УДК 378.14

Обобщения закона Мура

А.Я. Аноприенко
Донецкий национальный технический университет
anoprien@ya.ru

Аноприенко А.Я. Обобщения закона 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.*

Введение

Так называемый закон Мура является одной из наиболее известных закономерностей в области компьютерных наук и технологий. О ней знают практически все профессионалы в данной области, но интепретируют ее зачастую по-разному. Связано это в первую очередь с непростой историей формирования данной закономерности и ее понимания в разные периоды развития компьютерных систем и технологий. Практически все при этом знают и помнят о том, что речь идет об удвоении. Но при уточнении того, что именно удваивается и за какой период, начинаются существенные расхождения. Кроме этого, зачастую не видят принципиальной разницы между периодами удвоения в два или полтора года.

Обыденное мышление устроено так, что рост с известным периодом удвоения с трудом экстраполируется на более длительные периоды, соизмеримые со скроком действия той или иной закономерности. В этой связи уместно в очередной раз напомнить легенду об изобретателе шахмат, который запросил за свое изобретение удивительно скромную на первый взгляд награду: он просто попросил столько зерен пшеницы, сколько получится, если на первую клетку шахматной доски положить одно зерно, на вторую – в 2 раза больше, и так далее, пока не заполнятся все 64 ячейки.

В действительности оказывается, что пшеничных зерен при этом потребуется 18 446 744 073 миллиарда общей массой около 500-т миллиардов тонн! Это почти в тысячу раз больше, чем во всем мире выращивают за год в настоящее время (только к началу 1990-х годов мировой ежегодный сбор пшеницы превысил 500 миллионов тонн, а в начале 1960-х годов ежегодные урожаи составляли всего 250 миллионов тонн), и соизмеримо с суммарным урожаем пшеницы, собранным за всю историю человечества!

Следовательно, для более адекватного понимания динамики развития компьютерных систем и технологий необходимы оценки, ориентированные на более длительные промежутки времени, измеряемые, как правило, десятилетиями, при этом существенно более точные и гибкие, чем традиционно принятые периоды удвоения показателей. Как показал анализ наблюдавшихся ранее и наблюдаемых в настоящее время закономерностей, оптимальными являются периоды, соизмеримые с продолжительностью действия типичных закономерностей и типовыми дальними горизонтами планирования человеческой деятельности. Речь в первую очередь идет о периодах в 10-20 лет. Характерно, что за указанные периоды достаточно часто наблюдается рост на 1-3 и более десятичных порядков, что позволяет в случае продолжения действия соответствующих закономерностей достаточно просто оценивать рост и в последующие десятилетия: если, например, известно, что некоторый показатель увеличивается примерно в 100 раз за 10 лет, т.е. на 2 порядка, то совсем несложно определить, что через 20 лет рост будет уже на 4 порядка, а через 30 – на 6. Если же мы знаем, что за 18 месяцев происходит удвоение, то оценка роста за 10 или, тем более, 20 лет будет существенно сложнее. Для этого, как минимум, потребуется умение быстро оценивать количество периодов удвоения и затем возводить 2 в требуемую степень. Кроме этого, важно также помнить, что незначительные на первый взгляд погрешности в оценках роста за относительно короткие периоды (за несколько лет) приводят к весьма существенным расхождениям в более длительной перспективе (деятки лет). При этом заметное влияние на эти оценки будут также оказывать неизбежные кратковременные колебания темпов роста в пределах нескольких лет. Если же ориентироваться на 10-летние и более продолжительные периоды, то мы получаем возможность вычислить намного более точные оценки и максимально исключить влияние относительно случайных факторов, влияющих на темпы роста в те или иные годы.

Далее представлен обзор выявленных на сегодня эмпирических закономерностей роста в области компьютерных наук и технологий, прямо или косвенно связанных с законом Мура (почти все они носят экспоненциальный характер), и предложены 4 варианта обобщения данных закономерностей.

Закон Мура и его аналоги

Одним из отражений стремительного развития компьютерных технологий явилось появление множества именных (названных по именам их авторов и/или исследователей) эмпирических законов, характеризующих развитие различных технологий эпохи информационно-компьютерной революции. В первую очередь речь идет о самом законе Мура и непосредственно связанных с ним закономерностях. Краткий (и весьма неполный) их перечень включает, в частности, следующие закономерности:

Зако́н Му́ра (Moore's Law) – эмпирическое наблюдение, изначально (в 1965 г.) сделанное Гордоном Муром, согласно которому количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждый год. В 1975 году откорректировал свое наблюдение и предсказал удвоение степени интеграции микросхем каждые 2 года. В последующем появились и другие интерпретации данного закона. В настоящее время основным вариантом интерпретации закона Мура является удвоение каждые 18 месяцев.

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 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.

Отдельная группа закономерностей связана с ростом производительности компьютерных систем и эффективности программного обеспечения:

Закон Гроша (Grosch's Law), сформулированный еще в 1965 году, предполагающий, что производительность компьютеров, увеличивается как квадрат их стоимости. В действительности это правило действует далеко не всегда и ограничивается, как минимум, **законом Амдала** (Amdahl's law), сформулированным несколько позже, в 1967 году, и устанавливающим верхний предел роста производительности при распараллеливании вычислений. В первоначальной формулировке этот закон выглядит примерно следующим образом: «В случае, когда задача разделяется на несколько частей, суммарное время ее выполнения на параллельной системе не может быть меньше времени выполнения самого длинного фрагмента». В дальнейшем, в 1988 году, последовало уточнение в виде **закона Густафсона-Барсиса** (Gustafson – Barsis's law), определяющего оценку максимально достижимого ускорения выполнения параллельной программы в зависимости от количества одновременно выполняемых потоков вычислений («процессов») и доли последовательных расчётов в соответствии со следующей формулой для оценки ускорения масштабирования (англ. scaled speedup):

$S_p = p + (1 - p)g$, где

p – количество процессоров,

g – доля последовательных расчётов в программе.

Закон Вирта (Wirth's law) – полушутливое утверждение, сделанное в 1995 году, что программы становятся медленнее более стремительно, чем компьютеры становятся быстрее.

Закон Гейтса (Gates' law) – вариант закона Вирта, названный в честь основателя Microsoft Билла Гейтса. Это также полушутливое наблюдение, утверждающее, что скорость программного обеспечения уменьшается на половину каждые полтора года, что сводит на нет все преимущества закона Мура. Основные причины: добавление избыточных ненужных функций, плохой код, нежелание программистов дорабатывать программы, плохой менеджмент или частая смена команды.

Закон Мэя (May's law) – аналогично закону Гейтса гласит, что эффективность программного обеспечения падает вдвое каждые 18 месяцев, компенсируя закон Мура. Дэвид Мэй (David May), бывший архитектор семейства транспьютерных микропроцессоров (группы T2, T4, T8, T900) в знаменитой английской компании Inmos (язык Occam), а затем – профессор Бристольского университета в Великобритании, причиной всего этого считает то, что нынешние программные содержат слишком много ошибок, а также слишком велики и сложны для понимания.

Можно также выделить несколько эмпирических закономерностей, связанных с развитием коммуникационных систем:

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

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

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

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

Анализ перечисленной выше совокупности известных эмпирических законов показывает, что практически все они в большей или меньшей степени связаны с законом Мура. Поэтому логично их систематизировать и обобщить таким образом, чтобы в каждом случае оценки скоростей роста и общего прогресса, определяемого действием перечисленных выше и прочих закономерностей, были достаточно наглядными и сравнимыми.

Минимальное обобщение

Так называемый закон Мура [1] 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, как уже отмечалось, 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 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 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 [2], 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 [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 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 – именно об этой версии закона, как правило, по умолчанию ведется 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 (1 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 и различные прочие тенденции роста показателей в 10-кратном размере за 10 лет. Например, именно так оценивался рост объема инженерных работ [4, 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 [5, 6]. Условно этот вариант роста можно обозначить как «медленный закон Мура», который в настоящее время характеризует рост количества устройств, подключенных к Интернету. При приближении к 2005 году такие темпы роста обсуждались особенно активно в связи с тем, что именно с такой скоростью росла плотность энергии в микропроцессорах. В этой связи целесообразно обозначить данную закономерность как «закон Мура 2005» или ML2005.

Таким образом, можно выделить 3 основных варианта первого обобщения закона Мура (ML2005 – «медленный закон Мура», ML1985 – «современный закон Мура», и ML1965 – «быстрый закон Мура»), обозначив их соответственно через M1, M2 и M3, для которых ежегодные коэффициенты роста (ЕКР) будут соответственно 1,26, 1,59 и 2,00. Но при этом за 10-летний период коэффициенты роста будут иметь значения, равные 10-ти в соответствующей сепени: 10 для M1, 100 для M2 и 1000 для M3.

Второе обобщение

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 году 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) [7], что в дальнейшем, как показывает анализ, полностью подтвердилось.

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 годах, 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 г. впервые достаточно убедительно показал, что дальнейший экспоненциальный рост полупроводниковой промышленности может существенно сдерживаться исходя из сугубо экономических ограничений, связанных с экспоненциальным удорожанием ростом стоимости соответствующих средств производства [8]. 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, как отмечалось выше, 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 [8]. Экстраполяция наблюдавшихся в середине 90-х годов тенденций приводила к выводу, что произойти это должно было примерно к 2050 г. Естественно, эта ситуация представлялась несколько абсурдной даже с учетом стремительно нараставшей 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. [8]. В дальнейшем его наблюдения подтвердили и другие исследователи [9].

К 2005 г. выявились и новые фундаментальные технологические ограничения, которые существенно затрудняли 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, 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 [10].

Ярко проявившаяся к 2005 г. закономерность роста плотности энергии в микропроцессорах (как отмечалось выше, 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.

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, систематизируемой и регулярно публикуемой с 1993 года (список «Top500»), 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.

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. [11]. 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 на первый взгляд вносит существенную путаницу в использование самого понятия «закон Мура» и настоятельно требует на текущем этапе его переосмысления и обобщения. В идеале необходимо выявить наиболее общую закономерность, связывающую все известные на сегодня варианты закона Мура в единую систему, описываемую достаточно простыми функциональными зависимостями.

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 [11]:

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

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

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.

Таблица 1 – Коэффициенты роста для различных вариантов закона Мура

L	ML	M	ЕКР	Рост за 10 лет	**Рост за 20 лет**
1	ML1995		1,122	3,2	**10^1**
2	ML2005	M1	1.260	20	**10^2**
3	ML1975		1,414	32	**10^3**
4	ML1985	M2	1,587	102	**10^4**
5	ML2015		1,782	323	**10^5**
6	ML1965	M3	2,000	1024	**10^6**

Вышеприведенная зависимость 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. 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, фактически определив десятичный порядок их роста за базовый 20-летний период (табл. 1).

К настоящему времени проанализированы десятки различных процессов экспоненциального роста в области компьютерных технологий. 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 мы имеем *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 использовать обозначение «*Lj+*», например, «*L4+*». Следует также иметь ввиду, что в табл. 1 значения ЕКР 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 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.

Третье обобщение

С учетом разнообразия процессов технического прогресса на протяжении всей истории цивилизации целесообразно на базе рассмотренного выше подхода получить дальнейшее обобщение закона Мура, позволяющее описывать весь спектр возможной динамики экспоненциальных процессов развития.

Для этого, во-первых, кроме базового периода роста в 20 лет, характерного для ИКР, следует рассматривать и более длительные базовые периоды, отличающиеся на один и более десятичных порядков от наиболее короткого базового периода.

Во-вторых, будем предполагать, что основной оценкой скорости технического прогресса во всех случаях будет количество десятичных порядков, на которое возрастает (или в некоторых случаях уменьшается) значение того или иного показателя в ходе развития техники и технологий. При этом соответствующую скорость роста целесообразно обозначить через S (начальный символ англоязычного слова speed, означающего скорость). Такое обозначение представляется целесообразным также и потому, что большинство процессов развития в технике могут быть описаны различными S-образными кривыми [12], начальная часть которых (примерно первая половина или несколько более) представляет из себя экспоненциальную или подобную ей кривую.

Для различных скоростей экспоненциального роста обозначение в целом будет иметь вид SK, где K – это численное обозначение скорости роста, равное количеству десятичных порядков роста за базовый период. Это, естественно, отнюдь не предполагает, что соответствующий процесс роста будет длиться на протяжении всего базового периода. Чаще всего рост носит экспоненциальный характер на протяжении всего нескольких десятилетий. Но, как показывает практика, для сравнительного анализа привязка к базовым периодам является наиболее целесообразной.

При рассмотрении технического прогресса можно ограничиться максимальным базовым периодом в 2 тысячи лет, т.к. за пределами данного периода процессы технического развития либо вообще плохо прослеживаются, либо просто недостаточно документированы для более-менее достоверных количественных оценок. В этом случае в обозначении K будет использоваться 3 десятичных знака. Нули справа в обозначении K в большинстве случаев могут отбрасываться.

В общем случае будем считать, что n – количество десятичных знаков (цифр), составляющих K. Тогда K показывает на сколько десятичных порядков вырастет соответствующее значение рассматриваемого параметра роста за $2 \cdot 10^n$ лет.

Символом S без цифровых коэффицентов будем обозначать переменную, принимающую значение K. Для того, чтобы значение S было корректным для различных n для определения его целесообразно использовать следующую формулу:

S = 10•0,K.

Это, например, означает что для S1 S=1, для S05 S=0,5, для S225 S=2,25.

Минимальной единицей времени при расчетах будем считать один год, так в пределах года даже в случае самых быстрых темпов технического прогресса существенных изменений либо не наблюдается, либо они лежат в пределах возможных отклонений. Тогда для вычисления экспоненциально растущих значений *Pi* для любого i-го года (i > 0) при известном начальном значении P_0 может использоваться зависимость, аналогичная той, которая была приведена в работе [1] для обобщенного закона Мура:

$$Pi = P_0 \cdot 2^{S \cdot (Yi - Y0)/6},$$ где

Y_0 – начальный год действия соответствующей закономерности;

Yi – текущий год действия соответствующей закономерности;

Использование такой формы зависимости, описывающей закономерности роста, позволяет обеспечить совместимость системы обозначений, используемой для первого и второго обобщений, с обозначенями, описанными выше. При этом для шести вариантов закономерностей обобщенного закона Мура от L1 до L6 будем использовать, соответственно, обозначения от S1 до S6.

В таблице 2 приведены ежегодные коэффициенты роста sK для различных значений K, выраженных как X, 0X и 00X для 3-х вариантов базовых периодов.

Таблица 2 – Ежегодные коэффициенты роста для различных вариантов третьего обобщения закона Мура

		Ежегодные коэффициенты роста		
X	Коэффициенты роста за базовый период (20, 200, 2000 лет)	**20 лет:** sX	**200 лет:** s0X	**2000 лет:** s00X
1	**10**	**1,12**	1,012	1,0012
2	**100**	**1,26**	1,023	1,0023
3	**1 000**	**1,41**	1,035	1,0035
4	**10 000**	**1,58**	1,047	1,0046
5	**100 000**	**1,78**	1,059	1,0058
6	**1 000 000**	**2,00**	1,072	1,0069
7	10 000 000	2,24	1,084	1,0081
8	100 000 000	2,51	1,096	1,0093
9	1 000 000 000	2,82	1,109	1,0104
10	10 000 000 000	3,16	1,122	1,0116

В общем случае при произвольных значениях K таблица 1 может использоваться для определения значения K в соответствии со следующим алгоритмом:

Шаг 1: Определяем, за какой в период Y (в годах) происходит рост в Z раз.

Шаг 2: Извлекаем корень степени Y из Z.

Шаг 3: В таблице 1 в колонке «20 лет» находим ближайшее значение, не превышающее полученное на шаге 2. Соответствующий номер строки X будет первым десятичным знаком значения K. В случае полного совпадения значений на данном шаге алгоритм завершается.

Шаг 4: Определяем, во сколько раз значение, полученное на шаге 2 отличается от значения, определенного на шаге 3.

Шаг 5: В таблице 1 в колонке «200 лет» находим ближайшее значение, не превышающее полученное на шаге 4. Соответствующий номер строки X будет вторым десятичным знаком значения K. В случае полного совпадения значений на данном шаге алгоритм завершается.

Шаг 6: Определяем, во сколько раз значение, полученное на шаге 4 отличается от значения, определенного на шаге 5.

Шаг 7: В таблице 1 в колонке «2000 лет» находим значение, ближайшее к полученному на шаге 6. Соответствующий номер строки X будет третьим десятичным знаком значения K. На этом алгоритм завершается.

Естественно, что альтернативой значениям S могут быть просто коэффициенты ежегодного роста, но они. Как уже отмечалось, не дают достаточно наглядного представления о реальных многолетних темпах технического прогресса.

J-образные кривые развития

Четвертым, наиболее универсальным обобщением закона Мура можно считать описанное далее использование J-образных кривых развития.

Традиционно для описания динамики развития естетственных и технических систем используются S-образные кривые (или просто S-кривые), впервые предложенные в XIX веке бельгийским математиком Пьером Ферхю́льстом для моделирования динамики численности населения. Соответствующее уравнение было им названо логистическим (причина использования им именно такого названия остается невыясненной), в связи с чем соответствующие кривые также иногда определяются как логистические. К середине XX века S-кривые стали широко использоваться для описания динамики самых различных процессов развития, имеющих ресурсные ограничения. Уравнение кривой при этом имеет следующий вид:

$$\frac{dN}{dt} = rN\left(\frac{K-N}{K}\right),$$

где

N – некоторое отслеживаемое значение, изменяющееся в соответствии с логистической кривой;

K – предельное значение для N;

r – масштабный коэффициент.

На начальном этапе развития по S-траектории, когда текущее значение соответствующего критерия развития намного меньше предельного, кривая развития может рассматриваться как экспоненциальная, уравнение которой выглядит следующим образом:

$$\frac{dN}{dt} = rN.$$

Экспоненциальные траектории развития принято обозначать как J-кривые. Именно этот тип кривых развития, как будет, показано далее, является наиболее типичным для технических систем. При этом в большинстве случаев экспоненциальные процессы не переходят в классические S-кривые, как это имеет место в большинстве естественных и социально-экономических систем, а образуют специфические каскады J-кривых 2-х основных типов:

JJ-кривые, когда развитие доходит до некоторого предельного для текущей J-кривой значения и далее развитие идет в соответствии с новой J-кривой, как правило, существенной более пологой, чем предыдущая;

jJ-кривые, когда при достижении предельного для текущей J-кривой значения дальнейшее развитие идет в соответствии с новой более пологой J-кривой, начинающейся не с предельного значения, а с некоторого промежуточного, оптимального для дальнейшего развития, значения.

Выбор обозначения S как показателя темпов роста в третьем обобщении закона Мура при этом был обусловлен не только тем, что это начальный символ англоязычного слова speed, означающего скорость, но и тем, что большинство процессов развития в различных системах могут быть описаны различными S-образными кривыми, начальная часть которых представляет собой практически экспоненциальную или квазиэкспоненциальную кривую. В случае J-кривых и различных их каскадов в виде JJ-кривых и jJ-кривых вместо S целесообразно использовать значение J или Jp, где p – это длительность базового периода в годах. Для десятилетнего базового периода будет, соответственно, использоваться значение J_{10}, для двадцатилетнего J_{20} и т.д., что позволит в общем случае при необходимости вводить и использовать базовый период произвольной длительности. По умолчанию в качестве основного будет предполагаться базовый период в 20 лет, для обозначения которого будет использоваться J без каких-либо индексов, что, соответственно, будет эквивалентно использованию обозначения J_{20}.

Для упрощения вычисления Jp целесообразно вывести единую формулу, исходными значениями которой будут начальные и конечные годы и значения соответствующего периода экспоненциального роста, и реализовать ее вычисление с помощью, например, такого инструмента как MS Excel. Результатом вычисления будет число порядков роста за базовый период, имеющее в общем случае целую часть, эквивалентную для J_{20} значению первой цифры при обозначении S, а цифры дробной части будут эквивалентны соответственно второй, третьей и т.д. цифрам при обозначении S. Например, значение J=0,05 будет соответствовать S005, а значение J=1,23 будет соответствовать S123. Это означает, в частности, что вычисление J автоматически позволяет получить с требуемой точностью все цифры для обозначения S. В общем случае для сравнительного анализа достаточно просто вычислять и указывать для соответствующих J-кривых значение *Jp*.

При экспоненциальном развитии коэффициент ежегодного роста *Ry* при известных начальных и конечных значениях экспоненциально изменяющейся величины *Z* для периода от Yb до Ye вычисляется следующим образом:

$$\boldsymbol{Ry} = \sqrt[(Ye-Yb)]{\left(\frac{Ze}{Zb}\right)},$$

где

Yb – начальный год;

Ye – конечный год;

Zb - начальное значение;

Ze – конечное значение.

Рост на порядок за базовый период p (в годах) обеспечивается при ежегодном коэффициенте роста Rp, который вычисляется следующим образом:

$$\boldsymbol{Rp} = \sqrt[p]{\mathbf{10}}.$$

На базе данных двух значений вычисляется искомый показатель Jp – количество порядков, на которое происходит рост за базовый период:

$$\boldsymbol{Jp} = \boldsymbol{log_{Rp} Ry}.$$

Для реализации вычисления Jp на базе MS Excel используется функция *LOG(X;a)*, которая возвращает логарифм заданного числа X по заданному основанию a. При этом в качестве X используется значение Rp, а в качестве a – значение Ry.

Таким образом, для произвольной многолетней экспоненциальной зависимости, для которой известны значения в некоторый начальный и некоторый конечный год, можно определить показатель Jp, определяющий скорость роста за базовый период, что можно считать максимальным обобщением закона Мура.

Более детальный анализ различных зависимостей на примере множества конкретных примеров, связанных с развитием как компьютерных систем и технологий, так и прочих технических систем, приведен в работах [13-24], которые и послужили основой при написании данной статьи.

Выводы

На базе анализа различных вариантов закона Мура и связанных с ним прочих эмпирических закономерностей предложена четыре обобщенных варианта единого описания подобного рода законов и закономерностей, отличающиеся степенью детализации и универсальности. Предполагается также, что выявленная система закономерностей в области развития компьютерных систем и технологий может быть в той или иной степени обобщена применительно к другим техническим системам и технологиям, которые также (хотя и существенно более медленно) развиваются экспоненциально.

Литература

1. 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).
2. Мэлоун М. The Intel: как Роберт Нойс, Гордон Мур и Энди Гроув создали самую влиятельную компанию в мире. – М.: Эксмо, 2015. - 680 с.
3. Moore G. E. Cramming more components onto integrated circuits / Electronics, vol. 38, no. 8, Apr. 1965. P. 114–117.
4. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
5. Громов Г. Р. Национальные информационные ресурсы: проблемы промышленной эксплуатации. – М.: Наука, 1984. – 240 с.
6. Громов Г. Р. Очерки информационной технологии. – М.: Инфоарт, 1992. – 334 с.
7. Moore G. Progress in digital integrated electronics / Proc. of the International Electron Devices Meeting (IEDM'75), vol. 21, 1975. P. 11-13.
8. Moore G. Lithography and the Future of Moore's Law // SPIE, Vol. 2438, 1995. P. 2-17.
9. 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.
10. Feng W. The Importance of Being Low Power in High Performance Computing // Cyberinfrastructure Technology Watch Quarterly, vol. 1, no. 3, August 2005. P. 12-20.
11. Аноприенко А.Я. Системодинамика ноотехносферы: основные закономерности / Системный анализ в науках о природе и обществе. – 2014. – №1(6)-2(7). – С. 11-29.
12. Мартино Дж. Технологическое прогнозирование. – М.: Прогресс, 1977. – 592 с.
13. Аноприенко А.Я. Пределы информатики // «Информация и рынок». Теоретический и научно-практический журнал. – 1993. – №2-3. С. 10-14.
14. Аноприенко А.Я. Компьютерные науки и технологии: следующие 50 лет // Материалы научно-технической конференции «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС и КМ 2011)» – 12-13 апреля 2011 г., Донецк, ДонНТУ, 2011. Т.1. С. 7-22.
15. 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.
16. 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.
17. Аноприенко А.Я. Основные закономерности эволюции компьютерных систем и сетей // Научные труды ДонНТУ. Серия «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования». Выпуск № 1 (12) – 2 (13): Донецк: ДонНТУ, — 2013. С. 10–32.
18. 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.
19. Аноприенко А.Я. Система закономерностей развития средств и методов компьютинга // Материалы V всеукраинской научно-технической конференции «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС и КМ 2014)» – 22-23 апреля 2014 г., Донецк, ДонНТУ, 2014. В 2-х томах. Т. 1. С. 11-23.
20. Аноприенко О.Я., Варзар Р.Л., Иваница С.В. Закономерности развития аналого-цифровых преобразователей и перспективы использования постбинарного кодирования // Научные труды ДонНТУ. Серия: «Информатика, кибернетика и вычислительная техника». Выпуск 1 (19). – Донецк: ДонНТУ, 2014. С. 5-10.
21. Аноприенко А.Я. Периодическая система развития компьютерных систем и перспективы нанокомпьютеризации // Инновационные перспективы Донбасса: Материалы международной научно-практической конференции. Донецк, 20-22 мая 2015 г. Том 5. Компьютерные науки и технологии. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2015. С. 14-22.
22. Аноприенко А.Я. Программная инженерия и обобщенный закон Мура // Первая международная научно-практическая конференция «Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПИИВС-2016). Донецк, 16-17 ноября 2016 г. Сборник научных трудов. – Донецк: ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», 2016. – С. 41-47.
23. Аноприенко А.Я. Системодинамика техносферы: как измерить технический прогресс // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, 2015. № 1(8)-2(9). С. 47-58.
24. Аноприенко А.Я. Закономерности развития компьютерных технологий и обобщенный закон Мура // Вестник Донецкого национального технического университета, №2 (2), 2016. С. 3-17.

Anopriyenko A. Generalizations of Moore's Law. *Empirical observations, which characterize the dynamics of the exponential development of computer technology, are systematized and generalized. It is shown that the variety of basic regularities, including those characterizing Moore's law, can be represented as a series of generalized relatively simple dependencies. It is assumed that the revealed system of regularities has sufficient predictive properties of necessary accuracy for the short and long term.*

Статья поступила в редакцию 7.09.2017
Рекомендована к публикации доктором технических наук В.Н. Павлышом