

УДК 001.51:122

## Системодинамика ноотехносферы: основные закономерности

Аноприенко А.Я.

Донецкий национальный технический университет  
anoprien@gmail.com

*Аноприенко А.Я. «Системодинамика ноотехносферы: основные закономерности». Системодинамику ноотехносферы можно определить как науку о закономерностях процессов развития и изменения во времени глобальной информационно-компьютерной инфраструктуры, а также входящих в ее состав аппаратно-программных и информационных ресурсов и систем. В данной работе систематизированы и обобщены эмпирические наблюдения, которые характеризуют системодинамику ноотехносферы, и предложены зависимости, позволяющие в наиболее краткой и сжатой форме представить основную совокупность известных на сегодня в данной области закономерностей и названные обобщенным законом Мура. Показано, что многообразие основных закономерностей, характеризующих закон Мура, может быть представлено в виде обобщенной зависимости, характеризующей зависимость наблюдаемых параметров ноотехносферы от времени. Предполагается, что выявленная система закономерностей обладает прогностическими свойствами необходимой точности на долгосрочную перспективу.*

**Ключевые слова:** системодинамика, ноотехносфера, экспоненциальный рост, закономерности развития компьютерных систем, обобщенный закон Мура

### Введение

Данная публикация содержит новые результаты, полученные в ходе выявления и исследования закономерностей развития современной информационно-компьютерной инфраструктуры, и является продолжением ряда работ автора, посвященных данной теме, в частности тех, результаты которых изложены в публикациях [1 – 4]. В данной работе впервые сделана попытка систематизации всего известного в этой области комплекса закономерностей и зависимостей (как правило, эмпирических) с точки зрения системодинамики.

Системодинамика традиционно определяется как наука о закономерностях процессов развития и изменения сложных систем во времени [5 – 6]. Термином «техносфера» академик А.Е. Ферсман в 20-е годы XX столетия обозначил среду обитания, которую формирует человек, используя разум и пользуясь искусственными орудиями труда [7]. Параллельно при активном участии академика В.И. Вернадского сформировалось понятие «ноосфера» – «сфера разума», рассматриваемая как следующая стадия развития биосферы. В современных условиях активного развития «интеллектуальной» информационно-компьютерной составляющей техносферы наблюдается тенденция объединения указанных терминов. В частности, в работе [7] утверждается, что «современная искусственная среда наиболее адекватно может интерпретироваться как ноотехносфера» и что «глобальный характер становления ноотехносферы обуславливает логику ее

интерпретации в качестве определяющей характеристики современной эпохи».

Под ноотехносферой в контексте данной публикации далее будем понимать «интеллектуальную» составляющую техносферы, т.е. информационно-компьютерный глобальный континуум, состоящий из множества компьютерных систем и размещенных на них информационных ресурсов различного состава, назначения и масштаба, интегрированных в единое целое сетевой инфраструктурой. В настоящее время наблюдается процесс интенсивного развития ноотехносферы, заключающийся в росте ее масштабов, качества, плотности, связности, производительности, насыщенности устройствами, программным обеспечением и информацией. По состоянию на сегодня ноотехносфера в целом представляет собой наиболее сложную из всех когда-либо созданных человеком систем, и сложность ее продолжает стремительно увеличиваться.

Таким образом, системодинамику ноотехносферы можно определить как науку о закономерностях и особенностях процессов развития и изменения во времени современной глобальной информационно-компьютерной инфраструктуры, а также входящих в ее состав аппаратно-программных и информационных ресурсов и систем.

В данной работе систематизированы и обобщены известные эмпирические закономерности, которые характеризуют системодинамику ноотехносферы, и предложены зависимости, позволяющие в наиболее краткой и сжатой форме представить основную

совокупность известных на сегодня в данной области закономерностей. Полученные зависимости предложено назвать обобщенным законом Мура.

### **Закон Мура и законы его развития**

Так называемый «закон Мура» приобрел на сегодня статус фактически главной закономерности, определяющей технический прогресс не только в компьютерных технологиях, но и во многих других областях науки и техники. В то же время нарастает неоднозначность и неопределенность в понимании того, что же в действительности определяет данная закономерность. Современный диапазон интерпретаций закона Мура распространяется от наиболее широкого его понимания как практически любой формы экспоненциального развития систем до наиболее узкого понимания, предполагающего удвоение ряда показателей компьютерной техники каждые 1,5 года. Последний вариант интерпретации закона, являющийся на сегодня наиболее популярным, самим Муром, как это ни парадоксально, никогда не формулировался. В целом можно утверждать, что в настоящее время в связи со стремительным расширением использования термина «закон Мура» созрела необходимость всесторонне проанализировать все проявления данной закономерности и перейти к более точным и однозначным формулировкам и определениям.

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 [8]. Однако уже в 1975 году ему пришлось сделать существенное уточнение: в долговременной перспективе удвоение сложности интегральных схем возможно лишь каждые 2 года [9], что в дальнейшем, как показывает детальный анализ, полностью подтвердилось (рис. 1, 2). Свое название данная закономерность получила в 1970-е годы благодаря Карверу Миду (Carver Mead) – преподавателю Калифорнийского технологического института, сотруднику основанной Гордоном Муром лаборатории и автору первого учебного пособия по проектированию сверхбольших интегральных схем [10].

Таким образом, необходимо четко различать как минимум два варианта закона Мура (словосочетание «закон Мура» используется с 1970 года и сегодня считается общепринятым), которые можно обозначить в соответствии с годом их появления как «закон Мура 1965» и «закон Мура 1975». Целесообразно также ввести для дальнейшего

использования сокращенные обозначения для различных версий данного закона, состоящие из аббревиатуры ML (от англоязычного исходного наименования данной эмпирической закономерности как Moore's law) и года появления соответствующей версии закона: ML1965, ML1975 и т.д.

Часто цитируемый в литературе интервал в 18 месяцев самим Гордоном Муром никогда не рассматривался, он лишь высказывал предположение, что реальный период удвоения производительности может составлять примерно 20 месяцев, но в действительности это не подтвердилось. Предложенный период в 18 месяцев связан с прогнозами его коллег, пришедших к середине 80-х годов к выводу о том, что производительность процессоров должна удваиваться каждые 18 месяцев из-за сочетания роста количества транзисторов и быстродействия каждого из них. Эту весьма популярную на сегодня интерпретацию имеет смысл обозначить как «закон Мура 1985» (ML1985) – именно об этой версии закона, как правило, по умолчанию ведется речь, когда упоминается факт экспоненциального роста многих показателей в области компьютерных технологий.

Следует отметить, что при достаточно известной и однозначно определенной дате появления первого варианта закона Мура (1965 год) и благодаря последовавшему ровно через 10 лет его существенному уточнению, каждые последующие юбилейные даты активизировали обсуждение данной закономерности и порождали новые варианты ее формулировки и интерпретации.

Сам Гордон Мур, изначально предполагавший не более чем десятилетний период бурного роста с ежегодным удвоением показателей, на каждый такой юбилей (начиная с 1975 года) с завидной регулярностью (рис. 3) продлевал возможный срок действия закона своего имени еще на одно десятилетие. В связи с этим можно сформулировать своеобразный первый закон развития закона Мура: каждое десятилетие появляются достаточные основания продлить срок действия закона еще минимум на десятилетие.

Кроме этого, уже начальный период развития показал, что примерно к середине каждого десятилетия (начиная с 1960-х годов) появляется новая модификация закона, которая существенно дополняет известные ранее эмпирические наблюдения. Данный факт позволяет сформулировать второй закон развития закона Мура, суть которого заключается в том, что каждое десятилетие выявляется новая модификация эмпирической закономерности, которая дополняет предыдущие и характеризует либо особенности

экспоненциального развития компьютерных технологий или систем, либо разные темпы их развития на различных этапах эволюции. Закономерности, выявленные в 1965, 1975 и 1985 гг., описывающие относительно простые показатели, связанные с ростом степени интеграции и быстродействия цифровых микросхем, целесообразно назвать первым поколением законов Мура – именно эта группа версий закона наиболее известна.

Последующие десятилетия развития компьютерных технологий позволили выявить аналогичные закономерности и по целому ряду других показателей, связанных с ростом сложности микросхем лишь косвенно. Эту группу будем называть вторым поколением законов Мура.

Начало второму поколению выявленных закономерностей было положено в середине 90-х годов, когда созрел так называемый «второй закон Мура», определяющий экспоненциальный рост стоимости производства микросхем по мере их усложнения в соответствии с «первым законом Мура». Гордон Мур в 1995 году впервые достаточно убедительно показал, что дальнейший экспоненциальный рост полупроводниковой промышленности может существенно сдерживаться исходя из сугубо экономических ограничений, связанных с экспоненциальным удорожанием соответствующих средств производства [12]. В частности он обратил внимание на то, что стоимость строительства новой и более современной фабрики по производству микросхем удваивается примерно каждые 4 года. В последующем длительность периода удвоения стоимости фабрик в различных исследованиях уточнялась. При этом указывались периоды в 5 и 6 лет, что в конечном итоге привело к признанию того факта, что эта стоимость изменяется примерно на порядок за 20 лет (рис. 4). Этот факт обозначим как «закон Мура 1995» (ML1995). Данную закономерность иногда также называют законом Рока (Rock's law) в честь Артура Рока, который в 1968 г. помог своими инвестициями основать корпорацию «Intel».

Примерно такими же темпами нарастали стоимость фотолитографического оборудования, объемы выпуска кремниевых пластин для производства микросхем и масштабы полупроводниковой промышленности в целом. Все это при сохранении нынешних темпов развития в ближайшие десятилетия ведет к достижению полупроводниковой промышленностью суммарного уровня производства, равного в стоимостном выражении суммарному уровню производства всех видов продукции всего мирового хозяйства [12]. Экстраполяция наблюдавшихся в середине

90-х годов тенденций приводила к выводу, что произойти это должно было примерно к 2050 году (рис. 5).

Естественно, эта ситуация представлялась несколько абсурдной даже с учетом стремительно нарастающей доли «полупроводникового хозяйства» в мировой экономике. Поэтому единственно возможный вывод из всего этого заключался в том, что примерно в 20-е годы XXI столетия действие закона Мура в его нынешнем виде станет невозможным по сугубо экономическим причинам. Именно на это обратил внимание Гордон Мур в 1995 году [12]. В дальнейшем его наблюдения подтвердили другие известные исследователи [13].

К 2005 году выявились и новые фундаментальные технологические ограничения, которые существенно ограничивали дальнейший экспоненциальный рост характеристик микропроцессоров. В частности, по мере увеличения частоты синхронизации в 32-разрядных микропроцессорах плотность энергии в расчете на единицу площади кристалла с середины 80-х годов возрастала каждые 10 лет примерно на порядок (рис. 6), что приводило к стремительному увеличению нагрева кристаллов и катастрофическому усугублению проблем с теплоотводом. Экстраполяция этих тенденций на ближайшие десятилетия показывала неуклонное приближение температуры нагрева кристаллов к невероятным значениям, характерным, например, для рабочей зоны ядерных реакторов [14].

Ярко проявившаяся к 2005 году закономерность роста плотности энергии в микропроцессорах (десятикратно за десятилетие – целесообразно обозначить это как «закон Мура 2005» или ML2005) привела к коренному пересмотру технической политики в дальнейшем развитии микропроцессорных технологий: рост частоты синхронизации практически прекратился. При этом дальнейший рост производительности обеспечивался за счет тотального распараллеливания вычислительных процессов, в частности, путем наращивания количества вычислительных ядер в процессорах и роста числа процессоров на кристалле (рис. 7).

Одной из особенностей второго поколения законов Мура, как мы видим, является не только и не столько выявление и констатация наблюдаемых темпов экспоненциального развития, но и определение пределов роста. Причем в случае «закона Мура 2005» выявленный предел оказал практически немедленное воздействие на особенности дальнейшего развития микропроцессоров.

С приближением 50-летия закона Мура выявилась еще одна любопытная закономерность, связанная в первую очередь с ростом производительности наиболее мощных компьютерных систем. Благодаря статистике роста производительности 500-т наиболее мощных суперкомпьютеров, собираемой и регулярно публикуемой с 1993 года (список «Тор500»), выявилась закономерность, которая не укладывалась в известные до этого варианты закона Мура: производительность росла практически точно на порядок каждые 4 года. Выяснилось также, что такие темпы экспоненциального роста (ранее не подтвердившиеся применительно к росту стоимости фабрик полупроводников) наблюдаются и в ряде других случаев. Например, этой закономерности подчиняется рост количества вычислительных ядер в суперкомпьютерных системах, снижение стоимости хранения гигабайта информации на внешних носителях, глобальный ежегодный рост производства накопителей на жестких дисках, выраженный в виде их суммарной емкости, количество сетевых прикладных программных интерфейсов и т.д. Данную закономерность целесообразно обозначить как «закон Мура 2015» (ML2015). В отличие от двух других законов Мура второго поколения данная закономерность имеет более общий характер и в большинстве случаев может экстраполироваться на обозримое будущее без каких-либо существенных ограничений.

Таким образом, за 50 лет существования закона Мура выявилось не менее шести его модификаций, характеризующихся различными темпами экспоненциального роста. Такое разнообразие вносит существенную путаницу в использование самого понятия «закон Мура» и настоятельно требует на текущем этапе его переосмысления и обобщения.

### **Обобщенный закон Мура**

В идеале необходимо выявить закономерность, связывающую все известные на сегодня варианты закона Мура в единую систему, описываемую достаточно простыми функциональными зависимостями.

В процессе уточнения реальных ежегодных коэффициентов роста (ЕКР) и различных попыток их систематизации такая зависимость в итоге была выявлена. Она оказалась достаточно простой и изящной, вполне сопоставимой со знаменитой формулой  $E=mc^2$ , связывающей массу и энергию. Добиться этого удалось в процессе упорядочивания всех известных к 2015 году вариантов закона Мура в соответствии с возрастанием темпов экспоненциального роста. При этом максимально уточнялись значения как

ЕКР, так и коэффициентов роста за различные многолетние периоды. В процессе исследований выяснилось, что коэффициенты роста для всех шести вариантов выстраиваются в единую шкалу, в рамках которой, начиная с «самой медленной» закономерности ML1995 с ЕКР, равным примерно 1,122, для каждого последующего «более быстрого» варианта закономерности наблюдается возрастание коэффициентов роста в 1,122 (табл. 1). На основании данного наблюдения была получена следующая зависимость:

$$P_i = P_0 \cdot 2^{L(Y_i - Y_0)/6}, \quad (1)$$

где  $L$  – коэффициент, равный порядковому номеру закономерности при их упорядочивании в соответствии с возрастанием темпов экспоненциального роста (табл. 1);

$Y_0$  – начальный год действия соответствующей закономерности;

$Y_i$  – текущий год действия соответствующей закономерности;

$P_0$  – значение наблюдаемого параметра в начальном году;

$P_i$  – значение наблюдаемого параметра в искомом году.

При этом в качестве наиболее краткого обозначения каждого варианта закона Мура используется обозначение  $L_j$ , где в качестве элемента  $j$  предлагается значение  $L$  для каждого из вариантов. При этом само символьное обозначение  $L$  в соответствии с англоязычными терминами, начинающимися на эту букву, можно интерпретировать и как номер варианта закона (англ. Law), и как уровень (англ. Level) или скорость экспоненциального роста.

Зависимость (1), которую можно рассматривать в качестве обобщенного закона Мура, обладает целым рядом интересных особенностей. В частности, за 6-летний период коэффициенты роста описываются степенями двойки и имеют значение  $2^L$ . Особенно примечательным является тот факт, что за 20-летний период коэффициенты роста имеют значение  $10^L$ . В большинстве случаев действие различных вариантов закона Мура наблюдается на протяжении уже более чем 20-ти лет. Знание этого факта позволяет наиболее просто классифицировать все закономерности роста в соответствии с шестью уровнями или скоростями экспоненциального роста. К настоящему времени проанализированы десятки различных процессов экспоненциального роста в ноотехносфере, некоторые примеры которых приведены далее. Самое удивительное заключается в том, что в большинстве случаев наблюдается довольно точное соответствие одному из 6-ти вариантов закономерности. Но некоторые отклонения от точного соответствия

зависимости (1) вполне естественны и иногда наблюдаются. Поэтому в наиболее общем случае должен учитываться поправочный или уточняющий коэффициент  $k$ , что приводит зависимость к следующему виду:

$$P_i = k \cdot P_0 \cdot 2^{L(Y_i - Y_0)/6}. \quad (2)$$

В большинстве случаев с точностью до нескольких знаков (как правило, 3-х) после запятой  $k = 1$ . Однако в общем случае величина  $k$  может принимать значения в диапазоне от 0,944 до 1,059. При этом, если  $k < 1$ , то соответствующий вариант закономерности целесообразно обозначать как « $Lj-$ », например, « $L4-$ », а если  $k > 1$ , то следует использовать обозначение « $Lj+$ », например, « $L4+$ ». Следует также иметь в виду, что хотя в данной статье все значения и приводятся с точностью не более 3-х десятичных знаков после запятой, в процессе анализа и расчетов использовались значения с 10-ю знаками после запятой. В частности ЕКР для «самого медленного» варианта ML1995 в статье для краткости принимается равным 1,122, но в действительности составляет 1,1224620483. Такое же значение имеет и «коэффициент ускорения» при переходе от одного варианта закономерности к следующей.

Некоторые из вариантов закона Мура, представленные в таблице 1, имеют свои специфические особенности. Например, зависимость  $L4$  при рассмотрении роста показателей год за годом практически полностью соответствует ряду Фибоначчи, а зависимость  $L5$  каждые 2 года и зависимость  $L1$  каждые 10 лет дают коэффициент роста, близкий к значению числа  $\pi$ .

Еще одним удивительным фактом является то, что в современной ноотехносфере абсолютное большинство процессов роста достаточно точно вписывается в диапазон из 6-ти рассмотренных вариантов. Однако в ряде случаев процессы экспоненциального роста в техносфере или в природе могут по своим параметрам выходить далеко за пределы, характерные для ноотехносферы. В случае более медленных процессов целесообразно использовать обозначение « $L4--$ » (при этом  $k < 0,944$  или  $k \ll 0,944$ ), а в случае существенно более быстрых – « $L6++$ » (при этом  $k > 1,059$  или  $k \gg 1,059$ ).

Следует также иметь в виду, что экспоненциальный рост различных показателей имеет своеобразное зеркальное отражение в таком же экспоненциальном снижении ряда других показателей, например, стоимости, энергопотребления и т.п. В этом случае зависимости (1) и (2) приобретают, соответственно, вид (3) и (4):

$$P_i = P_0 / \left( 2^{L(Y_i - Y_0)/6} \right), \quad (3)$$

$$P_i = k \cdot P_0 / \left( 2^{L(Y_i - Y_0)/6} \right). \quad (4)$$

Пример такого зеркального отражения (но с разной скоростью изменений) представлен на рисунке 9.

### Примеры проявлений закона

Стремительное развитие ноотехносферы началось после завершения второй мировой войны и появления первых электронных цифровых вычислительных машин. Поэтому в большинстве случаев  $Y_0 > 1945$ . Но в каждом конкретном случае год начала действия той или иной закономерности определяется индивидуально. Причем далеко не всегда начало проявления той или иной закономерности совпадает с годом выявления соответствующего варианта закона Мура. Более того, применение обозначений вида  $L1, \dots, L6$  по сравнению с обозначениями, содержащими год выявления закономерности, является в большинстве случаев предпочтительным еще и потому, что, во-первых, закономерности, как правило, начинают проявляться задолго до того, как исследователи обращают на них внимание, а, во-вторых, для впервые выявленных закономерностей в дальнейшем находят самые разные аналоги, начинающие проявляться на самых разных этапах развития ноотехносферы. В частности, большинство действующих в настоящее время закономерностей в области развития современных компьютерных технологий актуализировалось с начала 90-х годов (рис. 10).

На рисунках 11 – 32 представлены некоторые характерные примеры из множества проанализированных элементов информационно-компьютерной инфраструктуры, свидетельствующие, что практически все исследованные экспоненциальные изменения достаточно точно соответствуют одной из 6-ти закономерностей обобщенного закона Мура.

### Заключение

Для большинства представленных в работе закономерностей были определены примерные даты начала их действия. Для некоторых закономерностей известны и приблизительные даты завершения их действия (или уже состоявшегося или предполагаемого). Но в целом, с учетом того, что в обозримом будущем процесс развития ноотехносферы будет продолжаться примерно с той же интенсивностью, что и в настоящее время, можно утверждать, что выявленная система закономерностей будет обладать достаточными прогностическими свойствами еще на много десятилетий вперед.

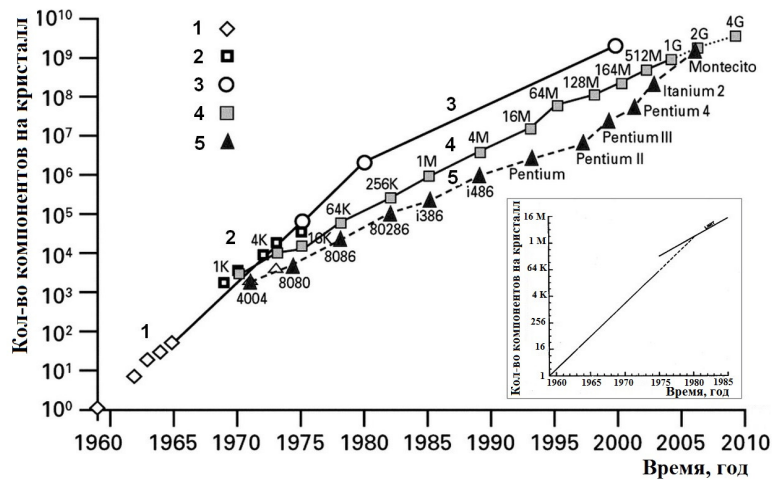


Рисунок 1. – Ожидаемый и реальный рост степени интеграции [11]:

1 – данные первой половины 60-х годов, на основании которых был сформулирован самый первый вариант закона Мура; 2 – реальные показатели степени интеграции микросхем памяти на рубеже 60-х и 70-х годов; 3 – прогноз Гордона Мура, сделанный в 1975 году; 4 – реальный рост степени интеграции микросхем памяти; 5 – реальный рост степени интеграции микропроцессоров. На врезке справа внизу – рисунок, которым завершается доклад Г. Мура в 1975 году [9], констатирующий, что десятилетие начального оптимизма «закона Мура 1965» (ежегодное удвоение) закончилось и начинается период реалистичного «закона Мура 1975» (удвоение каждые 2 года)

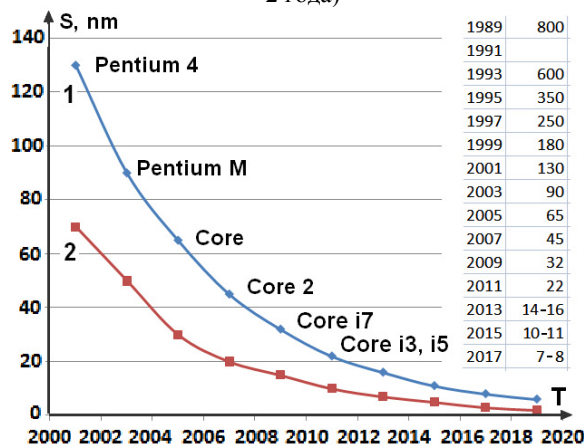


Рисунок 2. – «Закон Мура 1975» в действии:

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, кривая 2 – экспериментальные образцы

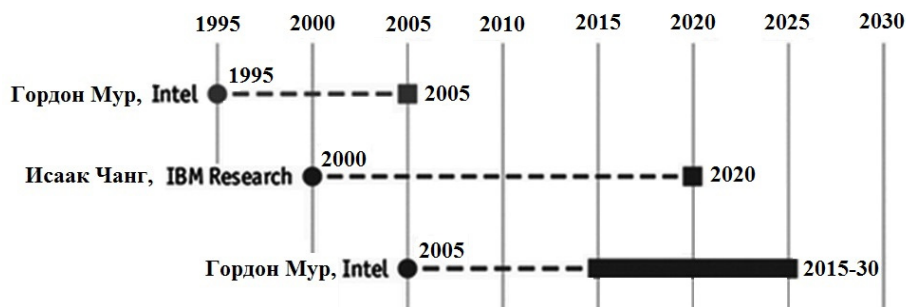


Рисунок 3. – Наиболее популярные прогнозы предстоящего срока действия закона Мура: круглым значком обозначен год публикации соответствующего прогноза, прямоугольником – прогнозируемый период завершения действия закона

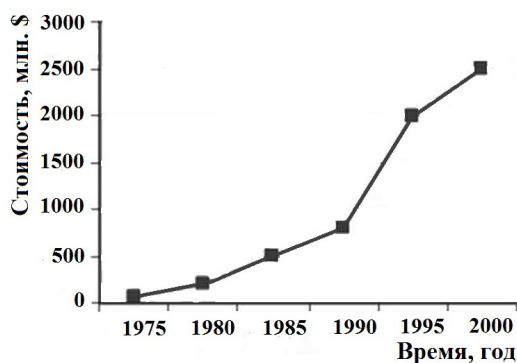


Рисунок 4. – Рост стоимости фабрик по производству микросхем в соответствии с «законом Мура 1995»: примерно на порядок за 20 лет

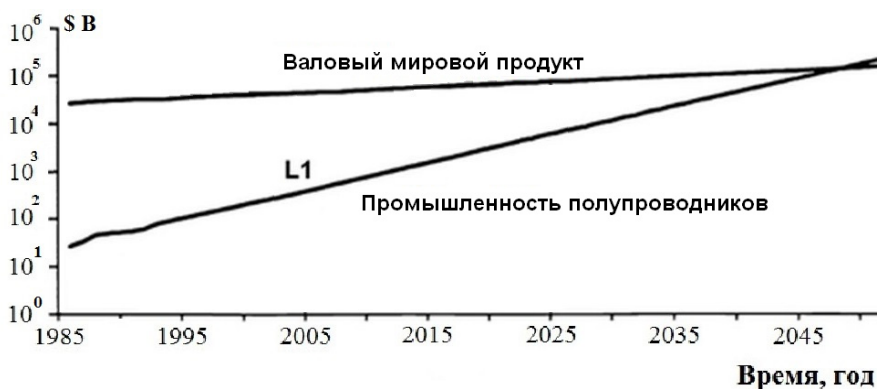


Рисунок 5. – Рост промышленности полупроводников на фоне роста суммарного уровня производства всех видов всего мирового хозяйства; источник информации: IMF, WSTS [12]

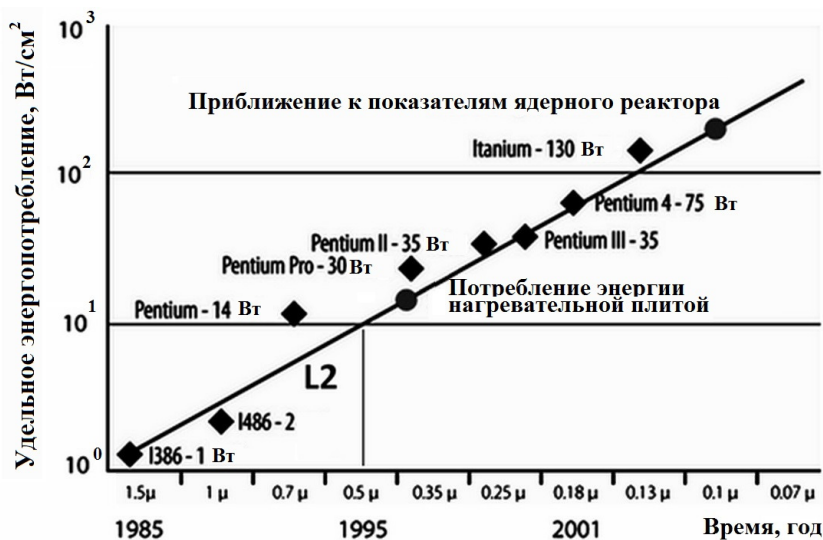


Рисунок 6 – Рост удельного потребления энергии в микросхемах неуклонно приближается к показателям рабочей зоны ядерного реактора; источник [14]

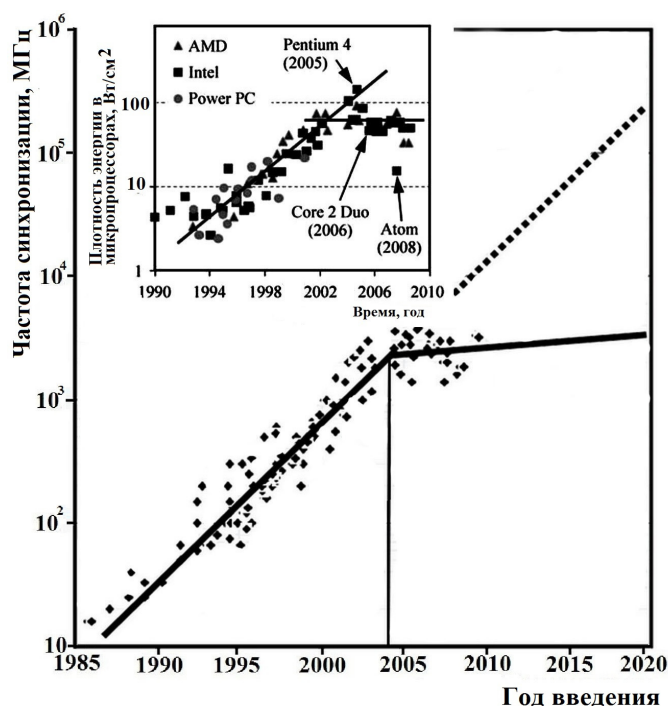


Рисунок 7. – Экспоненциальный рост частоты синхронизации микропроцессоров практически прекратился к 2005 году, что позволило предотвратить катастрофическое нарастание плотности энергии в микропроцессорах (рисунок-врезка слева сверху)

Таблица 1. – Основные закономерности роста для шести вариантов закона Мура

Законо- мерность	Описание закономерности	Обозна- чение	L	Коэффициент роста за указанный период (в годах)		
				1	6	20
ML1995	Рост в 10 раз каждые 20 лет	<b>L1</b>	1	1,122	2	<b>10</b>
ML2005	Рост в 10 раз каждые 10 лет	<b>L2</b>	2	1,260	4	<b>102</b>
ML1975	Закон Мура 1975: удвоение за 2 года	<b>L3</b>	3	1,414	8	<b>1 024</b>
ML1985	Закон Мура 1985: удвоение за 1,5 года (ряд Фибоначчи)	<b>L4</b>	4	1,587	16	<b>10 321</b>
ML2015	Рост в 10 раз каждые 4 года	<b>L5</b>	5	1,782	32	<b>104 032</b>
ML1965	Закон Мура 1965: ежегодное удвоение	<b>L6</b>	6	2	64	<b>1 048 576</b>

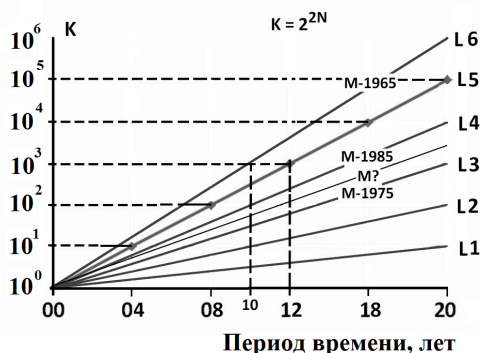


Рисунок 8. – Семейство базовых закономерностей экспоненциального роста L1 – L6, определяющих системодинамику ноотехносферы в пределах 20-летнего периода. Различные версии закона Мура обозначены как M-1965 (L6), M-1975 (L3) и M-1985 (L4). Гипотеза Мура о существовании закономерности удвоения примерно каждые 20 месяцев, не подтверждаемая фактическими данными, обозначена как «M?»



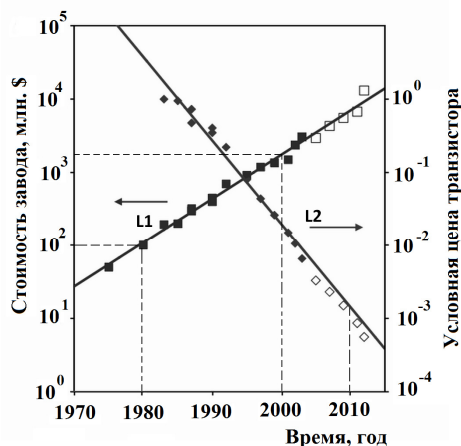


Рисунок 9. – Экспоненциальный рост стоимости все более современных заводов по производству полупроводников сопровождается аналогичным падением условной цены одного транзистора [15]

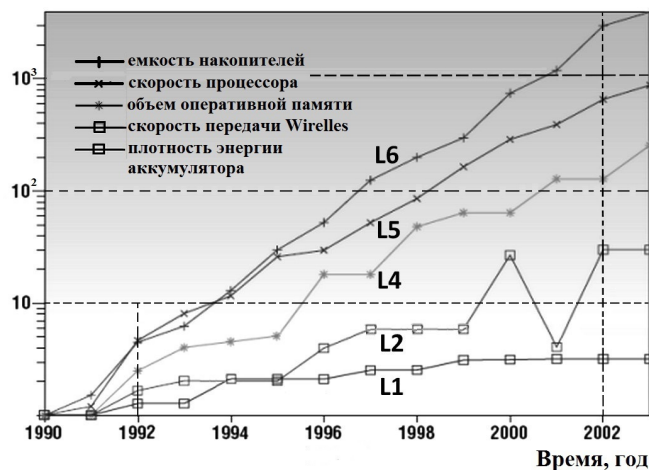


Рисунок 10. – Базовые закономерности L1 – L6 позволяют с достаточной точностью представить динамику роста самых различных характеристик современных компьютерных систем: L1 – рост плотности энергии батарей питания, L2 – рост скорости беспроводной связи, L4 – рост объемов оперативной памяти, L5 – рост скорости процессоров, L6 – рост емкости накопителей на жестких дисках (все данные представлены в относительных единицах по сравнению с уровнем 1990 года)

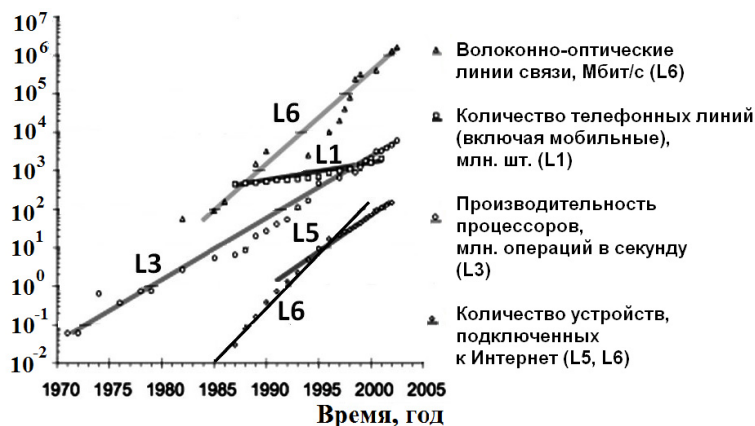


Рисунок 11. – Экспоненциальное развитие ноотехносферы сопровождается самыми различными процессами экспоненциального роста: L1 – рост количества телефонных линий (в миллионах, включая мобильную связь); L3 – рост производительности процессоров (в MIPS– миллионах операций в секунду); L6 – L5 – рост количества компьютеров, подключенных к Интернет (в миллионах); L6 – рост пропускной способности волоконно-оптических (Photonic) линий (Мбит/с); источник: ITU, Intel

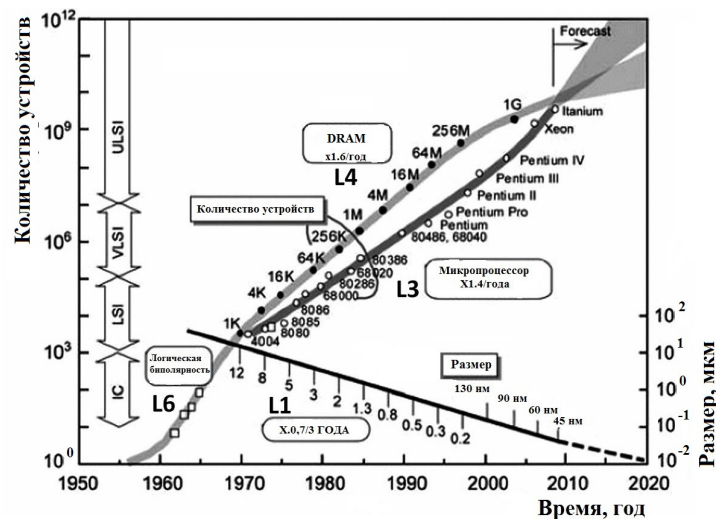


Рисунок 12. – Основные закономерности, определяющие динамику развития современных компьютерных технологий (по данным работы [16]): L1 – снижение проектных норм (правая шкала), L3 – рост количества активных элементов (транзисторов) в микропроцессорах в соответствии с законом Мура 1975 (левая шкала), L4 – рост объемов микросхем динамической оперативной памяти (DRAM) в соответствии с законом Мура 1978, L6 – начальный период быстрого роста степени интеграции микросхем памяти в соответствии с законом Мура 1965

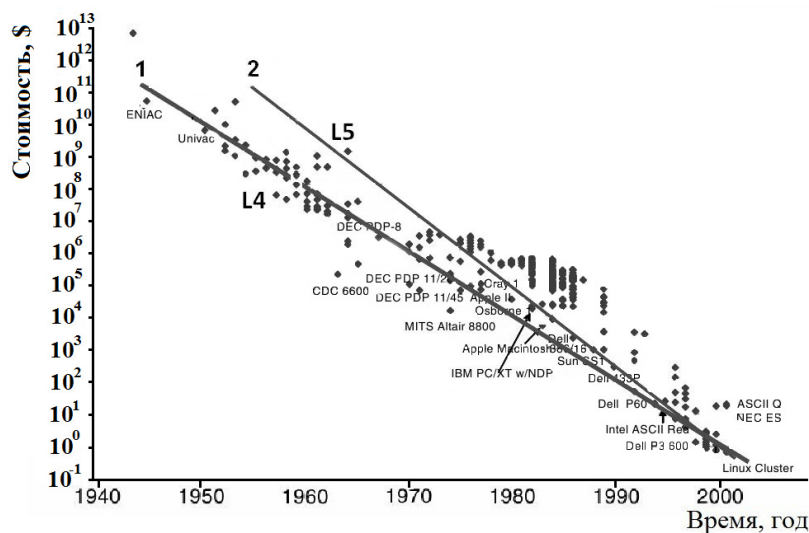


Рисунок 13. – Снижение удельной стоимости (в долларах на один «нормализованный» MIPS – миллион операций в секунду): с учетом статистики, накопленной с 40-х годов, соответствует закономерности L4 (прямая 1), но если не пренебрегать инфляцией доллара (почти на порядок) за более чем 50 лет, то получаем закономерность L5 (прямая 2)

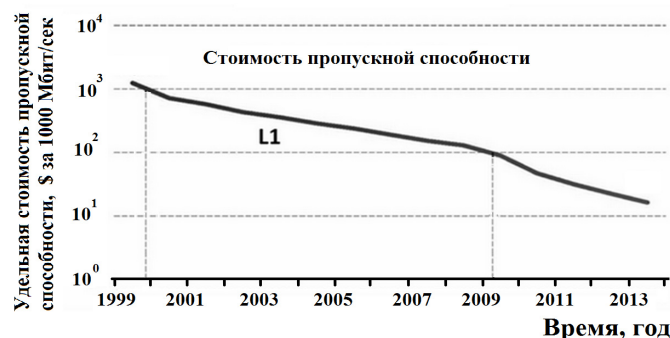


Рисунок 14. – Снижение удельной стоимости пропускной способности глобальной сети (в единицах стоимости за 1000 Мбит в секунду) в период с 1999 года (L=1, Y0=1999, P0=1000 \$); источник [17]

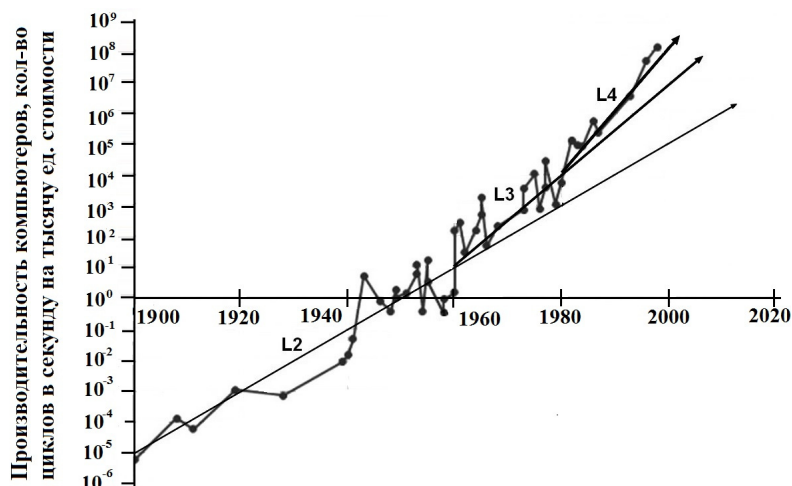


Рисунок 15. – Ускорение экспоненциального роста производительности компьютеров (в количестве циклов в секунду на тысячу единиц стоимости): L2 – относительно медленный рост до начала 1960-х годов; L3 – ускорение роста с началом эпохи интегральных схем в 1960-е годы; L4 – очередное ускорение роста с началом эпохи микропроцессоров 1980-е годы

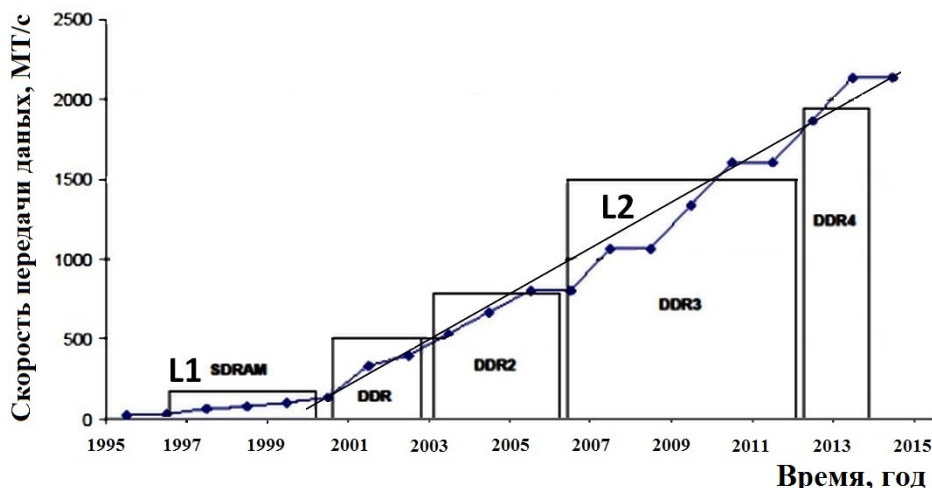


Рисунок 16. – Рост скорости обмена данными с подсистемой динамической оперативной памяти в современных компьютерных системах (МТ/с – мегатранзакций в секунду): до 2000 года наблюдался относительно медленный экспоненциальный рост (L1); после 2000 года экспоненциальный рост соответствует закономерности L2



Рисунок 17. – Опережающий рост производительности процессоров (CPU Performance) в соответствии с закономерностью L4 по сравнению с ростом производительности жестких дисков (HDD Performance) в соответствии с закономерностью L1 (показан относительный рост по сравнению с уровнем 1988 года, принятым за единицу); источник [17]

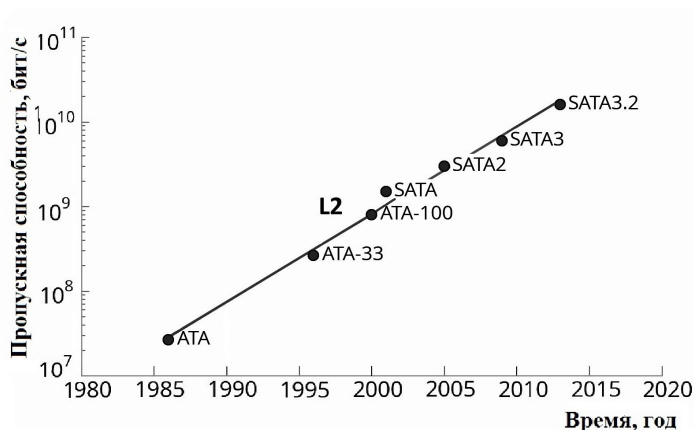


Рисунок 18. – Рост пропускной способности интерфейсов жестких дисков в соответствии с закономерностью L2

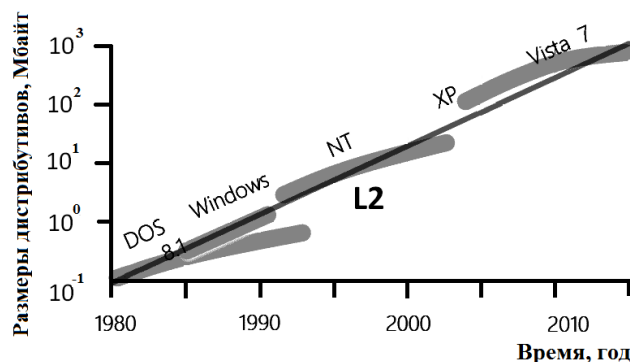


Рисунок 19. – Экспоненциальный рост размеров дистрибутивов операционных систем фирмы Microsoft в соответствии с закономерностью L2 (L=2, Y0=1980, P0=0,1 Мбайт)



Рисунок 20. – Пропорционально экспоненциальному росту объемов программного обеспечения повышается его качество в соответствии с той же закономерностью L2, что в целом позволяет поддерживать надежность программного обеспечения на требуемом уровне

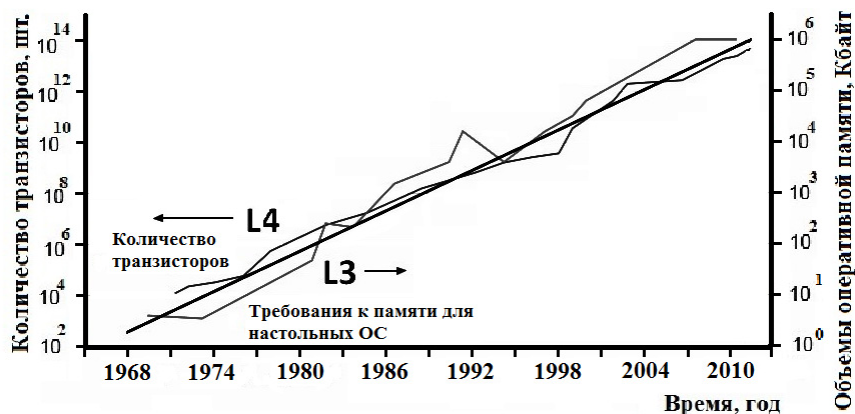


Рисунок 21. – Рост количества транзисторов на кристаллах фирмы Интел (в соответствии с закономерностью L4, левая шкала) происходит опережающими темпами по сравнению с ростом требований к объемам оперативной памяти со стороны операционных систем (L3, правая шкала)

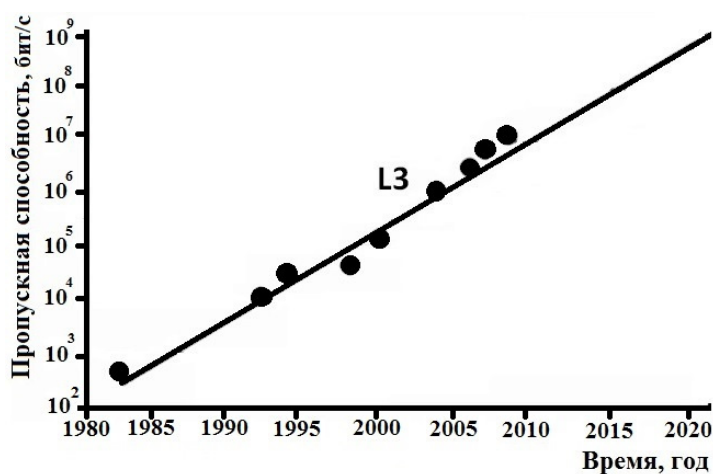


Рисунок 22. – Рост пропускной способности каналов подключения пользователей к Интернет подчиняется закономерности L3, что соответствует так называемому закону Якоба Ниельсона

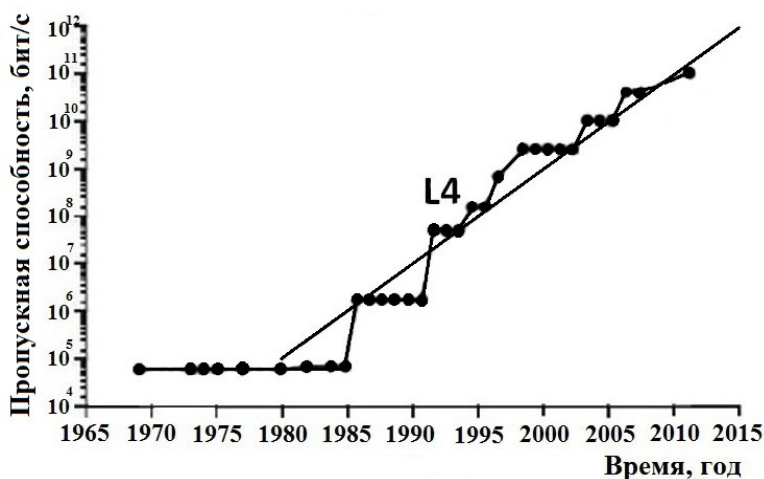


Рисунок 23. – Рост пропускной способности магистральных каналов Интернет с начала 1980-х годов подчиняется закономерности L4, что позволяет обеспечить не только рост пропускной способности каналов подключения пользователей к Интернет (L3), но и рост числа пользователей

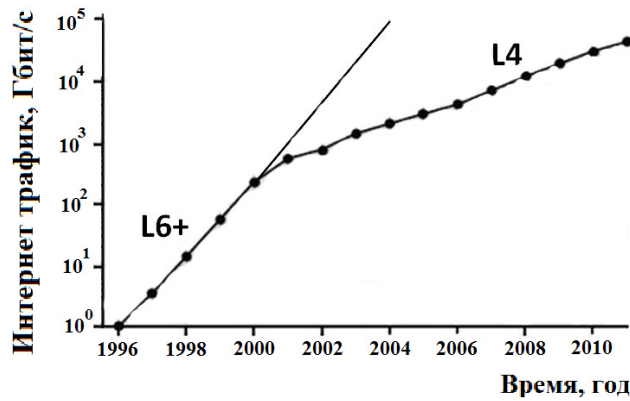


Рисунок 24. – Глобальный рост трафика Интернет до 2000 года несколько превышал темпы, определяемые закономерностью L6, но после 2000 года стал соответствовать темпам роста пропускной способности магистральных каналов Интернет в соответствии с закономерностью L4

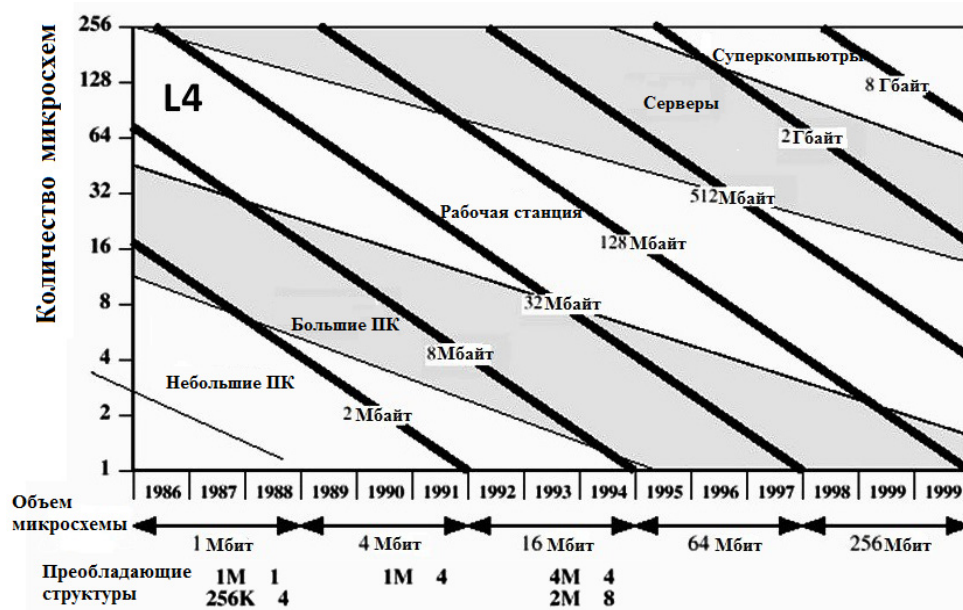


Рисунок 25. – Диаграмма, характеризующая изменения в организации оперативной памяти различных классов компьютеров в процессе роста объемов микросхем памяти в соответствии с закономерностью L4: каждые 3 года объем отдельной микросхемы увеличивается в 4 раза, что позволяет при одном и том же количестве микросхем постоянно увеличивать объем оперативной памяти для каждого класса компьютеров от небольших персональных компьютеров (ПК) до суперкомпьютеров

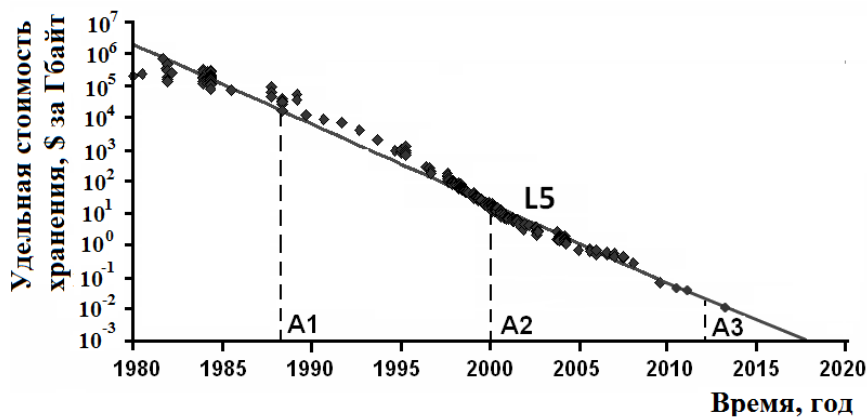


Рисунок 26. – Снижение удельной стоимости хранения (долларов за гигабайт) информации на внешних носителях (жестких дисках) в 1982 – 2020 гг. соответствует закономерности L5



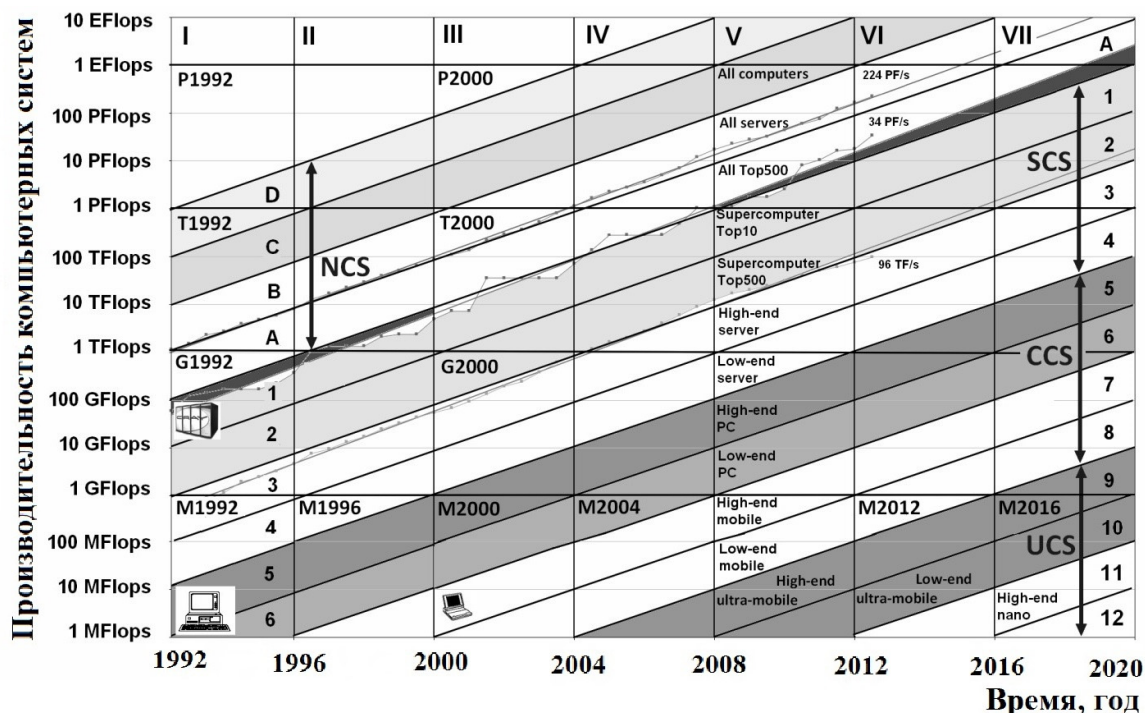


Рисунок 27. – Периодическая система роста производительности (в операциях с плавающей запятой в секунду) различных классов компьютерных систем в период с 1992 года по 2020 в соответствии с закономерностью L5

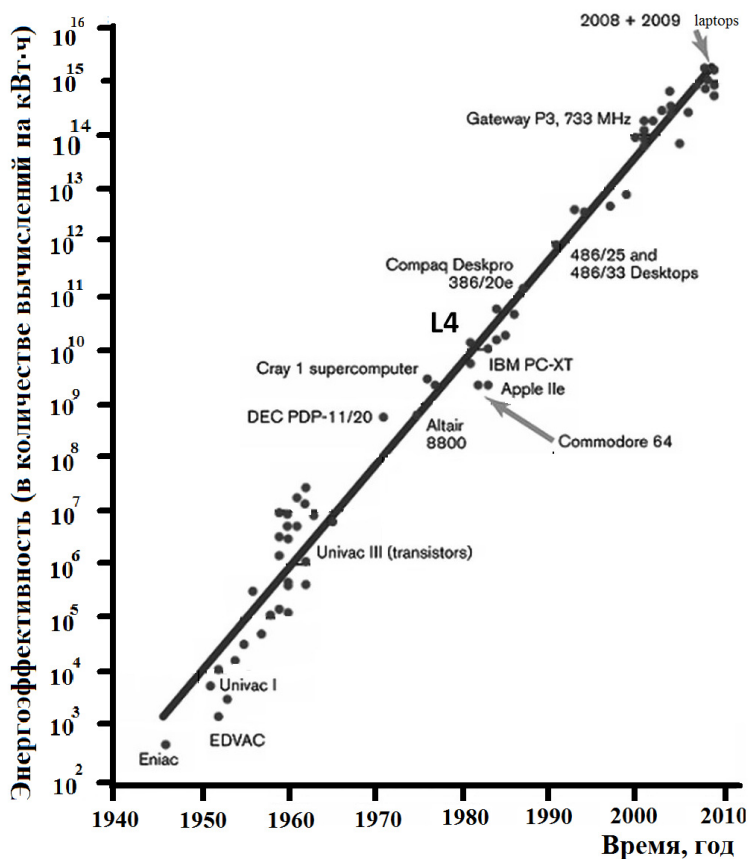


Рисунок 28. – Закон Куми (Коопеу) [18, 19], определяющий рост энергоэффективности, полностью соответствует закономерности L4 ( $L=4$ ,  $Y_0=1945$ ,  $P_0=1000$  кВт·ч)

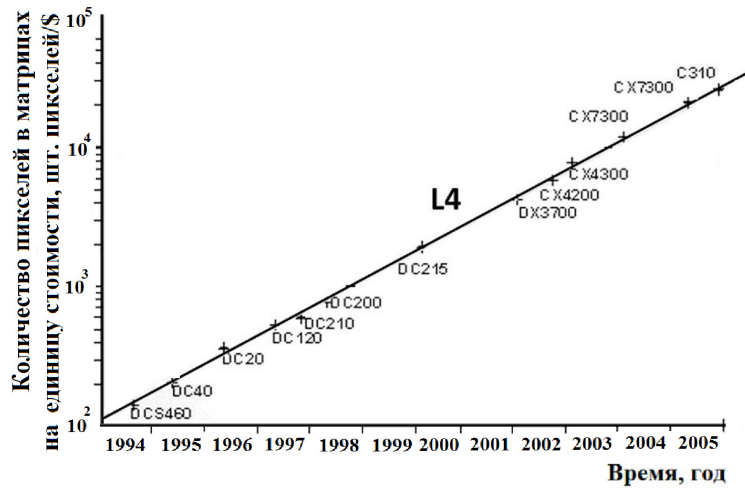


Рисунок 29. – Рост количества пикселей в матрицах фотоаппаратов фирмы Kodak (в расчете на единицу стоимости) также подчиняется закономерности L4

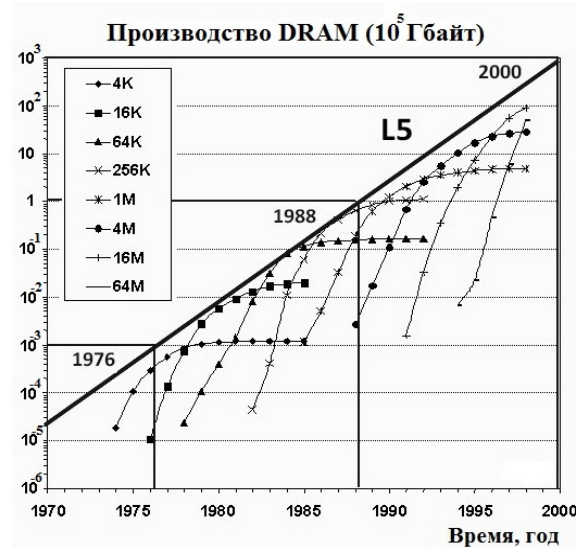


Рисунок 30. – Рост глобального производства динамической оперативной памяти (десятков тысяч Гбайт в год) соответствует закономерности L5; источник: [20]

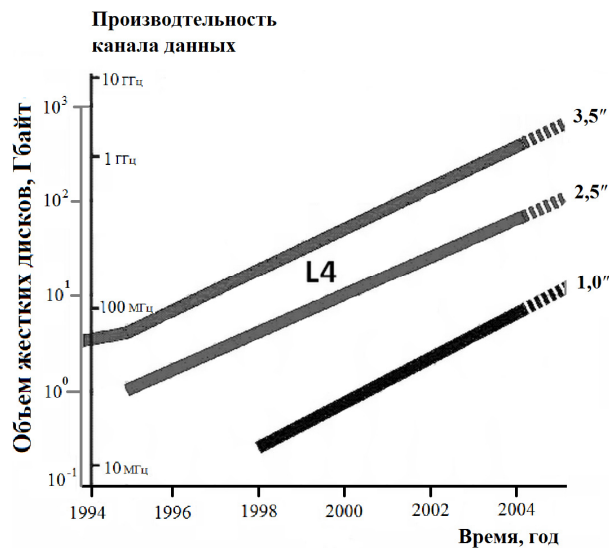


Рисунок 31. – Рост объемов жестких дисков в Гигабайтах для различных формфакторов подчиняется закономерности L4



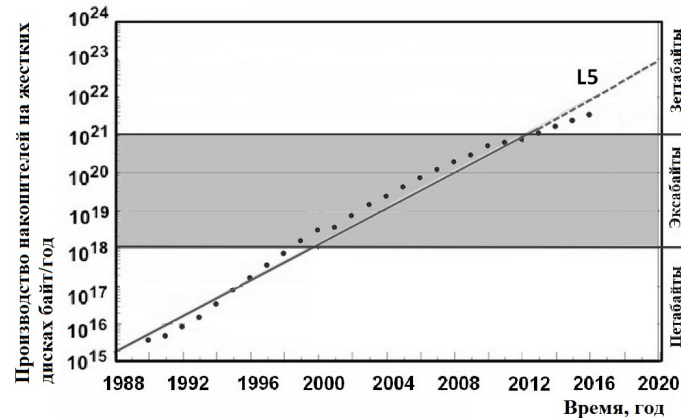


Рисунок 32. – Рост глобального производства накопителей на жестких дисках (байт в год) также соответствует закономерности L5

### Список литературы

1. Аноприенко А.Я. Будущее компьютерных технологий в контексте технической и кодологической эволюции // Вестник Инженерной Академии Украины. Теоретический и научно-практический журнал Инженерной Академии Украины. Выпуск 3 – 4, 2011. – С. 108 – 113.
2. Аноприенко А.Я. Ноокомпьютинг и будущее информационно-компьютерной инфраструктуры // Материалы Международного научного конгресса по развитию информационно-коммуникационных технологий и развития информационного общества в Украине. К., 2011. – С. 12 – 13.
3. Аноприенко А.Я. Компьютерные науки и технологии: следующие 50 лет // Материалы II всеукраинской научно-технической конференции «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС и КМ2011)». Донецк: ДонНТУ, 2011. Т. 1. – С. 7 – 22.
4. Аноприенко А.Я. Пределы информатики // «Информация и рынок». Теоретический и научно-практический журнал. – 1993. – № 2 – 3. – С. 10 – 14.
5. Аверин Г.В. Об основаниях системодинамики // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. Донецк: ДонНТУ. – 2011, № 1. – С. 6 – 52.
6. Аверин Г.В. О фундаментальных основах системодинамики: опытные факты, методология, приложения // Интеллектуальный анализ информации, ИАИ-2011. – К: НТУ «КПИ», 2011, – С. 152 – 169.
7. Хряпченкова И.Н. Человек в искусственной среде: стратегия социальной жизнедеятельности: автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра филос. наук. – Нижний Новгород, 2004. – 38 с.
8. Moore G.E. Cramming more components onto integrated circuits / Electronics, vol. 38, no. 8, Apr. 1965. – pp. 114 – 117.
9. Moore G.E. Progress in digital integrated electronics / Proc. of the International Electron Devices Meeting (IEDM'75), vol. 21, 1975. – pp. 11 – 13.
10. Mead C. and Conway L. Introduction to VLSI Systems. – Palo Alto: California, 1978. – 258 p.
11. Moore G.E. Moore's Law at 40 // Understanding Moore's law: four decades of innovation. – Philadelphia: Chemical Heritage Foundation, 2006. – pp. 67 – 84.
12. Moore G.E. Lithography and the Future of Moore's Law / SPIE, Vol. 2438, 1995. – pp. 2 – 17.
13. Rupp K. and Selberherr S. The Economic Limit to Moore's Law // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing Journal, vol. 24, no. 1, February 2011. – 4 p.
14. Feng W. The Importance of Being Low Power in High Performance Computing // Cyberinfrastructure Technology Watch Quarterly, vol. 1, no. 3, August 2005. – pp. 12 – 20.
15. Мурки Т. Закон Мура против нанометров. // iXBT.com: Сайт о высоких технологиях, 2011. – Электр. ресурс. URL: <http://www.ixbt.com/cpu/microelectronics.shtml> (10.07.14).
16. Sunami H. Dimension Increase in Metal-Oxide-Semiconductor Memories and Transistors // Advances in Solid State Circuit Technologies. – InTech, 2010. – 446 p.
17. Was Moore's Law Inevitable? // The Technium, 2009. – Электр. ресурс. URL: <http://kk.org/thetechnium/> (17.07.14).
18. Koomey J.G., Berard S., Sanchez M. and Won H.

- Assessing trends in the electrical efficiency of computation over time. Final report to Microsoft Corporation and Intel Corporation. – Oakland: Analytics Press, 2009. – 47 p.
19. Koomey J.G., Berard S., Sanchez M. and Won H. Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing // IEEE Annals of the History of Computing, vol. 33, Issue 3, July 2011. – pp. 46 – 54.
  20. Victor N.M. and Ausubel J.H. DRAMs as model organisms for study of technological evolution // Technological Forecasting and Social Change, 2002, vol. 69, no. 3. – pp. 243 – 262.
- References (transliteration)**
1. Anoprienko A.J. Budushhee komp'juternyh tehnologij v kontekste tehničkoj i kodologičeskoj jevoljucii [The future of computer technology in the context of technical and code-logical evolution] // Vestnik Inženernoj Akademii Ukrainy. Teoreticheskij i nauchno-praktičeskij žurnal Inženernoj Akademii Ukrainy. Issue 3 – 4, 2011. – pp. 108 – 113.
  2. Anoprienko A.J. Nookomp'jutering i budushhee informacionno-komp'juternoj infrastruktury [Noocomputing and the future of information and computing infrastructure] // Materialy Mezhduna-rodnoho nauchnoho kongressa po razvitiju informacionno-kommunikacionnyh tehnologij i razvitija informacionnoho obshhestva v Ukraine. K., 2011. – pp. 12 – 13.
  3. Anoprienko A.J. Komp'juternye nauki i tehnologii: sledujushhie 50 let [Computer Science and Technology: the next 50 years] // Materialy II vseukrainskoj nauchno-tehničkoj konferencii “Informacionnye upravljajushhie sistemy i komp'juternyj monitoring (IUS i KM2011)”. Doneck: DonNTU, 2011. Vol. 1. – pp. 7 – 22.
  4. Anoprienko A.J. Predely informatiki [Limits of Computer Science] // “Informacija i rynek” Teoreticheskij i nauchno-praktičeskij žurnal. – 1993. – no. 2 – 3. – pp. 10 – 14.
  5. Averin G.V. Ob osnovanijah sistemodinamiki [The grounds of system dynamics] // Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve. Doneck: DonNTU. – 2011, no. 1. pp. 6 – 52.
  6. Averin G.V. O fundamental'nyh osnovah sistemodinamiki: opytne fakty, metodologija, prilozhenija [About fundamentals sistemodinamiki: experimental facts, methodology, application] // Intellektual'nyj analiz informacii, IAI-2011. – K: NTU “KPI”, 2011, – pp. 152 – 169.
  7. Hrijapčenkova I.N. Chelovek v iskusstvennoj srede: strategija social'noj zhiznedejatel'nosti [A man in an artificial environment: strategy of social activity]: avtoref. dis. na soisk. učen. step. d-ra filoz. Nauk – Nizhnij Novgorod, 2004. – 38 p.
  8. Moore G.E. Cramming more components onto integrated circuits / Electronics, vol. 38, no. 8, Apr. 1965. – pp. 114 – 117.
  9. Moore G.E. Progress in digital integrated electronics / Proc. of the International Electron Devices Meeting (IEDM'75), vol. 21, 1975. – pp. 11 – 13.
  10. Mead C. and Conway L. Introduction to VLSI Systems. – Palo Alto: California, 1978. – 258 p.
  11. Moore G.E. Moore's Law at 40 // Understanding Moore's law: four decades of innovation. – Philadelphia: Chemical Heritage Foundation, 2006. – pp. 67 – 84.
  12. Moore G.E. Lithography and the Future of Moore's Law / SPIE, Vol. 2438, 1995. – pp. 2 – 17.
  13. Rupp K. and Selberherr S. The Economic Limit to Moore's Law // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing Journal, vol. 24, no. 1, February 2011. – 4 p.
  14. Feng W. The Importance of Being Low Power in High Performance Computing // Cyberinfrastructure Technology Watch Quarterly, vol. 1, no. 3, August 2005. – pp. 12 – 20.
  15. Murki T. Zakon Mura protiv nanometrov [Moore's law against nanometers] // iXBT.com: Sajt o vysokih tehnologijah, 2011. – Elektr. resurs. URL: <http://www.ixbt.com/cpu/microelectronics.shtml> (10.07.14).
  16. Sunami H. Dimension Increase in Metal-Oxide-Semiconductor Memories and Transistors // Advances in Solid State Circuit Technologies. – InTech, 2010. – 446 p.
  17. Was Moore's Law Inevitable? // The Technium, 2009. – Электр. ресурс. URL: <http://kk.org/thetechnium/> (17.07.14).
  18. Koomey J.G., Berard S., Sanchez M. and Won H. Assessing trends in the electrical efficiency of computation over time. Final report to Microsoft Corporation and Intel Corporation. – Oakland: Analytics Press, 2009. – 47 p.
  19. Koomey J.G., Berard S., Sanchez M. and Won H. Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing // IEEE Annals of the History of Computing, vol. 33, Issue 3, July 2011. – pp. 46 – 54.
  20. Victor N.M. and Ausubel J.H. DRAMs as model organisms for study of technological evolution // Technological Forecasting and Social Change, 2002, vol. 69, no. 3. – pp. 243 – 262.

**Аноприєнко О.Я. «Системодинаміка ноотехносфери: основні закономірності».** Системодинаміку ноотехносфери можна визначити як науку про закономірності процесів розвитку та зміни у часі глобальної інформаційно-комп'ютерної інфраструктури, а також апаратно-програмних та інформаційних ресурсів і систем, які входять до її складу. У роботі систематизовано й узагальнено емпіричні закономірності, які характеризують системодинаміку ноотехносфери, і запропоновано залежності, що дозволяють в найбільш стислій формі представити основну сукупність відомих на сьогодні в даній області закономірностей. Отримані залежності запропоновано назвати узагальненим законом Мура. Показано, що різноманіття основних закономірностей, які характеризують закон Мура, може бути представлено у вигляді узагальненої залежності, яка характеризує зв'язок спостережуваних параметрів ноотехносфери з часом. Передбачається, що виявлена система закономірностей має прогностичні властивості необхідної точності на довгострокову перспективу.

**Ключові слова:** системодинаміка, ноотехносфера, експоненціальне зростання, закономірності розвитку комп'ютерних систем, узагальнений закон Мура.

**Anopriyenko A.Y. "System dynamics of nootehnosphere: basic laws".** System dynamics of nootehnosphere can be defined as the science of the laws of protsessovrazvitiya and changes over time of the global information and computer infrastructure as well as hardware, software, and information systems and subsystems. Known empirical laws are summarized as generalized Moore's Law. In this paper and summarized empirical regularities that characterize sistemodinamiku nootehnosfery and offered depending allowing in the most concise and succinct provide basic set of presently known laws in this area. These depending asked to name a generalized Moore's Law. It is shown that the diversity of the basic laws describing Moore's law can be written as generalized dependence characterizing the relationship observed parameters nootehnosfery with time. It is assumed that the system of laws has identified prognostic features the required accuracy for the long term.

**Keywords:** systemdynamics, nootehnosphere, exponential growth, development of computer systems, a generalization of Moore's Law.

Стаття поступила в редакцію 22.08.2014  
Рекомендована к публикации д-ром техн. наук Г.В. Авериным