

СХЕМОТЕХНИКА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

С момента изобретения транзистора технология изготовления элементной базы радиоэлектронной аппаратуры стала доминирующей по отношению к ее схемотехническому проектированию. Именно технологические требования определили "цифровизацию" схемотехники. Под влиянием этих требований произошел сдвиг от аппаратных средств к программным. Развитие полупроводниковой технологии в некоторой степени описал закон Мура, физическая граница существования которого неизбежна. Так как же развивалась и развивается схемотехника радиоэлектронной аппаратуры от изобретения транзистора и до близкого заката закона Мура?

Ретроспективный анализ развития схемотехники, технологии и конструктивных реализаций радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) позволяет выделить некоторые обобщенные группы аппаратуры. Аппаратура, входящая в одну и ту же группу, имеет общие характеристики, тогда как свойства аппаратуры соседних групп существенно различаются. Такие группы, формирующиеся, как правило, в течение достаточно продолжительного времени, принято называть поколениями РЭА. Наиболее характерным для каждого поколения РЭА следует признать набор активных и пассивных компонентов, на основе которых синтезируется аппаратура, поскольку этот набор отражает технологический уровень, конструктивную реализацию, а также возможность унификации различных блоков РЭА.

Исторически сложились следующие пять поколений РЭА:

- на основе вакуумных активных приборов, дискретных резисторов, конденсаторов и элементов индуктивности. Для этого поколения свойственен объемный монтаж активных и пассивных элементов и практически отсутствие схемотехнической и конструктивной унификации;
- на основе активных полупроводниковых приборов, дискретных резисторов, конденсаторов и элементов индуктивности. Здесь уже выполнялся печатный монтаж элементов и появилась схемотехническая и конструктивная унификация;
- на основе интегральных микросхем низкого уровня интеграции. Благодаря решению большого числа функциональ-

И.Лазер, к.т.н.
729lazer@mail.ru

ных задач цифровыми методами для этого поколения характерна значительная схемотехническая и конструктивная унификация вплоть до появления базовых несущих конструкций (БНК);

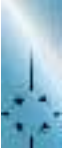
- на основе больших интегральных микросхем и микросборок. Этому поколению присуща магистрально-модульная конструктивная реализация;
- на основе микропроцессорных комплектов БИС – поколение, большинство функций которого реализовано с помощью микропроцессорных программ. Осуществлена интеллектуализация магистрально-модульных конструктивов.

Между смежными поколениями аппаратуры, естественно, нет резких границ, поскольку новая компонентная база не сразу внедряется во все виды и классы РЭА, а соответствующие конструктивные инновации также обладают некоторой инертностью. Поэтому в полной мере все важные характеристики каждого поколения достигаются в середине срока жизни поколения.

Изобретение в 40-х годах прошлого века транзистора послужило революционным толчком к созданию аппаратуры второго и всех последующих поколений, поскольку $n-p-n$ ($p-n-p$) переходы и сегодня в той или иной мере формируют твердотельную компонентную базу аппаратуры. Именно с момента изобретения транзистора выявляется приоритет технологии производства компонентной базы относительно схемотехники аппаратной реализации.

Причина активного внедрения в разработки РЭА транзисторов – не только снижение массогабаритных характеристик активных элементов, но и возможность их массового производства на одном кристалле в едином технологическом цикле с высокой идентичностью электрических характеристик. Естественно, при этом снижалась относительная стоимость каждого прибора.

Схемотехнические характеристики аппаратуры первого и второго поколений отличались незначительно. В основном, это были импульсные устройства, выполненные на основе мультивибраторов, триггеров различных типов, логических элементов, а также устройств согласования и усиления



импульсных сигналов. Небольшое разнообразие элементарных функций позволило поставить вопрос о схемотехнической конструктивной унификации элементов аппаратуры. В 1960-е годы эта задача была решена в результате разработки ряда унифицированных функциональных узлов (УФУ) в плоскостном исполнении и модулей ММ2 в объемном исполнении.

Идея интеграции активных приборов (транзисторов) и пассивных элементов (резисторов) на одном полупроводниковом кристалле позволила реализовать компонентную базу аппаратуры третьего поколения – интегральные микросхемы (ИС) [1, 2]. Конечно, на уровне импульсной схемотехники аппаратуры второго поколения для синтеза требуемых функций помимо транзисторов были необходимы и другие элементы: резисторы, конденсаторы, индуктивности. Но эти элементы с точки зрения полупроводниковой технологии нежелательны, поскольку занимают слишком большую площадь кристалла, а по своим электрическим характеристикам далеки от идеальных компонентов: резисторы имеют паразитные емкости, а у конденсаторов низкие значения тангенса угла потерь, т. е. велики утечки. Следовательно, для реализации всех возможностей полупроводниковой технологии необходимо было найти схемотехнические решения, позволяющие применять в основном активные приборы (транзисторы и диоды) и резисторы, позволяющие получать требуемые режимы работы активных элементов. В принципе такие решения уже существовали. Это – цифровая схемотехника, с помощью которой можно реализовать любую сколь угодно сложную функцию, имея набор необходимых и достаточных элементов, так называемых избыточных базисов: И, НЕ либо ИЛИ, НЕ. Более компактные схемотехнические решения той же функции можно получить с помощью функционально избыточного набора элементов И, ИЛИ, НЕ. Для синтеза и минимизации требуемых функций существовал достаточно хорошо разработанный математический аппарат в виде булевой алгебры и теории конечных автоматов. Все эти технологические, схемотехнические и теоретические предпосылки определили формирование компонентной базы аппаратуры третьего поколения в виде интегральных микросхем, в основном цифровых. Следует напомнить, что разработчики аппаратуры второго поколения синтезировали необходимые схемотехнические решения, опираясь, чаще всего, на опыт и интуицию, тогда как при создании РЭА третьего поколения стали широко применять автоматизированные методы схемотехнического проектирования.

Если сравнивать схемотехнические затраты на реализацию функций в импульсной и цифровой технике, то для последней эти затраты представляются весьма избыточными. Может быть, по этой причине цифровая техника практически не применялась в аппаратуре второго поколения. Например, для создания импульсного Т-триггера (счетного) необходимы два транзистора, восемь резисторов и четыре конденсатора (рис.1а). А, например, ТТЛ-схема такого же триг-

гера на логических элементах И-НЕ (триггер Вебба [3]) требует 30 транзисторов (диод формируется путем объединения областей базы и эмиттера транзистора) и 24 резистора (рис.1б, в). Но определяющее достоинство интегральной технологии – относительное уменьшение размеров сопоставимых систем почти на два порядка.

Отечественная электронная промышленность, начав с разработки германиевых ИС типа Р-12-2 [4], довольно быстро освоила производство кремниевых ТТЛ-микросхем, содержащих только транзисторы и резисторы, т. е. набор элементов, практически близкий к идеальному для реализации в полупроводниковой технологии.

Требования разработчиков аппаратуры к характеристикам логических элементов, на основе которых проектируется аппаратура, достаточно противоречивы. Так, необходи-

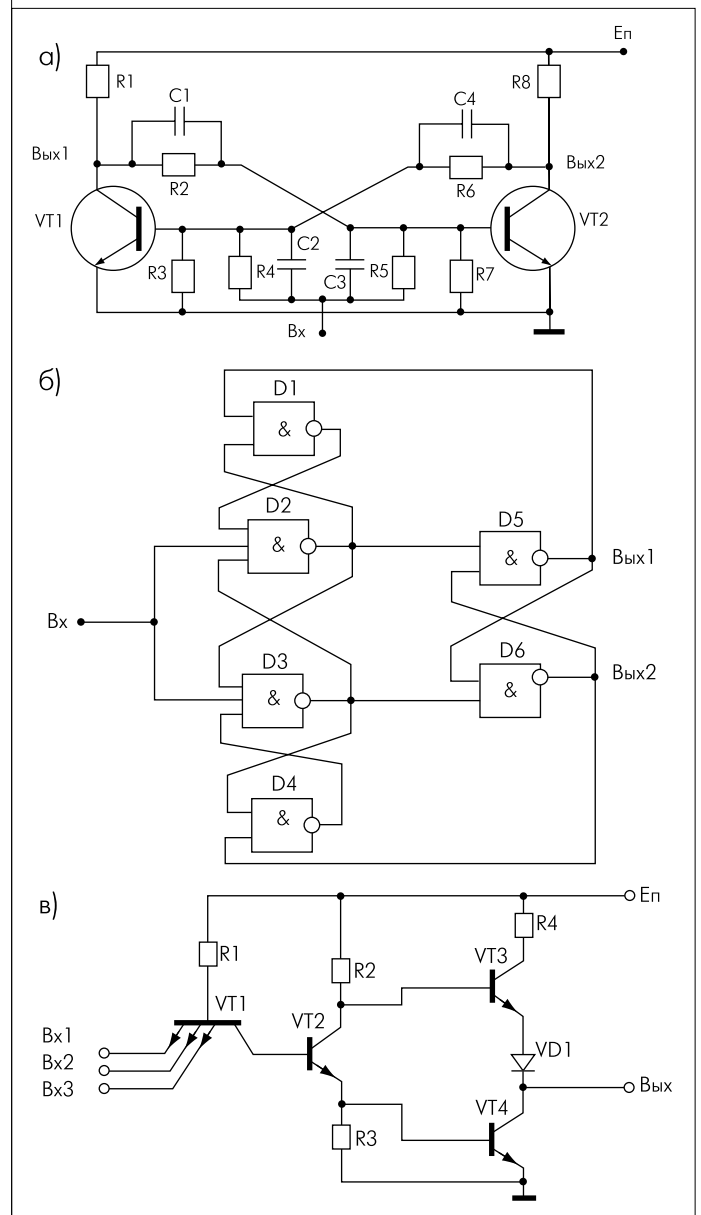


Рис. 1. Принципиальная схема Т-триггера, реализованного на принципах импульсной техники (а); на элементах И-НЕ (триггер Вебба) (б); принципиальная ТТЛ-схема элемента ЗИ-НЕ (в)

мо минимизировать время переключения элемента (максимизировать быстродействие), потребляемую им мощность и его физический размер (площадь, занимаемую на кристалле). Технологические разработки позволили создать ТТЛ-микросхемы с временем задержки распространения сигнала в элементе $t_3 \approx 1,5\text{--}2$ нс, ТТЛШ (транзисторно-транзисторная логика с переходами Шоттки) с $t_3 \approx 0,8\text{--}1$ нс, ЭСЛ-микросхемы с $t_3 > 0,1\text{--}1$ нс [5]. Но платой за достигнутое быстродействие оказалась мощность, затрачиваемая логическим элементом (P_3). Эмпирическая зависимость этих параметров описывается гиперболической функцией $t_3 \approx 1/P_3$, из чего следует, что P_3 ТТЛ-схем равна ~ 1 мВт, ТТЛШ – $\sim 3\text{--}5$ мВт и ЭСЛ – $\sim 10\text{--}40$ мВт.

Для получения интегрального показателя качества логического элемента было введено понятие – работа переключения $A_n = P_3 \cdot t_3$. Для основных типов логических элементов в достаточно широком диапазоне значений питающего напряжения, а следовательно, и потребляемой мощности P_3 значения A_n приблизительно одинаковы и составляют $\sim 10^{-12}$ Дж.

Уменьшение значения A_n было достигнуто в результате создания логических элементов интегральной инжекционной логики (И²Л) [6], что позволило почти вплотную подойти к теоретическому пределу этого параметра, оцениваемому на уровне $10^{-15}\text{--}10^{-18}$ Дж. К тому же, элементы И²Л – это схемотехнически идеальные компоненты с точки зрения технологической реализации, так как для их создания не требуются резисторы, занимающие на кристалле намного большую площадь, чем транзистор.

Дальнейшее развитие полупроводниковой технологии позволило получить не только логические элементы на биполярных транзисторах, к которым относятся все рассмотренные выше устройства, но и элементы на транзисторах со структурой металл–диэлектрик (или оксид)–полупроводник (МДП, или МОП). Уникальными в отношении потребляемой мощности стали логические элементы на комплементарных МОП (КМОП)-транзисторах. При частоте переключения $1\text{--}10$ МГц рассеиваемая их мощность $P_3 \approx 10\text{--}20$ мкВт.

С точки зрения цифровой техники (теории конечных автоматов) переход элемента из одного состояния в другое должен сопровождаться энергетическими затратами, т. е. работой переключения A_n . Но вот затраты на нахождение в некотором состоянии (упомянутая выше рассеиваемая мощность P_3) могут рассматриваться как энергетические потери. Ведь существуют энергонезависимые ЗУ, не требующие энергетической платы за сохранение состояния памяти. Эта идея уже поднималась директором по технологической стратегии компании Intel П.Джарджини [7], который заметил, что в современных полупроводниковых структурах электроны перемещаются от истока к стоку, а затем теряются. Задача состоит в том, чтобы переместить эти электроны на некий заранее известный уровень без их потери и, при необходимости,

вернуть их в исходное состояние. Таким образом, можно выполнять множество операций без потери электронов, затрачивая энергию только на изменение их состояния.

Разработка компонентной базы РЭА третьего поколения привела к созданию более крупных функциональных элементов цифровой техники, используемых во всех классах аппаратуры: триггеров различных типов – RS, D, T, JK; счетчиков; регистров (накопительных, сдвигающих); схем сравнения; сумматоров; дешифраторов; преобразователей кодов.

Проектирование комбинационных и последовательностных (регистров, счетчиков, генераторов чисел и других многоадресных схем, построенных на элементах памяти) цифровых устройств на микросхемах с низким уровнем интеграции без учета влияния производственных и конструктивно-технологических факторов, а также параметров окружающей среды, зачастую приводит к функциональной неустойчивости аппаратуры. К производственному фактору следует отнести разброс значений параметра t_3 логического элемента, к конструктивно-технологическому – разброс задержки сигнала в линиях связи, выполненных на печатных платах, шлейфах, кабелях. Изменение температуры, давления и влажности окружающей среды, а также инвариантность этих показателей усугубляют проблему обеспечения функциональной устойчивости аппаратуры.

Представим, например, что ракета находится на стартовой установке, в условиях, где температура окружающей среды может составлять 50°C . После старта за несколько десятков секунд ракета окажется в условиях стратосферы, и температура окружающей среды снизится до -50°C . Тепловые процессы в бортовой аппаратуре достаточно инертны, и поэтому градиент температуры различных частей аппаратуры, скорее всего, может составить 100°C . Задача разработчика РЭА состоит в том, чтобы и в этих условиях заданная функция аппаратуры реализовывалась устойчиво.

Синтезированная в аппаратуре по идеальной модели цифровых схем функция реализуется даже при ее моделировании на компьютере, но в реальных условиях, когда на работу аппаратуры влияют все перечисленные факторы, возможны сбои, которые нельзя устранить из-за многофакторности и непредсказуемости поведения большого числа логических элементов, объединенных в больших конструктивах. Поэтому были разработаны методы обеспечения функциональной устойчивости цифровой аппаратуры [8, 9], позволившие создать устойчивые типовые функциональные схемы различных устройств, обобщенные для разработчиков РЭА в стандарте ОСТ4 Г0.303.201 "Узлы и блоки радиоэлектронной аппаратуры на микросхемах. Типовые функциональные схемы цифровых устройств."

Относительная простота технологического выполнения и схемотехническая универсальность получения любой цифровой функции привели к разработке и серийному произ-



водству цифровых микросхем различных серий. Многие задачи, ранее решаемые аналоговыми средствами, получили возможность цифровой реализации.

По общему мнению специалистов, переход от РЭА первого поколения к РЭА второго поколения стал возможен благодаря революции в технологии изготовления полупроводниковых приборов. Развитие технологии, которое привело к повышению уровня интеграции микросхем, следует признать эволюционным. Правда, эта эволюция – явно нелинейный процесс, а скорее всего, экспоненциальный, поскольку в настоящее время некоторые параметры полупроводниковых изделий приблизились к физическому пределу. Так, в МОП-транзисторах нельзя уменьшать толщину затворного окисла менее $6 \cdot 10^{-9}$ м, поскольку при столь малой толщине возможно туннелирование электронов через оксид, что приведет к неработоспособности транзистора. Компанией IBM разработаны логические элементы на базе эффекта Джозефсона с $A_n = 10^{-16}$ Дж (теоретический предел этого параметра – 10^{-18} Дж).

Необходимость повышения уровня интеграции микросхем была обусловлена рядом причин. Во-первых, технологии изготовления микросхем и проектирования РЭА на их основе – встречно направленные процессы. Действительно, при производстве микросхем на кремниевой пластине изготавливается большое число структур будущих микросхем. На конечном этапе пластина разрезается на кристаллы, которые помещают в корпус. И здесь происходит конструктивная дезинтеграция. Размеры кристалла с микросхемой и корпуса, в который он монтируется, как минимум, отличаются на порядок. При создании РЭА микросхемы в корпусах устанавливаются на печатных платах, и происходит интеграция микросхем на новом уровне, но со значительными конструктивными потерями.

Во-вторых, при размещении на печатных платах цифровые микросхемы объединяются печатными проводниками узлов, а блоки и устройства на межблочном уровне – шлейфами, жгутами и кабелями. В силу резистивно-емкостных характеристик соединений возникает дополнительная задержка распространения сигнала, равная $t_{3,cb} \approx 0,07$ нс/см.

При задержке сигнала в логическом элементе $t_3 \geq 10$ нс можно считать, что

$$t_3 \gg t_{3,cb}, \quad (1)$$

поэтому $t_{3,cb}$ не учитывается при расчетах функциональной устойчивости РЭА. В математических моделях цифровых автоматов именно последнее соотношение является основополагающим для анализа и синтеза схемотехнических решений, свободных от различного вида состязаний сигналов, которые могут приводить к неустойчивым состояниям (сбоям в реализации переключательной функции).

Классический пример состязаний сигналов можно наблюдать в Т-триггере, построенном по MS-структуре (рис.2), где логический элемент D5 вступает в состязания с цепочками элементов D1–D3–D6 или D2–D4–D7. В такой схеме на-

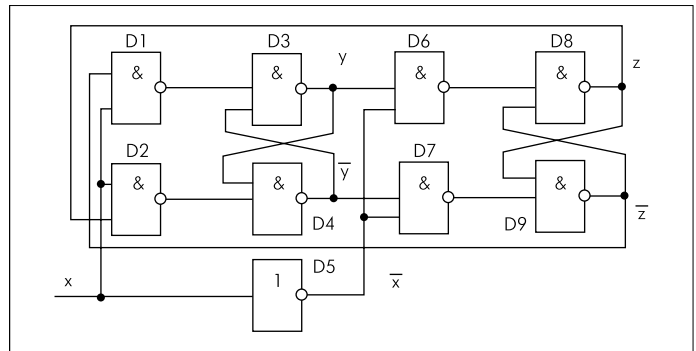


Рис.2. Логическая схема Т-триггера (MS-структура), содержащая существенные состязания

блюдаются существенные состязания сигналов, при наличии которых первичная переменная (x, \bar{x}) вступает в состязания с вторичной переменной (y, \bar{y}). Возможный результат таких состязаний – неалгоритмическое состояние переменной (z, \bar{z}). Другая структура этого триггера (рис.3), синтезированная с применением противогоночного кодирования [8], при выполнении условия (1) позволяет получить функционально устойчивую схему.

С учетом того, что задержка переключения быстродействующих цифровых логических элементов, например на арсениде галлия, $t_3 = 0,1-0,075$ нс, не считается с задержкой сигналов в элементах связи невозможно. Следует заметить, что в настоящее время математического аппарата синтеза цифровых автоматов, который бы позволял учитывать возможные в реальной РЭА значения $t_{3,cb}$, не существует.

Функциональная неустойчивость цифровых устройств проявляется при процессах перехода из одного состояния в другое. Если же получать информацию о начале и конце переходного процесса и, согласно этой информации, изменять состояние входов устройства только после окончания переходного процесса, вызванного предыдущим состоянием входов, то можно было бы обеспечить устойчивую работу цифрового устройства независимо от разбросов параметра t_3 . Такая идея была реализована в виде теории аperiodических автоматов В.И.Варшавским [10]. Для определения моментов окончания переходного процесса были предложены так называемые гистерезисные триггеры (Г-триггеры). Фактически аperiodический автомат работает устойчиво на предельно возможной скорости для данного набора логических эле-

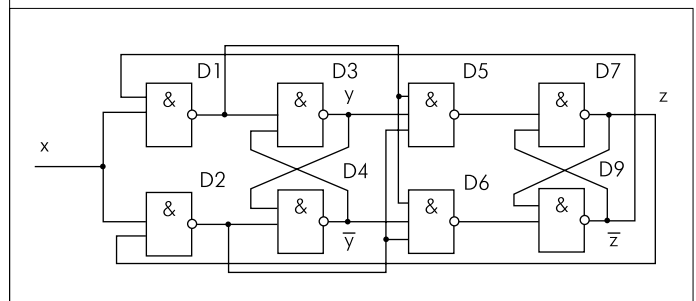


Рис.3. Функционально устойчивая схема Т-триггера

ментов и данного значения дестабилизирующих факторов внешней среды. Однако и для апериодических автоматов требуется выполнение условия (1).

Частично проблему функциональной устойчивости в отношении параметра $t_{3,св}$ можно было бы решить, если реализовывать большие функциональные части на одном кристалле. Тогда относительно тонкие и короткие линии связи имели бы достаточно малую задержку и выполнялось бы соотношение $t_3 \gg t_{3,св}$.

Большое число логических элементов, расположенных на одном кристалле, изготавливается в едином технологическом цикле, и поэтому их параметры в значительной степени идентичны, в том числе уменьшается разброс Δt_3 , основным следствием которого является возникновение состязаний сигналов различных типов. Кроме того, если считать, что стоимость технологической операции мало зависит от числа одновременно изготавливаемых логических элементов, то увеличение степени интеграции ведет к снижению относительной стоимости одного логического элемента. Все эти предпосылки способствовали появлению в качестве компонентной базы РЭА четвертого поколения микросхем с высоким уровнем интеграции – БИС. Более того, на первом этапе их разработки считалось, что стоимость программного обеспечения вычислительных процессов значительно выше стоимости их аппаратной реализации. Поэтому БИС могли служить достаточно дешевой заменой программного обеспечения аппаратными средствами.

Решение задач РЭА различных классов цифровыми методами привело к созданию общей компонентной базы, на которой строится аппаратура. Вместе с тем, каждый класс задач имеет свои особенности в части ввода-вывода информации, переходов на исполнительные и индицирующие устройства. Эти части аппаратуры оказались весьма проблемными или "неинтегрируемыми" на уровне РЭА третьего поколения. Однако успехи полупроводниковой технологии в области производства бескорпусных активных элементов и разработка методов изготовления качественных пассивных элементов по тонко- и толсто пленочной технологиям позволили проектировать специализированные микросхемы на основе совместимых конструктивов – микросборки. Построение РЭА четвертого поколения на стандартных цифровых БИС и микросборках привело к весьма высокой конструктивно-технологической и схемотехнической однородности аппаратуры различных классов.

Относительно малое быстродействие первых цифровых БИС при необходимости работы аппаратуры различных классов в реальном масштабе времени привело к проектированию БИС, ориентированных на реализацию узкого круга функций, характерных только для РЭА одного класса. Это обеспечивало требуемое быстродействие компонентной базы, но стоимость проектирования и изготовления таких БИС небольшой серийности была достаточно высокой. Диалектика дальнейшего развития полупроводниковой технологии изготовле-

ния БИС позволила получить как сверхвысокое быстродействие логических элементов, так и огромное число логических элементов на одном кристалле (свыше 400 млн. шт.). Такие результаты позволили разработать микропроцессорные комплекты БИС (МПК БИС) и на новом витке развития вернуться к унификации схемных решений БИС, а проблему различия функциональных задач всех классов РЭА свести к разработке специальных программных средств. В этом случае высокая стоимость проектирования МПК БИС компенсируется большой серийностью их производства, что обеспечивает снижение их стоимости в расчете на одну БИС в корпусе.

Подтверждением последнего положения можно считать реально действующий до сих пор эмпирический закон Мура [11, 12], который констатирует, что каждые полтора-два года число транзисторов на кристалле одной микросхемы удваивается, а стоимость микросхемы падает в два раза. Но утверждение, касающееся уменьшения стоимости микросхемы либо нелогично, либо требует уточнения, поскольку, если через два года функциональная емкость микросхемы увеличится в два раза, то вряд ли ее цена упадет в два раза. Но если новая микросхема будет стоить столько же, сколько старая (два года назад), то относительная стоимость действительно снизится в два раза.

В связи с высокой динамикой роста числа транзисторов микросхемы проблемы синтеза требуемой функции смещаются в область программного обеспечения. Но вот статистика изменения быстродействия каждой следующей версии операционной системы Microsoft Windows показывает замедление этого параметра в полтора раза. В то же время другое следствие закона Мура указывает на удвоение тактовой частоты работы микропроцессоров. По закону Мура развивается и такая характеристика микросхем, как плотность транзисторов на кристалле. Под закона Мура подпадают не только микросхемы, но и другие средства – жесткие диски, аппаратные и программные средства компьютера. Если этот закон универсален, не является ли он частью философского закона всеобщего развития – диалектики? Но тогда в отношении ОС Microsoft Windows справедливо поставить следующие три вопроса:

- подчиняются ли поколения этих систем закону Мура по параметру быстродействия?
- почему изменение быстродействия поколения этих систем носит регрессивный характер?
- что получают пользователи микропроцессоров, а фактически, пользователи ПК, если прогрессивный характер развития аппаратных средств тем или иным способом будет взаимодействовать с регрессивным характером развития программных средств?

И, наконец, о возможных сроках действия закона Мура. Если бы это был естественный физический или социальный закон, он объективно не имел бы временных границ. Когда в 2005 году в одном из интервью Г.Мура спросили, как дол-



го будет действовать его закон, он с юмором ответил: "...во всяком случае до тех пор, пока Мур будет что-либо делать". Деятельность корпорации Intel в рамках закона Мура позволила в 2005 году получить прогнозируемые результаты: процессор Itanium на платформе Montecito содержит 1,72 млрд. транзисторов. Но раньше или позже размеры транзисторов должны приблизиться к своим физическим пределам, что и определит временную область существования закона Мура. Математическое описание закона Мура в виде $N_y = N_0 2^{y/P_y}$, где N_y – число транзисторов в микросхеме через время y (в годах), N_0 – исходное число транзисторов в микросхеме при $y = 0$, P_y – период удвоения N_0 (в годах), предложил Сорокин А.Д. (<http://electrosad.narod.ru./Processor/ProcMooR.htm>). Это выражение представляет собой непрерывную функцию, которая не имеет физического смысла внутри периода удвоения числа транзисторов, поскольку новые поколения микросхем вряд ли выпускаются каждый месяц. Поэтому более логичным представляется дискретное представление этой функции: $N_y = N_0 2^{n P_y / P_y} = N_0 \cdot 2^n$, где $n = 1, 2, 3, \dots$ – количество сроков удвоения числа транзисторов микросхемы, начиная с уровня N_0 .

Полученная формула описывает геометрическую прогрессию с весьма интенсивным нарастанием N_y , что может быть еще одним доказательством существования временной границы закона Мура.

А что же дальше? Диалектика гласит о спиралевидном развитии с некоторыми качественными скачками. Так вот один из возможных вариантов гипотетически высказал упомянутый выше П. Джарджини из компании Intel – далее следует организация передачи сигналов на уровне спина элементарных частиц с многократным использованием одних и тех же электронов. По другому предположению – это построение транзисторов на основе углеродных и кремниевых нанотрубок, но поскольку их диаметр составляет 1–2 нм, то это и будет физическим ограничением размеров транзистора, а в этом случае угрожающей становится проблема отвода тепла, образующегося из-за огромной концентрации рассеиваемой мощности.

В ближайшей же перспективе, можно полагать, что аппаратура пятого поколения на базе МПК БИС и микросборок, обладающая высокой степенью схемотехнической и конструктивно-технологической унификации, позволит реализовать весьма жесткие требования к различным параметрам РЭА при снижении стоимости ее проектирования и производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kilby J.S. Semiconductor solid circuits. Presented at American Rocket Society Corp. – 14-th Annual Meeting, Nov. 1959.
2. Pat. USA №2981877 Noyce R.N. Semiconductor Device and Lead Structure, 1961.
3. Patent USA N3374393, 1964. Webb J.E. Counter

and Shift-register.

4. Малашевич Б.М. Первые отечественные интегральные схемы. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2008, №5, с.108–117.
5. Алексенко А.Г., Шагурин И.И. Микросхемотехника. – М.: Радио и связь, 1990.— 496 с.
6. Шагурин И.В., Петросянец К.О. Проектирование цифровых микросхем на элементах инъекционной логики. – М.: Радио и связь, 1984.— 232 с.
7. Chip News, 2005, №5 (98).
8. Пятлин О.А., Овсицер П.И., Лазер И.М., Кулешов А.И., Шубарев В.А. Проектирование микроэлектронных цифровых устройств. – М.: Советское радио, 1977.— 272 с.
9. Лазер И.М., Шубарев В.А. Устойчивость цифровых микроэлектронных устройств. – М.: Радио и связь, 1983.— 216 с.
10. Аперидические автоматы. Под ред. В.И.Варшавского. – М.: Наука, 1976.— 24 с.
11. Moore G. Progress in Digital Integrated Electronics. – IEEE, IEDM Tech. Digest, 1975.
12. Moore G. Lithography and Future of Moore's Law.— Proc. SPIE 1975, v.2437.