

А.Я. Анопrienко

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

Кафедра компьютерной инженерии

anoprien@gmail.com

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭВОЛЮЦИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

Рассматриваются основные закономерности развития компьютерных систем и сетей, которые более адекватно и всесторонне позволяют отслеживать и прогнозировать эволюцию средств и методов компьютеринга. При этом, учитывая чрезвычайное многообразие различных данных и довольно частую их противоречивость, речь в первую очередь идет о разного рода моделях эволюции, отражающих основные качественные и количественные закономерности эволюции компьютерных систем и сетей с приемлемой и разумной степенью точности.

Компьютерные системы и сети, закономерности развития, закон Мура, иерархия закономерностей

Введение

В условиях интенсивного развития современных компьютерных систем особую актуальность в процессе их проектирования и эксплуатации приобретает необходимость учитывать основные закономерности их эволюции. Однако здесь в настоящее время приходится в основном ограничиваться совсем немногими общепризнанными эмпирически закономерностями, связанными преимущественно с так называемым законом Мура. В то же время накопленные к настоящему времени данные позволяют не только существенно уточнить все, что связано с законом Мура, но и выявить целую систему закономерностей, определяющих развитие средств и методов компьютеринга.

Закон Мура

Гордон Мур, один из основателей корпорации Интел, в 1965 году впервые высказал предположение, что интенсивное развитие цифровой микроэлектроники позволит **ежегодно удваивать** количество активных элементов на кристалле [1]. Однако уже в 1975 году ему пришлось сделать существенное уточнение: в долговременной перспективе **удвоение сложности интегральных схем возможно лишь каждые 2 года** [2], что в дальнейшем, как показывает детальный анализ, полностью подтвердилось (рис. 1, 2).

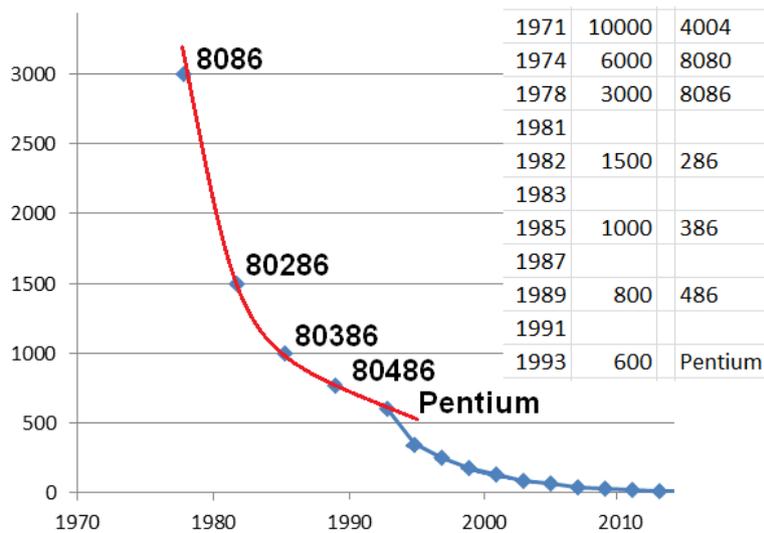


Рисунок 1 – Становление «закона Мура 1975»: уменьшение проектных норм микропроцессоров фирмы Интел в среднем в 1,5 раза каждые 4 года в 1971-1993 гг.

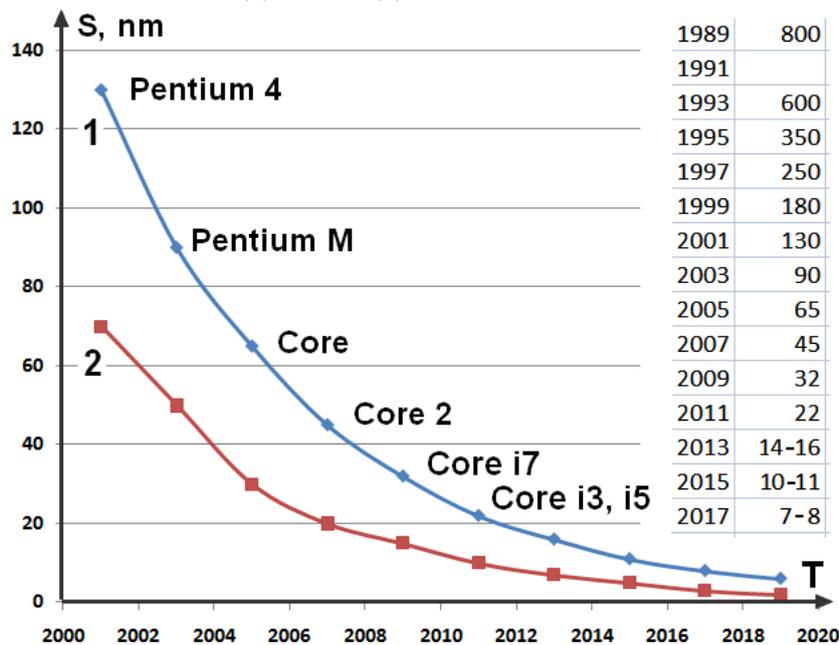


Рисунок 2 – «Закон Мура 1975» в действии: уменьшение проектных норм микропроцессоров фирмы Интел в среднем в 2 раза каждые 4 года (в 1,4 раза каждые 2 года) в 1993-2018 гг. позволяет увеличивать количество активных элементов на той же площади кристалла в 2 раза каждые 2 года, но за счет увеличения размеров микропроцессоров обеспечивалось реальное увеличение количества транзисторов примерно в 2 раза каждые 1,5 года (кривая 1 – серийные микропроцессоры, 2 – экспериментальные образцы).

Соответственно, сегодня можно говорить как минимум о 2-х вариантах закона Мура (словосочетание «закон Мура» используется с 1970 года и сегодня считается общепринятым, но недостаточно

определенным), которые можно обозначить в соответствии с годом их появления как «закон Мура 1965» и «закон Мура 1975». Эти 2 варианта формулировки данного закона фактически определили наиболее оптимистичную и наиболее пессимистичную оценки роста соответственно.

Часто цитируемый интервал в 18 месяцев самим Гордоном Муром не рассматривался и связан с прогнозом его коллеги Давида Хауса, менеджера фирмы Intel, сделавшего в 80-е годы предположение о том, что производительность процессоров должна удваиваться каждые 18 месяцев из-за сочетания роста количества транзисторов и быстродействия каждого из них. В последующем последовали уточнения, что, возможно, реальный период удвоения производительности составляет 20 месяцев. Но **наиболее популярными по-прежнему остаются весьма приближенные оценки удвоения каждые 1-2 или 1,5 года.**

Накопленный к настоящему времени фактический материал позволяет существенно уточнить и обобщить эти оценки.

Выявленная система закономерностей

Одним из наиболее значимых источников для анализа закономерностей роста производительности современных компьютерных систем является на сегодня список 500-т наиболее производительных суперкомпьютеров Top500 – проект, инициированный в 1993 году в университете Манхайма (Германия) и предполагающий публикацию дважды в год рейтинга и статистики по 500-м наиболее производительным суперкомпьютерам по результатам теста Linpack.

По результатам анализа динамики изменений в этом списке и сопоставления ее с данными из других источников ранее уже предпринимались попытки построения более общих моделей развития компьютерных систем [3-6] (рис. 3 и 4). В частности, на рисунке 3 график роста производительности по списку Top500 совмещен и согласован с независимо полученными графиками роста производительности суперкомпьютеров в период с 1961 по 1993 год (по данным работы [7]), что наглядно подтверждает факт формирования наблюдаемых в настоящее время закономерностей роста производительности практически с самого начала истории суперкомпьютерных технологий.

В работе [4] в 2010 году были сформулировано предположение о том, что динамика развития суперкомпьютерных систем во многом определяет динамику развития всех классов компьютеров и на этой основе может быть построена своего рода периодическая система развития компьютерных систем. Первая попытка выделения 9-ти таких классов (существующих и перспективных) представлена

нумерацией в правой части рисунка 3. Но в относительно целостном и системном виде такая классификация впервые сформировалась к 2011 году (рис. 4) [6].

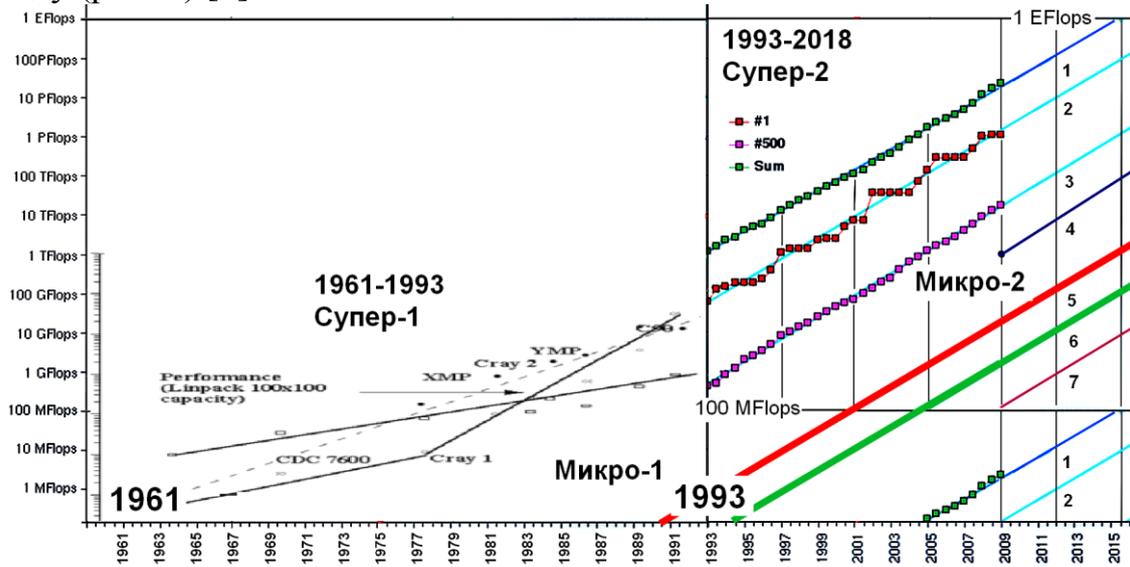


Рисунок 3 – Ноограмма, впервые представленная в работе [4], позволяющая экстраполировать тенденции списка Top500 (после 1993 года блок, условно названный «Супер-2») в прошлое как минимум до 1977 года, когда появился первый суперкомпьютер (Cray 1).

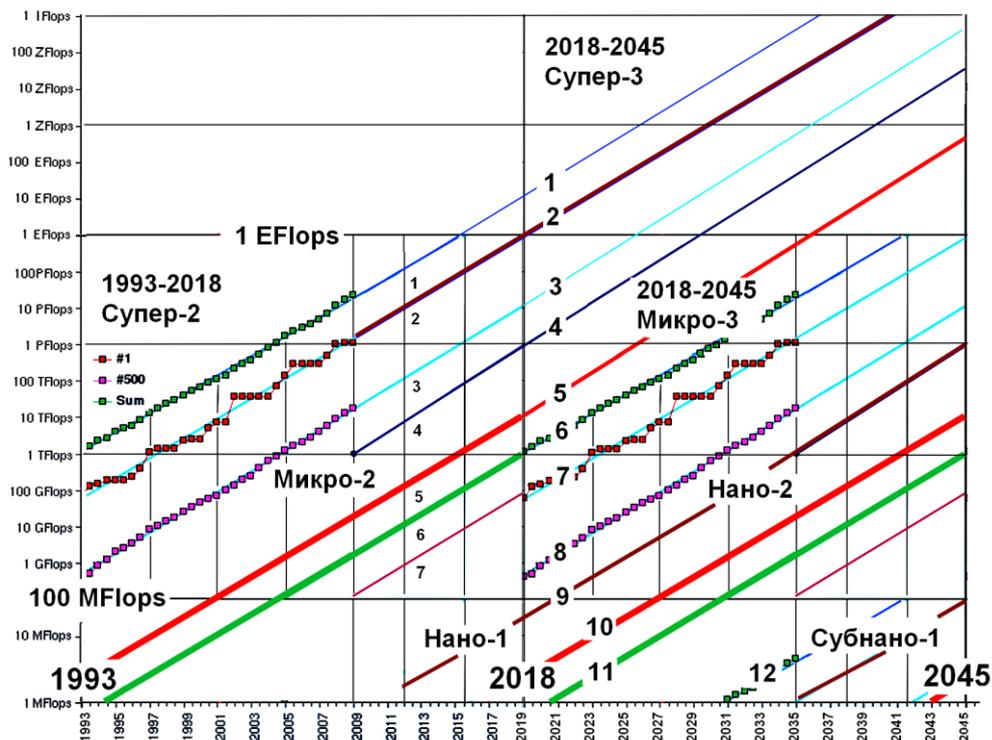


Рисунок 4 – Ноограмма [6], показывающая реальный и прогнозируемый рост производительности различных типов компьютерных систем с экстраполяцией существующих тенденций до 2045 года и прогнозом появления новых классов компьютеров.

На рисунке 4 различные классы компьютерных систем могут быть соотнесены с соответствующими графиками производительности (всего их выделено 12, при этом классы 8-12 являются прогнозируемыми):

1. Суммарная производительность всех суперкомпьютерных систем из списка Top500.
2. Производительность рекордных систем из списка Top500 (1 Ефлопс к 2018-2019 г.).
3. Производительность последней (500-й) системы в списке Top500.
4. Производительность «персональных суперкомпьютеров» на базе графических процессоров (стоимостью порядка 10-20 тыс \$).
5. Производительность «продвинутых» персональных компьютеров стоимостью порядка 1-2 тыс \$ (на 2010 год примерно соответствует производительности микропроцессоров Intel Core 2 Duo).
6. Усредненная производительность персональных компьютеров, находящихся в эксплуатации.
7. Усредненная производительность процессоров компактных мобильных устройств.
8. Суммарная производительность всех нанокompьютерных систем из гипотетического списка будущего NanoTop500 (примерно с 2018 г.).
9. Производительность рекордных систем из гипотетического списка NanoTop500 (100 Мфлопс примерно к 2020 г.).
10. Производительность последней (500-й) наносистемы в гипотетическом списке NanoTop500.
11. Производительность серийных «персональных нанокompьютеров».
12. Появление субнанокompьютеров (2030-е годы).

Как показали последующие исследования, данная идея явилась достаточно продуктивной. Но для ее полной реализации потребовалось существенное уточнение целого ряда параметров.

Наиболее актуальным в этом контексте явилось уточнение коэффициентов роста производительности. Это оказалось особенно важным с учетом того, что этот рост по данным списка Top500 демонстрирует удивительную стабильность на протяжении целого ряда последних десятилетий, что позволяет делать достаточно уверенные прогнозы на ближайшее будущее. В результате анализа выявлено, что существенно более точной оценкой роста производительности являются не традиционные варианты закона Мура, а **гипотеза о 10-кратном росте производительности каждые 4 года**, предполагающая достаточно точную оценку ежегодного

коэффициента роста (ЕКР): **1,77828**. Это примерно соответствует значению $ЕКР = \sqrt{\pi} = 1,7725$ (таблица 1).

Таблица 1 – Закон Мура и реальные коэффициенты роста

Закономерность	Основной период (лет)	Коэффициент роста за основной период	Ежегодный коэффициент роста (ЕКР)
Закон Мура 1965	1	2	2
Закон Мура 1975	2	2	$\sqrt{2} = 1,4$
Современный «закон Мура»	1,5	2	1.5874
В 10 раз за 4 года	4	10	1,77828
В π раз за 2 года	2	π	$\sqrt{\pi} = 1,7725$

На рисунке 5 представлен график фактического и прогнозируемого изменения коэффициентов ежегодного роста производительности рекордных суперкомпьютерных систем, который примерно соответствует динамике изменений и для других классов систем (но в существенно более сглаженном виде).

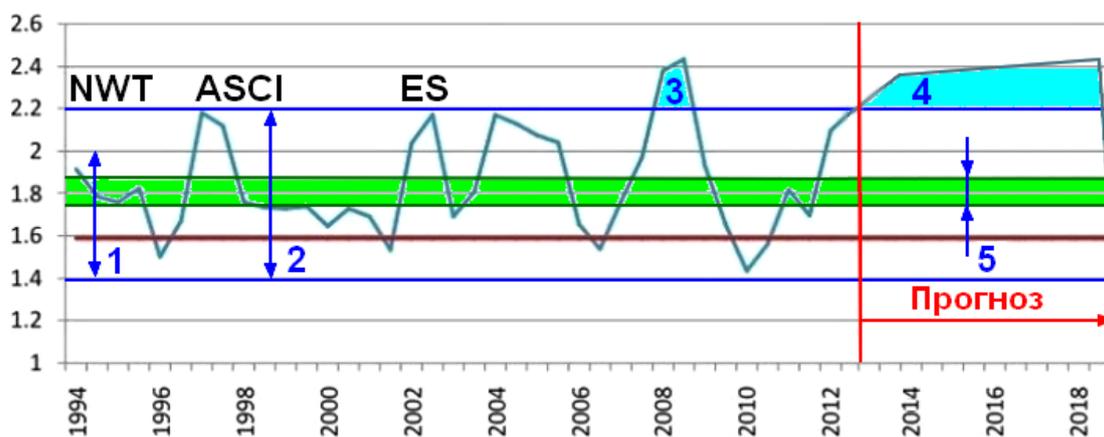


Рисунок 5 – График изменения коэффициентов ежегодного роста производительности рекордных суперкомпьютерных систем (по данным списка Top500).

Цифрами на графике обозначены следующие характерные элементы графика: 1 – диапазон разброса коэффициентов для различных вариантов «закона Мура», 2 – основной диапазон изменения коэффициентов роста рекордных систем, 3 – аномальный всплеск, связанный с «петафлопсной гонкой», 4 – аномально высокие

коэффициенты роста, обусловленные экзафлопсной гонкой (прогноз), 5 – диапазон усредненных коэффициентов роста, нижняя граница которого является наиболее приемлемым значением для построения обобщенных моделей эволюции компьютерных систем. На рисунке 5 представлены также аббревиатуры наиболее известных систем рекордной производительности, связанных с моделированием и стимулировавших в свое время аномальный рост производительности: NWT – Numerical Wind Tunnel (Цифровая аэродинамическая труба), ASCI – Accelerated Strategic Computing Initiative (с 2005 года Advanced Simulation and Computing Program, программа создания суперкомпьютерных систем для моделирования ядерных арсеналов), ES – Earth Simulator (Модель Земли).

Детальный анализ закономерностей роста производительности различных других типов компьютеров позволяет сделать заключение, что они эволюционируют примерно в том же темпе. Более того, выявленные закономерности позволяют построить обобщенную модель эволюции производительности компьютерных систем различных классов – своего рода периодическую систему основных закономерностей роста производительности различных классов компьютеров (рис. 6).

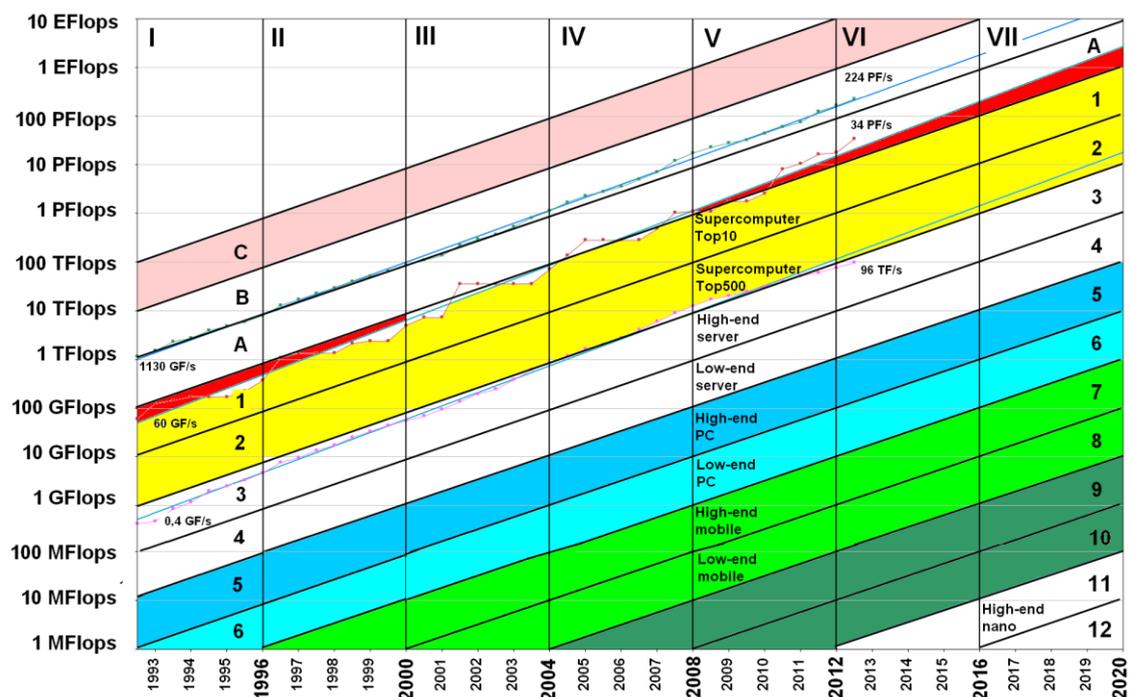


Рисунок 6 – Обобщенная модель эволюции производительности компьютерных систем различных классов.

Представленная на рис. 6 модель позволяет существенно усовершенствовать и упорядочить ранние попытки классификации, примером которых является рис. 4. В частности, как показал анализ, **основой для построения такой системы может служить 4-летний**

период, который характеризуется ростом производительности для различных классов систем примерно на порядок. К 2012 году таких классов сформировалось 10, но фактически можно констатировать **появления нового класса (отличающегося от предыдущего по производительности на порядок) примерно каждые 4 года**. При этом классы могут быть сгруппированы попарно в родственные группы, представляющие элитную, высокопроизводительную и относительно дорогую (High-end), и массовую (Low-end) разновидность соответствующего типа компьютеров. Если такие классы обозначить номером N начиная с класса наиболее производительных систем, то всего на рисунке 6 можно выделить 12 классов (к 2020 году):

- 1 – Top50 суперкомпьютерных систем (High-end);
- 2 – прочие системы из списка Top500 суперкомпьютерных систем (Low-end);
- 3 и 4 – серверные системы различных классов производительности (соответственно High-end и Low-end);
- 5 и 6 – персональные стационарные системы различных классов производительности;
- 7 и 8 – мобильные системы различных классов производительности (ультрабуки, ноутбуки, нетбуки и пр.);
- 9 и 10 – ультрамобильные системы различных классов производительности (планшеты, коммуникаторы и пр.);
- 11 и 12 – перспективные сверхкомпактные наносистемы.

Кроме этого, учитывая возрастающую сетевую связность всех компьютерных систем, можно также выделить аналогичные сверхклассы:

- A – надсистемы, интегрирующие производительность Top500 суперкомпьютерных систем (класс GRID-систем);
- B – сверхсистемы, интегрирующие производительность всех компьютерных систем с широкополосным подключением к Интернет (класс облачных систем);
- C – глобальные сверхсистемы, интегрирующие производительность всех подключенных к Интернет компьютерных систем (типа Bitcoin).

Производительность сверхклассов (надсистем пр.) носит потенциальный характер и может быть получена лишь в случае их эффективного сетевого объединения в единый ресурс на базе, например, GRID-технологий (наиболее характерных в случае интеграции суперкомпьютерных ресурсов [9, 10]) или облачных технологий, интегрирующих ресурсы существенно более широкого класса компьютерных систем. Ярким примером эффективной интеграции вычислительных ресурсов различных классов является

запущенная в 2009 году система Bitcoin – пиринговая электронная платёжная система, использующая одноимённые единицы для учёта. Сеть полностью децентрализована, не имеет центрального администратора или какого-либо его аналога. Базовым элементом этой платёжной системы является программа-клиент с открытым исходным кодом, выполняющая значительный объём вычислений для обеспечения общей безопасности и надёжности. С помощью сетевого протокола прикладного уровня запущенные на множестве компьютеров клиенты соединяются между собой в одноранговую сеть. В середине мая 2013 года мощность этой сети превысила 1 эксафлопс, превысив в 6,35 раза суммарную мощность всех суперкомпьютеров из рейтинга Top500.

Анализ показывает, что в зависимости от значения N существенно меняются не только показатели производительности, но также и порядок стоимости (P) и объём производства (V) компьютерных систем соответствующего класса (рис. 7).

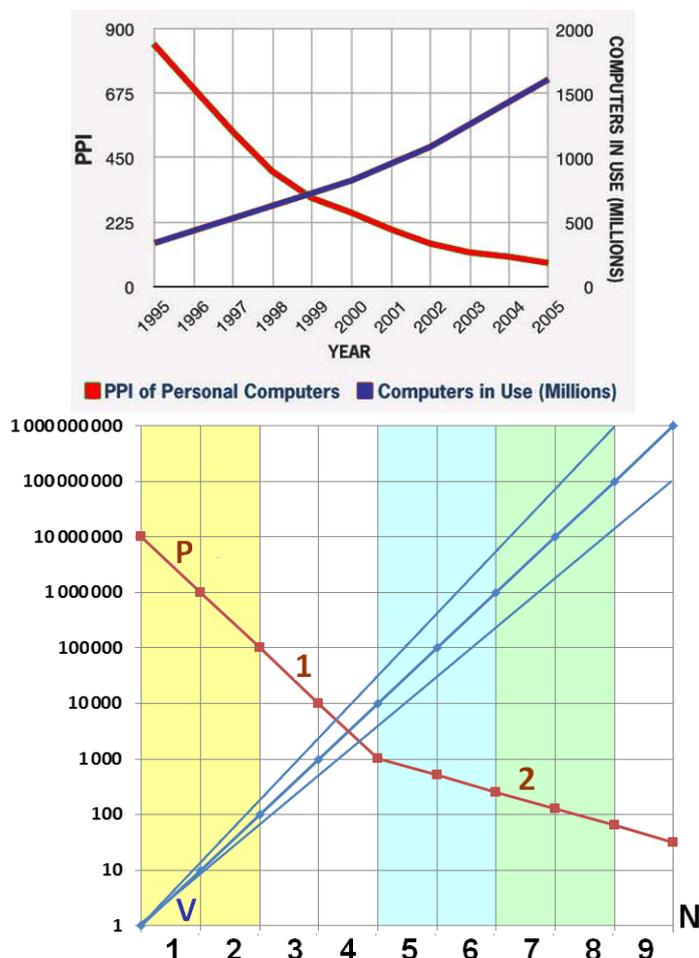


Рисунок 7 – Взаимосвязь между классом компьютерных систем, их стоимостью и распространённостью (вверху – пример реальных данных, внизу – предложенная модель).

Как видно из рис. 7, реальное изменение индекса цен производителей (PPI — Producer Price Index — показатель среднего уровня изменения цен) персональных компьютеров (нисходящая зависимость на верхнем графике) и общее их количество в эксплуатации (восходящая зависимость на верхнем графике) хорошо согласуется с линеаризованной моделью этих зависимостей (на нижнем графике), построенной на основе обобщенной модели эволюции производительности: N — класс системы в рамках обобщенной модели; P (Price) — цена (значения вертикальной шкалы в этом случае соответствуют PPI, более крутой линеаризованный участок 1 соответствует относительно большим ценовым различиям для малотиражных систем, участок 2 — относительно небольшим изменениям для массовых систем); V (Volume) — объем производства соответствующего класса систем (может иметь существенные флуктуации по мере увеличения масштабов массового производства).

Как показал проведенный анализ, закономерности роста производительности тесно связаны и с другими закономерностями, определяющими развитие компьютерных систем и их компонентов (рис. 8-18). В частности, одной из таких закономерностей является волнообразная смена преобладающих базовых архитектур с периодом примерно в 12 лет, что наглядно иллюстрируется на примере суперкомпьютерных систем (рис. 8).

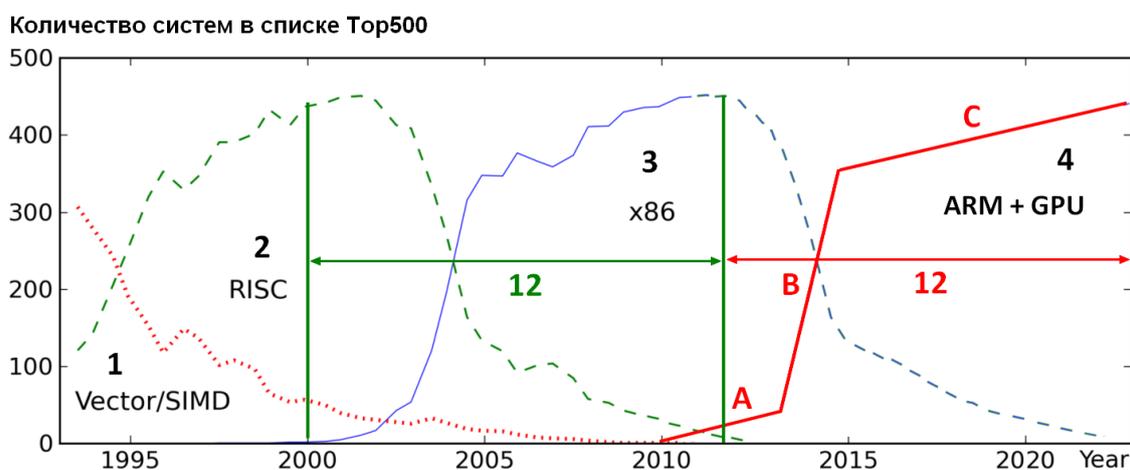


Рисунок 8 – Анализ списка Top500 позволяет выявить закономерность волнообразной смены преобладающих базовых архитектур с периодом примерно в 12 лет (графики за период 1993-2013 гг. построены по данным Top500).

Линеаризация такой волны (на рис. 8 справа) позволяет выделить 3 характерных участка в динамике перехода к преобладанию новой архитектуры: А — начальный рост (период формирования концептуальных основ новой архитектуры), В —

основной рост (общее признание новой концепции и быстрое вытеснение систем предыдущей архитектуры), С – остаточный рост (период уверенного преобладания новой архитектуры).

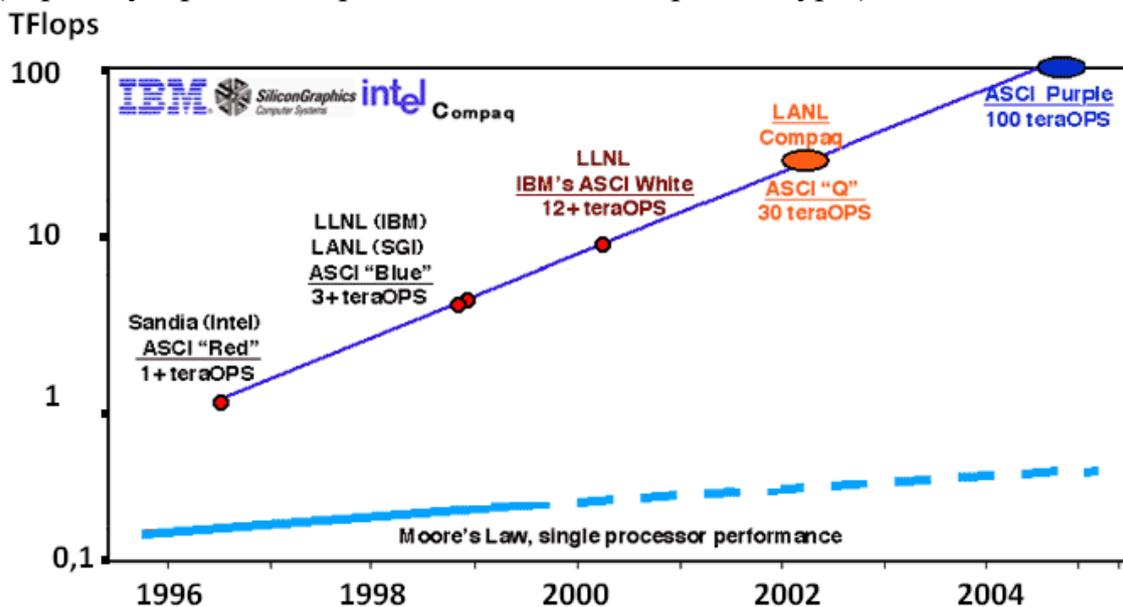


Рисунок 9 – Рост производительности «на порядок каждые 4 года» на рубеже тысячелетий обеспечивался компьютерами семейства ASCI, большинство которых (кроме ASCI Red) строилось на базе все более мощных RISC-процессоров (порядка 10-ти тысяч в каждой системе), что более чем на десятилетие определило базовую архитектуру основных суперкомпьютерных систем (по данным работы [11])

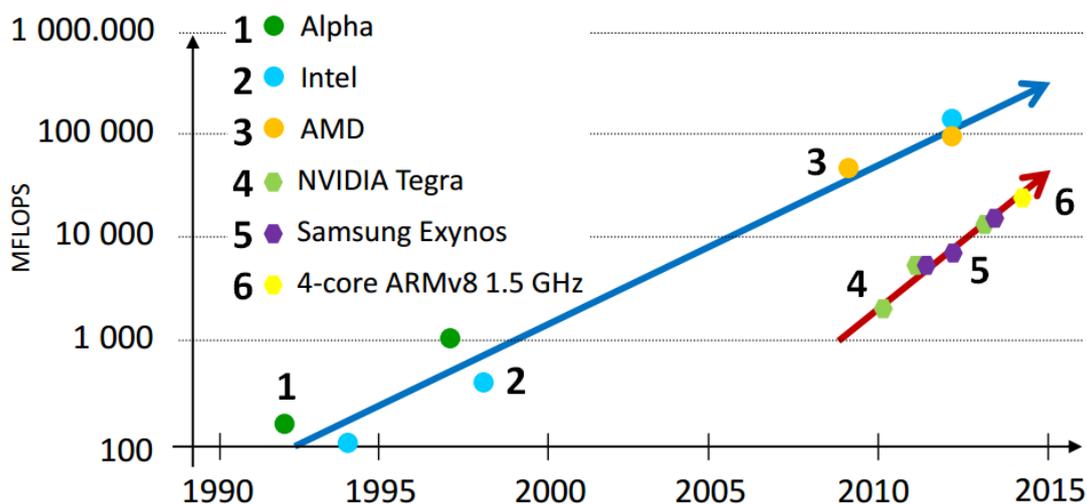


Рисунок 10 – Более чем через десятилетие история стремительной смены архитектур суперкомпьютерных систем повторяется, но уже на базе процессоров типа ARM и GPU, количество которых уже начинает исчисляться миллионами (по данным работы [12]).

Одним из характерных современных показателей, хорошо вписывающихся в общие закономерности роста, является рост

количества процессоров и/или ядер в компьютерных системах (рис. 11). Но при этом в рекордных системах количество процессоров может в отдельных случаях на 1-2 порядка превышать среднее: например уже в 1996 году в системе ASCI Red использовалось 9216 процессоров Intel Pentium Pro, но в последней рекордной системе этого ряда ASC Purple в 2005 году использовались 12544 RISC-микропроцессоров POWER5, что полностью вписывается в общую закономерность).

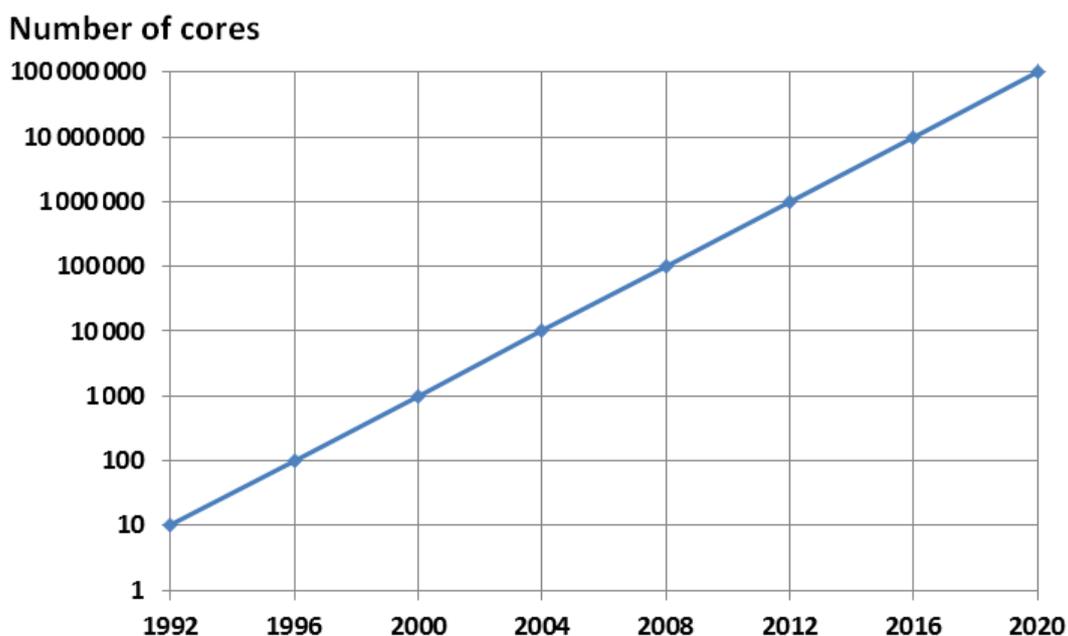


Рисунок 11 – Усредненное количество ядер в наиболее производительных суперкомпьютерных системах (для периода 1993-2013 по данным списка Top500): **рост в тысячу раз каждые 12 лет или в 1,77828 раз ежегодно.**

Динамика изменения типичного объема оперативной памяти (RAM) в персональных компьютерах (рис.12) в соответствии с распространенной гипотезой 2000-го года также должна была увеличиваться в 10 раз каждые 4 года (график 1 на рис. 12) [13], но реально до 1983 года наблюдался рост практически в строгом соответствии с «законом Мура 1965», а после этого – в соответствии с «законом Мура 1975» (т.е. удвоение каждые 2 года – график 2), что позволяет прогнозировать преодоление рубежа в 100 Гбайт примерно в 2020 году.

Глобальное же производство микросхем динамической оперативной памяти (DRAM) основных типов действительно увеличивается **в тысячу раз каждые 12 лет или в 10 раз каждые 4 года** (рис. 13 – по данным работы [14]).

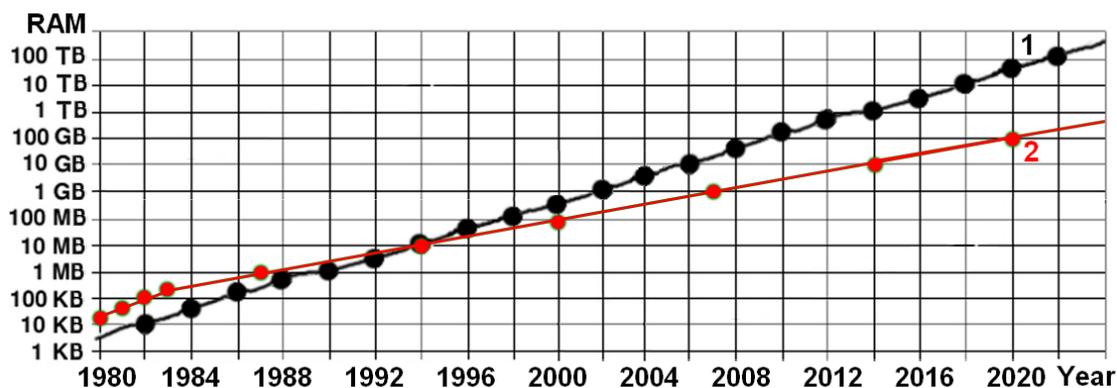


Рисунок 12 – Динамика изменения типичного объема оперативной памяти (RAM) в персональных компьютерах.

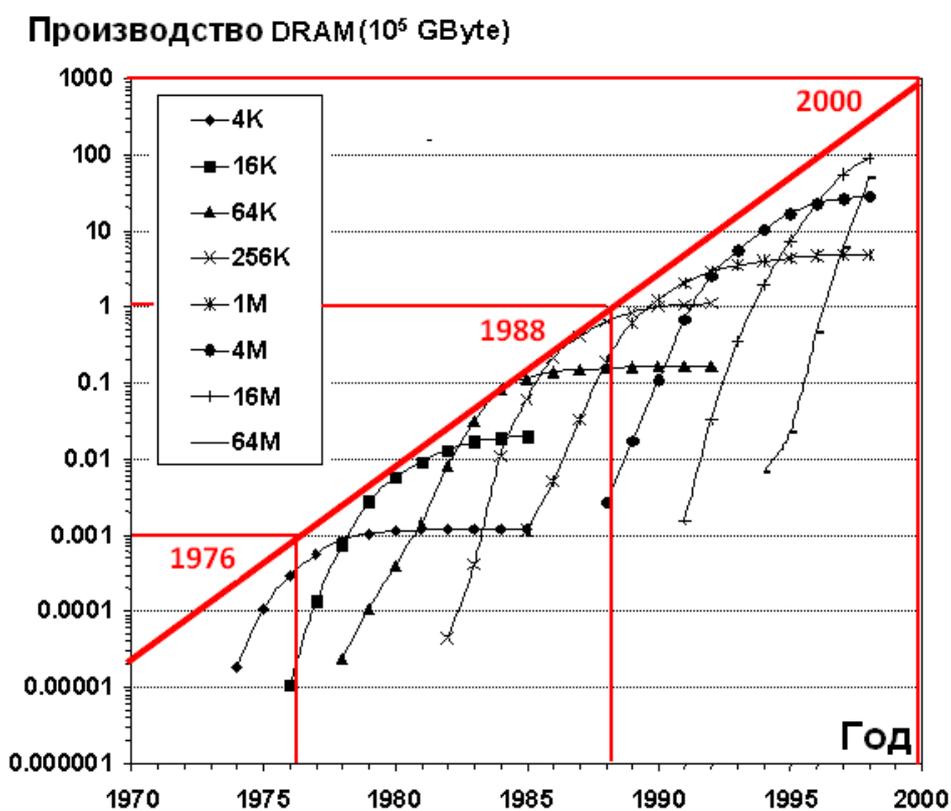


Рисунок 13 – Глобальное производство микросхем динамической оперативной памяти (DRAM) основных типов реально увеличивается в тысячу раз каждые 12 лет или в среднем в 1,77828 раз ежегодно.

На примере производства микросхем динамической оперативной памяти (DRAM) обнаруживается также закономерность волнообразной смены преобладающих типов микросхем: примерно каждые 3 года (начиная с 1976 года) емкость основного типа производимых микросхем увеличивается в 4 раза.

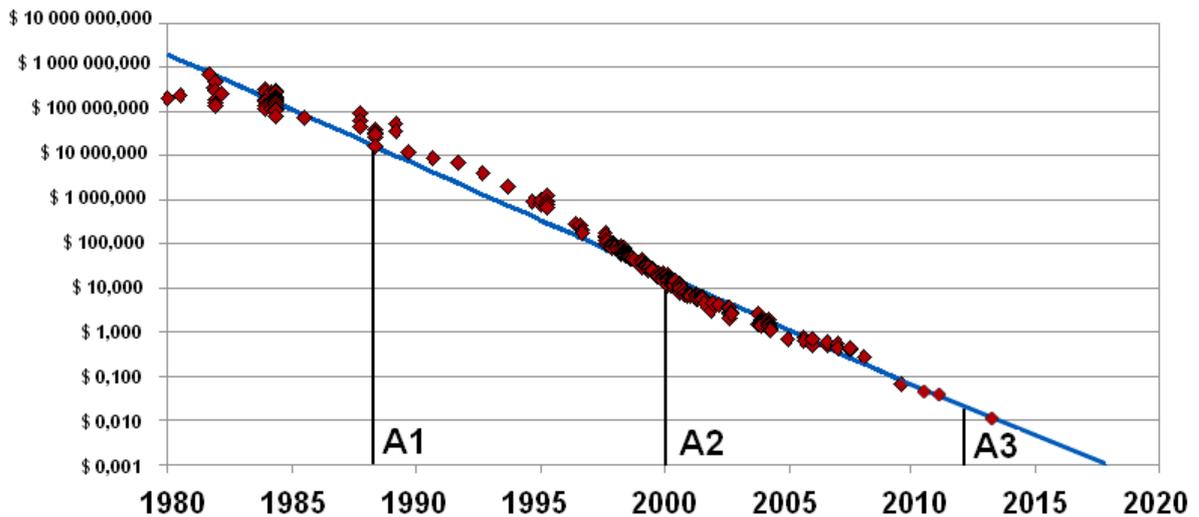


Рисунок 14 – Уменьшение стоимости хранения гигабайта информации на внешних носителях (на жестких дисках) 1982- 2020 гг.: **в тысячу раз каждые 12 лет** (см. интервалы A1-A2 и A2-A3) или на порядок каждые 4 года или в 1,77828 раз ежегодно.

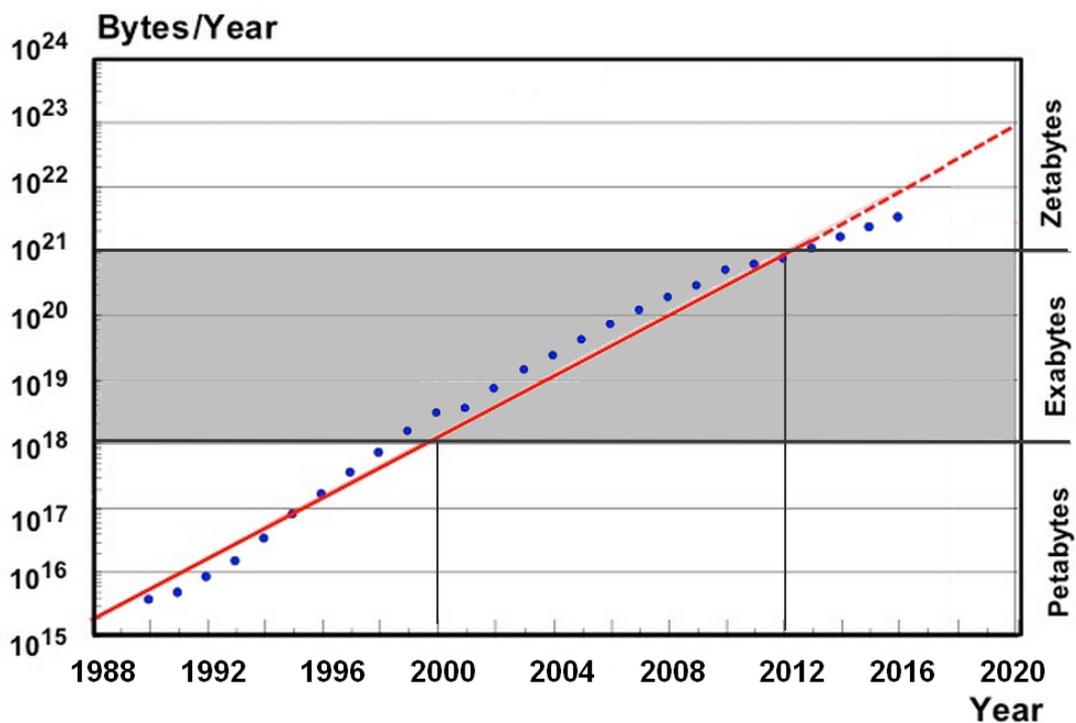


Рисунок 15 – Глобальное ежегодное производство накопителей на жестких дисках, выраженное в виде их суммарной емкости в 1988- 2020 гг.: **рост в тысячу раз каждые 12 лет или в 1,77828 раз ежегодно**. После 2012 года суммарная емкость ежегодного производства жестких дисков начинает снижаться за счет перераспределения в пользу SSD-накопителей, но суммарная емкость накопителей этих 2-х видов продолжает сохранять прежние тенденции роста.

Эволюция характеристик отдельных компьютерных систем сопровождается столь же стабильным ростом их сетевой связности (рис. 16).

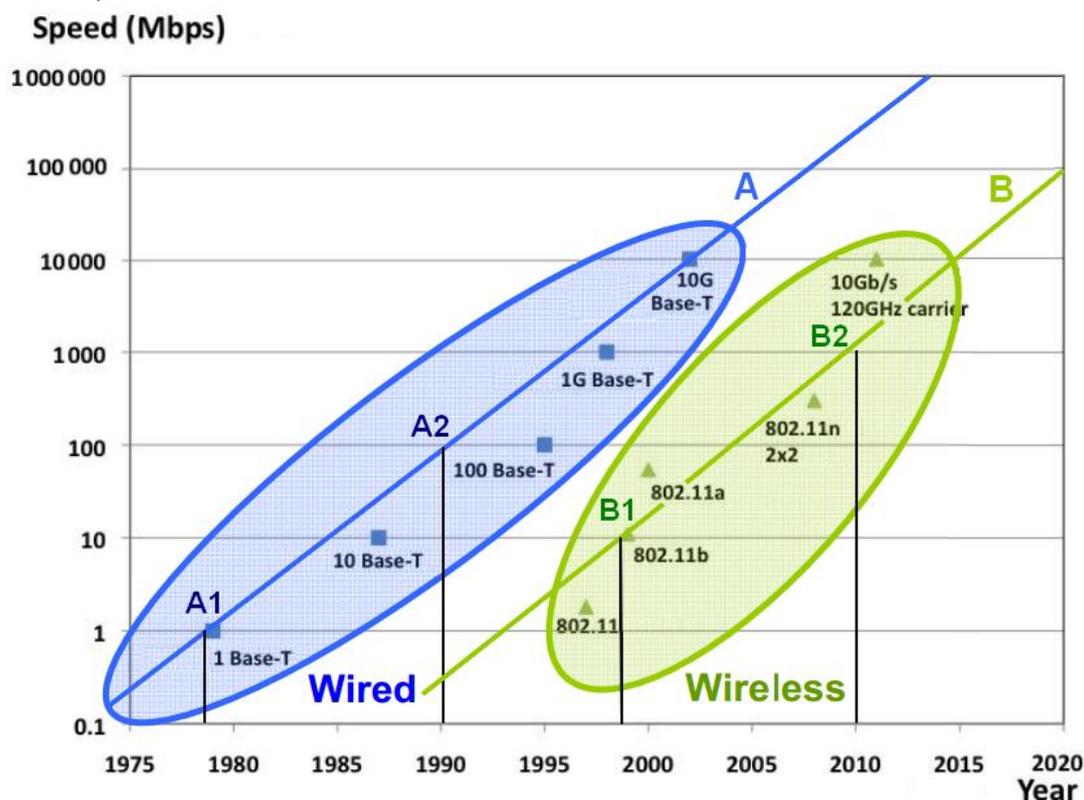


Рисунок 16 – Своего рода периодическая система роста производительности проводных (wired) и беспроводных (wireless) систем связи в компьютерных сетях: **рост на 2 порядка за 12 лет** (см. периоды A1-A2 и B1-B2) с отставанием по производительности беспроводных сетей от проводных примерно на 12-15 лет.

Постоянный рост сетевой связности ведет к формированию **качественно новой глобальной информационно-вычислительной сетевой инфраструктуры**, стремительно меняющей традиционные представления об организации информационно-вычислительных процессов и программировании. В частности, экспоненциальный рост количества сетевых прикладных программных интерфейсов (рис. 17-18) означает сдвиг основной парадигмы программирования от традиционной платформенно-ориентированной к глобальной веб-ориентированной, которую можно обозначить как **ноопрограммирование** (рис. 19). Другими словами, в новых условиях стремительно меняется и методы организации вычислений, и методы программирования, все более ориентируясь на эффективное использование глобальной среды и глобальное использование компьютерных ресурсов.

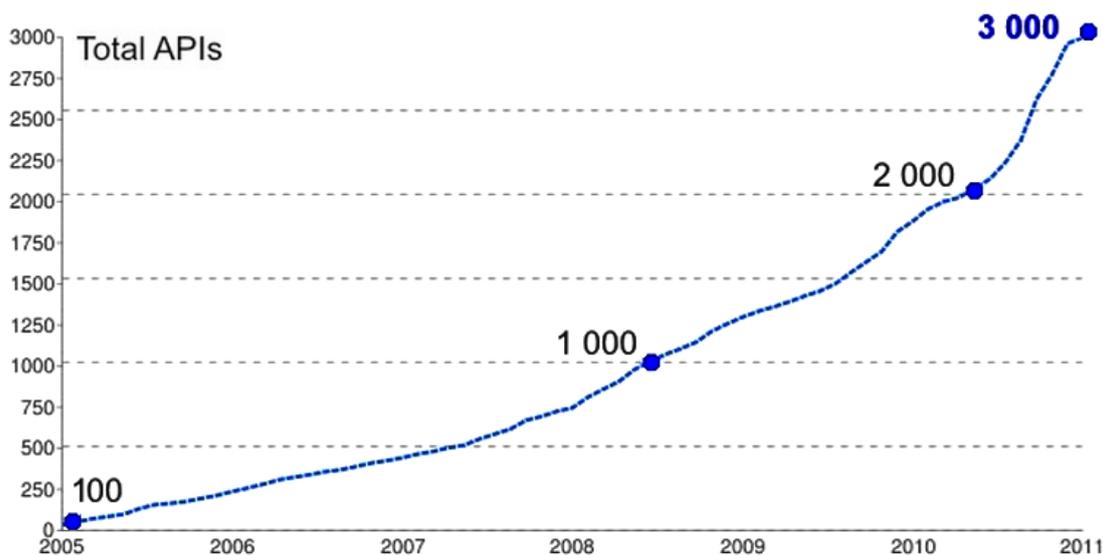


Рисунок 17 – Реальный рост количества прикладных программных интерфейсов (API), доступных в глобальной сети.

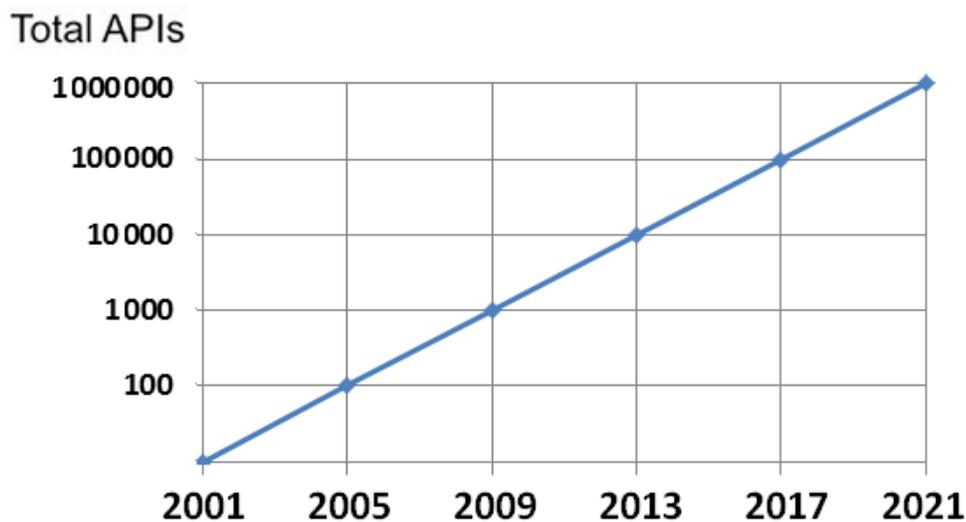


Рисунок 18 – Модель роста количества сетевых прикладных программных интерфейсов (API или WebAPI): средний **рост на порядок каждые 4 года.**

С этими процессами может быть ассоциировано техническое становление ноосферы с присущими ей динамическими закономерностями [15-18] и, соответственно, необходимо вести речь не только о ноопрограммировании, единой платформой для которого является все глобальное сетевое пространство, но и ноокомпьютинге и ноосетях как компонентах новой информационно-вычислительной реальности, становление которой только началось.

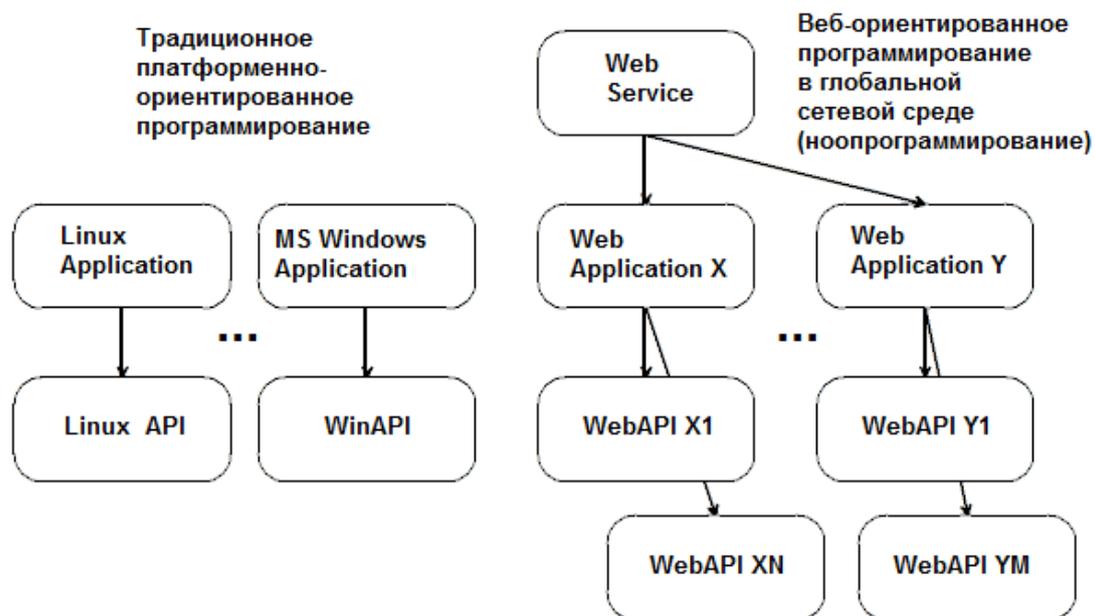


Рисунок 19 – Экспоненциальный рост количества сетевых прикладных программных интерфейсов (WebAPI) означает сдвиг основной парадигмы программирования от традиционной платформенно-ориентированной к глобальной веб-ориентированной, которую можно обозначить как ноопрограммирование.

Так как эту новую информационно-вычислительную реальность можно считать своего рода нервной системы современной цивилизации, то еще одной важной составляющей этой реальности являются компьютерные модели нервной системы и мозга, развитие которых является в настоящее время одним из наиболее значительных вызовов в области современных компьютерных технологий. При этом динамика развития таких моделей также в перспективе может вполне соответствовать закономерности роста «на порядок каждые 4 года» (рис. 20).

Есть также основания также предполагать, что интенсивное развитие нанотехнологий позволит экстраполировать и закон Мура, и выявленные закономерности по меньшей мере до 60-х годов XXI века **с перспективой реализации систем на одноатомных транзисторах примерно к 2050 году** (рис. 21) [20].

Кроме того, не исключено, что закономерности развития компьютерных систем являются частным случаем более общих закономерностей развития различных других процессов во Вселенной, в частности, эволюции жизни и генома как ее основы. В частности, исследования последнего времени показали, что эволюционное усложнение избыточной части генома происходит со скоростью примерно на порядок каждые миллиард лет (рис. 22) [21-24].

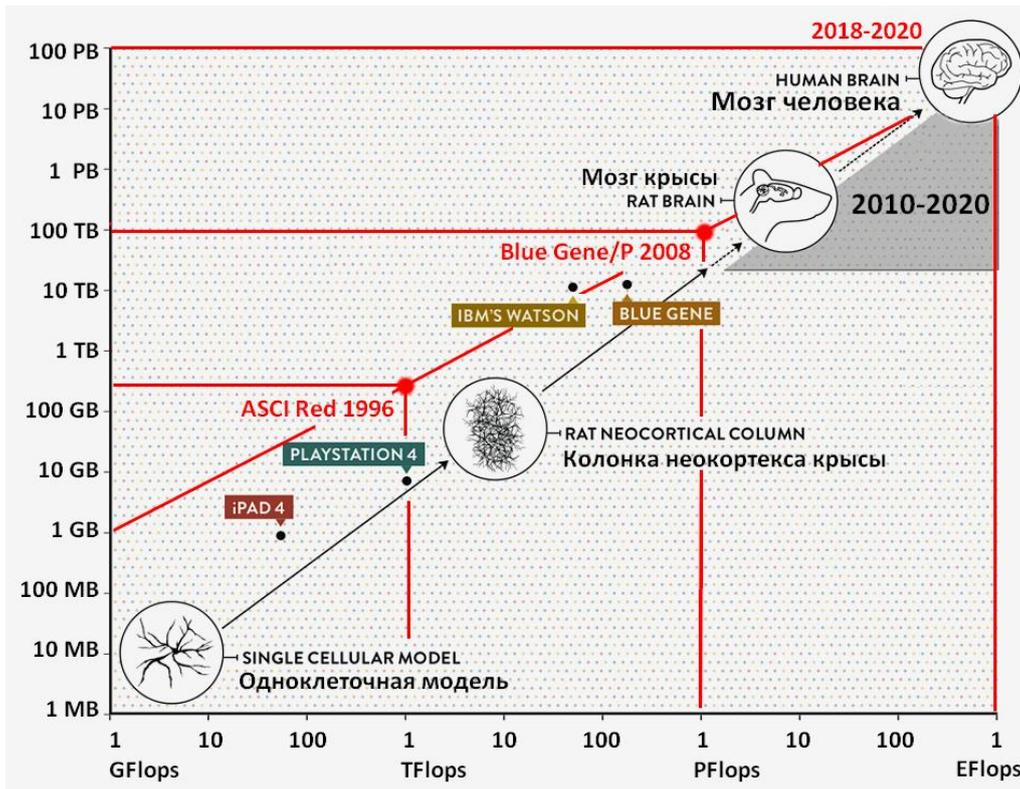


Рисунок 20 – Динамика роста характеристик суперкомпьютерных систем и развития компьютерных моделей мозга (по данным работы [19]) также в перспективе сходятся и соответствуют закономерности роста характеристик на 3 порядка за 12 лет.

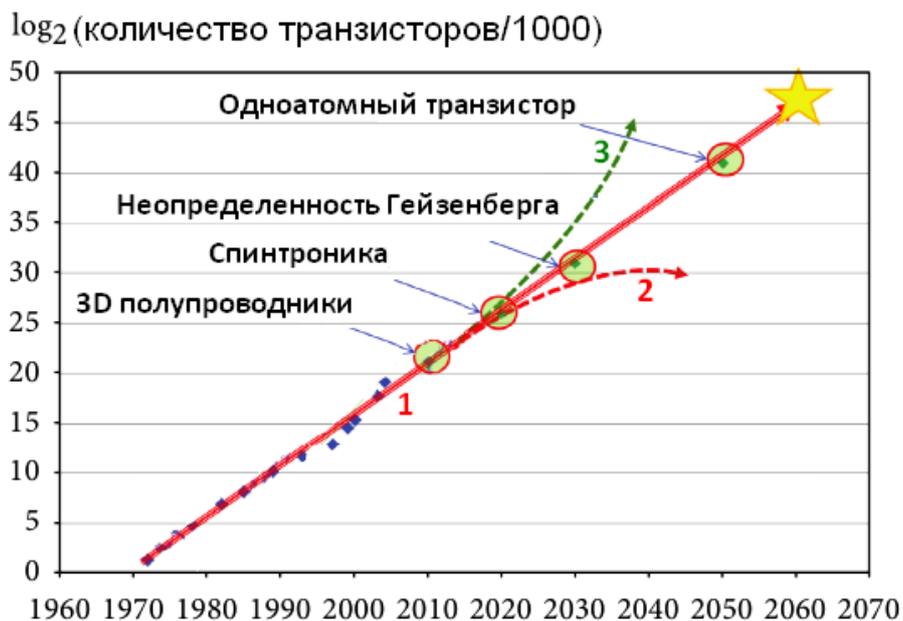


Рисунок 21 – Перспективы развития нанотехнологий позволяют экстраполировать закон Мура вплоть до 2060-х годов с перспективой реализации систем на одноатомных транзисторах примерно к 2050 году: 1 – прямая, соответствующая «закону Мура 1975», 2 – ограничения современных полупроводниковых технологий, 3 – возможный «нанопрорыв» в технологиях (по материалам работы [20]).

Log10 размера генома (количество пар нуклеотидов)

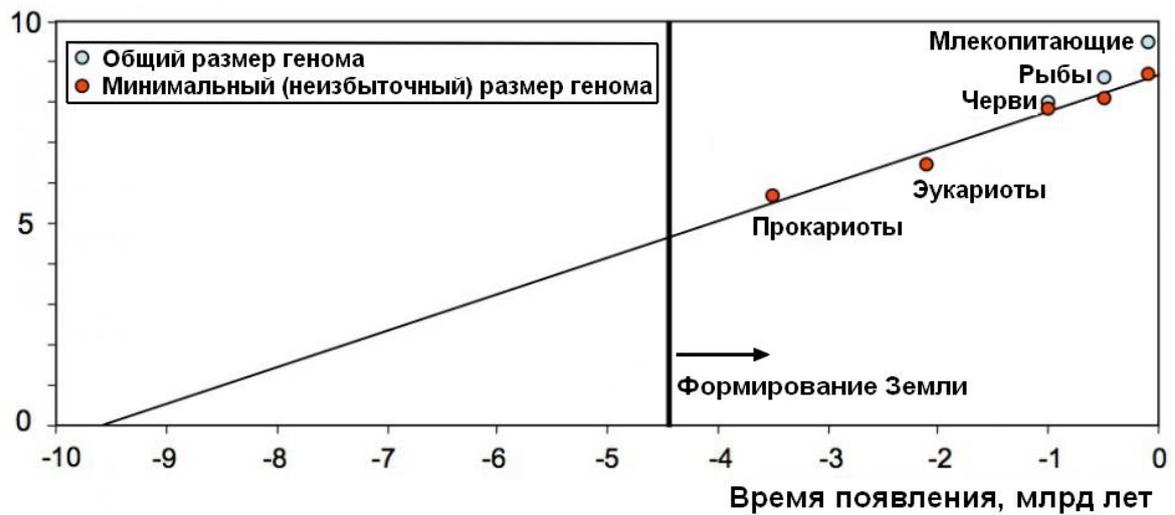


Рисунок 22 – Современная реконструкция эволюции сложности генома позволяет предположить возможность обобщения законов развития компьютерных систем вплоть до масштабов эволюции жизни во Вселенной [24].

В целом, в настоящее время есть основания утверждать, что в развитии информационно-компьютерных технологий (в самом широком смысле этого понятия, не ограниченном лишь современным этапом развития) может быть выделена целая система иерархически связанных закономерностей (рис. 23).



Рисунок 23 – Иерархия закономерностей развития информационно-компьютерных систем.

При этом современный этап развития (текущее и прошлое столетия) описывается **макрозакономерностями**, к которым могут быть отнесены почти все закономерности, описанные выше. Период, охватывающий практически всю историю цивилизации, описывается **мегазакономерностями**, к которым, в частности, относится **кодо-логическая эволюция** [25, 26]. К этой же категории частично могут

быть отнесены и различные **закономерности усложнения операционной гибкости** в процессе эволюции (например, в компьютерной логике и представлении чисел, т.е. количественной информации, но эта же закономерность применительно к развитию системы адресации компьютерной памяти и сетевых устройств может рассматриваться как макрозакономерность).

Гиперзакономерности охватывают весь период развития жизни во Вселенной.

Впервые рассмотренная выше система закономерностей была представлена в работах [28] и [29]. Как показали последующие исследования, данный подход открывает возможности для построения масштабной взаимосвязанной системы прогнозов развития компьютерных систем, сетей и их компонентов.

Выводы

Выявленная система закономерностей не исчерпывает все вопросы, связанные с эволюцией компьютерных систем и сетей, но существенно уточняет и дополняет все то, что связано с законом Мура и подобными ему законами развития. Знание и учет представленных закономерностей позволяет более осознанно и обоснованно осуществлять планирование и проведение разного рода проектных и эксплуатационных работ, связанных с компьютерными системами и сетями, тем самым заметно повышая их итоговую эффективность.

Список литературы

1. Moore G. E. Cramming more components onto integrated circuits / Electronics, vol. 38, no. 8, Apr. 1965. P. 114–117.
2. Moore G. E. Progress in digital integrated electronics / Proc. of the International Electron Devices Meeting (IEDM'75), vol.21, 1975. P. 11–13.
3. Аноприенко А.Я. Компьютерные науки и технологии в прошлом, настоящем и будущем // Материалы V международной научно-технической конференции «Информатика и компьютерные технологии» – 24-26 ноября 2009 г., Донецк, ДонНТУ, 2009. С.15-26.
4. Аноприенко А.Я. Вызовы времени и постбинарный компьютинг // Информатика и компьютерные технологии / Материалы VI международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – 23-25 ноября 2010 г. Т. 1. Донецк, ДонНТУ. – 2010. С. 13-31.
5. Аноприенко А.Я. Компьютерные науки и технологии: следующие 50 лет // Материалы II всеукраинской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС и КМ 2011)» – 12-13 апреля 2011 г., Донецк, ДонНТУ, 2011. Т.1. С. 7-22.

6. Аноприенко А.Я. Ноографика и ноомоделирование // Материалы четвертой международной научно-технической конференции «Моделирование и компьютерная графика» 5-8 октября 2011 года, Донецк, ДонНТУ, 2011. С. 321-324.
7. Апокин И.А., Майстров Л.Е. Развитие вычислительных машин, – М.: «Наука», 1974. – 400 с.
8. Аноприенко А.Я., Иваница С.В. Постбинарный компьютеринг и интервальные вычисления в контексте кодо-логической эволюции. — Донецк, ДонНТУ, УНИТЕХ, 2011. — 248 с.
9. Куссуль Н.Н., Шелестов А.Ю. Grid-системы для задач исследования Земли. Архитектура, модели и технологии. – Киев: Наукова думка, 2008. – 452 с.
10. На шляху до європейського ґрід. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 392 с.
11. Larzelere A.R. The History of the Accelerated Strategic Computing Initiative (ASCI). Lawrence Livermore National Laboratory. 2009. – 216 p.
12. Tafani D. The Mont-Blanc Project. Leibniz Supercomputing Centre. 2013. 23 p.
13. Buttazzo G. Can a Machine Ever Become Self-aware? / Artificial Humans. – Los Angeles: Goethe Institute, May 2000, P. 45-49.
14. Victor N. M., Ausubel J. H. DRAMs as model organisms for study of technological evolution // Technological Forecasting and Social Change. Volume 69, Issue 3, April 2002. P. 243-262.
15. Аноприенко А.Я. Нооритмы: модели синхронизации человека и космоса. – Донецк: УНИТЕХ, 2007. – 372 с.
16. Аноприенко А.Я. Цивилизация, ноосфера и нооритмы // «Ноосфера и цивилизация». Научный журнал. Выпуск 7 (10). – Донецк, 2009, с. 62-69.
17. Аноприенко А.Я. Нооритмы и время в информационную эпоху // «Время в зеркале науки». Специальный выпуск сборника научных трудов «Гуманитарные студии». Часть 1. – К.: Центр учебной литературы, 2010. С. 291-305.
18. Аноприенко А.Я. Нооритмы: комплексная эмпирическая модель ноосферной динамики // Международный междисциплинарный симпозиум «Нанотехнология и ноосферология в контексте системного кризиса цивилизации». Сборник тезисов докладов. Симферополь – Ялта, 4-10 января, 2011 г. С. 30-32.
19. Keats J. The \$1.3B Quest to Build a Supercomputer Replica of a Human Brain, <http://www.wired.com/wiredscience/2013/05/neurologist-markam-human-brain/all/>
20. Wu J., Shen Y., Kitt Reinhardt K., Szu H., Dong B. A Nanotechnology Enhancement to Moore's Law / Applied Computational Intelligence and Soft Computing, Volume 2013, Article ID 426962. 13 p.
21. Sharov A.A. Genome increase as a clock for the origin and evolution of life / Biology Direct. Published 12 June 2006. – 10 p.
22. Долгоносков Б.М. Доминирующий тип памяти определяет тип цивилизации и динамику ее роста // История и математика. – М.: URSS, 2010. 12 с.
23. Марков А.В., Анисимов В.А., Коротаев А.В. Взаимосвязь размера генома и сложности организма в эволюционном ряду от прокариот к млекопитающим // Палеонтологический журнал. №4, 2010. Стр. 3–14.
24. Sharov A.A., Gordon R. Life Before Earth / Cornell University Library's online archives arXiv.org. Submitted on 28 Mar 2013. <http://arxiv.org/pdf/1304.3381v1>.
25. Аноприенко А.Я. Обобщенный кодо-логический базис в вычислительном моделировании и представлении знаний: эволюция идеи и перспективы развития // Научные труды Донецкого национального технического

- университета. Серия «Информатика, кибернетика и вычислительная техника» (ИКВТ-2005) выпуск 93: – Донецк: ДонНТУ, 2005. С. 289-316.
26. Аноприенко А.Я., Иваница С.В. Постбинарный компьютеринг и интервальные вычисления в контексте кодо-логической эволюции. — Донецк, ДонНТУ, УНИТЕХ, 2011. — 248 с.
27. Аноприенко А.Я., Иваница С. В. Тетралогика, тетравычисления и ноокомпьютинг. Исследования 2010–2012. — Донецк: ДонНТУ, Технопарк ДонНТУ УНИТЕХ, 2012. — 308 с.
28. Аноприенко А.Я. Закономерности развития компьютерных систем // «Научная дискуссия: инновации в современном мире». №10 (18): Сборник статей по материалам XVIII международной заочной научно-практической конференции. – М.: Изд. «Международный центр науки и образования», 2013. – С. 19-29.
29. Аноприенко А.Я. Модели эволюции компьютерных систем и средств компьютерного моделирования // Материалы пятой международной научно-технической конференции «Моделирование и компьютерная графика» 24-27 сентября 2013 года, Донецк, ДонНТУ, 2013. С. 403-423.

Надійшла до редколегії 25.12.2013.

Рецензент: д.т.н., проф. Башков Є.О.

Как ссылаться на данную статью:

Аноприенко А.Я. Основные закономерности эволюции компьютерных систем и сетей // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования» (МАП-2013). Выпуск № 1 (12) – 2 (13): Донецк: ДонНТУ, — 2013. С. 10–32.

Информация об авторе:

Аноприенко Александр Яковлевич,



декан факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета (ДонНТУ), профессор кафедры компьютерной инженерии ДонНТУ. Основные направления научных исследований: закономерности развития средств и методов компьютеринга, компьютерное моделирование и компьютерная графика, интернет-технологии, постбинарный компьютеринг.

Анопрієнко О. Я.

Донецький національний технічний університет

Основні закономірності еволюції комп'ютерних систем і мереж.

Розглядаються основні закономірності розвитку комп'ютерних систем і мереж, які більш адекватно і всебічно дозволяють відслідковувати і прогнозувати еволюцію засобів і методів комп'ютерингу. При цьому, враховуючи надзвичайне різноманіття різних даних і досить часту їх суперечливість, мова в першу чергу йде про різного роду моделі еволюції, що відображають основні якісні та кількісні закономірності еволюції комп'ютерних систем і мереж з прийнятною і розумною точністю.

Комп'ютерні системи та мережі, закономірності розвитку, закон Мура, ієрархія закономірностей.

Анопрієнко А.

Donetsk National Technical University

Basic laws of computer systems and networks evolution.

Moore's law is the observation that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This empirical law was first formulated in 1965 as a law of doubling the number of active elements on the chip every year. In 1970, it got its name in honor of the author Gordon Moore – one of the founders of the company Intel. In 1975 this law was greatly improved: in the long term doubling the complexity of integrated circuits is possible only every 2 years – it's actually a modern form of the Moore's law.

The analysis shows that the data accumulated to date, can significantly clarify and summarize these estimates. In particular, the list of the most productive Top500 supercomputers today is one of the most important sources for the analysis of patterns of growth performance of modern computer systems. Analysis of the Top500 list and other sources suggests that most indicators of development of modern computer systems increased by approximately one order every 4 years. These and other identified patterns allow us to construct a generalized model of the evolution of the performance of computer systems of different classes – a kind of periodic system of the basic laws of growth performance of different classes of computers.

Four-year period, which is characterized by the growth performance for different classes of systems by approximately one order is the basis for the construction of the periodic system. By 2012, 10 such classes formed, but in fact it can be stated the emergence of a new class (which differs from the previous performance by an order) approximately every 4 years. At the same classes can be grouped in pairs in related groups, representing high-performance and relatively expensive (High-end), and mass (Low-end) kind of appropriate types of computers.

Analysis of a variety of other data shows that in the development of information and computer technologies can be formulated as a whole system of hierarchically related laws, one of which is code-logical evolution.

Computer systems and networks, development law, Moore's law, the hierarchy of laws.