

УДК 008.2

А.Я. Аноприенко /к.т.н./
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОБЩЕННЫЙ ЗАКОН МУРА

Систематизированы и обобщены эмпирические наблюдения, которые характеризуют динамику экспоненциального развития компьютерных технологий. Показано, что многообразие основных закономерностей, в том числе характеризующих закон Мура, может быть представлено в виде ряда обобщенных относительно простых зависимостей. Предполагается, что выявленная система закономерностей обладает достаточными прогностическими свойствами необходимой точности на краткосрочную и долгосрочную перспективу.

Ключевые слова: закон Мура, закономерности развития компьютерных систем, технологическое прогнозирование.

«Статистика не должна состоять в одном только заполнении ведомостей размерами с двухспальную простыню никому не нужными числами, а в сведении этих чисел на четвертушку бумаги и в их сопоставлении между собою, чтобы по ним не только видеть, что было, но и предвидеть, что будет...»
А.Н. Крылов [1, с. 196]

Систематизация и обобщение всех известных на сегодня эмпирических закономерностей, характеризующих динамику развития компьютерных технологий, дает возможность вывести зависимости, названные обобщенным законом Мура. Получение данных зависимостей может рассматриваться как один из важнейших этапов в ведущихся с начала 90-х годов исследованиях автора по динамике и особенностям развития

компьютерных технологий [2-15].

Известные закономерности развития техники и технологий

Развернувшаяся с рубежа XVIII и XIX веков промышленная революция, накатываясь волна за волной, особой интенсивности достигла на рубеже тысячелетий – фактически в процессе перехода цивилизации в стадию материализации

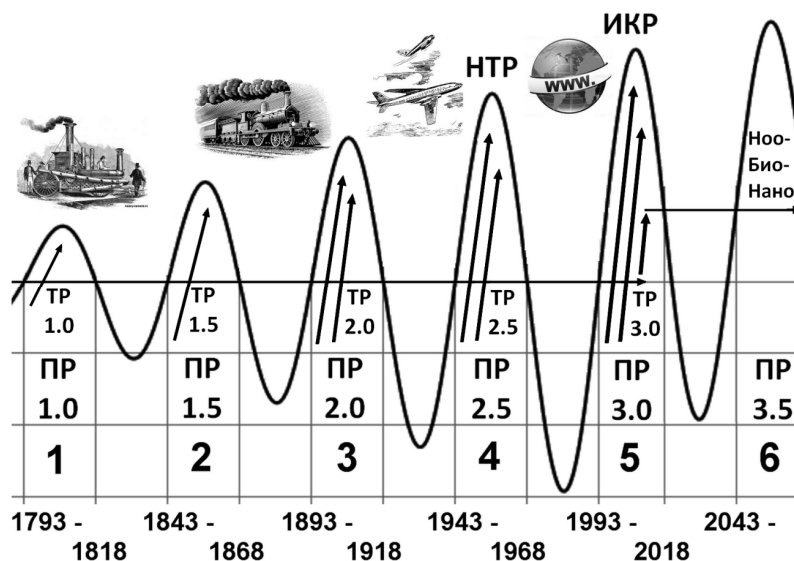


Рис. 1. Концептуальное представление влияния волн Кондратьева на динамику технологического развития: ПР – промышленная революция; ТР – технологическое развитие; НТР – научно-техническая революция; ИКР – информационно-компьютерная революция

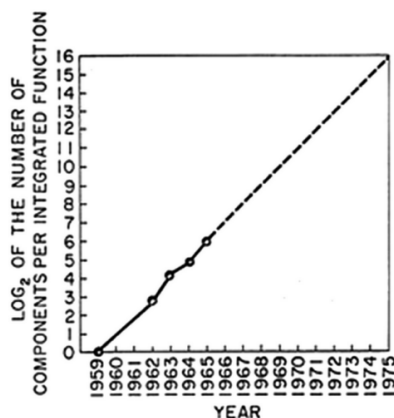


Рис. 2. Первоначальный закон Мура, сформулированный им в 1965 г.: иллюстрации из исторической публикации в журнале «Электроника» [19]

идеи ноосферы В.И. Вернадского [16]. Пятая волна Кондратьева (и, по сути, третья промышленная революция) характеризовалась особенно стремительным и продолжительным ростом целой совокупности компьютерных технологий (рис. 1).

Одним из отражений этого бурного роста явилось появление множества именных (названных по именам их авторов и/или исследователей) эмпирических законов, характеризующих развитие различных технологий эпохи информационно-компьютерной революции. Краткий (и весьма неполный) их перечень включает, в частности, следующие закономерности.

Закон Мура (Moore's Law) – эмпирическое

наблюдение, изначально (в 1965 г.) сделанное Гордоном Муром, согласно которому количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца. В последующем появились и другие интерпретации данного закона.

Закон Рока (Rock's law) или второй закон Мура, сформулированный в середине 90-х годов Юджином Мейераном и утверждающий, что стоимость фабрик по производству полупроводников аналогично закону Мура удваивается примерно каждые 4 года.

Закон Гроша (Grosch's Law), предполагающий, что производительность компьютеров увеличивается как квадрат их стоимости.

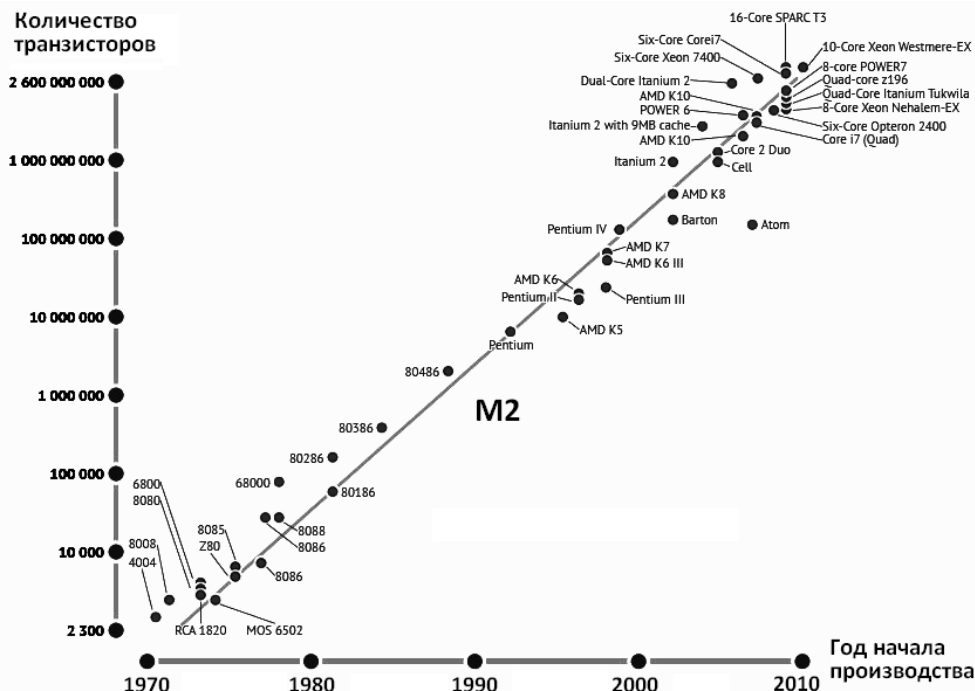


Рис. 3. Основная современная интерпретация закона Мура: количество транзисторов в микропроцессорах увеличивается в 2 раза каждые 1,5 года или на 2 порядка каждые 10 лет как за счет увеличения плотности размещения элементов, так и за счет увеличения размеров кристаллов

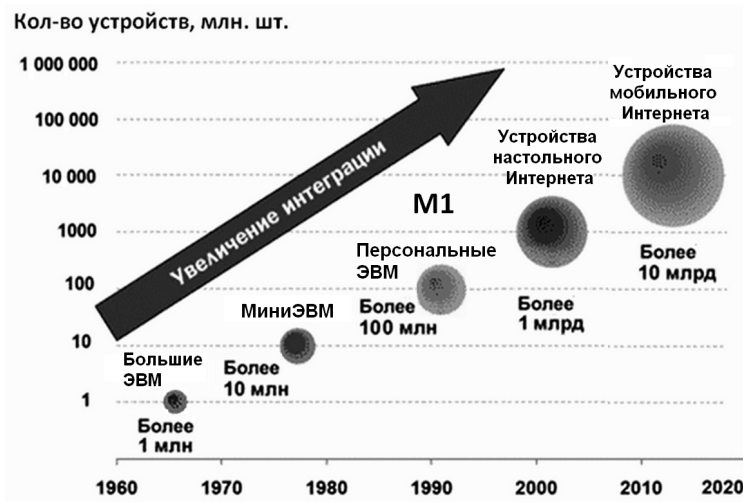


Рис. 4. Рост количества программируемых устройств в мире: примерно на порядок каждые 10 лет

Закон Куми (Koomey's Law) – своеобразный «экологический» вариант закона Мура, гласящий, что фундаментальной особенностью развития вычислительной техники является рост энергоэффективности (т.е. среднего количества вычислений на единицу электроэнергии), возрастающий примерно в два раза каждые полтора года.

Закон Крайдера (Kryder's Law) – вариант закона Мура для дисковых накопителей, предложенный вице-президентом по научным разработкам компании Seagate в 2005 г. и констатирующий, что плотность записи на магнитные диски удваивается приблизительно каждые восемнадцать месяцев. Это также означает, что стоимость хранения информации снижается вдвое каждые восемнадцать месяцев.

Закон Бутгера (Butter's Law) – количество данных, передаваемых через волоконно-оптические линии связи, удваивается каждые 9 меся-

цев.

Закон Купера (Cooper's Law) – количество мобильных пользователей удваивается каждые 30 месяцев.

Закон Меткалфа (Metcalf's Law) – полезность сети пропорциональна квадрату численности пользователей этой сети.

Закон Нильсена (Nielsen's Law) – пропускная способность, доступная пользователям Интернета растет на 50 % ежегодно или удваивается каждый 21 месяц.

Практически во всех перечисленных закономерностях речь идет об экспоненциальном росте соответствующих показателей. Для сравнения: на предыдущих этапах промышленной революции в основном констатировались и анализировались различные S-образные кривые роста, которые лишь на относительно недолгих ранних стадиях развития могли интерпретироваться как экспоненциальные.

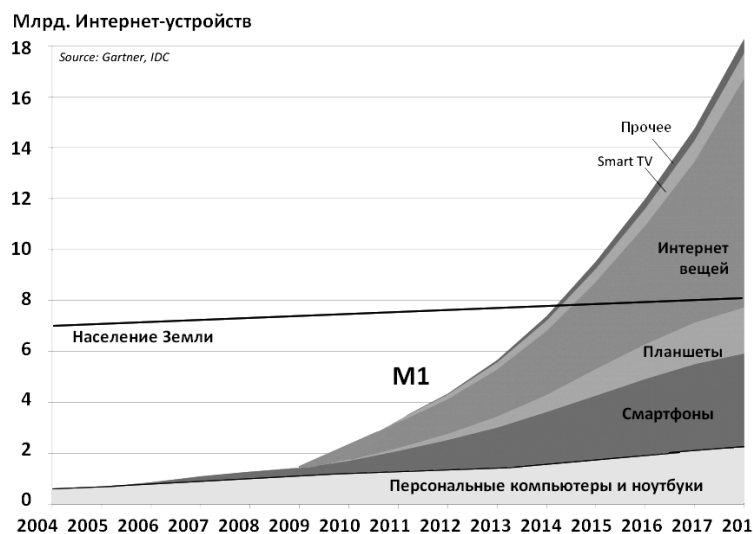


Рис. 5. Всемирный рост количества программируемых устройств, подключенных к Интернету: с 2010 г. заметную роль начинают играть встроенные устройства («Интернет вещей»), а примерно с 2015 г. количество устройств начинает превышать население Земли

Табл. 1. Основные закономерности роста для трех вариантов закона Мура

Закономерность	Описание закономерности	Обозначение	M	Коэффициенты роста за 1 год и 10 лет	
				1 (ЕКР)	10 (10 ^M)
«Медленный закон Мура»	Рост в 10 раз каждые 10 лет	M1	1	1,26	10
Современный закон Мура	Удвоение каждые 1,5 года (10-кратно каждые 5 лет)	M2	2	1,587	100
Первоначальный закон Мура	Ежегодное удвоение	M3	3	2	1000

Наблюдаемое в настоящее время ошеломляющее многообразие экспоненциальных процессов технологического роста, имеющих место преимущественно в области компьютерных технологий, настоятельно требует их дальнейшего анализа, систематизации и обобщения.

Закон Мура и его минимальное обобщение

Так называемый «закон Мура» [17] приобрел 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 толкования как практически любой формы экспоненциального развития систем до наиболее узкого определения, предполагающего исключительно удвоение ряда показателей компьютер-

ной техники каждые 1,5 года. Последний вариант интерпретации закона, являющийся на сегодня наиболее популярным, самым Муром, как это ни парадоксально, никогда не формулировался.

В целом можно утверждать, что в настоящее время в связи со значительным 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 [18], в 1965 г. впервые высказал предположение, что одним из наиболее экономически оправданных вариантов интенсивного развития цифровой микроэлектроники является ежегодное удвоение количества активных элементов на кристалле [19] (рис. 2-3). Позднее, в 70-х и 80-х годах, оценки темпов развития стали существенно более скромными. Период в полтора года или в 18 месяцев связан с прогнозами его

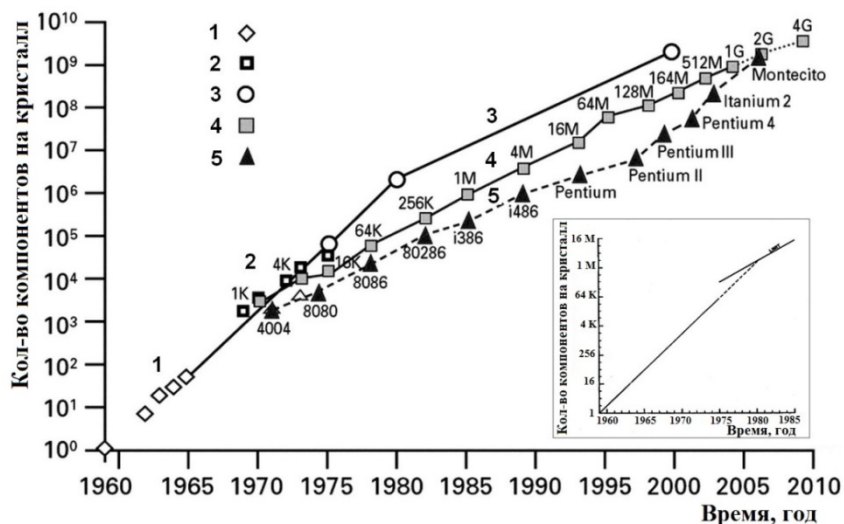


Рис. 6. Ожидаемый и реальный рост степени интеграции [24]:

- 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 г.;
- 4 – реальный рост степени интеграции микросхем памяти;
- 5 – реальный рост степени интеграции микропроцессоров; справа внизу – рисунок, которым завершается доклад Г. Мура в 1975 г. [23], констатирующий, что десятилетие начального оптимизма «закона Мура 1965» (ежегодное удвоение) закончилось и начинается период реалистичного «закона Мура 1975» (удвоение каждые 2 года)

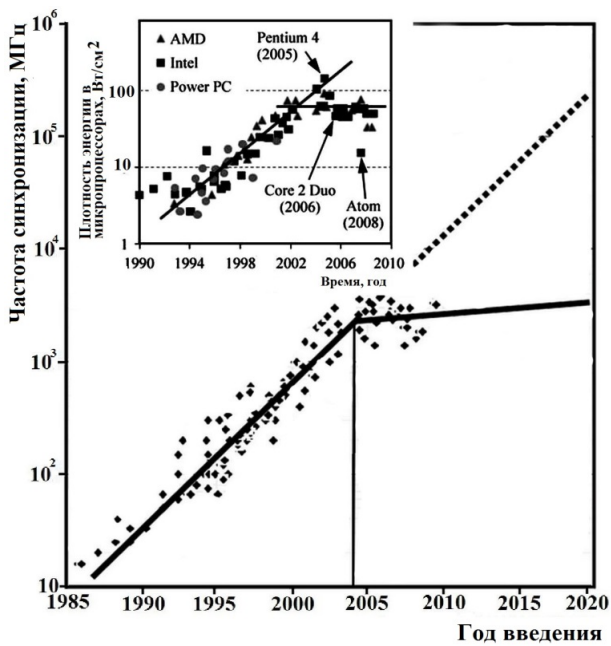


Рис 7. Экспоненциальный рост частоты синхронизации микропроцессоров практически прекратился к 2005 г., что позволило предотвратить катастрофическое нарастание плотности энергии в микропроцессорах (врезка слева вверху)

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 быстрой скорости каждого из них – именно об этой версии закона, как правило, по умолчанию ве-

дется речь, когда упоминается факт экспоненциального роста многих показателей в области компьютерных технологий.

Таким образом, необходимо четко различать как минимум два варианта закона Мура, которые можно обозначить в соответствии с годом их появления как «закон Мура 1965» и «закон Мура 1985». 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, ML1985 и т.д.

Следует отметить, что при относительно небольшой на первый взгляд разнице в периодах удвоения (2 и 1,5 года), в десятилетней перспективе мы имеем соответственно рост в 1000 и 100 раз, т.е. на 3 и 2 десятичных порядка соответственно.

Характерно, что с середины XX века начали также отмечаться различные тенденции роста показателей в 10-кратном размере за 10 лет. Например, именно так оценивался рост объема инженерных работ [20, с. 8] и количества программируемых устройств, общее количество которых к концу 50-х годов достигло примерно 1-го миллиона и с того времени растет экспоненциально с 10-кратным увеличением за 10-летие [21,22] (рис. 4). Условно этот вариант роста можно обозначить как «медленный закон Мура», который в

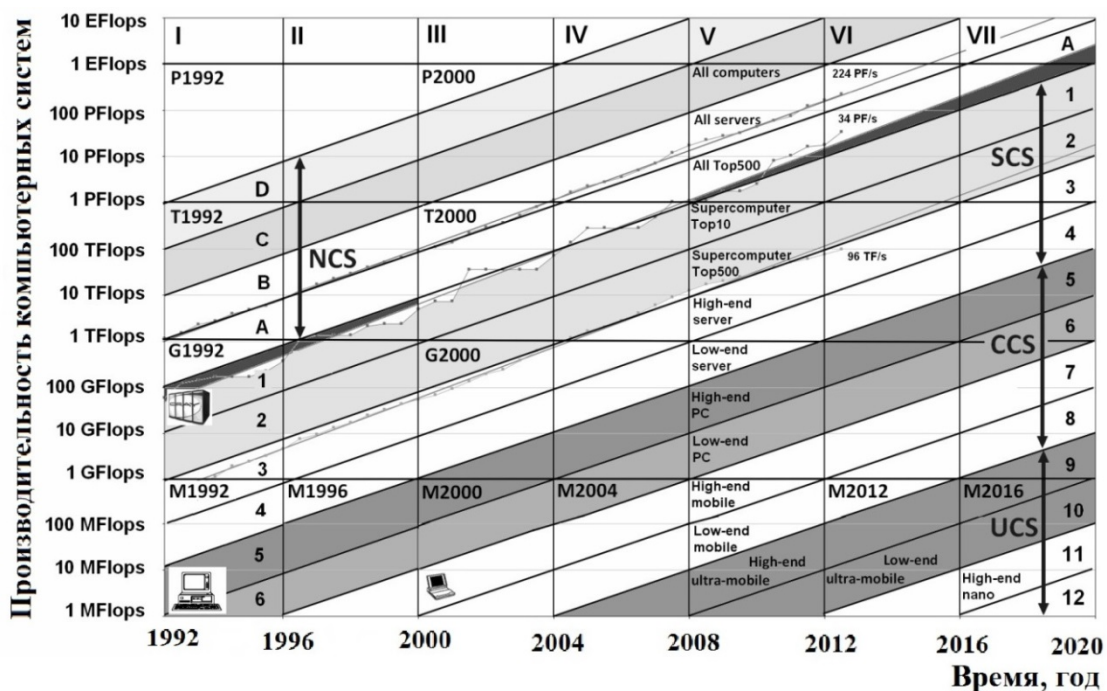


Рис. 8. Периодическая система роста производительности (в операциях с плавающей запятой в секунду) различных классов компьютерных систем в период с 1992 по 2020 гг. [6-9]

Табл. 2. Основные закономерности роста для шести вариантов закона Мура, упорядоченных по времени их появления

Закономерность	Описание закономерности	Обозначение	L	Коэффициенты роста за 1 год, 6 и 20 лет		
				1 (ЕКР)	6 (2 ^L)	20 (10 ^L)
ML1965	Закон Мура 1965: ежегодное удвоение	L6 (M3)	6	2	64	1000000
ML1975	Закон Мура 1975: удвоение каждые 2 года	L3	3	1,414	8	1000
ML1985	Закон Мура 1985: удвоение каждые 1,5 года (ряд Фибоначчи)	L4 (M2)	4	1,587	16	10000
ML1995	Рост в 10 раз каждые 20 лет	L1	1	1,122	2	10
ML2005	Рост в 10 раз каждые 10 лет	L2 (M1)	2	1,26	4	100
ML2015	Рост в 10 раз каждые 4 года	L5	5	1,782	32	100000

настоящее время характеризует рост количества устройств, подключенных к Интернету (рис. 5), а к 2005 г. активно обсуждался в связи с тем, что именно такими темпами росла плотность энергии в микропроцессорах (в связи с этим целесообразно обозначить данную закономерность как «закон Мура 2005» или ML2005).

Таким образом, в первом приближении можно выделить 3 основных варианта закона Мура, обозначив их соответственно через M1, M2 и M3, для которых ежегодный коэффициент роста (ЕКР) будут лежать в диапазоне от 1,26 до 2 (табл. 1).

Прочие варианты закона Мура

Детальный анализ всей наблюдаемой в настоящее время совокупности закономерностей роста в области компьютерных технологий показывает, что описанное выше минимальное обобщение закона Мура охватывает далеко не все уже известные на сегодня закономерности.

В частности, Гордону Муру уже в 1975 г. пришлось сделать существенное уточнение: в долговременной перспективе удвоение сложности интегральных схем возможно лишь каждые 2 года (целесообразно обозначить это как «закон

Мура 1975» или ML1975) [23], что в дальнейшем, как показывает детальный анализ, полностью подтвердилось (рис. 6).

В целом следует отметить, что примерно к середине каждого десятилетия (начиная с 1960-х годов) появлялась новая модификация закона Мура, которая существенно дополняла известные ранее эмпирические наблюдения. Данный факт позволяет говорить о своеобразном «**законе развития закона Мура**», суть которого заключается в том, что каждое десятилетие выявляется новая модификация эмпирической закономерности, которая дополняет предыдущие и описывает или новые особенности экспоненциального развития в области компьютерных технологий или разные темпы их развития на различных этапах эволюции. Закономерности, выявленные в 1965, 1975 и 1985 г., 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

Табл. 3. Основные закономерности роста для шести вариантов закона Мура, упорядоченных по возрастанию темпов роста

L	Закономерность	ЕКР	Коэффициент роста за указанный период (Y)							Интервал удвоения	
			1	2	3	4	5	6	10	20	лет
1	Рост в 10 раз каждые 20 лет	1,122	1,26	1,414	1,587	1,782	2	3,175	10	6	72
2	Рост в 10 раз каждые 10 лет	1,26	1,587	2	2,52	3,175	4	10	102	3	36
3	Закон Мура 1975: удвоение каждые 2 года	1,414	2	2,828	4	5,657	8	32	1024	2	24
4	Закон Мура 1985: удвоение каждые 1,5 года (ряд Фибоначчи)	1,587	2,52	4	6,35	10,079	16	102	10321	1,5	18
5	Рост в 10 раз каждые 4 года	1,782	3,175	5,657	10,079	17,959	32	323	104032	1,167	14
6	Закон Мура 1965: ежегодное удвоение	2	4	8	16	32	64	1024	1048576	1	12

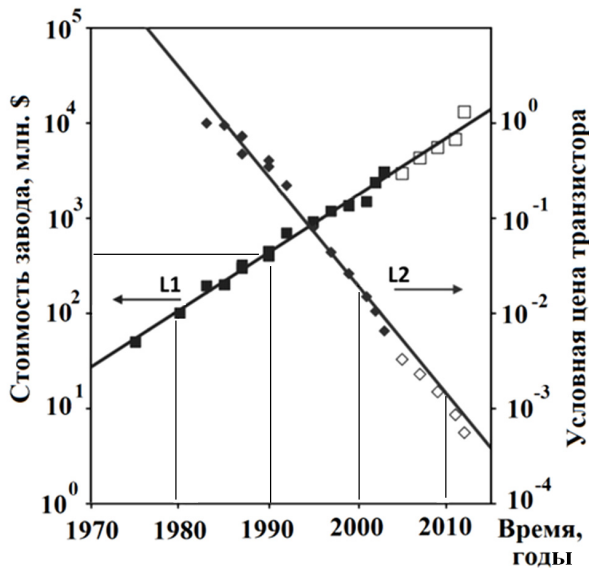


Рис. 9. Экспоненциальный рост стоимости все более современных заводов по производству полупроводников сопровождается аналогичным падением условной цены одного транзистора [17]

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 г. 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 [25]. В частности, он обратил внимание на то, что стоимость строительства новой 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 новых полупроводниковых производств растет примерно на порядок за 20 лет. 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 [25]. Экстраполяция наблюдавшихся в середине 90-х годов тенденций приводила к выводу, что

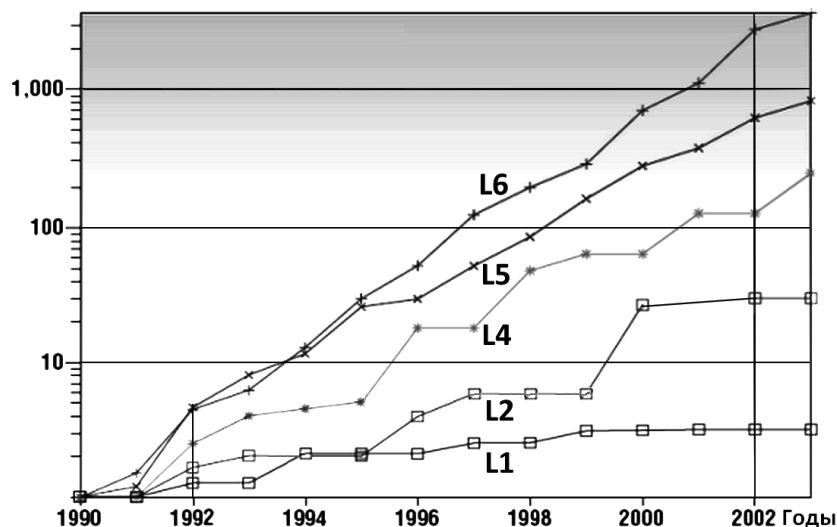


Рис. 10. Базовые закономерности L1-L6 позволяют представить динамику роста различных характеристик современной компьютерной инфраструктуры:
 L1 – рост плотности энергии батарей питания; L2 – рост скорости беспроводной связи;
 L4 – рост объемов оперативной памяти; L5 – рост производительности компьютерных систем;
 L6 – рост объемов цифровой информации (все данные представлены в относительных единицах по сравнению с уровнем 1990 г. по данным работы [28])

Табл. 4. Пример задания исходных данных для расчета текущих значений различных характеристик компьютерной инфраструктуры с использованием зависимости (1)

№ п.п.	Показатель	L	k	P_0	Y_0	YF
1	Рост пропускной способности интерфейсов жестких дисков, Мбит/с	2	1	100	1990	202X
2	Рост размеров дистрибутивов операционных систем фирмы Microsoft, Мбайт	2	1	0,1	1980	202X
3	Снижение количества дефектов на единицу площади кристаллов, дефектов на см ²	2	1	100	1965	202X
4	Рост пропускной способности каналов подключения пользователей к Интернет (закон Ниельсона), Кбит/с	3	1	1	1985	20XX
5	Рост пропускной способности магистральных каналов Интернет, Мбит/с	4	1	0,1	1980	20XX
6	Рост глобального трафика Интернет после 2000 г., Гбит/с	4	1	500	2000	20XX
7	Рост количества активных элементов на кристалле в начальный период освоения технологий интегральных схем, ML1965	6	1	1	1959	1975
8	Рост глобального трафика Интернет в начальный период освоения, Гбит/с	6	1	1	1996	2000

Примечание: YF – известный или предполагаемый год или период завершения действия соответствующей закономерности.

произойти это должно было примерно к 2050 г. Естественно, эта ситуация представлялась несколько абсурдной даже с учетом стремительно нарастающей доли «полупроводникового хозяйства» в мировой экономике. Поэтому единственно возможный вывод из всего этого был следующий: 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 г. [25]. В дальнейшем его наблюдения подтвердили и другие исследователи [26].

К 2005 г. выявились и новые фундаментальные технологические ограничения, которые существенно затрудняли дальнейший экспоненциальный рост характеристик микропроцессоров. В частности, по мере увеличения частоты син-

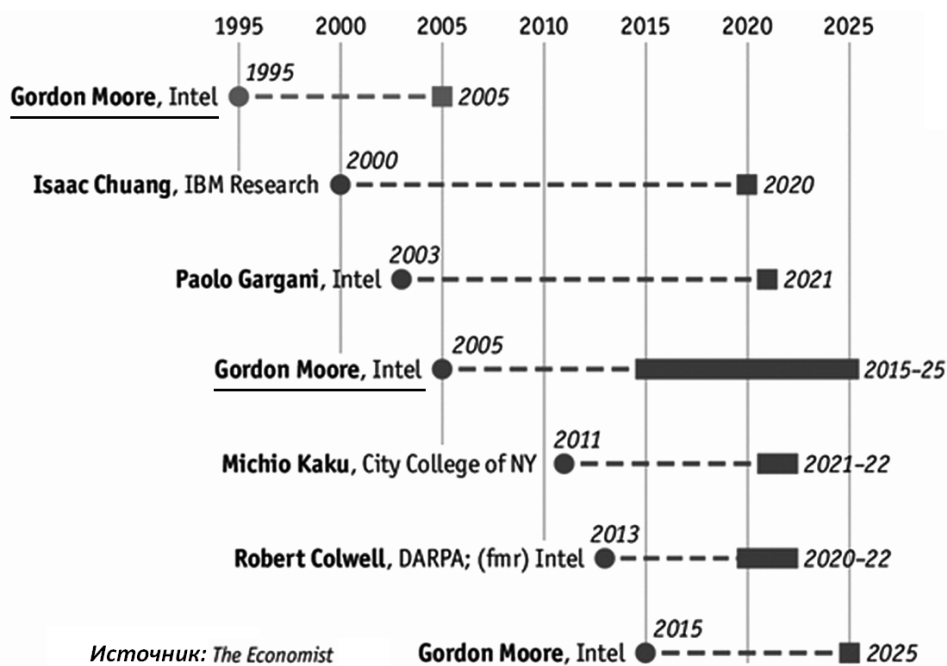


Рис. 11. Прогнозы предполагаемых сроков завершения действия закона Мура: круглый значок – год публикации соответствующего прогноза; прямоугольный значок – прогнозируемый период завершения действия закона

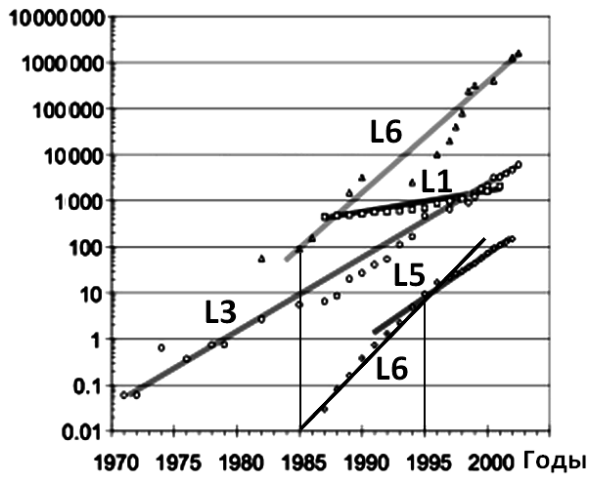


Рис. 12. Экспоненциальное развитие различных составляющих

информационно-компьютерной инфраструктуры:

- 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 Интернету (в миллионах);
- L6 – рост пропускной способности волоконно-оптических линий (Мбит/с)

хронизации в 32-разрядных микропроцессорах плотность энергии в расчете на единицу площади кристалла с середины 80-х годов возрастала каждые 10 лет примерно на порядок, 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 [27].

Ярко проявившаяся к 2005 г. закономерность роста плотности энергии в микропроцессорах (десятикратно за десятилетие – «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 начал обеспечиваться преимущественно за счет тотального распараллеливания вычислительных процессов, в частности, путем наращивания количества вычислительных ядер в процессорах и роста числа процессоров на кристалле (рис. 7).

Как видим, одной из особенностей второго поколения законов Мура явилось 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,

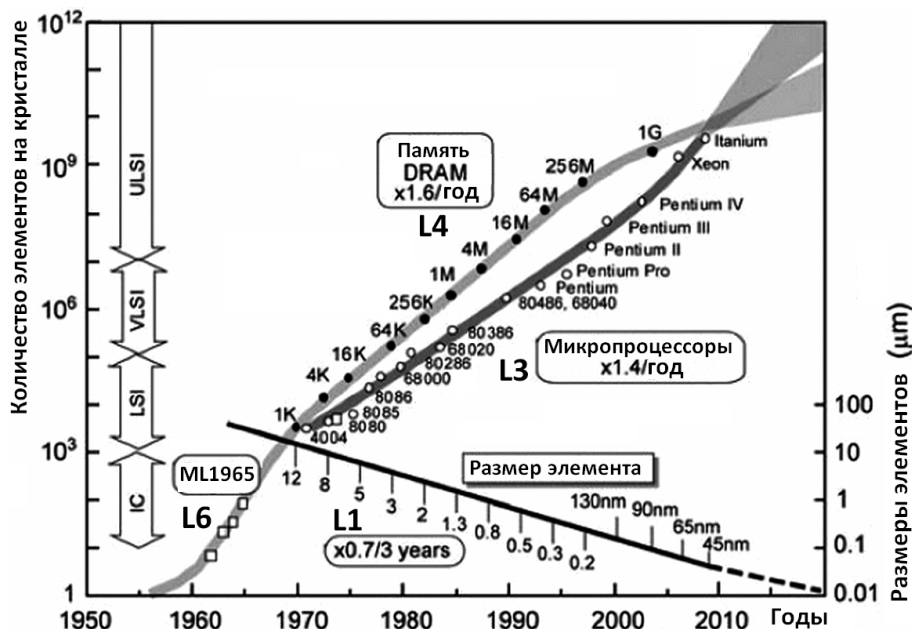


Рис. 13. Основные закономерности, определяющие динамику развития современных компьютерных технологий [29]: L1 – снижение проектных норм (правая шкала); L3 – рост количества активных элементов (транзисторов) в микропроцессорах в соответствии с законом Мура 1975 (левая шкала); L4 – рост объемов микросхем 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

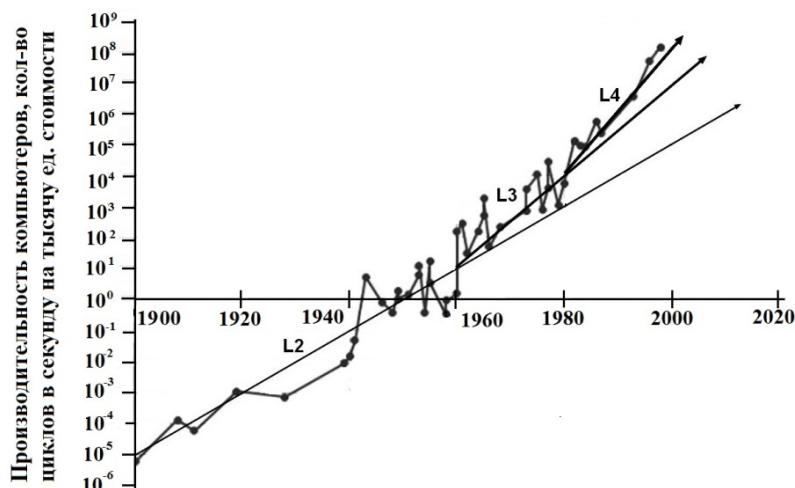


Рис. 14. Ускорение экспоненциального роста производительности компьютеров (в количестве циклов в секунду на тысячу единиц стоимости):

L2 – относительно медленный рост до начала 1960-х г.;

L3 – ускорение роста с началом эпохи интегральных схем в 1960-е г.;

L4 – очередное ускорение роста с началом эпохи микропроцессоров в 1980-е г.

связанная в первую очередь с ростом производительности наиболее мощных компьютерных систем. Благодаря статистике роста производительности 500 наиболее мощных суперкомпьютеров, собираемой, систематизируемой и регулярно публикуемой с 1993 г. (список «Тор 500»), выявилась закономерность, которая не укладывалась в известные до этого варианты закона Мура: производительность компьютерных систем в целом (а не отдельно процессоров) растет практически точно на порядок каждые 4 года (рис. 8).

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. [3]. 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 исполь-

зование самого понятия «закон Мура» и настоятельно требует на текущем этапе его переосмысления и обобщения.

Обобщенный закон Мура

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

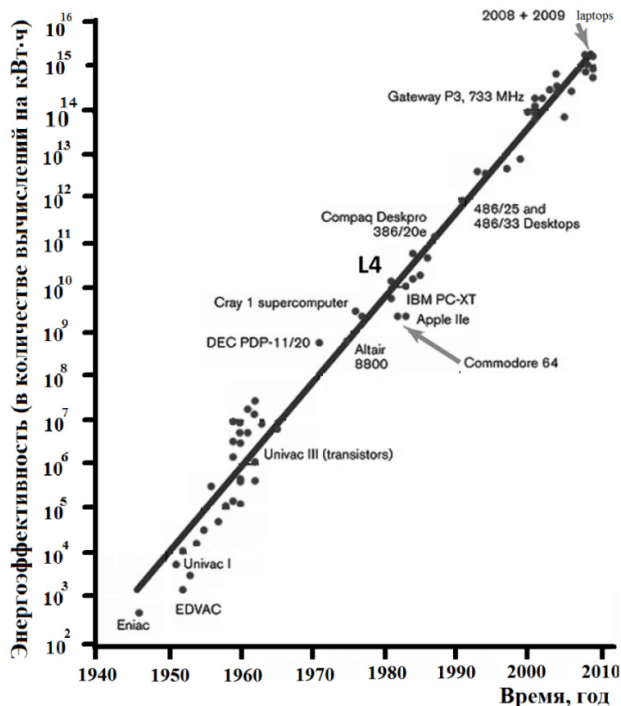


Рис. 15. Закон Куми (Коомея) [30,31], определяющий рост энергоэффективности, полностью соответствует закономерности L4 ($L=4, Y_0=1945, P_0=1000$ кВт·ч)



Рис. 16. Рост ежесекундного(!) мирового производства транзисторов (в составе интегральных схем)

В процессе уточнения реальных ЕКР и различных попыток их систематизации такая зависимость в итоге была выявлена. Добиться этого удалось в процессе упорядочивания всех известных к 2015 г. 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. На основании данного наблюдения была получена следующая зависимость [3]:

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

где L – коэффициент, равный порядковому номеру закономерности при их упорядочивании в соответствии с возрастанием темпов экспоненциального роста (табл. 1); Y_0 и Y_i – начальный и текущий год действия соответствующей закономерности; P_0 и P_i – значение наблюдаемого параметра в начальном и искомом году.

При этом в качестве наиболее краткого обозначения каждого варианта закона Мура принято обозначение L_j , где в качестве элемента j используется значение L для каждого из вариантов. 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. В табл. 2 представлены все известные на сегодня варианты закона Мура (в т.ч. приведены их обозначения в соответствии с минимальным вариантом обобщения), упорядоченные по времени их появления.

Существенно более важной и наглядной является табл. 3, в которой все варианты упорядочены по возрастанию темпов роста. Зависимость (1) 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

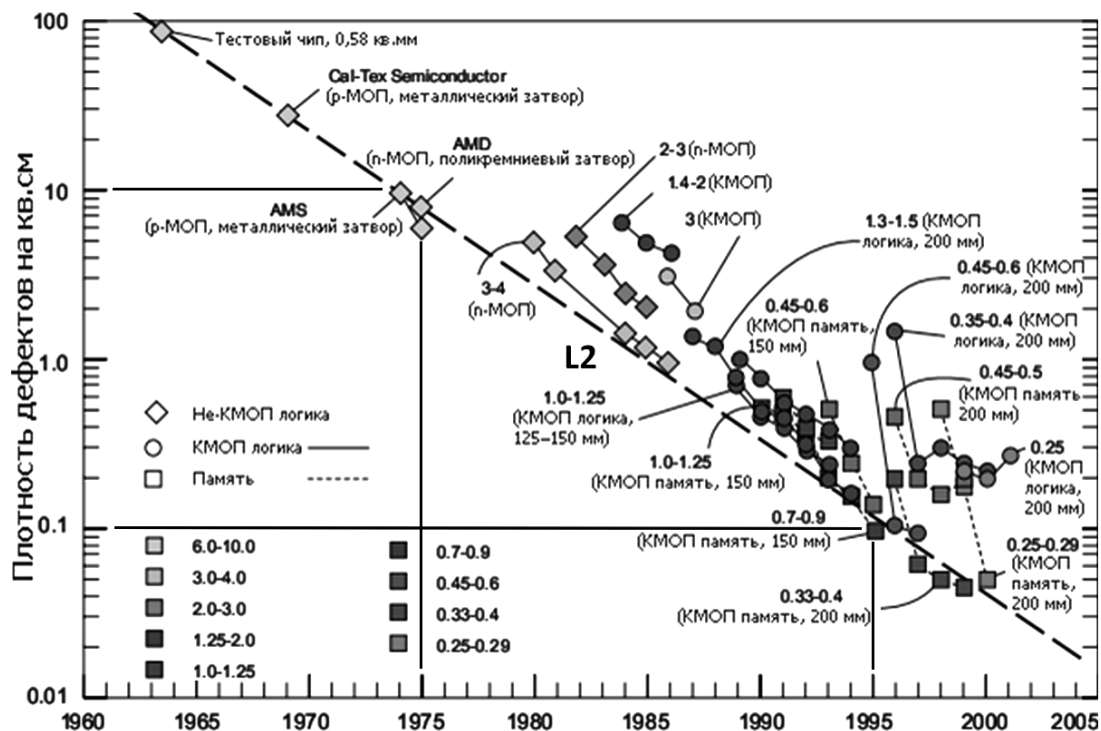


Рис. 17. Снижение количества дефектов на единицу площади кристаллов подчиняется закономерности $L2$ (график приведен по данным работы [17])



Рис. 18. Рост количества пользователей социальной сети Facebook (L4)

коэффициенты роста имеют значение 10^L . Т.к. в большинстве случаев действие различных вариантов закона Мура наблюдается на протяжении 20-ти и более лет, то знание этого факта позволяет наиболее просто классифицировать все закономерности роста в соответствии с шестью уровнями или скоростями экспоненциального роста, определив десятичный порядок их роста за базовый 20-летний период (табл. 3).

К настоящему времени проанализированы десятки различных процессов экспоненциального роста в области компьютерных технологий, некоторые примеры которых приведены далее. Самое удивительное заключается в том, что в большинстве случаев наблюдается довольно точное соответствие одному из 6-ти вариантов закономерности. Некоторые отклонения от точного соответствия вышеприведенной зависимости вполне естественны и иногда наблюдаются. Поэтому в наиболее общем случае должен учитываться поправочный или уточняющий коэффициент k , что приводит зависимость к следующему виду:

$$P_i = kP_0 2^{\frac{L(Y_i - Y_0)}{6}}$$

В большинстве случаев с точностью до нескольких знаков (как правило, 2-х или 3-х) после запятой $k=1$. Но в общем случае 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 исполь-

зовать обозначение «Lj+», например, «L4+». Следует также иметь в виду, что в табл. 2 и 3 все значения приводятся с точностью не более 3-х десятичных знаков после запятой, но в процессе анализа и расчетов использовались значения с 10-ю десятичными знаками после запятой. В частности ЕКР для «самого медленного» варианта ML1995 для краткости принимается равным 1,122, но в действительности составляет 1,1224620483. Такое же значение имеет и «коэффициент ускорения» при переходе от одного

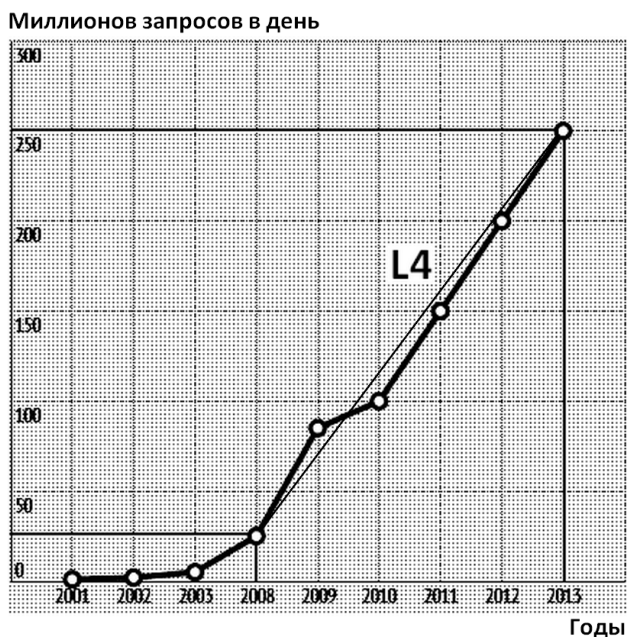


Рис. 19. Рост количества ежедневных запросов в поисковой системе Яндекс также подчиняется закономерности L4 примерно с 2008 г.

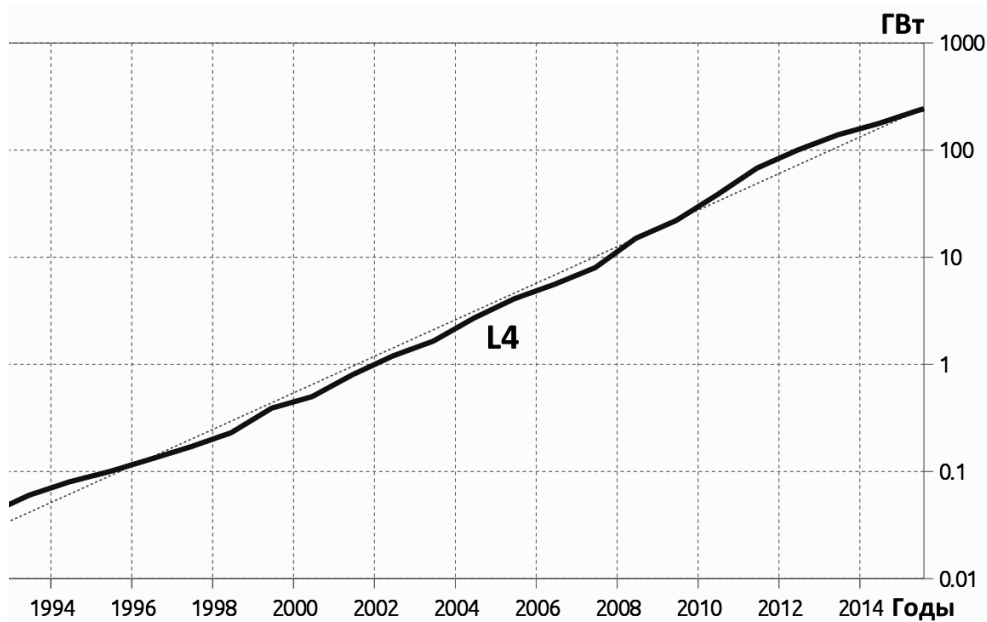


Рис. 20. Рост мировой установленной мощности солнечной энергетики соответствует закономерности L4 (по материалам работы [32])

варианта закономерности к следующему.

Некоторые из вариантов закона Мура, представленные в табл. 1, имеют свои специфические особенности. Например, зависимость L4 (это основной современный вариант интерпретации закона Мура) 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 π. Но самым главным является то, что абсолютное большинство процессов роста в современных компьютерных технологиях достаточно точно вписываются в один из 6-ти рассмотренных вариантов. 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 вышеприведенные зависимости приобретают, соответственно, вид:

$$P_i = \frac{P_0}{2^{\frac{L(Y_i - Y_0)}{6}}} \text{ и } P_i = \frac{kP_0}{2^{\frac{L(Y_i - Y_0)}{6}}}$$

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

Примеры проявлений закона

Стремительное развитие компьютерных технологий 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 определенной закономерности совпадает с годом выявления соответствующего варианта закона Мура. Более того, применение обозначений вида L1, ..., L6 по сравнению с обозначениями, содержащими год выявления закономерности, является в большинстве случаев предпочтительным еще и потому, что, во-первых, закономерности зачастую начинают действовать задолго до того как исследователи обращают на них внимание, а, во-вторых, для впервые выявленных закономерностей в дальнейшем находят различные аналоги, определяющие развитие разнообразных технологий на разных этапах их развития. В частности, большинство действующих в настоящее время закономерностей в области развития современных компьютерных технологий актуализировалось с начала 90-х годов (рис. 10).

Эффективное использование зависимостей 1-4 предполагает наличие соответствующих исходных данных, пример которых представлен в табл. 4. Наибольшей сложностью в большинстве случаев является определение года или периода завершения действия той или иной закономерности. Именно поэтому при задании завершающих дат используется символ неопределенности X, который может иметь значение в диапазоне от 0 до 9-ти. В случае закона Мура срок завершения его действия откладывался многократно. В 1965 г. Гордон Мур прогнозировал примерно

десятилетнее действие выявленной им закономерности. Но уже в 1975 г., внося соответствующие коррективы, он продлил действие закономерности еще на десятилетие, что в последующем повторилось еще несколько раз (рис. 11).

На рис. 12-14 представлены некоторые характерные примеры развития различных элементов информационно-компьютерной инфраструктуры, свидетельствующие, с одной стороны, что практически все исследованные экспоненциальные изменения достаточно точно соответствуют одной из 6-ти закономерностей обобщенного закона Мура, а, с другой – что действие большинства закономерностей имеет достаточно четко ограниченные временные рамки.

Большинство эмпирических законов, перечисленных в начале данной работы укладываются в рамки одного из 6-ти вариантов обобщенного закона Мура. В качестве примера на рис. 15 приведена зависимость L4 для закона Куми (Коомеу), описывающего рост энергоэффективности компьютеров.

На рис. 16-20 приведены еще некоторые характерные проявления обобщенного закона Мура в различных современных интенсивно развивающихся технологиях, в первую очередь, компьютерных.

Выводы

Интенсивное развитие компьютерных технологий с начала 90-х г. привело к качественному скачку в развитии техносферы, суть которого состоит в материальном воплощении концепции ноосферы, информационной глобализации общества и стремительном насыщении компьютерными системами и технологиями всей материальной среды. Как показано в работе, большинство процессов роста при этом могут быть описаны относительно простыми зависимостями и укладываются в рамки одного или нескольких вариантов обобщенного закона Мура.

С учетом того, что в обозримом будущем процесс развития компьютерных технологий будет продолжаться примерно с той же интенсивностью, что и в настоящее время, можно утверждать, что выявленная система закономерностей обладает достаточными прогностическими свойствами, а также позволяет систематизировать и сделать достаточно сравнимыми и измеримыми процессы роста в области компьютерных и других инновационных технологий.

Список литературы

1. Крылов А.Н. Мои воспоминания. – Л.: Судостроение, 1979. – 480 с.

2. Аноприенко А.Я. Периодическая система развития компьютерных систем и перспективы нанокompьютеризации / Инновационные перспективы Донбасса: Материалы межд. науч.-практ. конф. Донецк, 20-22 мая 2015 г. Т.5. Компьютерные науки и технологии. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – С. 5-13.
3. Аноприенко А.Я. Системодинамика ноотехносферы: основные закономерности / Системный анализ в науках о природе и обществе. – 2014. – №1(6)-2(7). – С. 11-29.
4. Аноприенко А.Я., Варзар Р.Л., Иваница С.В. Закономерности развития аналого-цифровых преобразователей и перспективы использования постбинарного кодирования / Науч. тр. Донец. нац. техн. ун-та. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – Вып.1(19). – С. 5-10 (серия: Информатика, кибернетика и вычислительная техника).
5. Аноприенко А.Я. Четыре концепции будущего: «Зеленый рост», «Индустрия 4.0», нооинфраструктура и космоантропная перспектива / Донбасс-2020: Материалы VII науч.-практ. конф., Донецк, 20-23 мая 2014 г. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – С. 6-11.
6. Аноприенко А.Я. Система закономерностей развития средств и методов компьютинга / Материалы V всеукраинской науч.-техн. конф. «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС и КМ 2014)», Донецк, 22-23 апреля 2014 г. В 2-х т., Т.1. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – С. 11-23.
7. Аноприенко А.Я. Основные закономерности эволюции компьютерных систем и сетей / Науч. тр. Донец. нац. техн. ун-та. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – Вып.1(12)-2(13). – С. 10-32 (серия: Проблемы моделирования и автоматизации проектирования).
8. Аноприенко А.Я. Закономерности развития компьютерных систем / Научная дискуссия: инновации в современном мире. Сборник статей по материалам XVIII межд. заоч. науч.-практ. конф. №10(18). – М.: Изд. «Международный центр науки и образования», 2013. – С. 19-29.
9. Аноприенко А.Я. Модели эволюции компьютерных систем и средств компьютерного моделирования / Материалы пятой межд. науч.-техн. конф. «Моделирование и компьютерная графика», Донецк, 24-27 сентября 2013 г. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – С. 403-423.
10. Аноприенко А.Я. Ноокомпьютинг / Материалы VI межд. науч.-техн. конф. «Информатика и компьютерные технологии», До-

- нецк, 22-23 ноября 2011 г., Т.1. – Донецк, ДонНТУ. – 2011. – С. 10-23.
11. Анопrienко А.Я. Ноокомпьютинг и будущее информационно-компьютерной инфраструктуры / Тезисы докладов Межд. науч. конгресса по развитию информационно-коммуникационных технологий и развития информационного общества в Украине, Киев, 17-18 ноября 2011 г. – Киев, 2013. – С. 12-13.
 12. Анопrienко А.Я. Будущее компьютерных технологий в контексте технической и кодологической эволюции / Вестник Инженерной Академии Украины. – 2011. – Вып.3-4. – С. 108-113.
 13. Анопrienко А.Я. Компьютерные науки и технологии: следующие 50 лет / Материалы II всеукраинской науч.-техн. конф. «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС и КМ 2011)», Донецк, 12-13 апреля 2011 г., Т.1. – Донецк, ДонНТУ, 2011. – С. 7-22.
 14. Анопrienко А.Я. Компьютерные науки и технологии в прошлом, настоящем и будущем / Материалы V межд. науч.-техн. конф. «Информатика и компьютерные технологии», Донецк, 24-26 ноября 2009 г. – Донецк, ДонНТУ, 2009. – С. 15-26.
 15. Анопrienко А.Я. Пределы информатики / Информация и рынок. – 1993. – №2-3. – С. 10-14.
 16. Вернадский В.И. Несколько слов о ноосфере / Успехи современной биологии. – 1944. – №18, Вып.2. – С. 113-120.
 17. Мурки Т. Закон Мура против нанометров / iXBT.com: Сайт о высоких технологиях, 2011. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ixbt.com/cpu/microelectronics.shtml>
 18. Мэлоун М. The Intel: как Роберт Нойс, Гордон Мур и Энди Гроув создали самую влиятельную компанию в мире. – М.: Эксмо, 2015. – 680 с.
 19. Moore G.E. Cramming more components onto integrated circuits / Electronics. – 1965. – Vol.38, No.8. – P. 114-117.
 20. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
 21. Громов Г.Р. Национальные информационные ресурсы: проблемы промышленной эксплуатации. – М.: Наука, 1984. – 240 с.
 22. Громов Г.Р. Очерки информационной технологии. – М.: Инфоарт, 1992. – 334 с.
 23. Moore G. Progress in digital integrated electronics / Proc. of the International Electron Devices Meeting (IEDM'75). – 1975. – Vol.21. – P. 11-13.
 24. Moore G. Moore's Law at 40 / Understanding Moore's law: four decades of innovation. – Philadelphia: Chemical Heritage Foundation, 2006. – P. 67-84.
 25. Moore G. Lithography and the Future of Moore's Law / SPIE. – 1995. – Vol.2438. – P. 2-17.
 26. Rupp K., Selberherr S. The Economic Limit to Moore's Law / IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing Journal. – 2011. – Vol.24, No.1. – P. 4-6.
 27. Feng W. The Importance of Being Low Power in High Performance Computing / Cyberinfrastructure Technology Watch Quarterly. – 2005. – Vol.1, No.3. – P. 12-20.
 28. Paradiso J., Starner T. Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics / IEEE Pervasive Computing. – 2005. – January-March. – P. 18-27.
 29. Sunami H. Dimension Increase in Metal-Oxide-Semiconductor Memories and Transistors / Advances in Solid State Circuit Technologies. – 2010. – 446 p.
 30. Koomey J.G., Berard S., Sanchez M., 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.
 31. Koomey J.G., Berard S., Sanchez M., Won H. Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing / IEEE Annals of the History of Computing. – 2011. – Vol.33, Issue 3. – P. 46-54.
 32. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS). – Snapshot of Global PV Markets 2014. – Report IEA PVPS T1-26:2015. – 15 p.

Сведения об авторе

А.Я. Анопrienко

SPIN-код: 4819-8590
 Телефон: +380 (50) 677-72-70
 Эл. почта: anoprien@gmail.com

Статья поступила 14.03.2016 г.

© А.Я. Анопrienко, 2016