

# Архитектура ЭВМ

Лектор: к.т.н., доцент, Попов Алексей Юрьевич

## **Цель дисциплины:**

•получить знания и навыки, необходимые для проектирования и эффективного использования современных аппаратных вычислительных средств.

## **Задачами дисциплины является изучение:**

- принципов организации ЭВМ;
- методики проектирования ЭВМ и устройств, их составляющих.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника: Учеб. Пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 800 с.: ил.
2. Цилькер Б.Я., Орлов С.А. Организация ЭВМ и систем: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2004. – 668 с.: ил.
3. Каган Б.М. Электронные вычислительные машины и системы. - М.: Энергоатомиздат, 1991.

# План проведения теоретических и практических занятий:

Семестр	Теоретические занятия	Лабораторные работы	Вид отчетности
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Вводная часть</li> <li>• Арифметические основы ЭВМ</li> <li>• Логические основы ЦВТ</li> <li>• Элементы и узлы ЭВМ</li> <li>• Организация памяти ЭВМ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Исследование работы триггеров</li> <li>• Исследование работы регистров</li> <li>• Исследование работы счетчиков.</li> <li>• Исследование работы мультиплексоров.</li> </ul>	зачет
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Принципы построения и архитектура ЭВМ</li> <li>• Процессорные устройства</li> <li>• Организация ввода вывода</li> <li>• Вычислительные системы</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Разработка радиоэлектронной аппаратуры на основе микроконтроллеров ARM7 TDMI</li> <li>• Синхронизация микроконтроллеров ARM7 TDMI и управление таймерами</li> <li>• Система прерываний микроконтроллера и управление интерфейсом RS232.</li> <li>• Организация памяти конвейерных суперскалярных электронных вычислительных машин</li> <li>• Практикум: Проектирование систем на кристалле на основе ПЛИС</li> </ul>	зачет

# I. Введение

## История развития вычислительной техники.

Механические вычислительные устройства.

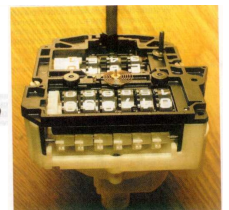
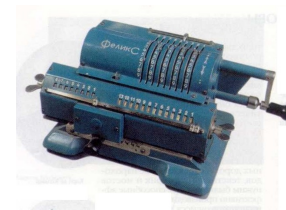
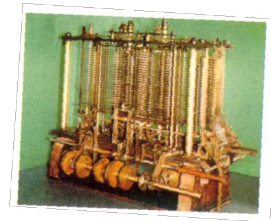
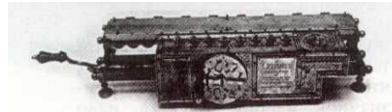
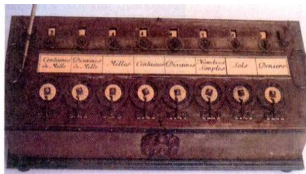
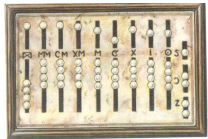
Абак

Машина  
Паскаля

Машина  
Лейбница

Машина  
Бэбиджа

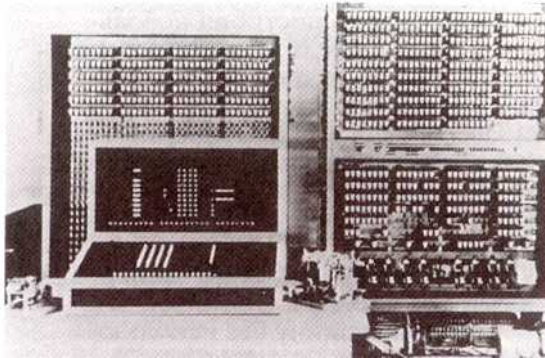
Современные  
механические машины



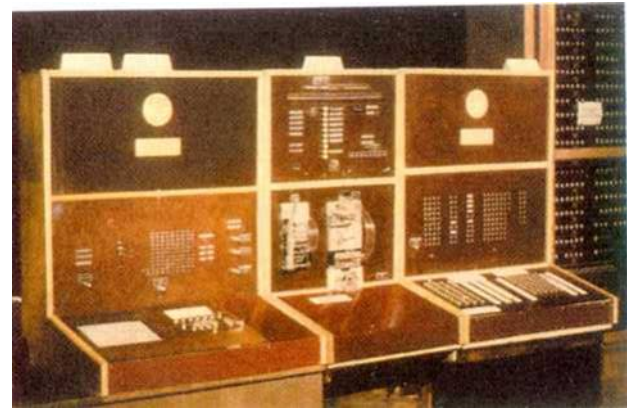
# Электромеханические счетные машины

## Машины Конрада Цузе (Z1, Z2, Z3, Z4)

- Z1 – полностью механическая машина (1936);
- Z2 – использование реле в арифметическом устройстве (1939);
- Z3 и Z4 – электромеханические машины с механической памятью (1941 и 1945).



Машина Z3

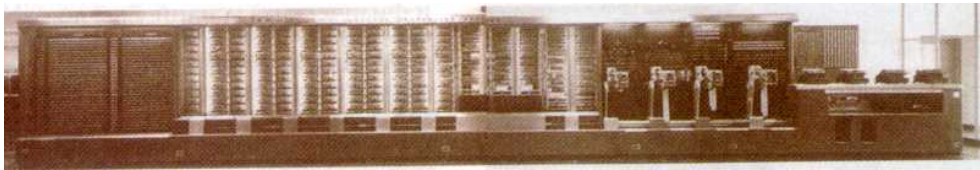


Машина Z4

# Поколения электронных вычислительных машин

## Первое поколение ЭВМ (с конца 30-х до середины 50-х)

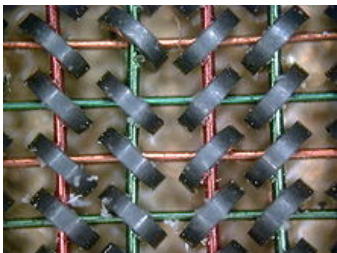
Поколение ЭВМ	Элементная база	Тип основного запоминающего устройства	Представители классов ЭВМ	Языки программирования	Программное обеспечение	Средства связи с пользователем
I (с конца 30-х до середины 50-х)	Электро-магнитные реле; электронные лампы	Линии задержки на электронные лучевых трубках, Ферритовые сердечники ( $\sim 2^{12}$ - $2^{16}$ )	Калькуляторы (ABC, ENIAC), Большие ЭВМ (MARK I, EDVAC, UNIVAC, БЭСМ, МЭСМ, Стрела, Минск, IAS)	Ручная коммутация, Машинные коды	Ассемблер	Индикаторы, Пульт управления, Перфокарты



ЭВМ MARK I



ЭВМ ENIAC



Ферритовые сердечники



## Второе поколение ЭВМ (с середины 50-х до середины 60-х)

Поколение ЭВМ	Элементная база	Тип основного запоминающего устройства	Представители классов ЭВМ	Языки программирования	Программное обеспечение	Средства связи с пользователем
II (с середины 50-х до середины 60-х)	Транзисторы	Ферритовые сердечники (до $2^{19}$ )	Малые и средние ЭВМ (БЭСМ-4, Урал-14, Минск-2, Днепр), Большие ЭВМ (TRADAC, IBM 7030, IBM 7090, TX-O, БЭСМ-2,3)	Фортран, Алгол, Кобол	Компиляторы, автоматизированные системы управления, диспетчеры	Индикаторы, Пульт управления, Перфокарты, Перфоленты

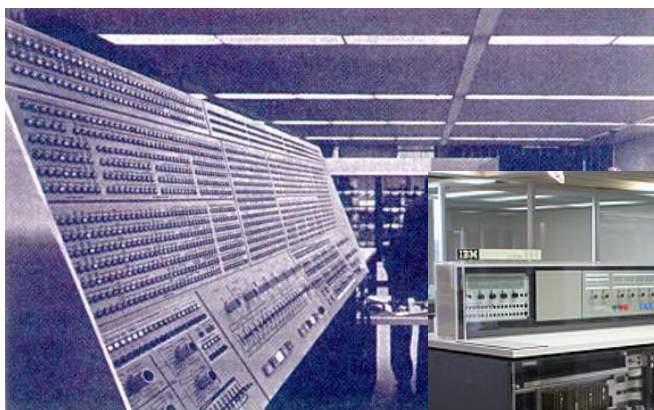
ЭВМ БЭСМ-4





## Третье поколение ЭВМ (с середины 60-х до середины 70-х)

Поколение ЭВМ	Элементная база	Тип основного запоминающего устройства	Представители классов ЭВМ	Языки программирования	Программное обеспечение	Средства связи с пользователем
III (с середины 60-х до середины 70-х)	Интегральные схемы малой и средней степени интеграции	Полупроводниковые ЗУ на интегральных схемах (до $2^{25}$ )	Мини и микро-ЭВМ (Мир-1, М220), Средние и большие универсальные ЭВМ (ILLIAC IV, CDC6600, CDC7600, IBM 360, ЕС ЭВМ, СМ ЭВМ, БЭСМ-6)	Фортран, Алгол, В, С	ОС (UNIX, IBM), СУБД, САПР, Пакеты прикладных программ	Алфавитно-цифровые дисплеи



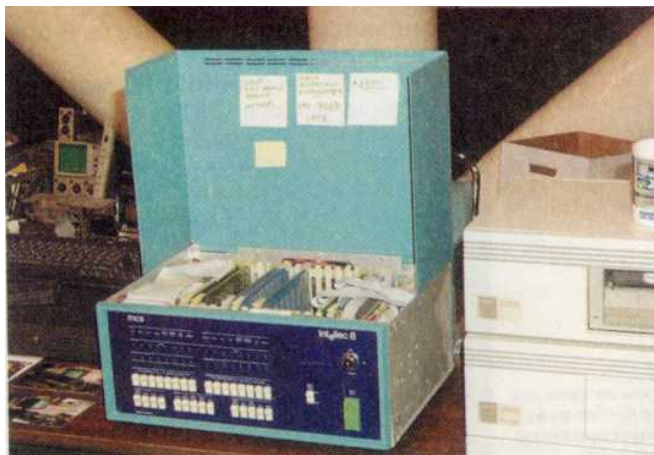
IBM 360



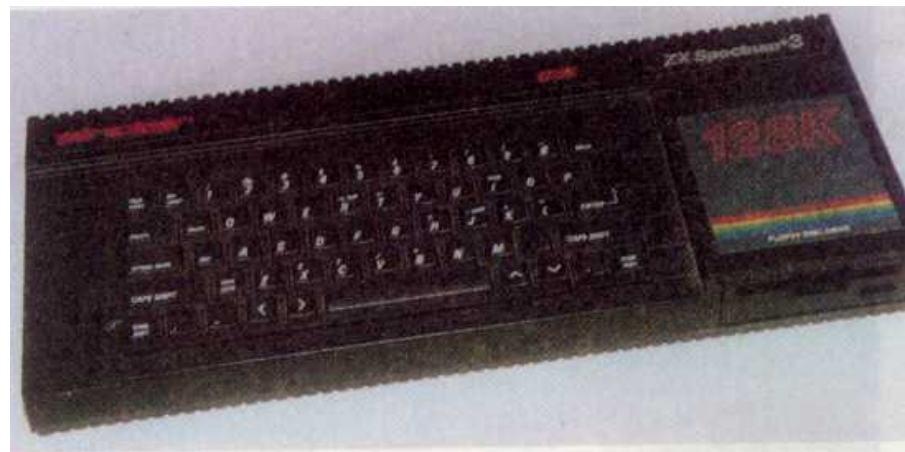
ЭВМ БЭСМ-6

## Четвертое поколение ЭВМ (с середины 70-х до середины 80-х)

Поколение ЭВМ	Элементная база	Тип основного запоминающего устройства	Представители классов ЭВМ	Языки программирования	Программное обеспечение	Средства связи с пользователем
IV (с середины 70-х до середины 80-х)	Интегральные схемы большой и сверхбольшой степени интеграции	Полупроводниковые ЗУ на сверх больших интегральных схемах (до $2^{28}$ )	Персональные компьютеры (Intellec8, IBM PC/XT/AT, Sinclair Spectrum), Средние и Большие ЭВМ (Cray, Эльбрус-1,2,3)	Пролог, Фортран, С, Паскаль	Графические ОС, Среды визуальной разработки, САПР, Системы программирования, Игры	Графические дисплеи, клавиатура, мышь



Intellec8 (Intel 8080)



Sinclair Spectrum



## Пятое поколение ЭВМ (с середины 80-х)

Поколение ЭВМ	Элементная база	Тип основного запоминающего устройства	Представители классов ЭВМ	Языки программирования	Программное обеспечение	Средства связи с пользователем
V (с середины 80-х)	Интегральные схемы сверхбольшой степени интеграции	Полупроводниковые ЗУ на сверх больших интегральных схемах (до $\sim 2^{32}$ )	ПК на универсальных конвейерных МП (IA 32, PowerPC), Средние большие ЭВМ с массовым параллелизмом (серия IBM Mainframes, Cray, HP, DEC)	Языки с ООП, Языки параллельного программирования (MPI), Специализированные языки (VHDL, Perl, PHP, SQL и т.д.)	Мультимедиа, WWW	Графические дисплеи, клавиатура, мышь, звук

# Классификация ЭВМ

## Классификация ЭВМ по назначению:

### **Общего назначения**

- Супер ЭВМ
- Минисупер ЭВМ
- Мэйнфреймы
- Серверы
- Рабочие станции
- Персональные компьютеры
- Ноутбуки
- Портативные компьютеры
- ...

### **Специализированные**

...

## Классификация ЭВМ по структуре:

- Однопроцессорные
- Многопроцессорные

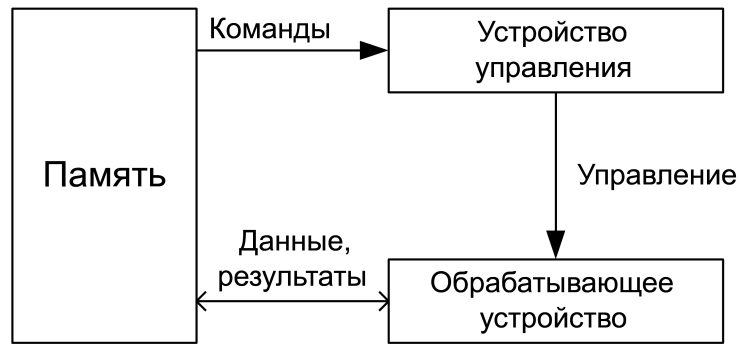
## Классификация ЭВМ по режимам работы:

- Однопрограммные
- Мультипрограммные
- Мультипрограммные в составе систем
- ЭВМ в системах реального времени

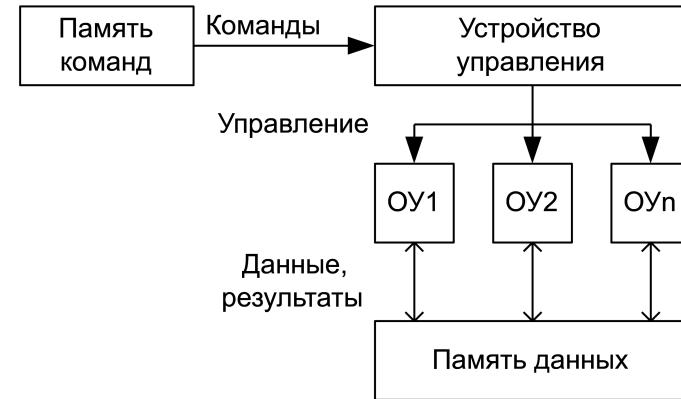
## Классификация ЭВМ по количеству потоков команд и данных:

- ЭВМ с одним потоком команд и одним потоком данных (ОКОД, SISD);
- ЭВМ с одним потоком команд и многими потоками данных (ОКМД, SIMD);
- ЭВМ с многими потоками команд и одним потоком данных (МКОД, MISD);
- ЭВМ с многими потоками команд и многими потоками данных (МКМД, MIMD).

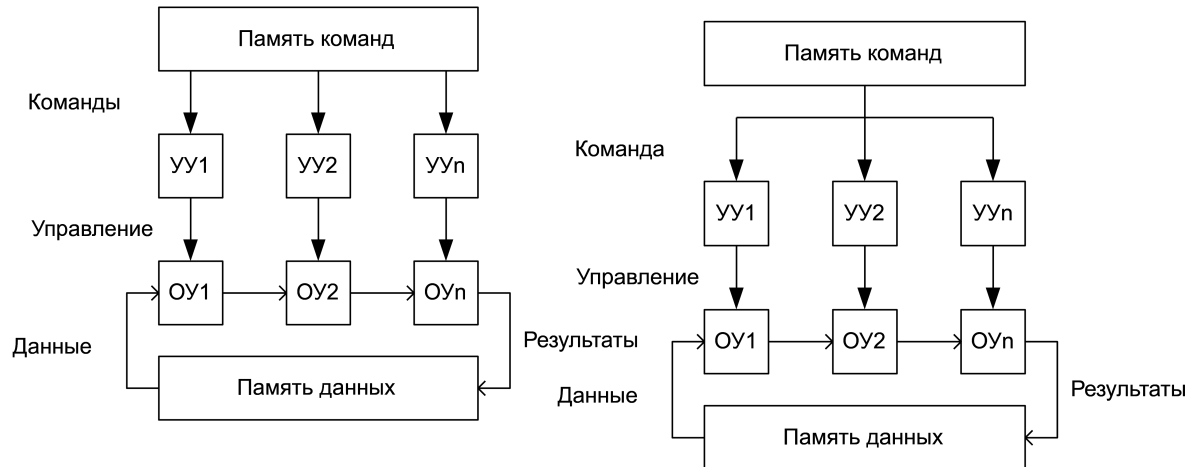
## ОКОД, SISD



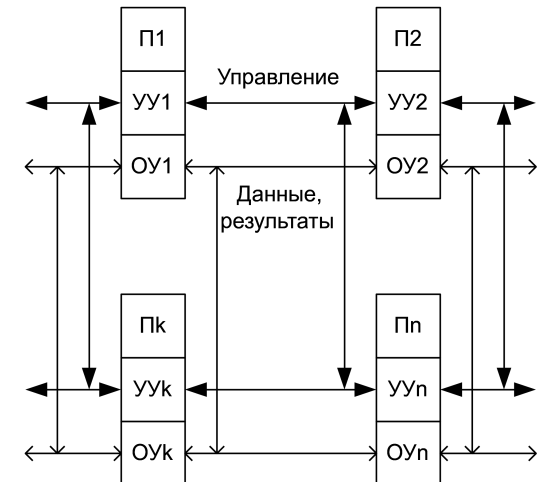
## ОКМД, SIMD



## МКОД, MISD



## МКМД, MIMD



# Основные характеристики ЭВМ

- Эффективность
- Производительность
- Надежность
- Стоимость
- Энергопотребление

## Общий коэффициент эффективности

$$\mathcal{E} := \frac{P}{C_{\text{ЭВМ}} + C_{\text{эксплуатации}}}$$

$$\mathcal{E}' := \frac{P}{C_{\text{ЭВМ}}}$$

$$\mathcal{E} := \frac{P \cdot K_{\text{и}}}{C_{\text{ЭВМ}} + C_{\text{эксплуатации}}}$$

$\mathcal{E}$  - Общий коэффициент эффективности  
 $P$  - Производительность,  
 $C_{\text{ЭВМ}}$  - Стоимость ЭВМ,  
 $C_{\text{эксплуатации}}$  - Стоимость эксплуатации

$$C_{\text{ЭВМ}} \gg C_{\text{эксплуатации}}$$

$\mathcal{E}'$  - Эффективность без учета эксплуатационных издержек.  
 $\mathcal{E}_{\text{и}}$  - Эффективность с учетом эксплуатационной надежности.

# Производительность ЭВМ

$$P := \frac{\sum_{s=1}^n K_s}{\sum_{s=1}^n K_s \cdot t_s}$$

$K_s$

- Весовой коэффициент задачи S ,

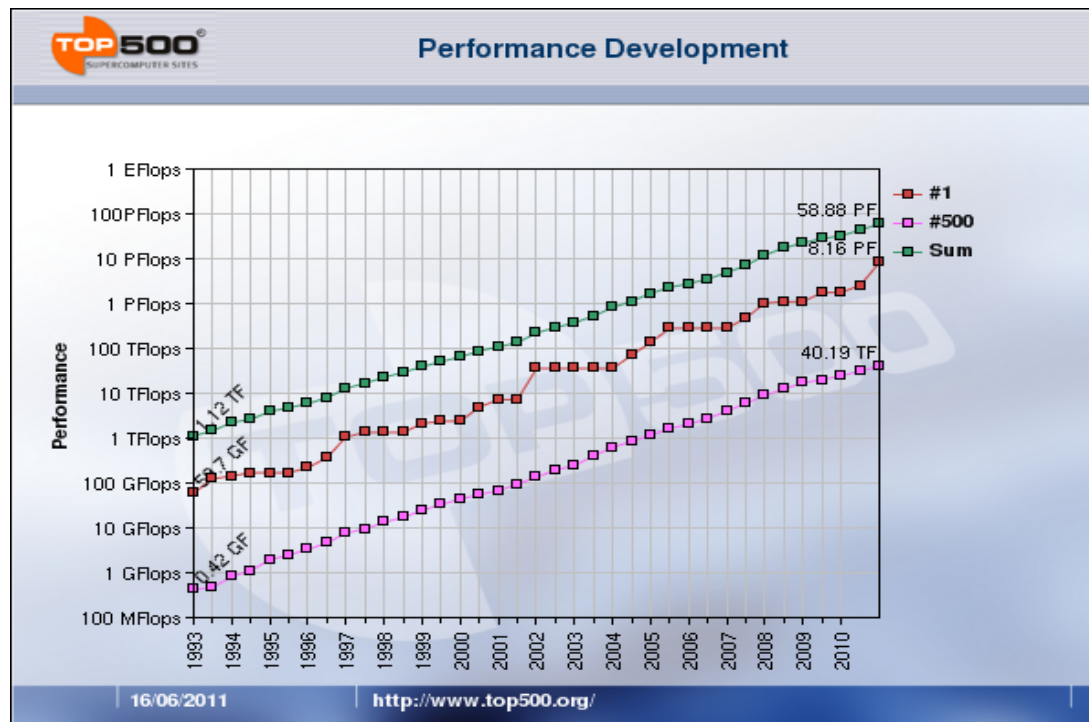
$t_s$

- Время выполнения задачи S .

Единицы измерения производительности:

MIPs =  $10^6$  целочисленных операций в секунду.

MFlops =  $10^6$  операций с плавающей запятой в секунду.

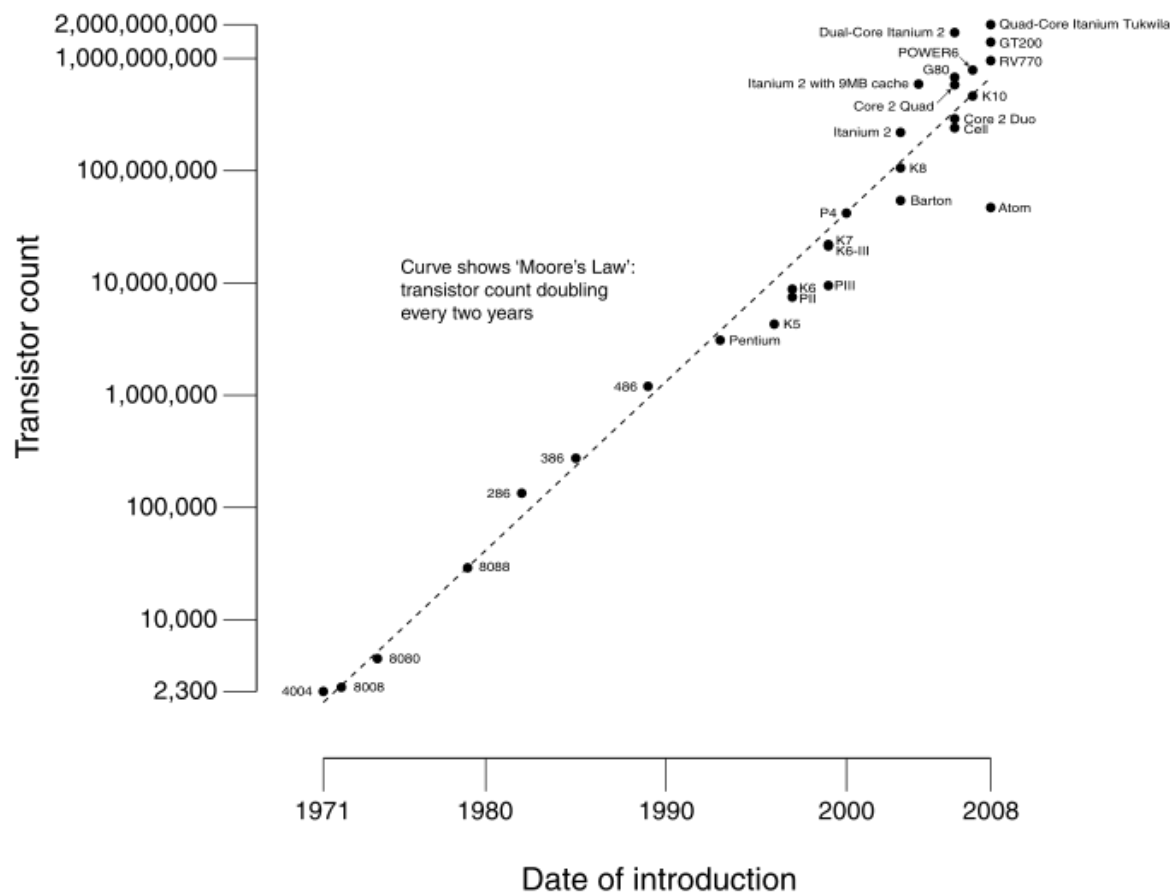




# Закон Мура

Число транзисторов на кристалле будет удваиваться каждые 24 месяца

CPU Transistor Counts 1971-2008 & Moore's Law



# Список наиболее производительных ЭВМ (11.2013)

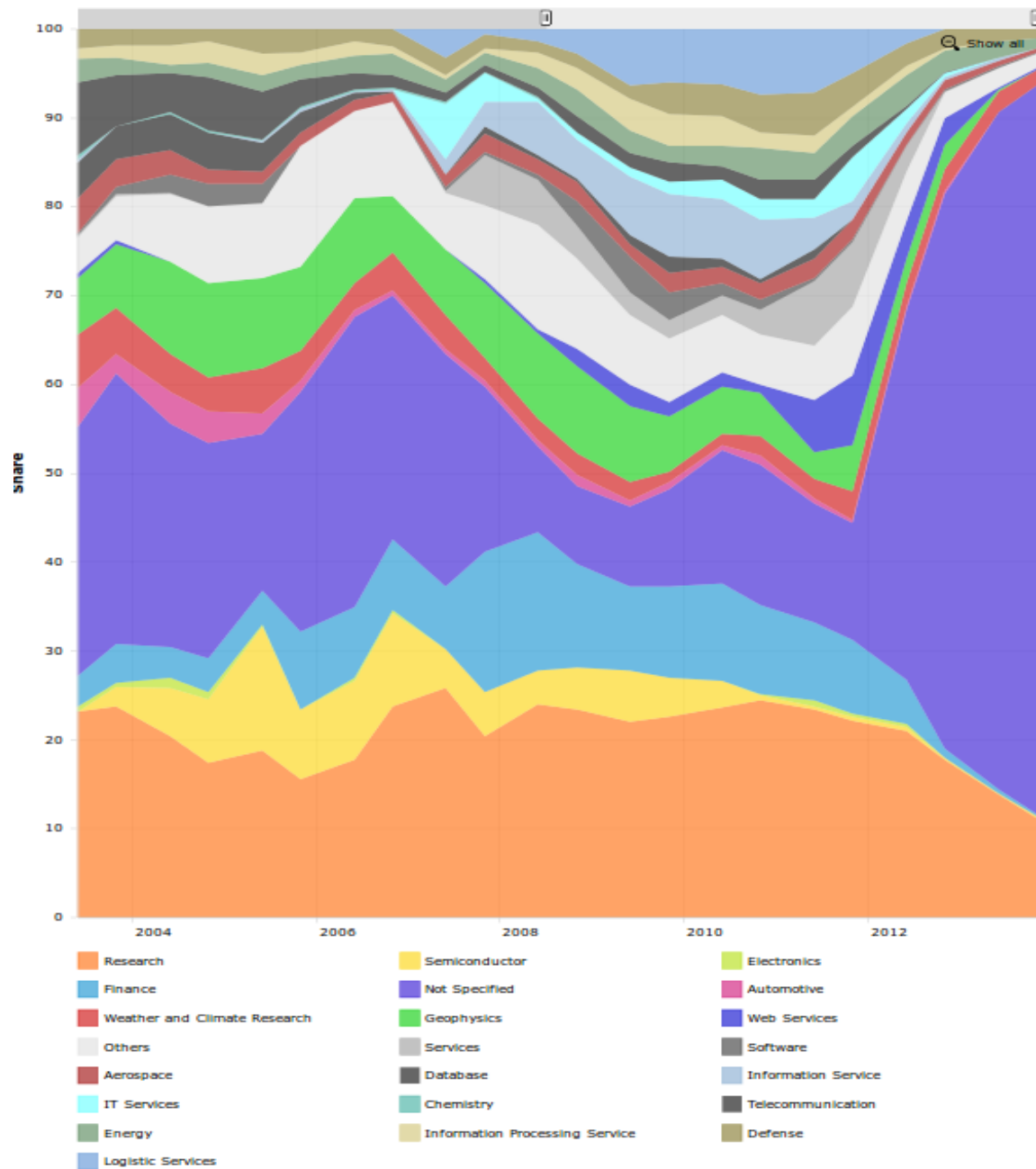
Параметры: Количество процессоров; Максимальная производительность Rmax (TFlops);  
Пиковая производительность Rpeak (TFlops); Рассеиваемая мощность (KW).

Rank	Site	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	National Super Computer Center in Guangzhou China	<b>Tianhe-2 (MilkyWay-2)</b> - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692 12C 2.200GHz, TH Express-2, Intel Xeon Phi 31S1P NUDT	3,120,000	33,862.7	54,902.4	17,808
2	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	<b>Titan</b> - Cray XK7 , Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x Cray Inc.	560,640	17,590.0	27,112.5	8,209
3	DOE/NNSA/LLNL United States	<b>Sequoia</b> - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom IBM	1,572,864	17,173.2	20,132.7	7,890
4	RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) Japan	<b>K computer</b> , SPARC64 VIIIfx 2.0GHz, Tofu interconnect Fujitsu	705,024	10,510.0	11,280.4	12,659.9
5	DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	<b>Mira</b> - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60GHz, Custom IBM	786,432	8,586.6	10,066.3	3,945
6	Swiss National Supercomputing Centre (CSCS) Switzerland	<b>Piz Daint</b> - Cray XC30, Xeon E5-2670 8C 2.600GHz, Aries interconnect , NVIDIA K20x Cray Inc.	115,984	6,271.0	7,788.9	2,325
7	Texas Advanced Computing Center/Univ. of Texas United States	<b>Stampede</b> - PowerEdge C8220, Xeon E5-2680 8C 2.700GHz, Infiniband FDR, Intel Xeon Phi SE10P Dell	462,462	5,168.1	8,520.1	4,510
8	Forschungszentrum Juelich (FZJ) Germany	<b>JUQUEEN</b> - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.600GHz, Custom Interconnect IBM	458,752	5,008.9	5,872.0	2,301
9	DOE/NNSA/LLNL United States	<b>Vulcan</b> - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.600GHz, Custom Interconnect IBM	393,216	4,293.3	5,033.2	1,972
10	Leibniz Rechenzentrum Germany	<b>SuperMUC</b> - iDataPlex DX360M4, Xeon E5-2680 8C 2.70GHz, Infiniband FDR IBM	147,456	2,897.0	3,185.1	3,422.7

## Список наиболее производительных ЭВМ (06.2012, продолжение)

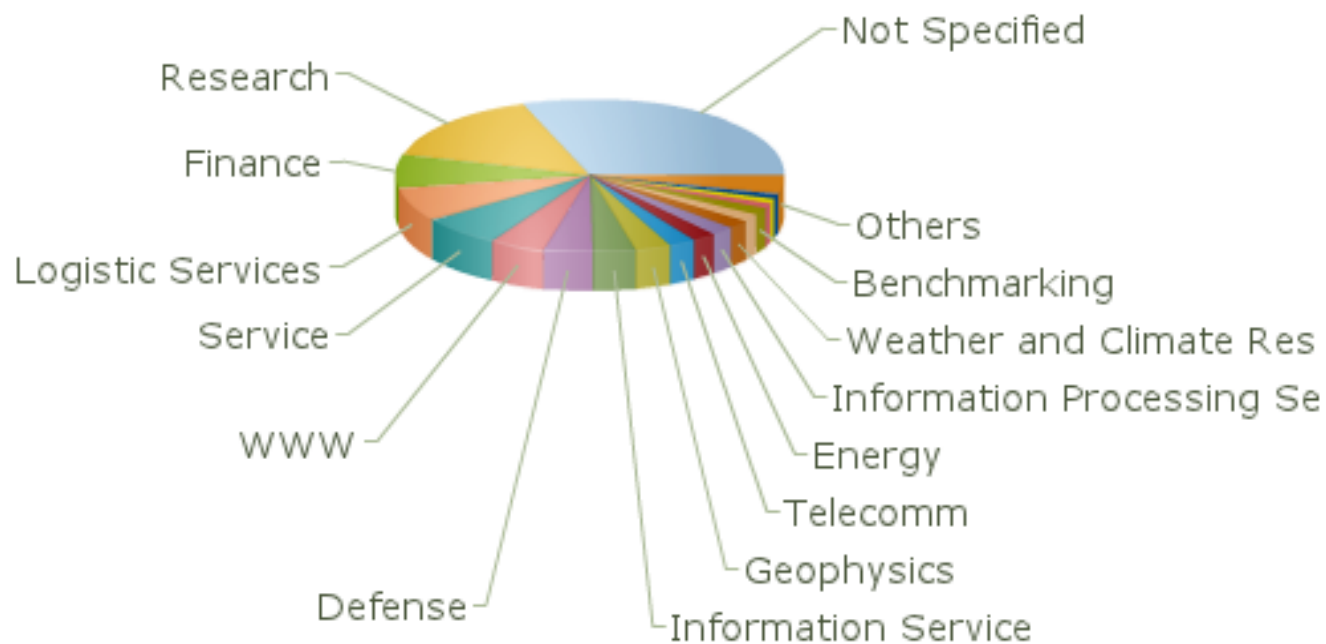
Rank	Site	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
37	Moscow State University - Research Computing Center Russia	<b>Lomonosov</b> - T-Platforms T-Blade2/1.1, Xeon X5570/X5670 /E5630 2.93/2.53 GHz, Nvidia 2070 GPU, PowerXCell 8i Infiniband QDR T-Platforms	78,660	901.9	1,700.2	2,800
84	Joint Supercomputer Center Russia	<b>MVS-10P</b> - RSC Tornado, Xeon E5-2690 8C 2.900GHz, Infiniband FDR, Intel Xeon Phi SE10X RSC Group	28,704	375.7	523.6	222.7
127	South Ural State University Russia	<b>RSC Tornado SUSU</b> - RSC Tornado, Xeon X5680 6C 3.330GHz, Infiniband QDR, Intel Xeon Phi SE10X RSC Group	28,032	288.2	473.6	294
277	IT Services Provider Russia	Cluster Platform 3000 BL460c Gen8, Xeon E5-2660 8C 2.200GHz, Gigabit Ethernet Hewlett-Packard	18,032	160.9	317.4	
487	Joint Supercomputer Center Russia	<b>MVS-100K</b> - Cluster Platform 3000 BL460c/BL 2x220/SL390, Xeon E5450/5365/X5675 4C 3.000GHz, Infiniband DDR, NVIDIA 2090 Hewlett-Packard	13,004	119.9	227.9	

# Топ500 статистика



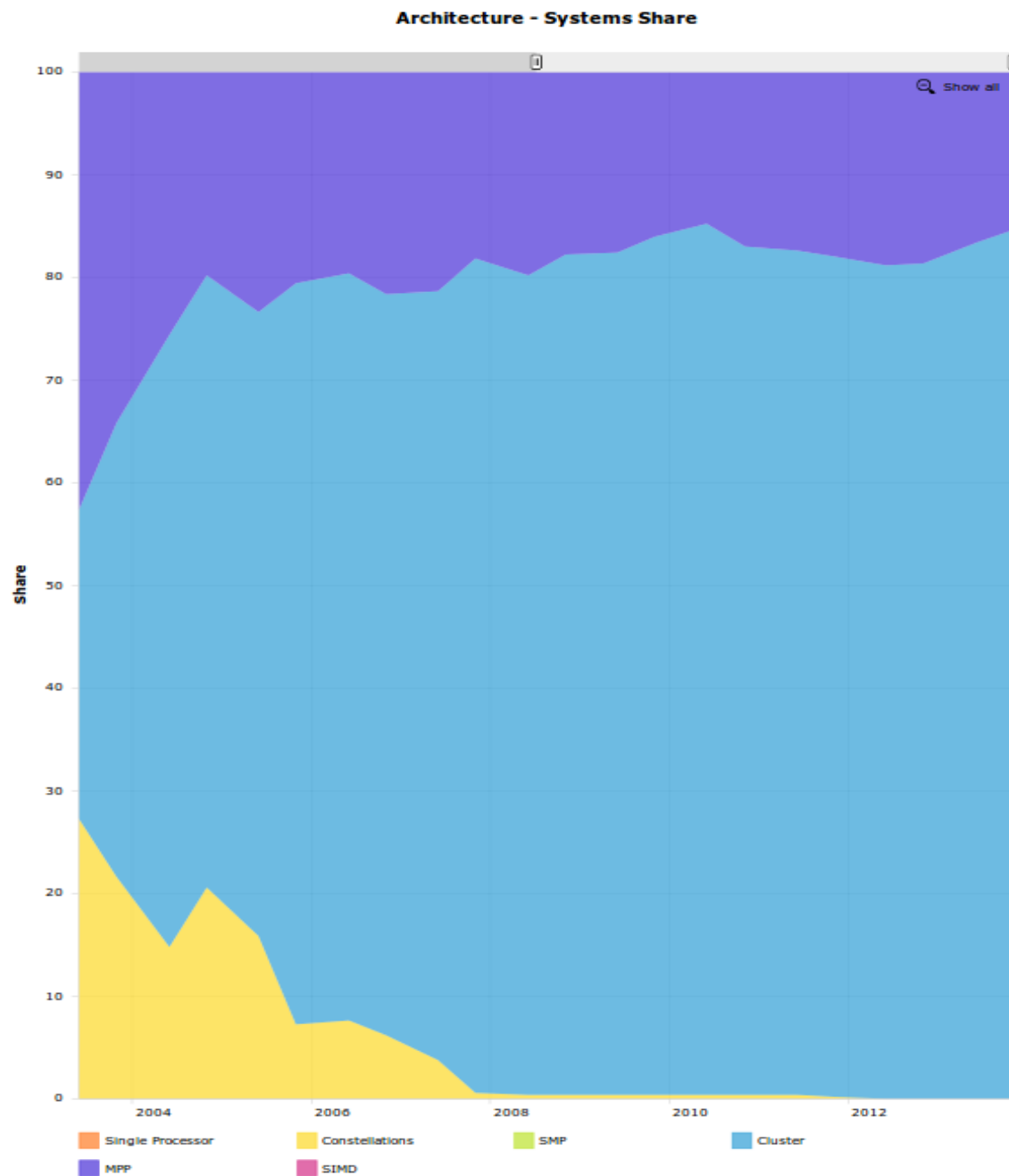
# Top500 статистика

Application Area / Systems  
June 2011



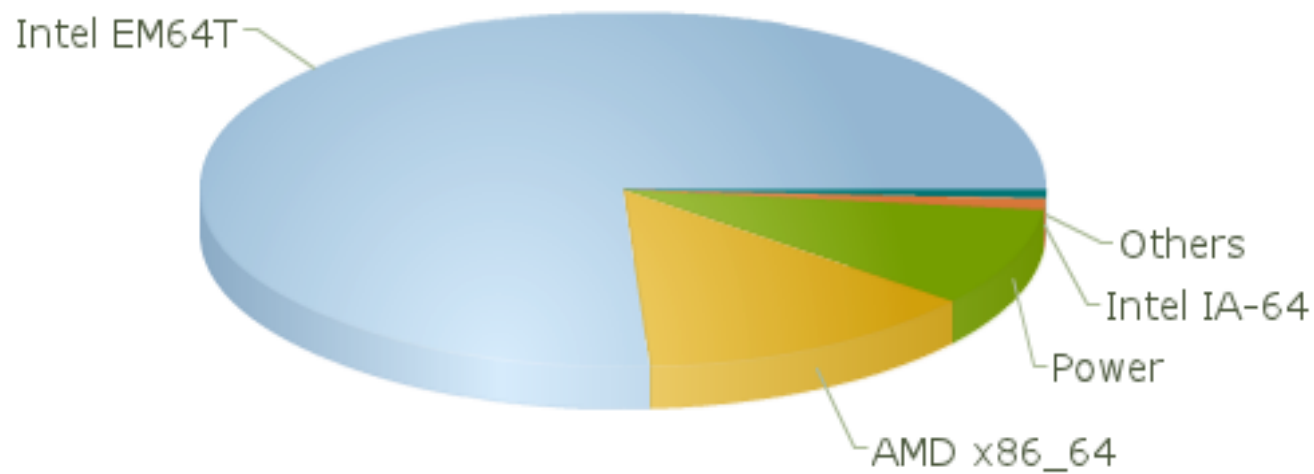


# Top500 статистика



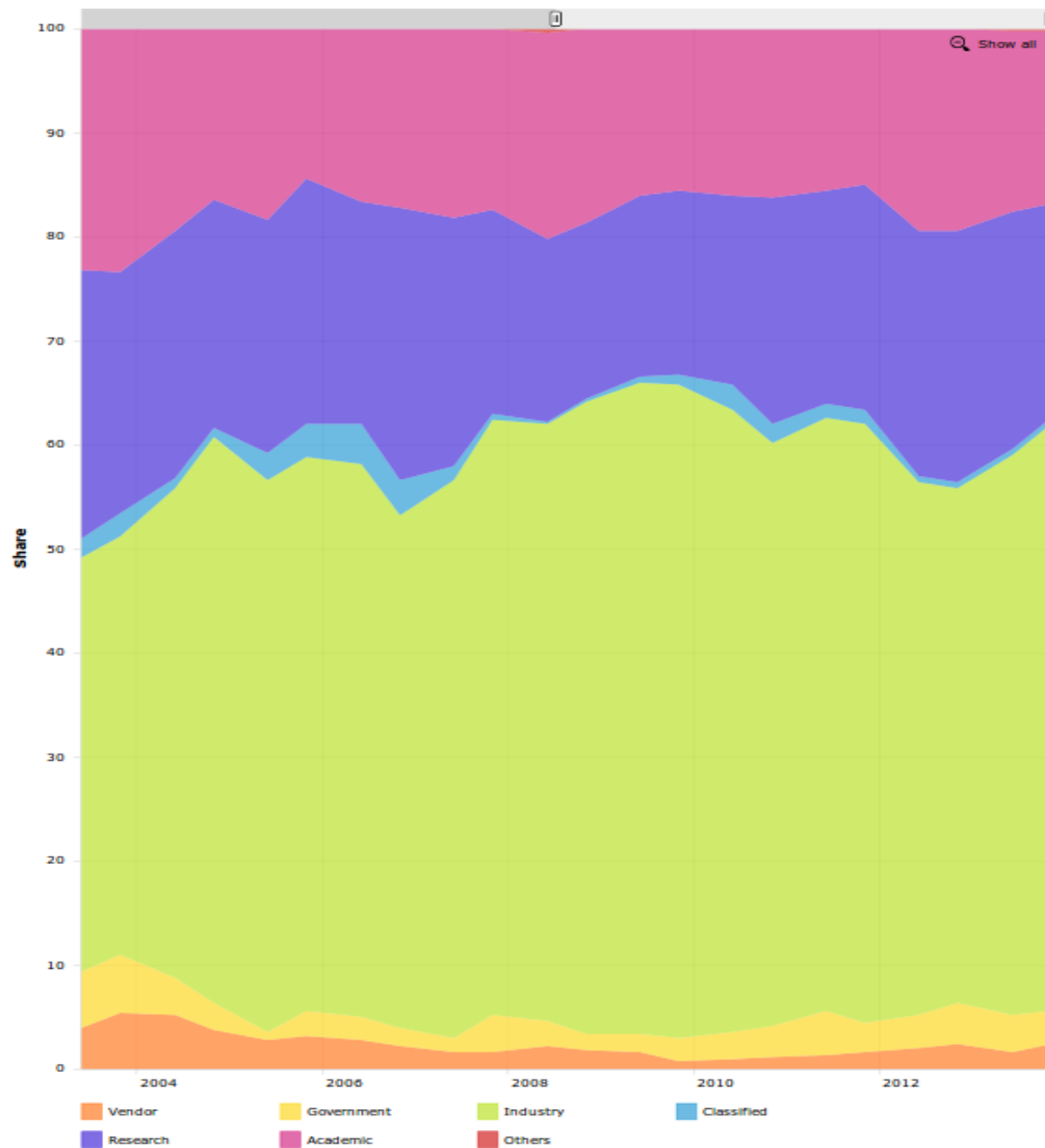
# Top500 статистика

Processor Family / Systems  
June 2011



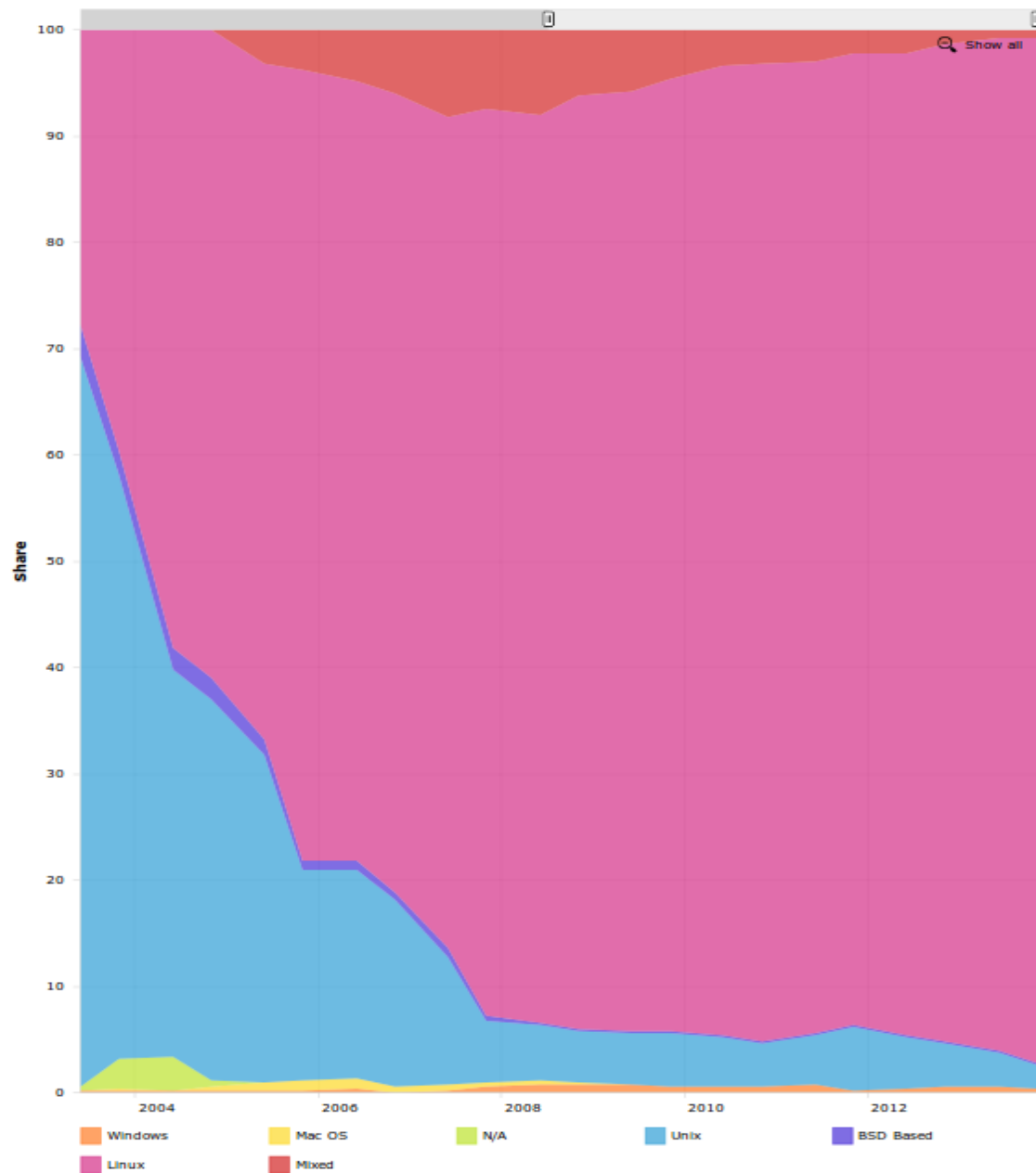
# Top500 статистика

Segments - Systems Share



# Top500 статистика

Operating system Family - Systems Share



## II. Арифметические основы ЭВМ

Системой счисления называется совокупность правил для представления чисел с помощью символов (цифр).

Позиционная система счисления:

$$(\dots a_3 a_2 a_1 a_0 . a_{-1} a_{-2} a_{-3} \dots) = \dots + a_3 b^3 + a_2 b^2 + a_1 b^1 + a_0 + a_{-1} b^{-1} + a_{-2} b^{-2} + a_{-3} b^{-3}$$

Системы счисления, используемые в ЭВМ:

- Двоичная (0,1)
- Десятичная (0,...,9)
- Восьмеричная (0,...,7)
- Шестнадцатиричная (0,...,9,A,B,C,D,E,F)
- Двоично-десятичная (0000,...,1001)
- Шестидесятиричная (0,...,59)
- Троичная (-1,0,1)

Преобразование из двоичной системы счисления в десятичную:

$$1011.01_2 = 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 + 0 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2} = (8 + 2 + 1 + 0.25)_{10} = 11.25_{10}$$

Преобразование из двоичной системы счисления в восьмеричную:

$$10111101_2 = 010 \quad 111 \quad 101 = 275_8$$

Преобразование из двоичной системы счисления в шестнадцатиричную:

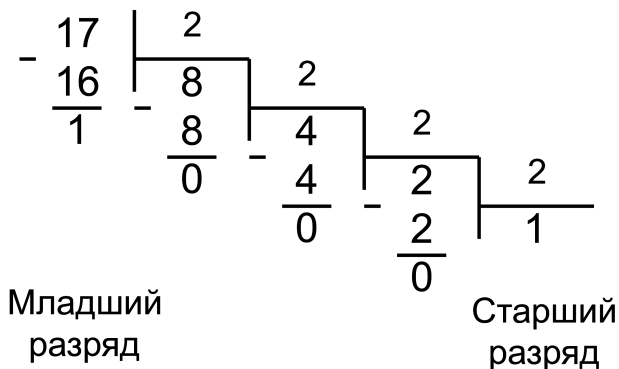
$$10111101_2 = 10 \quad 11 \quad 1101 = BD_{16}$$



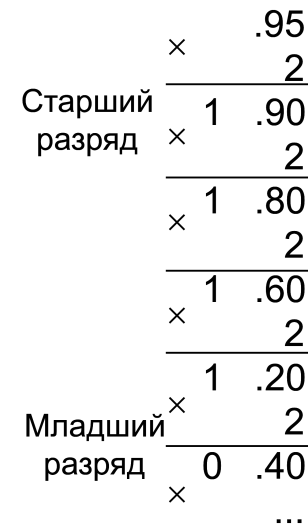
# Преобразование из десятичной системы счисления в двоичную:

Целая часть

$$17,95_{10} = 10001,11110..._2$$



Дробная часть



Двоичная арифметика

$0+0=0$	$0*0=0$
$0+1=1$	$0*1=0$
$1+0=1$	$1*0=0$
$1+1=0$	$1*1=1$

Пример сложения и умножения

$$\begin{array}{r} 10010111 \\ + 10011010 \\ \hline 100110001 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} + 1011 \\ 1101 \\ \hline 1011 \\ 0000 \\ + 1011 \\ 1011 \\ \hline 10001111 \end{array}$$

# Прямой, обратный и дополнительный коды

## Прямой код

$$A - B = A + (-B)$$

$$G_{\text{пр}} = \begin{cases} G, & \text{при } G \geq 0 \\ A + |G|, & \text{при } G < 0 \end{cases}$$

при  $G \geq 0$

при  $G < 0$

$G$  –  $n$ -разрядное число;

$A$  – вес старшего разряда

$A = 2^{n-1}$  для целых и  $A=1$  для дробей

Положительные  
числа

Отрицательные  
числа

$$10_{10} = 01010_2$$

$$0.725_{10} = 0.110_2$$

$$-10_{10} = 11010_2 = 10000 + 01010$$

$$-0.725_{10} = 1.110_2 = 1.000 + 0.110$$

## Обратный код

$$G_{\text{обр}} = \begin{cases} G, & \text{при } G \geq 0 \\ B - |G|, & \text{при } G < 0 \end{cases}$$

при  $G \geq 0$

при  $G < 0$

$G$  –  $n$ -разрядное число;

$B$  – наибольшее число без знака

$B = 2^n - 1$  для целых и  $B = 2 - 2^{-(n-1)}$  для дробей

Положительные  
числа

Отрицательные  
числа

$$10_{10} = 01010_2$$

$$0.725_{10} = 0.110_2$$

$$-10_{10} = 10101_2 = 11111 - 01010$$

$$-0.725_{10} = 1.001_2 = 1.111 - 0.110$$

## Дополнительный код

$$G_{\text{доп}} = \begin{cases} G, & \text{при } G \geq 0 \\ C - |G|, & \text{при } G < 0 \end{cases}$$

$G$  –  $n$ -разрядное число;  
 $C$  – наибольшее число без знака + 1  
 $C = 2^n$  для целых и  $C=2$  для дробей

Положительные  
числа

$$10_{10} = 01010_2$$

$$0.725_{10} = 0.110_2$$

Отрицательные  
числа

$$-10_{10} = 10110_2 = 100000 - 01010$$

$$-0.725_{10} = 1.010_2 = 10.000 - 0.110$$

Переполнение при сложении чисел в дополнительном коде определяется, если перенос в знаковый разряд не вызывает перенос из знакового разряда, и перенос из знакового разряда не вызван переносом в знаковый

$$\begin{array}{r} 00,1111 \\ + 00,0001 \\ \hline 01,0000 \end{array}$$

Переполнение

$$\begin{array}{r} 01,0010 \\ + 01,1100 \\ \hline 10,1110 \end{array}$$

Переполнение

$$\begin{array}{r} 01,1111 \\ + 00,0001 \\ \hline 10,0000 \end{array}$$

Нет переполнения

- Числа в ЭВМ:

Числа с фиксированной запятой (позиция разделителя дробной и целой части заранее определена)

Числа с плавающей запятой (позиция разделителя определяется с помощью порядка числа)

Числа с плавающей запятой:

Пример:

$$X = S^P \cdot q$$

q – мантисса числа X;

P – порядок числа

S – основание характеристики  
(для двоичной системы S=2);

$S^P$  - характеристика

$$\begin{aligned} 0,0110000_2 * 10^{011}_2 &= 0,375 * 2^3_{10} = \\ &= 0.0011000_2 * 10^{100}_2 = 0.1100000_2 * 10^{010}_2 = 0. \\ &75 * 2^2_{10} \end{aligned}$$

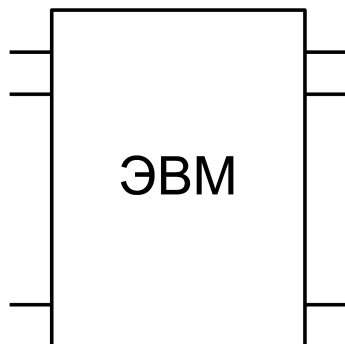
Для представления порядка используется смещенный код, в котором знаковый разряд инвертирован. Это позволяет легко сравнивать порядки чисел

- Сравнение чисел с Ф.З и с П.З.:

У Ч.П.З. Большой диапазон представления

Арифметика над Ч.П.З. более сложная

# III. Логические основы цифровой вычислительной техники



Любую ЭВМ можно рассматривать как сложное устройство, на вход которого подается входная информация в определенной последовательности. При этом на выходе должна формироваться ожидаемая выходная информация

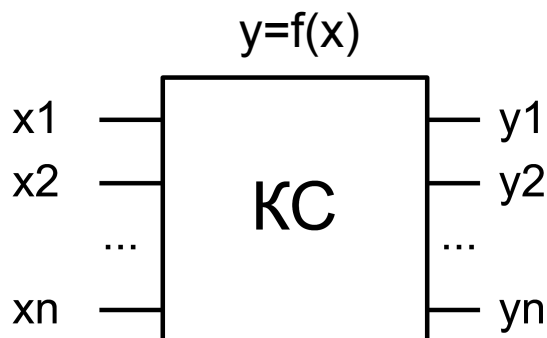
•ЭВМ состоит из взаимодействующих устройств, задачей которых является преобразование входной информации в выходную.

Такие устройства бывают двух типов:

Комбинационные схемы

Цифровые автоматы

Комбинационные схемы



Цифровые автоматы

Цифровые автоматы представляют собой комбинационные схемы и устройства хранения (память).

Работа цифровых автоматов происходит в соответствии с частотой поступления входного слова. Для того, чтобы сигналы поступали одновременно, срабатывание ЦА происходит по синхросигналу



# Цифровые автоматы

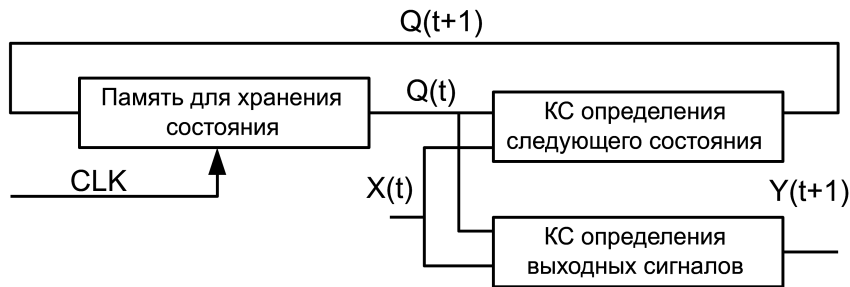
Для задания ЦА необходимо определить:

- Входной алфавит: множество значений  $x(t)$ .
- Выходной алфавит: множество значений  $y(t)$ .
- Алфавит состояний:  $Q$ .
- Начальное состояния  $Q_0$ .
- Функция переходов  $A(Q, x)$ .
- Функция выходов  $B(Q, x)$ .

## Автомат Мили

$$\begin{cases} Q(t+1) = A(Q(t), x(t)). \\ Y(t+1) = B(Q(t), x(t)). \end{cases}$$

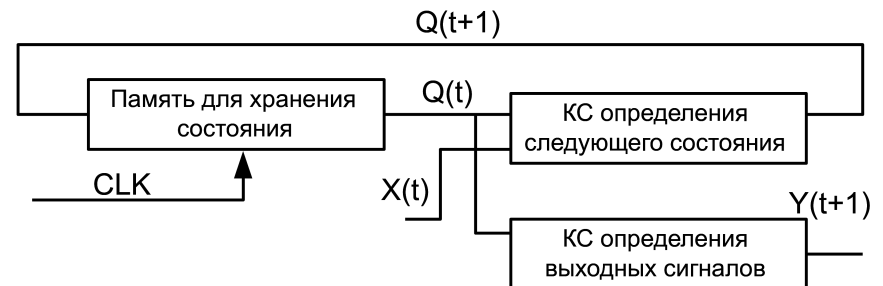
Схема автомата Мили



## Автомат Мура

$$\begin{cases} Q(t+1) = A(Q(t), x(t)). \\ Y(t+1) = B(Q(t)). \end{cases}$$

Схема автомата Мура



## Проектирование комбинационных схем

Проектирование комбинационных схем заключается в определении выходного слова в виде функции алгебры логики от входного слова

Дизъюнктивной (конъюнктивной) нормальной формой называется равносильная ей формула, представляющая собой дизъюнкцию (конъюнкцию) элементарных конъюнкций (дизъюнкций).

N=3

		B		$\bar{B}$
A	0	1	0	0
$\bar{A}$	0	1	0	0
	$\bar{C}$	C	$\bar{C}$	

$Y = ABC + \bar{A}BC = BC$

Любую функцию можно образовать посредством базисных операций: Отрицания, дизъюнкции и конъюнкции.

ДНФ и КНФ не являются самым простым способом задания ФАЛ. Для минимизации нормальных форм применяют карты Карно

N=4

		B		$\bar{B}$	
A	1	0	0	1	$\bar{D}$
	0	1	1	0	D
$\bar{A}$	0	1	1	0	
	1	0	0	1	$\bar{D}$
	$\bar{C}$	C	$\bar{C}$		

$Y = DC + \bar{D}\bar{C}$

## Логические функции

A	0	0	1	1	Обозначение функции	Название функции
B	0	1	0	1		
	0	1	1	1	$A \cup B$	Дизъюнкция
	0	0	0	1	$A \cap B$	Конъюнкция
	1	1	0	0	$\neg A$	Отрицание A
	0	0	1	0	$\neg A \rightarrow B$	Запрет $\neg A \rightarrow B$
	0	1	0	0	$\neg B \rightarrow A$	Запрет $\neg A \rightarrow B$
	0	1	1	0	$A \neg B$	Исключающее ИЛИ
	1	0	0	0	$A \downarrow B$	Стрелка Пирса ИЛИ-НЕ
	1	0	0	1	$A \sim B$	Равнозначность
	1	0	1	1	$B \rightarrow A$	Импликация от B к A
	1	1	0	1	$A \rightarrow B$	Импликация от A к B
	1	1	1	0	$A/B$	Штрих Шеффера И-НЕ