют тактовой частотой процессора. Таким образом, можно сказать, что такт процессора — это квант времени, в течение которого осуществляется элементарная микрооперация (например — выборка, сравнение, пересылка данных).

Циклом процессора называют период времени, за который осуществляется выполнение одной машинной команды исходной программы. Цикл состоит из нескольких тактов.

В качестве примера рассмотрим, как происходит выполнение т. н. короткой[6] команды. К таким командам относятся инструкции арифметики с фиксированной точкой или логические операции. Каждая из них занимает как минимум пять тактов, в течение которых реализуются следующие микрооперации:

1. Выборка команды (Fetch);
2. Расшифровка кода операции/декодирование (Instruction Decode);
3. Вычисление адреса и выборка данных из памяти (Address Generate, Load)
4. Выполнение операции (Execute);
5. Запись результата в память (Write Back, Store).

[6] В современных ЦП очень часто встречаются длинные инструкции, требующие гораздо большего количества машинных тактов для своего выполнения.

4 Структурная организация ВМ

4.1 Классическая архитектура фон Неймана (звезда)

Структура ЭВМ традиционной архитектуры фон Неймана представлена на рис. 15.

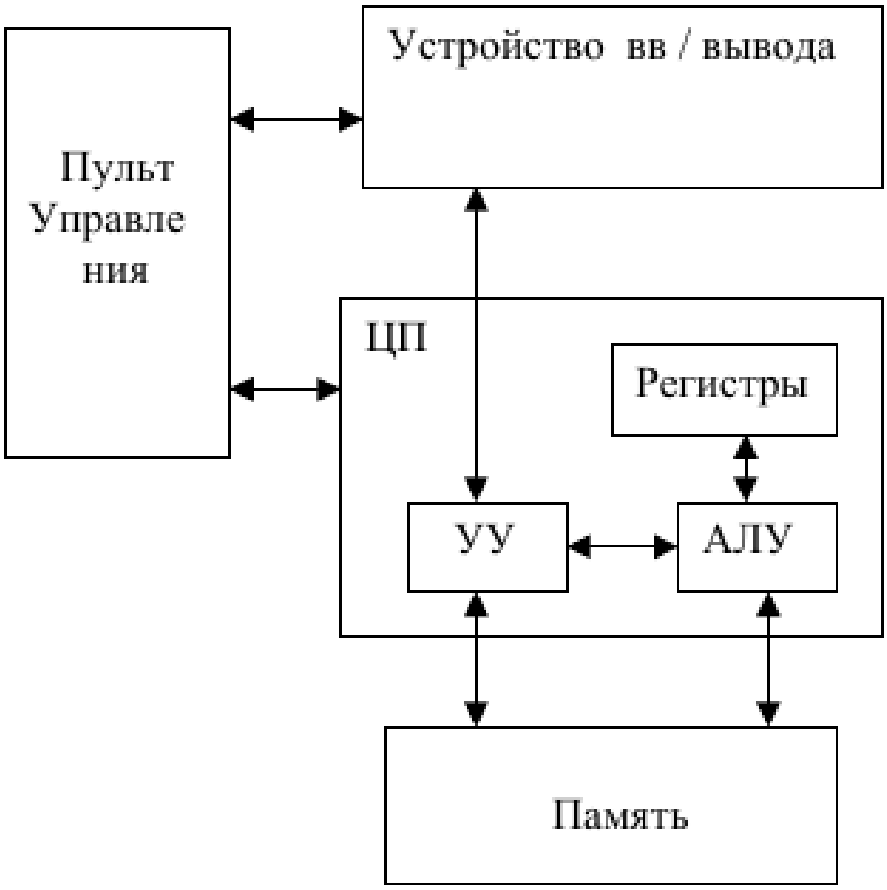


Рис. 15: Компьютер архитектуры фон Неймана

В этой архитектуре выделяется четыре основных узла: центральный процессор, память, УВВ и пульт управления. ЦП в свою очередь состоит из АЛУ, устройства управления (УУ) и регистров (регистрового файла). Внешние устройства (УВВ) служат для ввода в память расчётной программы и её исходных данных, а также для вывода результатов. Пульт управления предназначен для первоначального запуска машины, контроля хода вычислений, остановки программ вручную и др.

Арифметические и логические операции выполняются в АЛУ над целыми, вещественными числами и логическими элементами, представленными в двоичной системе счисления. Для отрицательных значений используется обратный или дополнительный код. Последний используется чаще, т. к. позволяет свести операцию вычитания к операции сложения.

В состав обычного фон Неймановского компьютера входит один ЦП, основная задача которого — выбирать из памяти и выполнять команды. Порядок выборки команд определяется счётчиком адреса команд (СчАК), содержимое которого инкрементируется после выборки очередной инструкции. Изменение естественного порядка выборки и выполнения команд производится командами переходов (передач управления), помещающих целевой адрес в СчАК.

Выбранная команда дешифрируется УУ и интерпретируется им в последовательность электрических импульсов и потенциалов (микроопераций), управляющих соответствующими функциональными элементами ЭВМ.

ЦП имеет набор регистров (или так называемую сверхоперативную память) предназначенных для временного хранения промежуточных результатов вычислений и данных, требуемых для выполнения команд. Регистры, как правило, разделяют на два класса: регистры общего назначения (РОН) и специальные. РОНы полноценно доступны программисту и их функциональность может меняться программно. Их количество широко варьруется в разных процессорах и ограничивается технологическими и экономическими соображениями. Специальные (или иначе — операционные) регистры, к которым относятся, например, регистр команд, буферные регистры и т. п. недоступны программисту.

Память в топологии звезда соединяется с процессором отдельной шиной, что позволяет одновременно с чтением-записью данных при выполнении текущей команды производить выборку и декодирование следующей команды.

Архитектуру фон Неймана часто называют принстонской архитектурой, и главной её отличительной чертой считают использование общей оперативной памяти для хранения как инструкций, так и данных. Альтернативная — гарвардская архитектура (название связано с компьютером Mark I, 1950 г.) — характеризуется физическим разделением оперативной памяти на память команд и память данных (instruction and data memory banks). Гарвардская архитектура широко используется в структуре современных центральных процессоров, так как их кэш-память делится на память команд (I-Cache) и кэш данных (D-Cache).

4.2 Иерархическая архитектура

При такой структрурной организации (см. рис. 16) центральное устройство компьютера соединено с периферийными процессорами (также называемыми вспомогательными или канальными процессорами), управляющими в свою очередь контроллерами, к которым подключены группы внешних устройств. Системы IBM 360-375 и ЕС ЭВМ были построены именно по такой схеме.

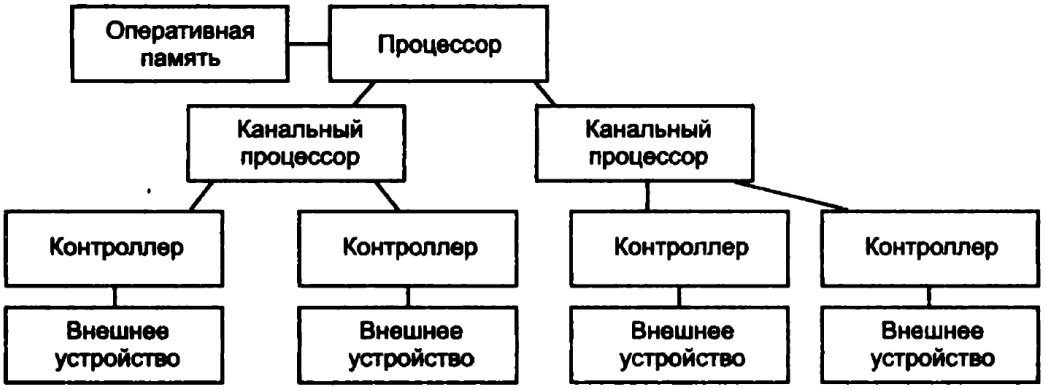


Рис. 16: Иерархическая архитектура

4.3 Магистральная структура

Магистральная структура представлена на рис. 17. Процессор (или процессоры) и блоки памяти взаимодействуют между собой и с внешними устройствами (точнее — с их контроллерами) через внутренний канал, общий для всех устройств. Физически магистраль представляет собой многопроводную линию с разъёмами для подключения различных электронных устройств. Совокупность линий магистрали разделяется на отдельные группы — шину адреса, шину данных и шину управления. С точки зрения структуры к этой категории относятся машины фирмы DEC, а также IBM PC-совместимые персональные ЭВМ.

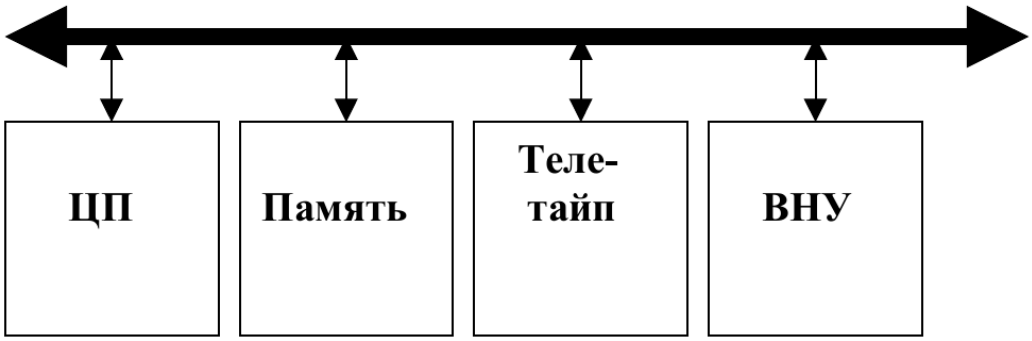


Рис. 17: Магистральная архитектрура на примере DEC PDP-11

Подобные машины появились в начале 70-х годов прошлого века в классе мини-ЭВМ в результате поиска структур, отличных от традиционных и позволяющих уменьшить показатель «цена-производительность». Впервые такая архитектура была опробована на миникомпьютере GRI-909, в котором все элементы процессора и других функциональных блоков подключались к достаточно простой параллельной шине. При этом все функциональные блоки становились программно адресуемыми и между ними стали возможными прямые связи под программным управлением.

Развитием магистральной архитектуры стала мини-ЭВМ PDP-11 фирмы DEC, основой которой стала единая, скоростная, двунаправленная, асинхронная маги-

страль UNIBUS. Все системные компоненты и внешние устройства PDP-11 подключены и взаимодействуют друг с другом через интерфейс UNIBUS. При этом регистры внешних устройств рассматриваются и адресуются как ячейки памяти, что позволяет процессору работать с ними как с содержимым памяти. Это позволяет использовать всё множество команд не только для вычислений, но и для управления вводом-выводом, что совмещает ввод/вывод информации с её обработкой. Появилось понятие «отображение УВВ на память».

Взаимодействие двух устройств на магистрали основано на отношении «ведущий-ведомый» (Master-Slave), которое является динамическим, т. е. одно и то же устройство в разные моменты времени может быть как ведущим, так и ведомым. Ведущее устройство управляет работой ведомого непосредственно, минуя процессор и память. В каждый момент времени лишь одно устройство может управлять магистралью. Память всегда ведомая.

Каждое устройство магистральной ВМ может разрабатываться независимо от других за исключением интерфейса с магистралью. Блоки могут вставляться в любые разъёмы без нарушения работоспособности. Легко решается проблема расширяемости системы. Упрощение и упорядочение обмена между блоками позволило просто соединить одноимённые контакты разъёмов печатными проводниками и существенно снизить трудоёмкость изготовления системы по сравнению с машинами аналогичного класса традиционной структуры.

Идея магистральной структуры оказалась настолько плодотворной, что с тех пор многие вычислительные средства разрабатывают на её основе, хотя, конечно, реальная структура компьютеров отличается от теоретических схем — в ней используется несколько разновидностей шинных интерфейсов, которые соединяются между собой мостами либо хабами.

4.4 Многошинные структуры компьютеров

Подключение большого числа устройств к шине не позволяет решить задачу повышения производительности за приемлемую стоимость, так как с ростом электрической мощности и частоты синхронизации растёт уровень помех и рассогласования сигналов. В связи с этим в настоящее время распространены многошинные (чаще трёхшинные) структуры персональных ЭВМ, выполненные на основе мостовой или хабовой архитектуры.

4.4.1 Мостовая архитектура

В мостовых архитектурах (см. рис. 18) центральный процессор компьютера подключается непосредственно к главной системной шине (FSB — Front Side Bus — фасадная шина), нагруженной лишь на одно устройство — северный мост (Northbridge), что упрощает проектирование систем высокой производительности. Такая трёхскоростная и трёхуровневая структура (FSB + PCI + ISA) позволяет различным

устройствам работать с оптимальной скоростью.

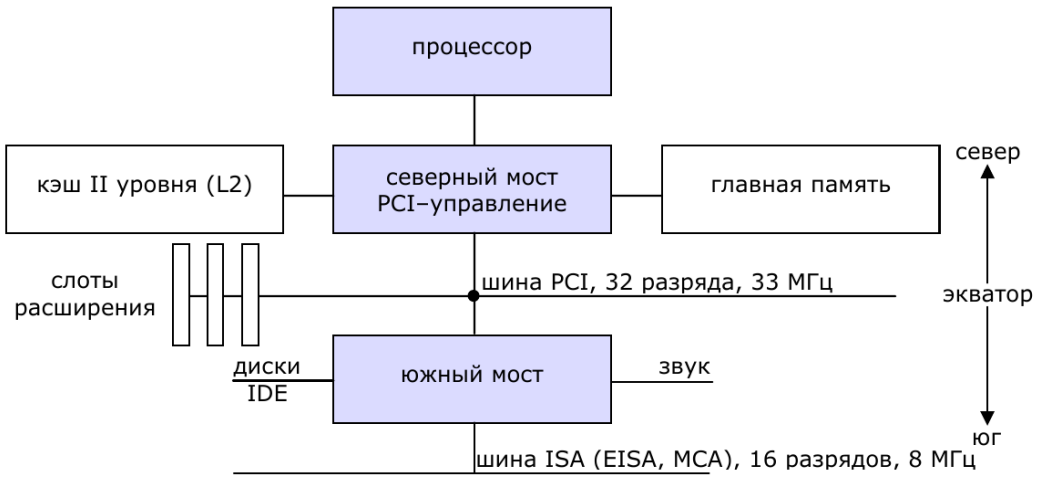


Рис. 18: Мостовая архитектрура

Шина FSB также часто называется шиной процессора (Host bus), так как она постоянно контролируется процессором. Эта 64-х разрядная шина передаёт данные процессору со скоростью от 528 МБайт/с (при частоте синхронизации 66 МГц) до 1.064 Гбайт/с (133 МГц). В компьютерах на базе процессора Pentium IV для шины FSB применялась уже существенно более высокая частота синхронизации — 488 МГц, что примерно соответствует[7] скорости передачи информации 2.4 Гбайт/с. Все промахи обращения в кэш первого уровня (и второго уровня в процессорах Pentium Pro) преобразуются в обращения к главной памяти и вместе с транзакциями ввода/вывода проходят через главную шину. Микросхему подключённую к шине FSB с другой стороны от процессора называют северным мостом. Фактически — это системный контроллер (являющийся частью набора системной логики — так называемого chipset'а — материнской платы), управляющий кэш-памятью второго уровня, оперативной памятью и выполняющий функцию моста от Host'а к шине PCI.

Шина PCI (Peripheral Component Interconnect) с точки зрения скорости передачи даных и расположения на схеме занимает среднее (экваториальное) положение в компьютере. Мост Host — PCI в системном контроллере реализует протоколы шины PCI и обеспечивает интерфейс между шиной PCI и отдельными устройствами. Пиковая скорость передачи данных по шине PCI составляет как правило 133 МБайт/с (при частоте синхронизации 33 МГц). Этой шиной может управлять любое из нескольких устройств, подключённых к ней (в том числе, конечно, процессор, а также устройства ввода/вывода).

Поскольку шина PCI поддерживает лишь 3 – 6 слотов, то компьютеры с большим количеством разъёмов PCI должны содержать несколько шин PCI, которые управляются дополнительными мостами PCI — PCI.

[7]Как вы думаете, — почему это соответствие нельзя рассматривать в качестве точного?

Наименее быстродействующими в описываемой структуре являются периферийные шины: ISA, EISA или MCA. Микросхема, обычно называемая южным мостом (Southbridge), по-сути является “переходным элементом” между шинами PCI и ISA (или EISA, MCA), который обеспечивает интерфейс связи медленных периферийных УВВ с шиной PCI. Обычно пиковая скорость шины ISA составляла 5 МБайт/с, но эффективная скорость передачи данных была ещё меньше — порядка 2.5 МБайт/с. В 1999 году было объявлено, что шина ISA устарела и устройства для неё перестали выпускать.

Системы PCI обычно поддерживают функциональные возможности, которые можно включить или отключить в BIOS. К таким возможностям, например, относится управление буферизацией (сохранение больших фрагментов данных) между процессором и шиной PCI, изменение временны́х характеристик шины PCI и контроль состояния шины. Предоставляемые в распоряжение пользователя параметры зависят от набора микросхем материнской платы. BIOS, поддерживающая изменение параметров шины PCI, позволяет экспериментальным путём подобрать оптимальную производительность и обеспечить совместимость всех компонентов схемы. Обычно различные шины “развязываются” (т. е. согласовываются между собой) через буферы FIFO (First Input — First Output) посредством считывания с опережением и записи с запаздыванием, что в какой-то мере предотвращает торможение более быстрой шины FSB более медленной шиной PCI (и аналогично для связки шин ISA и PCI).

4.4.2 Хабовая архитектура

С повышением быстродействия процессоров (Intel Pentium III / Celeron, AMD Athlon / Duron) и периферийных устройств относительно медленная шина PCI стала узким местом в увеличении общей производительности и надёжности компьютерных систем, реализующих мостовую структуру.

В этих системах шина PCI не только должна обеспечивать поток данных между PCI устройствами, памятью и процессором, но и транзакции между южным и северным мостами. Ставить 64–х разрядную шину PCI дорого, а поднимать частоту до 66 МГц тоже невыгодно, так как все устройства на шине должны работать на этой частоте (иначе её скорость падает до 33 МГц). Чтобы оптимизировать структуру компьютера и значительно ускорить информационный обмен между устройствами, фирмой Intel, начиная с чипсета i810, и позже фирмой VIA, начиная с чипсетов Apollo Pro 266 / KT266, была реализована так называемая Accelerated Hub Architecture. Пример структурной схемы такой системы приведён на рис. 19.

В этой архитектуре северный мост заменён на хаб контроллера графики и памяти (GMCH – Graphics and Memory Controller Hub), а южный мост — на хаб контроллера ввода/вывода (ICH — Input/output Controller Hub). При этом шина PCI полностью перешла под управление ICH, а обмен данными между хабами осуществляется по специально выполненной шине с эффективной скоростью передачи 125 МБайт/с. У

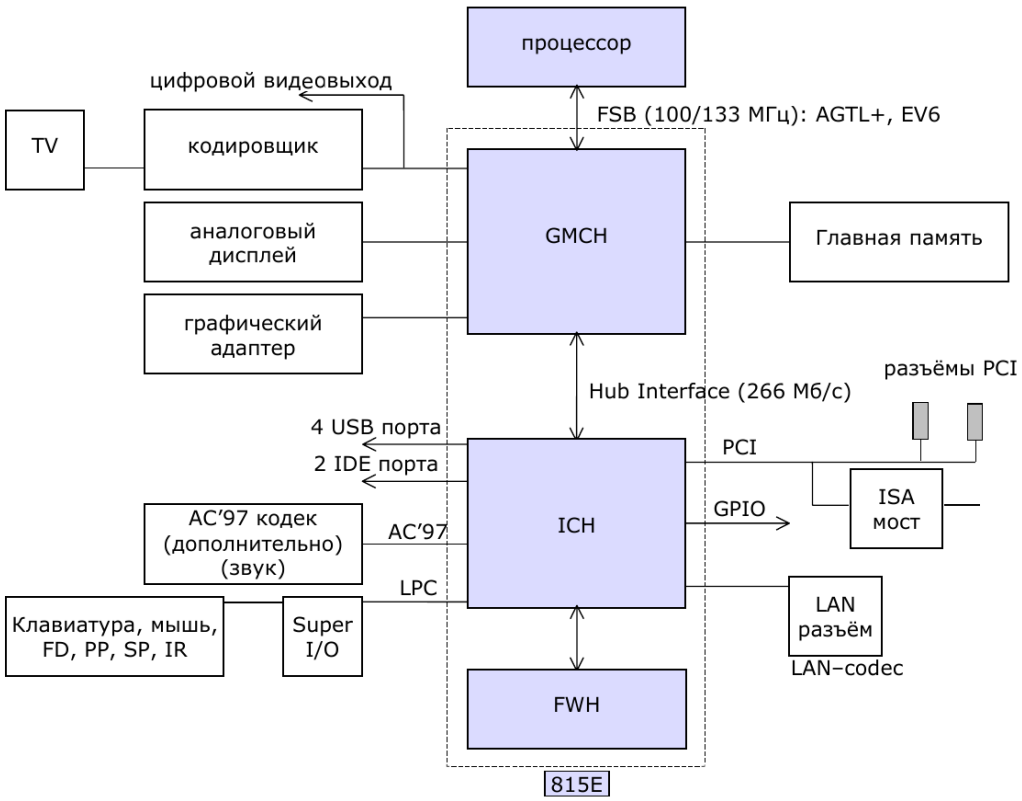


Рис. 19: Хабовая архитектура ВМ на примере чипсета i815E

Intel она называется Intel Hub Interface, у VIA — V-Link. Эти шины имеют разрядность 64 бита и частоту синхронизации 100 и 66 МГц, соответственно[8]. LPC (Low Pin Count) здесь — это интерфейс заменяющий шину ISA для подключения старых (legacy) устройств. Третий хаб (FWH — FirmWare Hub) обеспечивает функционирование средств зашиты и управления компьютером (BIOS).

В настоящее время, когда тактовая частота центральных процессоров давно превысила 3 ГГц, а требования к пропускной способности интерфейсов передачи приближаются к работе на частотах порядка 10 – 100 ГГц, параллельные системные и периферийные шины достигли потолка своих возможностей. Это связано с тем, что в параллельных шинах трудно достичь идентичности линий разных разрядов по длине, однородности и, следовательно, идентичности характеристик, что приводит к рассинхронизации сигналов на линиях разрядов. Поэтому произошёл практически повсеместный переход к последовательным шинам. Фирмы-производители оборудования уже в 2010-х годах отказались от праллельных шин FSB, PCI, AGP (и тому подобных) и заменили их последовательными шинами PCI Express, Hyper Transport, SATA, USB и др.

[8] А какова при этом оценка для теоретической максимальной скорости передачи информации?

5 Вычислительные системы и суперкомпьютеры

5.1 Определение и основная классификация

Определение 4. ***Вычислительная система или суперкомпьютер*** *— это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих процессоров или ЭВМ, периферийного оборудования и программного обеспечения, предназначенная для сбора, хранения, обработки и распределения информации.*

Создание вычислительных систем преследует следующие основные цели:

- повышение производительности системы за счет ускорения процессов обработки данных;
- повышение надёжности и достоверности вычислений;
- предоставление пользователям дополнительных сервисных услуг и т. п.

Отличительной особенностью вычислительных систем по отношению к классическим ЭВМ является наличие в них нескольких вычислителей, реализующих параллельную обработку информации. Параллелизм выполнения операций существенно повышает быстродействие системы. Он может также значительно повысить надёжность (при отказе одного компонента системы его функции может взять на себя другой) и достоверность функционирования системы (если операции будут дублироваться на разных узлах, а результаты их выполнения сравниваться).

Если не вдаваться в подробности, вычислительные системы прежде всего можно разделить на:

- многомашинные;
- многопроцессорные.

Многомашинная вычислительная система. Здесь несколько процессоров, входящих в вычислительную систему, не имеют общей оперативной памяти, а работают каждый со своей локальной памятью. Каждый компьютер в многомашинной системе имеет классическую архитектуру, однако эффект от применения такой вычислительной системы может быть получен только при решении задач, имеющих специальную структуру: она должна разбиваться на столько слабо связанных подзадач, сколько компьютеров в системе.

Многопроцессорная система. Наличие в компьютере нескольких процессоров означает, что параллельно может быть организовано много потоков данных и много потоков команд. Таким образом, параллельно могут выполняться несколько фрагментов одной задачи.

Преимущество в быстродействии многопроцессорных и многомашинных вычислительных систем перед однопроцессорными очевидно.

5.2 Классификация архитектур компьютеров по Флинну

В 1966 г. Флинном (M.J. Flynn) была предложена классификация архитектур ЭВМ и вычислительных систем, в основу которой положено понятие потока, или последовательности элементов (команд или данных), обрабатываемых компьютером. Соответствующая система классификации, основанная на рассмотрении числа потоков команд и потоков данных, приводит к четырём базовым классам.

1. SISD (Single Instruction stream — Single Data stream): один поток команд и один поток данных.

2. SIMD (Single Instruction stream — Multiple Data stream): один поток команд и много потоков данных.

3. MISD (Multiple Instruction stream — Single Data stream): много потоков команд и один поток данных.

4. MIMD (Multiple Instruction stream — Multiple Data stream): много потоков команд и много потоков данных.

Кратко опишем характерные особенности каждой из этих архитектур.

5.2.1 SISD

Архитектура SISD охватывает все однопроцессорные и одномашинные варианты систем — все ЭВМ классической структуры попадают в этот класс. Здесь параллелизм вычислений обеспечивается только путём конвейеризации и распараллеливания потока микрокоманд между исполнительными устройствами.

5.2.2 SIMD

Архитектура SIMD предполагает создание структур векторной или матричной обработки. Системы этого типа обычно строятся как однородные, т. е. процессорные элементы, входящие в систему, идентичны, и все они управляются одной и той же последовательностью команд. Однако каждый процессор обрабатывает свой поток данных. Под эту схему хорошо подходят задачи обработки матриц или векторов (массивов), задачи решения систем линейных и нелинейных, алгебраических и дифференциальных уравнений, задачи теории поля и др. Часто компьютеры с архитектурой SIMD предназначаются для решения специализированных задач, например, преобразования Фурье или обработки изображений.

Такие компьютеры, две модификации которых приведены на рис. 20, состоят из командного процессора (управляющего модуля), называемого контроллером, и нескольких модулей обработки данных, называемых процессорными элементами (ПЭ). Управляющий модуль принимает, анализирует и выполняет команды. Если в

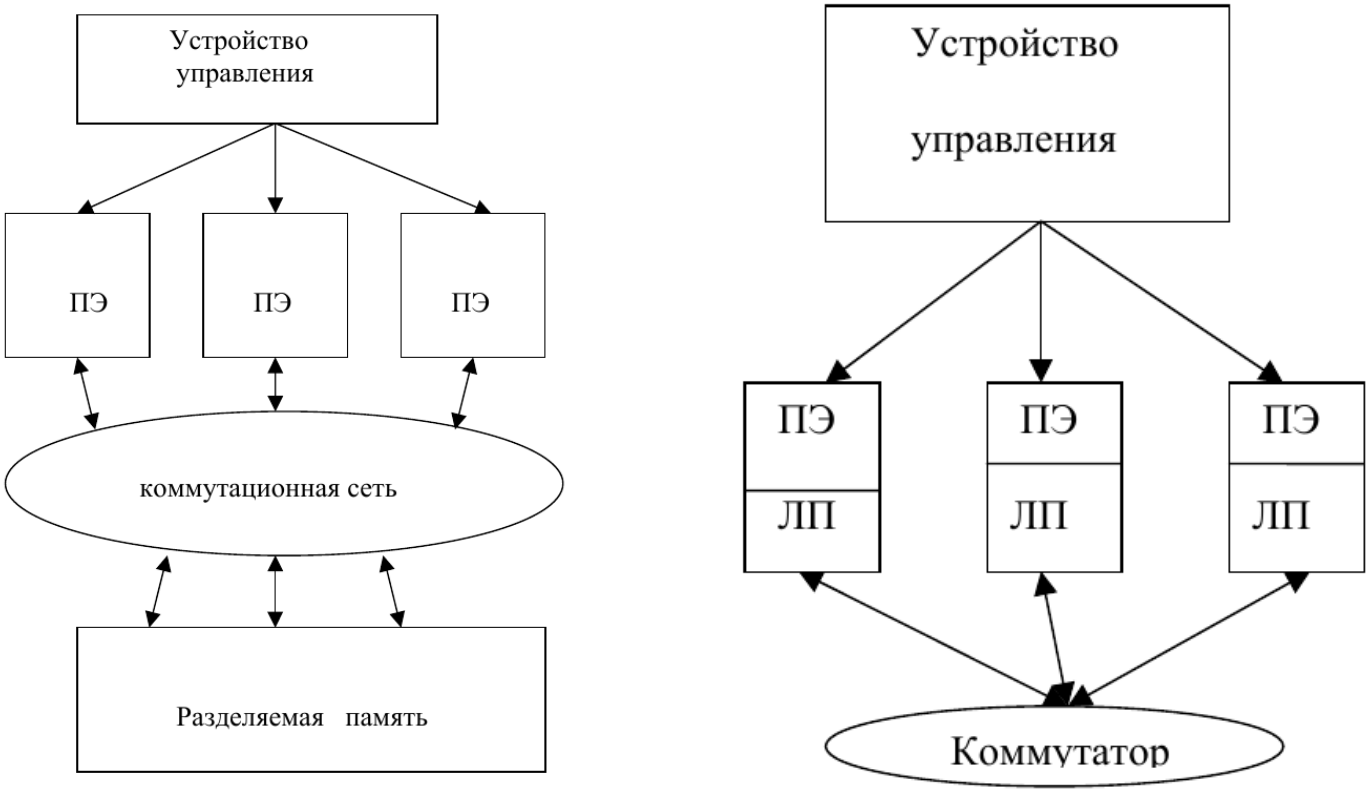


Рис. 20: SIMD-компьютеры с разделяемой и распределённой памятью

команде имеются данные, то контроллер рассылает её на все ПЭ, и она выполняется на всех, либо на нескольких процессорных элементах. ПЭ сравнительно просты и состоят из АЛУ, нескольких регистров и локальной сверхоперативной памяти.

5.2.3 MISD

Третий тип архитектуры (MISD) предполагает построение своеобразного процессорного конвейера, в котором результаты обработки передаются от одного процессора к другому по цепочке (см. рис. 21). Прототипом таких вычислений может служить схема любого производственного конвейера. В современных ЭВМ по этому принципу реализована схема совмещения операций, в которой параллельно работают различные функциональные блоки, и каждый из них делает свою часть в общем цикле обработки команды.

5.2.4 MIMD

Архитектура MIMD предполагает, что все процессоры вычислительной системы работают по своим программам с собственным потоком команд. В простейшем случае они могут быть автономны и независимы. Такая схема использования часто применяется во многих крупных вычислительных центрах для увеличения пропускной способности центра.

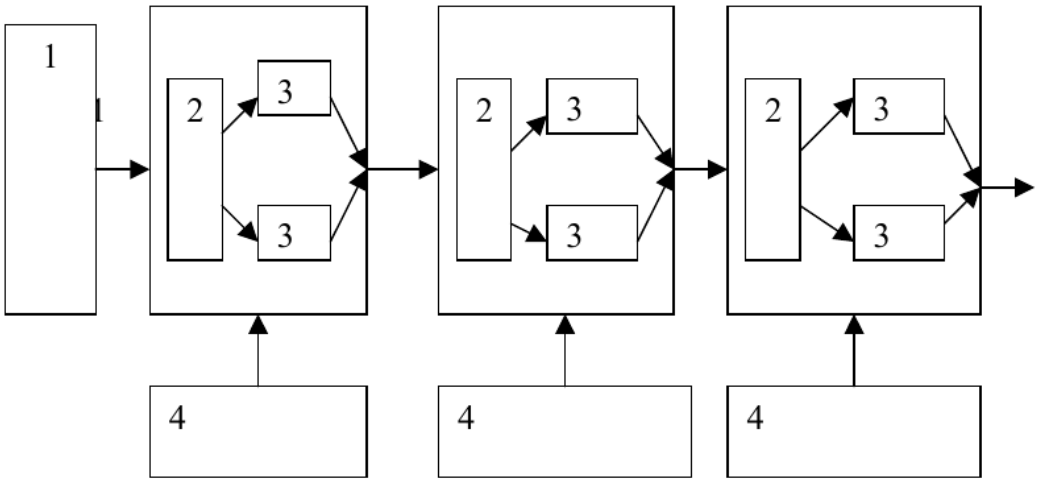


Рис. 21: Схема MISD-компьютера: 1 — данные, 2 — буфер, 3 — процессор, 4 — память

Существуют MIMD-компьютеры с разделяемой и с распределённой памятью. Этот класс архитектур имеет множество реализаций. К ним относят и симметричные параллельные вычислительные системы, и рабочие станции с несколькими процессорами, и кластеры рабочих станций и многие другие суперкомпьютеры. В начале 90-х годов прошлого века MIMD-компьютеры вышли в лидеры рынка высокопроизводитедьных вычислительных систем. Вначале на компьютерах с несколькими независимыми процессорами одновременно выполнялись разные задания, т. е. независимые программы, однако сейчас часто встречается распараллеливание в рамках одной задачи.

Развитием концепции MIMD-архитектуры с распределённой памятью является распределённая обработка информации. При этом вместо комплекта процессоров, размещённых в одном корпусе, используется совокупность компьютеров, взаимодействующих через достаточно быструю сеть. Принципиально это та же MIMD-архитектура, но с более медленно взаимодействующими компонентами.

5.3 Другие подходы к классификации вычислительных систем

Наличие большого разнообразия систем, образующих класс MIMD, делает классификацию Флинна не полностью адекватной. Действительно, и 4-процессорный SX-5 компании NEC и 1000-процессорный Cray T3E попадают в один и тот же класс. Это заставляет искать другие основания для классификации суперкомпьютеров.

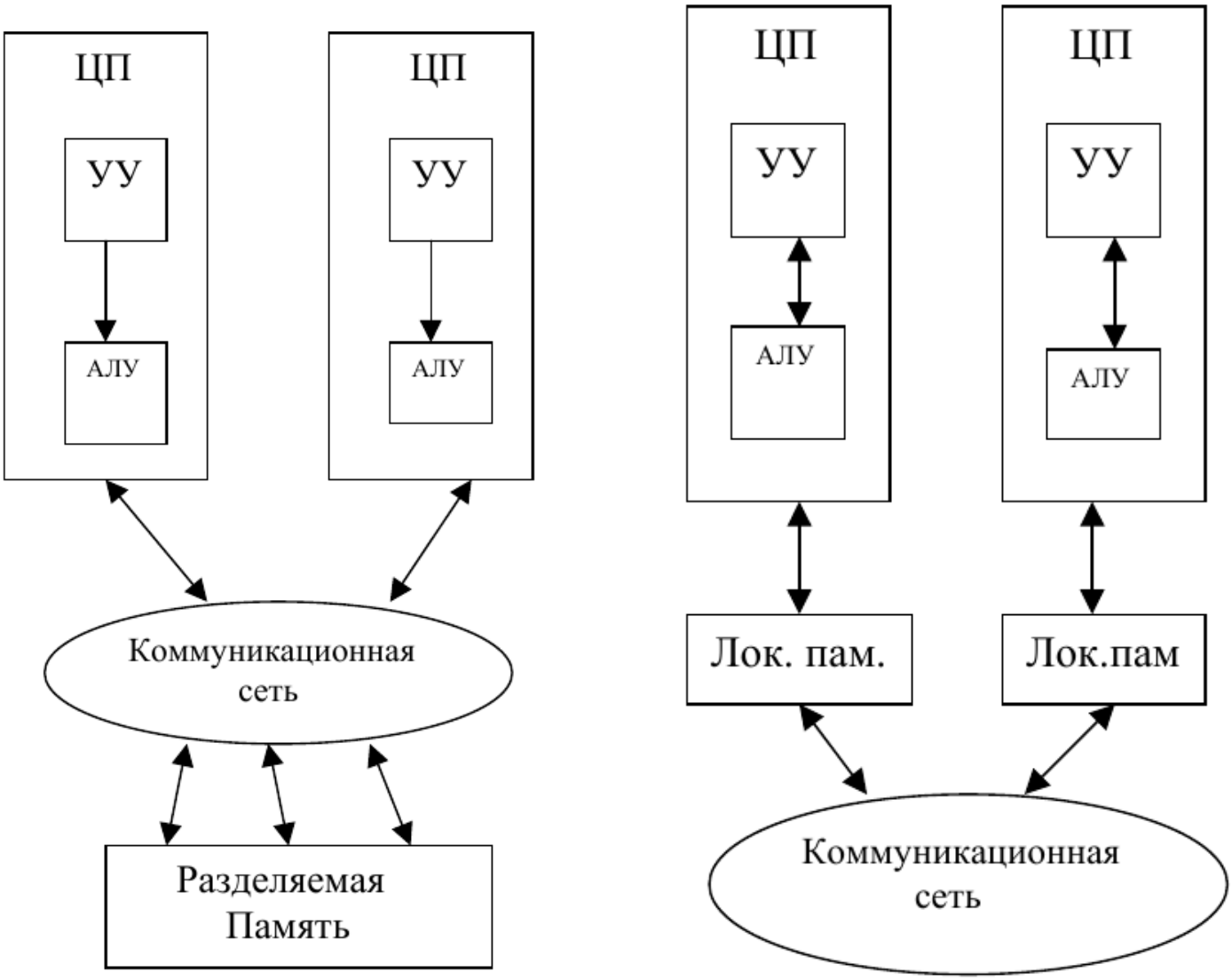


Рис. 22: MIMD-компьютеры с разделяемой и распределённой памятью

6 Контрольные вопросы и задания

1. Сколько всего возможно двухвходовых логических вентилей? Что такое штрих Шеффера и стрелка Пирса? Расширьте таблицу истинности 2, добавив в неё информацию о всех возможных двухвходовых гейтах.

2. Составьте таблицу истинности RS-триггера. Какие ещё бывают триггеры?

3. Известны ли вам примеры цифровых компьютеров, построенных на небинарной логике? Каковы их преимущества и недостатки?

4. Что такое квантовый компьютер? Являются ли кубиты (qubit) элементами, реализующими небинарную логику? Что вы знаете о кудитах (qudit)?