



ВВЕДЕНИЕ

На страницах журнала «Автоматизация в промышленности» регулярно в течение 10 лет обсуждаются вопросы, связанные с развитием рынка встраиваемых компьютерных технологий и использующих их встраиваемых и мобильных решений. Мы обсуждали технические аспекты встраиваемых решений, связанные с уменьшением форм-факторов при увеличении производительности, уменьшением энергопотребления, отсутствием механических деталей, использованием двухъядерных, а теперь уже и четырехъядерных процессоров и т. д. На страницах журнала отражалась судьба фирм-участников рынка: сотрудничество и конкуренция, слияния и поглощения, деятельность профессиональных сообществ. В публикациях наших авторов рассматривались плюсы и минусы частнофирменных решений и открытых стандартизированных платформ, преимущества различных архитектур, прослеживалось развитие интерфейсов.

В год 10-летия журнала «Автоматизация в промышленности» проанализируем ключевые события рынка встраиваемых компьютерных технологий и мобильных решений за последние 10 лет.

Предлагаем вниманию читателей обзорные материалы:
– освещающие развитие технологий, на базе которых создаются встраиваемые решения, успехи и неудачи их разработчиков;
– анализирующие особенности развития разнообразных встраиваемых решений.

Приведем мнения специалистов по аппаратному и программному обеспечению, имеющих реальный опыт работы в данном секторе рынка промышленной автоматизации.

В разделе «Технические средства автоматизации» собраны материалы, описывающие примеры современных встраиваемых и мобильных решений от различных производителей.

ВСТРАИВАЕМЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПОДРЫВНЫЕ ИННОВАЦИИ ИЛИ КАК ДОСТИЧЬ УСПЕХА

Н.И. Аристова (Журнал «Автоматизация в промышленности»)

Выделены ключевые технологии в области встраиваемых компьютерных систем, появившиеся в последнее 10-летие: изменение ТП производства микросхем, многоядерные процессоры, виртуализация вычислений, 64-разрядные процессоры и устройства с повышенными требованиями к безопасности. Перечислены технические и неформальные характеристики современных встраиваемых ОС, которые разработчики учитывают при выборе ОС.

Ключевые слова: встраиваемые компьютерные системы, технологический процесс производства микросхем, многоядерные процессоры, виртуализация, 64-разрядные процессоры, безопасность, ОС.

В 2000 г. в области встраиваемых компьютерных систем впервые появился термин "технологии-киллеры" (Killer Technologies). Так назвали важнейшие технологии, определяющие развитие этой отрасли, эффективное использование которых способно "убить" конкурента. К технологиям-киллерам были отнесены: язык Java, ОС Linux, применение реконфигурируемых процессоров, системы высокой готовности (high availability – HA), коммутируемые связанные структуры (switched fabric), используемые в качестве межсоединений системного уровня, сетевые процессоры. Далее технологии развития встраиваемых систем приняли более "миролюбивый" характер, «киллеры» более не упоминались. Это понятие вновь всплывало позднее в области программных приложений (Killer applications).

Область встраиваемых компьютерных систем продолжала свое развитие. Открывались новые методы повышения конкурентоспособности, прокладыва-

лись пути, позволяющие соответствовать современным требованиям рынка.

В 2010 г. в публикациях, анализирующих состояние рынка встраиваемых систем, выделялись так называемые подрывные инновации (инновации, предполагающие не развитие существующих технологий, а их полную замену), благодаря которым производители устройств промышленного назначения получают значительные возможности по улучшению как самих устройств, так и бизнеса в целом. В частности, среди технологий, предоставляющих широкие возможности для достижения конкурентных преимуществ, выделялись [1]:

- многоядерные процессоры;
- виртуализация вычислений;
- устройства с повышенными требованиями к безопасности.

Добавим к этому списку:

- 64-разрядные процессоры и
- изменение ТП производства микросхем.

Жизнь - это бесконечное совершенствование. Считать себя совершенным - значит убить себя.
Фридрих Кристиан Геббель

Многоядерные процессоры

В течение многих лет электронной промышленности удавалось снижать размеры элементов и размещать все больше транзисторов на той же площади микросхемы. Это стало основой закона Мура, представляющего собой результат эмпирического наблюдения о том, что число транзисторов на микросхеме удваивается каждые 18 ...24 мес. Однако в конце XX века этот прогресс вошел в противоречие с законами физики. Проблема заключается в том, что уменьшение размеров элементов происходит во всех трех измерениях. В результате различные слои микросхемы становятся слишком тонкими, что приводит к повышению энергоемкости процессоров и их перегреву. Если бы данная тенденция продолжилась, то, как говорят некоторые прогнозы, электронные микросхемы стали бы излучать столько же энергии (если брать на единицу площади), как поверхность Солнца. Другими препятствиями к продолжению развития в данном направлении стали разность в скорости работы между микросхемами процессоров и памяти, а также сложности в реализации все большего параллелизма обработки данных на одном процессорном ядре [2].

Таким образом, путь простого увеличения плотности размещения транзисторов на кристалле и повышения тактовой частоты практически исчерпал свои возможности. Решением, принятым на вооружение компанией Intel и другими производителями микросхем, стало размещение двух исполнительных ядер на каждой микросхеме. Каждое ядро является в значительной степени независимым процессором, хотя и с разделением некоторых ресурсов с соседями.

Новейшие многоядерные процессоры демонстрируют значительное увеличение общей производительности и производительности на 1 Вт, по сравнению с одноядерными. Микроархитектура нового поколения характеризуется оптимизированным энергопотреблением и миниатюризацией (начали выпускаться микросхемы, изготавливаемые по 22-нанометровой технологии).

Одновременно с миниатюризацией развивается уровень интеграции. Интерфейсные технологии продолжают интегрироваться в процессорные микросхемы, улучшая их характеристики и расширяя функциональность. Для пользователя высокая интеграция эквивалентна низкой стоимости и увеличению надежности конечных систем.

Системы на базе многоядерных процессоров также обеспечивают большую масштабируемость, позволяя наращивать вычислительную мощность увеличением числа ядер без вмешательства в ПО [1].

Таким образом, применение многоядерных процессоров стало наиболее подрывной и вместе с тем наиболее многообещающей инновацией на рынке встраиваемых систем за последние 10 лет.

Виртуализация вычислений

Другая важная технологическая тенденция класса «подрывных» — это виртуализация вычислений. Она предоставляет возможность нескольким виртуальным машинам работать на одной физической плате, представляя нижележащие ядра процессора, память и периферийные устройства как уровень абстракции. Виртуализация позволяет использовать в одном и том же устройстве одновременно несколько ОС.

Технология виртуализации, предложенная компанией Intel — Intel Virtualization Technology, является компонентой двухъядерной технологии, обеспечивает более простое администрирование аппаратными средствами, позволяет работать множеству ОС и приложений как "виртуальным машинам" в независимых разделах на одной платформе. Это делает всю систему более устойчивой, так как разделяет процессы, которые конкурировали между собой за процессорное время в рамках системы с одним ядром. Разделы могут присваиваться по мере необходимости даже в условиях уже работающих систем. Благодаря более высокому уровню абстракции приложения могут "перемещаться" с одного сервера на другой. Виртуализация предлагает опцию для интеграции старых изолированных систем таких, как управление, сетевые экраны и серверы данных, которые раньше полностью изолировались от других частей системы. Все вместе это способствует значительному уменьшению стоимости решения [3].

Прирост производительности, обеспечиваемый комбинацией многоядерного процессора и технологии виртуализации, позволяет объединить в одном устройстве функции, ранее выполняемые несколькими отдельными устройствами. Такая интеграция уменьшает общий объем оборудования и снижает энергопотребление, что позволяет сократить число необходимых компонентов и получить выигранный в эксплуатационных расходах.

64-разрядные процессоры

Корпорация Intel, признанный лидер микропроцессорной отрасли, приступила к разработке 64-разрядных архитектур в 1991 г., а первые системы на базе 64-разрядного процессора Itanium появились на рынке в 2001 г. Однако основное ПО на тот момент разрабатывалось с учетом 32-разрядной архитектуры. Но 32-разрядные приложения на мощных современных платформах Intel могли выполняться только в режиме эмуляции, что затормозило распространение инновации. Прорыв наступил в 2003 г., когда компания Advanced Micro Devices представила платформу AMD64, а также семейство 64-разрядных серверных процессоров Opteron. В отличие от Itanium

на Opteron 32-разрядные приложения выполнялись с максимальной эффективностью. AMD положила начало переходу к более эффективным (с точки зрения соотношения цена/производительность) серверам. При этом пользователям не нужно было ждать появления 64-разрядных приложений. В 2004 г. компания Intel представила процессоры Pentium 4 с поддержкой 64-разрядных расширений, предназначенные для настольных ПК, а в 2005 г. — 64-разрядные версии процессоров Xeon для рабочих станций и серверов (<http://stfw.ru>). Так началась эра 64-разрядных процессоров.

Современные компьютеры оперируют данными, представленными в двоичном формате, 64-разрядные процессоры способны обрабатывать в определенный момент времени максимальный размер двоичных чисел. 64-разрядная платформа дает возможность приложениям, работающим с большими объемами данных, загружать их в память, создавая по-настоящему крупные структуры. Реализация технологий параллелизма и многопоточности на 64-разрядном процессоре значительно увеличивают удельную производительность встраиваемого дискретного устройства на 1 Вт потребляемой энергии. Этот параметр в прикладном плане видится важным критерием оценки функциональной дееспособности интегрируемого компьютера.

В настоящее время 64-разрядные процессоры применяются и во встраиваемых системах. Компания VIA пополнила семейство процессоров Nano для встраиваемых систем 64-разрядной версией Nano E. Новые процессоры поддерживают принцип виртуализации, позволяющий выполнять приложения в виртуальных средах, не оказывая влияния на быстродействие системы в целом. Компания отмечает значительный прирост производительности за счет перехода на 64-разрядную архитектуру благодаря двукратному увеличению объема данных, которые процессор способен обработать за один такт (www.ixbt.com/news/hard/index.shtml?13/20/34).

В конце 2012 г. компания Intel представила семейство процессоров Intel® Atom™ S1200 — первые в мире маломощные 64-разрядные серверные однокристальные системы, предназначенные для микросерверов с высокой плотностью размещения вычислительных ресурсов и нового класса энергоэффективных сетевых систем и систем хранения данных. Однокристальная система имеет два физических ядра и поддерживает четыре вычислительных потока благодаря технологии Intel® Hyper-Threading. Она также имеет контроллер памяти с поддержкой до 8 Гб памяти DDR3, восемь каналов PCI Express 2.0, поддерживает 64-разрядные вычисления, технологию Intel® Virtualization (Intel® VT), код коррекции ошибок (ECC) и другие интерфейсы ввода/вывода, реализованные в наборах микросхем. Новое семейство процессоров будет включать три модели процессоров с тактовой частотой 1,6...2,0 ГГц (www.intel.ru).

Изменение ТП производства микросхем

Традиционные МОП-транзисторы для микропроцессоров имели фиксированную архитектуру, и перспективы внедрения новых производственных технологий были очевидны: уменьшаем размеры по вертикали и горизонтали, понижаем напряжение и получаем более компактные, менее «прожорливые» в отношении энергии, более быстрые транзисторы. Конечно, периодически приходилось внедрять что-то новое: ионную имплантацию, самосовмещенные затворы, нитридные подзатворные элементы. Но сама архитектура оставалась неизменной в течение многих лет. Компоненты, выполненные по 130-нанометровой технологии, были, по всей видимости, последней «настоящей» технологией, реализованной в привычной архитектуре.

Начало 90-х годов XX века было отмечено кардинальными изменениями в отрасли. Тогда Intel создала полупроводники с одноосевой деформацией, выполненные по 90-нанометровому ТП. Эта разработка, отмеченная использованием кремний-германиевых элементов в р-канальных структурах металлооксид-полупроводник (МОП), открыла эпоху трансформации материалов, которая сопровождалась значительными изменениями как физических размеров, так и электрических показателей.

В 2003 г. на рынке появились микросхемы с революционной на тот момент 90-нанометровой проектной нормой. Новый ТП, по которому корпорация Intel планировала производить большую часть своей продукции, в том числе процессоры, наборы микросхем и коммуникационное оборудование, был разработан на опытном заводе корпорации Intel по обработке 300-миллиметровых пластин в г. Хиллсборо (шт. Орегон) [4].

Развитие продолжалось. И вот уже появились 65-нанометровые структуры, которые последними использовали подзатворный диэлектрик на основе диоксида кремния. Начиная с 45-нанометрового ТП, компания Intel перешла на новаторский на тот момент времени диэлектрик high-k на основе диоксида гафния. Выпуск 22-нанометровых структур ознаменовал конец 50-летней эпохи плоскостных МОП-транзисторов и переход к трехмерным 3D Tri-Gate.

Таким образом, сегодня, спустя 10 лет в результате бурного развития отрасли производства полупроводников, стало возможным изготовление микросхем по 22-нм техпроцессу. Компания Intel в 2013 г. начнет серийное производство мобильных процессоров ("систем-на-кристалле") нового поколения, которые будут выпускаться по 22-нанометровому технологическому процессу. Они будут превосходить чипы нынешнего поколения по быстродействию (на 22...65%) и по энергопотреблению. В настоящий момент современные процессоры Intel, предназначенные для смартфонов и планшетов, выпускаются по 32-нанометровому техпроцессу. Компания Qualcomm в про-

Встраиваемые ОС

изготовлении своих чипов использует 28-нанометровый техпроцесс, а компания Nvidia — 40-нанометровый. Intel уже освоила 22-нанометровый техпроцесс, но выпускает по нему только процессоры для компьютеров. В процессорах используются транзисторы 3-D Tri-Gate с тремя затворами. За счет особенностей конструкции утечки тока в Tri-Gate меньше, чем в традиционном транзисторе.

Компания Intel также работает над созданием нового поколения процессоров Atom под кодовым названием Avoton, обеспечивающих исключительную энергоэффективность. Новая разработка, представление которой ожидается в 2013 г., дополнительно расширит функциональные возможности однокристалльных систем Intel. Использование 22-нанометровых транзисторов 3-D Tri-Gate позволит добиться выдающихся показателей энергоэффективности и производительности (www.intel.com).

Но развитие ТП производства микросхем не останавливается на достигнутом. Уже предложены перспективные решения: туннельные транзисторы, BISFET, графеновые структуры и спиновые полевые транзисторы. Они активно изучаются ведущими производителями полупроводников и отраслевыми организациями.

Повышенные требования к безопасности

Архитектуры с повышенными требованиями к безопасности усложняются по мере появления новых функциональных требований, новых требований нормативного соответствия и новых внешних угроз. Один из факторов, влияющих на рост сложности, — это необходимость интерфейса между промышленными устройствами и большим числом внешних систем и сетей, таких как Internet, Ethernet, производственное оборудование, точки оказания услуг, корпоративные сети, мобильные пользователи и т. д. В результате устройствам приходится поддерживать широкий спектр прикладного и связующего ПО разной степени критичности [1].

Ответом на требования современного рынка являются технологии, например, Intel® Identity Protection и Intel® Anti-Theft, призванные запретить вход в систему неавторизованным пользователям и приложениям и обеспечить безопасность данных, хранящихся как on-line, так и непосредственно на самих устройствах.

Совместная разработка компаний Intel и McAfee — технология McAfee DeepSAFE использует аппаратные функции, реализованные в процессорах Intel Core i3, i5 и i7. Новый программный уровень защиты, работающий ниже уровня ОС, позволяет осуществлять мониторинг активности системы памяти и процессора. Решения для защиты данных с поддержкой аппаратных функций, созданные на этой платформе, могут использовать новые методики для определения случаев заражения вирусами и для предотвращения возникновения вредоносных процессов (www.intel.ru).

Итак, за последние 10 лет аппаратные возможности встраиваемых систем значительно расширились. Устройства с многоядерными 64-разрядными процессорами и трехмерной анимированной графикой уже не являются экзотикой. Разнообразие представленных на рынке решений, многообразие интерфейсов и форм-факторов встраиваемых систем требуют серьезного подхода к выбору программно-аппаратной платформы, которая технически позволяет реализовать его конкурентные преимущества с минимальными затратами проектных ресурсов. Встраиваемая ОС определяет множество статей расходов, связанных с созданием устройства. Поэтому кратко остановимся на выборе ОС производителями встраиваемых решений под современную аппаратную базу и с учетом требований рынка.

При выборе встраиваемой ОС в первую очередь необходимо учитывать ее технические характеристики. Со стороны ОС в число заявляемых производителями характеристик обычно входят:

- архитектурные принципы (тип ядра и планировщика, модель многозадачности и т. п.);
- временные характеристики (время реакции на прерывание, время переключения контекста, время перепланирования и т. п.);
- поддержка РВ (жесткое, мягкое или отсутствует);
- показатели надежности (например, среднее время восстановления после отказа);
- метрики производительности (например, пропускная способность файловой системы на заданном носителе) [6].

Кроме того, разработчики встраиваемых решений учитывают при выборе ОС следующие неформальные факторы.

- Популярность у разработчиков: чем больше программистов отдадут предпочтение данной ОС, тем проще собрать квалифицированную команду для реализации проекта на ее основе.
- Адаптация к работе с оборудованием от разных производителей. Решение проблем программно-аппаратной совместимости — трудоемкая задача, требующая высококвалифицированных специалистов, поэтому сведение этих проблем к минимуму способно существенно сократить проектные расходы.
- Интеграция с инфраструктурными технологиями прикладного уровня, в том числе созданными для других ОС. Усложнение ПО встраиваемых устройств стимулирует стандартизацию их графических и коммуникационных сред, подсистем управления устройствами, средств повышения безопасности, управления конфигурациями и др. Возможность обеспечить требуемую инфраструктуру при помощи готовых решений существенно ускоряет и удешевляет разработку устройства.
- Простота освоения, использования и обслуживания. Встраиваемые ОС поставляются с инструментами разработки целевых устройств. Если цикл разработки встраиваемого ПО с помощью этих ин-

струментов состоит из несложных и эффективных процедур, то специалисты экономят время на их изучение и освоение [7].

- Масштабируемость — возможность подобрать нужную конфигурацию ОС для выбранной аппаратной платформы и с учетом развития проекта.

- Приемлемые лицензионные отчисления и гибкое ценообразование. Необходимо учитывать, что в рыночных условиях цена продукта представляет собой лишь долю средств, которые покупатель продукта платит за его использование, особенно в случае продукта с длинным жизненным циклом. Любая техника требует обслуживания, ремонта, модернизации и т. п., а это всегда выливается в дополнительные расходы. Поэтому при выборе ОС корректнее говорить не о цене продукта, а об интегральном критерии так называемой суммарной стоимости обладания (Total Cost of Ownership — TCO). Соответственно, вместо привычного соотношения "цена — качество" на передний план выходит соотношение "TCO — качество" [6].

Таким образом, задача выбора встраиваемой ОС — многокритериальная. Производители встраиваемых решений не разглашают методов, которыми они руководствуются при решении многокритериальных задач выбора на практике. Как правило, для обоснованного оптимального выбора требуется участие опытного эксперта в области встраиваемых решений, знающего особенности аппаратно-программных архитектур, законы рынка, ценообразования и лицензирования. В различных отраслях промышленности для принятия нестандартных многокритериальных решений применяются средства поддержки принятия решений, основанные на математических методах.

Метод поддержки принятия решений по выбору ОС

В работе [8] предложено использовать известный метод Т. Саати поддержки принятия решений в условиях многокритериального выбора — метода анализа иерархий или аналитического иерархического процесса (Analytic Hierarchy Process — АНР) для определения момента целесообразности перехода на другую ОС с целью улучшения конкурентных преимуществ выпускаемой продукции. Приведенные рассуждения вполне применимы и при первичном выборе ОС.

Для решения поставленной задачи требуется разработать систему критериев. Причем для каждого производства эти критерии будут разными в зависимости от характера производимых устройств, текущей стадии жизненного цикла продукта, бизнес-целей и т. п. Как именно каждый производитель выбирает и ранжирует критерии, зависит от конкретного случая. АНР как используемый механизм принятия решения должен позволять корректно учитывать все выбранные факторы.

Процесс принятия решения строится на вычислении предпочтений между несколькими фактора-

ми, попарно сравниваемыми в контексте некоего выбранного критерия. На принятие решения обычно влияет множество факторов. Можно упростить процедуру анализа, сгруппировав их в более высокоуровневые категории: аппаратные, программные, бизнес-факторы, факторы внешних контрагентов и т. д. Метод АНР позволяет системно подойти к расстановке приоритетов в списке заданных критериев того, что настало время начинать процесс миграции, или критериев выбора конкретной ОС.

Теоретически использование метода Т. Саати подходит для решения поставленной задачи выбора ОС, и его применение способно помочь реализовать взвешенный и объективный подход. Но для его практического использования требуется проведение экспериментов, подтверждающих сходимость метода, то есть близость получаемого результата решения задачи к тому решению, которое можно принять за истинное.

Заключение

В заключение отметим еще раз, что область встраиваемых компьютерных технологий — это динамично развивающаяся и конкурентная среда. В этой среде активно применяются современные научные разработки и проверенные временем подходы с целью улучшения характеристик выпускаемых решений, сокращения времени между идеей и выходом на рынок готового изделия, оперативного реагирования на новые требования рынка. Отдельные инновации этой среды в результате их научно-технической значимости и актуальности приобретают статус подрывных, но не разрушают область, а способствуют ее дальнейшему развитию и приводят своих разработчиков и пользователей к бизнес-успеху.

Список литературы

1. *Вианд И., Чамберс М.* Применение многоядерных процессоров и виртуализации в приложениях повышенной безопасности//Современные технологии автоматизации. 2010. № 3.
2. *Панфилов П. Б., Пономарев Д. В.* Мультиядерные процессоры в промышленной автоматизации мультиядерность и виртуализация//Автоматизация в промышленности. 2011. № 3.
3. *Золотарев С. В., Рыбаков А. Н.* Большой взрыв в мирных целях или многоядерные компьютерные системы//Автоматизация в промышленности. 2006. № 2.
4. *Пахомов С.* 90-нанометровая технология производства процессоров//Компьютер Пресс. 2003. № 1
5. *Горбунов Н. Б.* Встраиваемая ОС как основа успеха//Автоматизация в промышленности. 2004. № 3.
6. *Кузнецов А. А.* Windows Embedded — технологии для современного мира//Автоматизация в промышленности. 2012. № 3.
7. *Фейи Т.* Определение ключевого фактора для смены программной платформы//Современные технологии автоматизации. 2011. № 4.

*Аристова Наталья Игоревна — канд. техн. наук, главный редактор журнала "Автоматизация в промышленности".
Контактный телефон (495) 334-91-30.*