

# Тенденции в создании встроженных систем

Перспективы и трудности применения однокристальных вычислительных систем и встраиваемых сетевых систем в области промышленной автоматизации

Грант Мартин, Ричард Зуравски



Развитие технологических процессов и появление новых средств проектирования позволяют расширить номенклатуру встроженных систем и перейти от комплекта микросхем, смонтированного на одной плате, к комплекту функциональных модулей внутри одной интегральной схемы. Однокристальная техника (SoC, System-on-Chip – «система на кристалле») находит все более широкое применение в промышленной автоматике, что позволяет создавать сложные интеллектуальные полевые устройства. Эта тенденция сопровождается также переходом на платформно-ориентированное проектирование, позволяющее упростить процесс разработки и проверки сложных однокристальных схем за счет интенсивного повторного применения наработок в области аппаратного и программного обеспечения. Еще одной важной чертой эволюции встроженных систем является тенденция к объединению встраиваемых узлов в сети с помощью специализированных сетевых технологий. Системы, созданные с использованием такого подхода, получили название встроженных сетевых систем (NES, Networked Embedded Systems).

## Технологии встроенных систем

Концепция однокристалльных систем явилась революционным нововведением в области проектирования интегральных схем (ИС), а ее осуществление стало возможным благодаря развитию технологических процессов, позволяющих объединить основные компоненты и подсистемы электронного изделия в одной микросхеме или в комплекте ИС [1]. Разработчики сложных микросхем с готовностью осваивают новые методы, поскольку это дает возможность обеспечить максимальную степень интеграции, а следовательно, добиться повышения эксплуатационных характеристик, снижения энергопотребления, а также улучшения массогабаритных характеристик и снижения себестоимости. В процессе проектирования перечисленным критериям уделяется огромное внимание, и поэтому выбор в пользу однокристалльных схем можно обоснованно считать одним из важнейших решений на этапе разработки встроенных систем реального времени.

Однокристалльные системы можно рассматривать как сложные интегральные схемы или комплект интегральных микросхем, сочетающих в едином

устройстве основные функциональные элементы или подсистемы полноценного изделия. В настоящее время в состав наиболее сложных однокристалльных систем входит по меньшей мере один программируемый процессор, и очень часто сочетание из одного или более управляющих RISC-процессоров (процессор с сокращенным набором команд) и одного цифрового сигнального процессора (DSP). Кроме того, предусматривается внутрисистемная связь: одна или несколько процессорных шин, одна или несколько периферийных шин, а иногда – высокоскоростная системная шина. Для процессоров однокристалльных систем большое значение имеет обеспечение памятью, имеющей многоуровневую структуру и расположенной непосредственно на кристалле, а также каналами обмена данными с внешней памятью. В большинстве систем, предназначенных для обработки сигналов, предусматриваются функциональные блоки аппаратного ускорения, что позволяет обеспечить повышенную производительность и снизить энергопотребление. Для связи с внешним миром в схему однокристалльной системы включают ряд периферийных блоков обработки на аналоговых компонентах, а также цифровые интерфейсы (на-

пример, для подключения к системной шине платы или к соединительной панели). В перспективе возможно создание однокристалльных систем с использованием датчиков и приводов на базе МЭМС или компонентов химической обработки (lab-on-a-chip – «лаборатория на кристалле»), см. рис. 1.

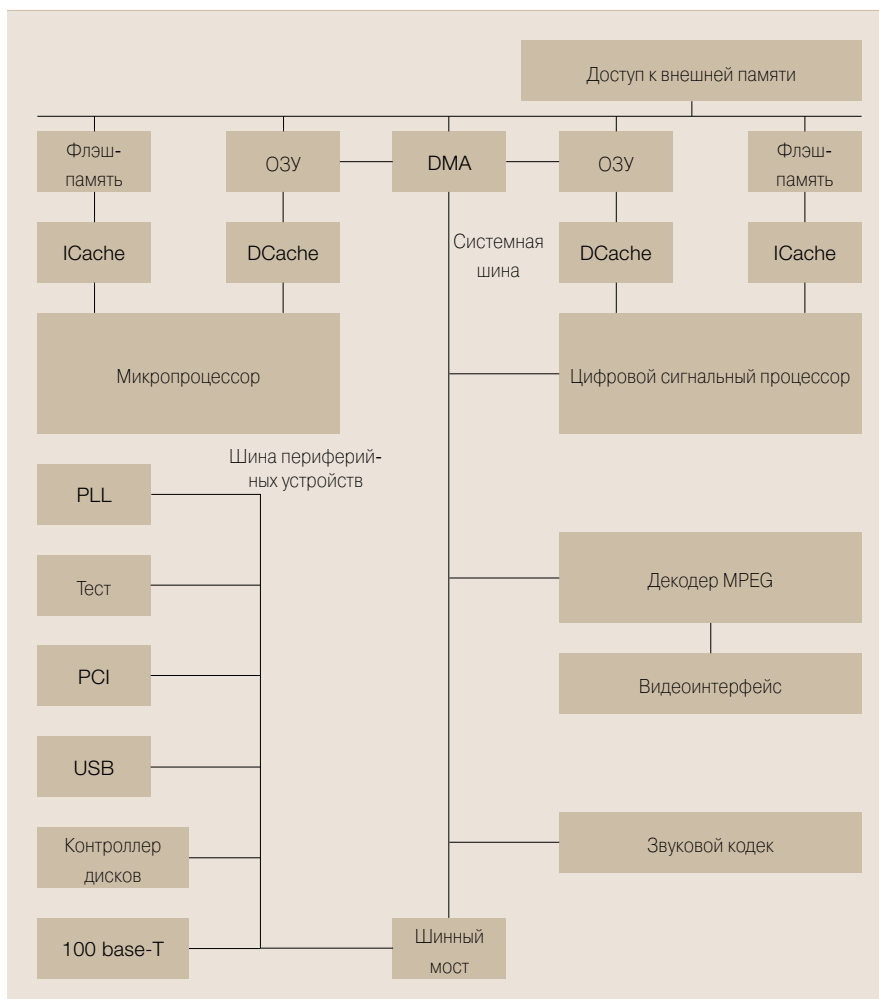
Все однокристалльные системы включают как аппаратные, так и программные компоненты. Среди последних – ПО программируемых процессоров, операционные системы реального времени и другие элементы аппаратно-зависимого программного обеспечения. Таким образом, при проектировании и эксплуатации однокристалльных систем возникают вопросы, связанные не только с аппаратной реализацией. Становятся необходимыми применение принципов разработки на системном уровне, выбор и разбиение процессов по методу реализации (аппаратному или программному), а также проработка архитектуры, проектирование и реализация программ.

#### Системы на программируемых кристаллах

Недавно спектр однокристалльных систем типа System-on-Chip («система на кристалле») был расширен за счет появления систем типа System-on-a-Programmable-Chip – «систем на программируемых кристаллах». Кроме решений на основе заказных и специализированных ИС (ASIC) или специализированных компонентов (ASSP), концепция теперь охватывает разработку и применение сложных перенастраиваемых логических элементов со встроенными процессорами. Помимо этого в новые схемы включают и другие прикладные элементы, такие как процессоры, память или специализированные схемы, приобретаемые у сторонних разработчиков.

Изготовлением этих сложных программируемых логических вентиляльных матриц (Field-Programmable Gate Arrays, FPGA) занимается ряд производителей, в том числе Xilinx (Virtex-II PRO Platform FPGA, Virtex-IV) и Altera (SOPC). Основопологающий принцип такого подхода к созданию однокристалльных систем заключается в сочетании большого количества перенастраиваемых логических элементов и встроенных RISC-процессоров с целью получения гибких и адаптируемых аппаратно-программных комплексов, которые в дальнейшем применяются разработчиками при решении конкретных прикладных задач. Алгоритмы, включающие значительный объем управляющей логики, а также значительная доля операций по обработке данных могут быть перенесены на перенастраиваемый управляющий RISC-процессор с целью аппаратного ускорения. Несмотря на то что полученный комплекс не обеспечивает максимальной производительности, минимального энергопотребления и не обладает наименьшей себестоимостью (по

1 Типовое однокристалльное устройство для бытовой техники.



## Технологии встроенных систем

сравнению с заказными и специализированными ИС классов ASIC и ASSP, выполняющими те же функции), он обеспечивает высочайшую гибкость при внесении изменений на этапе внедрения и эксплуатации и позволяет избежать больших затрат на разовые проектные работы (NRE, Non-Recurring Engineering). Благодаря этому новые приложения, интерфейсы и усовершенствованные алгоритмы могут быть просто загружены в изделия, уже развернутые на объекте.

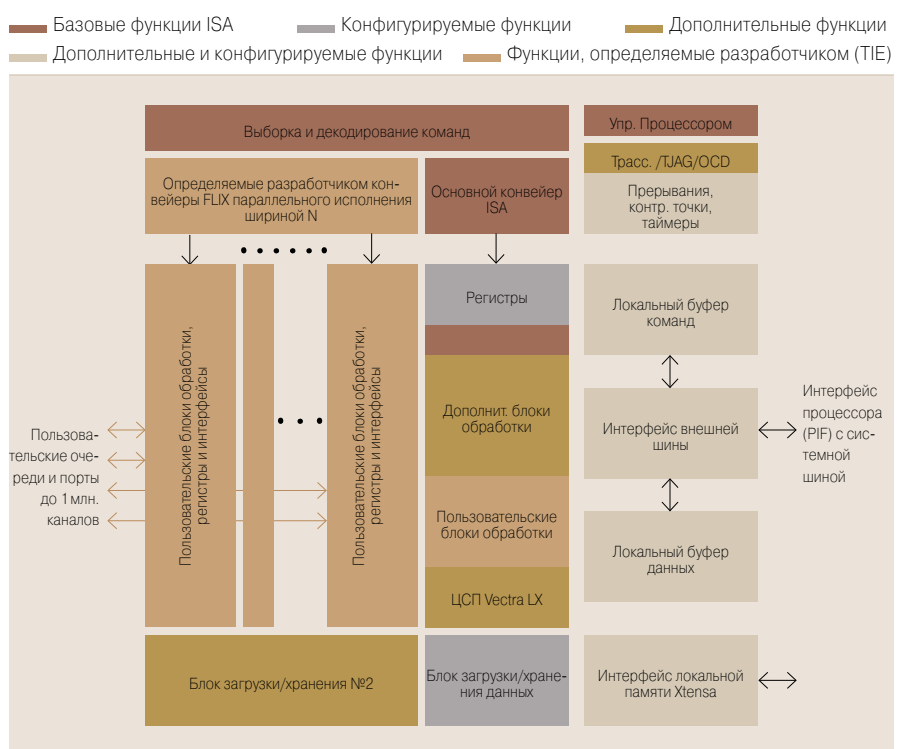
Основополагающий принцип такого подхода к созданию однокристалльных систем заключается в сочетании большого количества перенастраиваемых логических элементов и встроенных RISC-процессоров.

В состав изделий данного класса также входят другие ядра обработки и связи: они состоят из блоков умножения-суммирования (MAC), предназначенных для обработки сигналов и изображений, а также высокоскоростных последовательных интерфейсов для кабельных систем связи, таких как блоки SERDES (последовательно-параллельного и параллельно-последовательного преобразования). С учетом этого, однокристалльные системы на программируемых кристаллах не являются узкоспециализированными, но при этом не в полной мере универсальны.

Пока неизвестно, окажутся ли системы на программируемых кристаллах (SoPC) популярной платформой для массовых изделий или же их распространение будет ограничено двумя основными областями, такими как быстрое создание опытных образцов, которые затем будут переведены на специализированную элементную базу, а также создание относительно дорогих компонентов коммуникационной инфраструктуры высокого класса, где обеспечение гибкости в эксплуатации возможно за счет повышения стоимости и энергопотребления в сочетании с пониженной производительностью.

Промежуточные варианты, например, применение базовых логических матриц (MPGA) в комбинации с жесткими процессорными подсистемами и другими ядрами, как, например, «структурированные специализированные ИС» производства компаний LSI Logic (RapidChip) и NEC (Instant Silicon Solutions Platform), представляют собой некий компромисс между фиксированным набором

2 Процессор LX компании Tensilica.



масок и программируемыми логическими матрицами. Характерными особенностями таких решений являются: более медленная разработка образцов (несколько недель вместо одного или нескольких дней), большие затраты на разовые проектные работы по сравнению с FPGA (однако гораздо меньше, чем в случае полного набора фиксированных масок), но при этом лучшие показатели стоимости, производительности и энергопотребления по сравнению с FPGA – вероятно, всего на 15-30% хуже аналогичных показателей для ASIC. В распоряжении проектировщиков также появляются и другие гибридные формы, такие как схемы классов ASIC/ASSP с областями класса FPGA, выполненными на том же кристалле. И, наконец, еще одним интересным вариантом является комбинация конфигурируемого процессора, выполненного частично в виде неконфигурируемых схем, и области FPGA, применяемой для реализации дополнительных наборов команд и иного расширения конечным пользователем. Например, компания-изготовитель полупроводниковых приборов Stretch Inc., реализует такой вид однокристалльной платформы на базе конфигурируемого процессора фирмы Tensilica (рис. 2).

### Платформы

В последнее время наблюдается распространение целостного подхода к проектированию сложных однокристалльных схем и повторному использованию виртуальных компонентов – он получил название «платформено-ориентированного проектирования» [1, 2]. Под платформено-ориен-

тированным проектированием следует понимать продуманную методiku проектирования и проверки сложных однокристалльных систем, позволяющую сократить затраты времени и труда, а также снизить риски. Достигается это за счет широкого повторного использования интеллектуальной собственности, а именно комбинаций аппаратных [3] и программных [4] разработок. В отличие от повторного использования разработок «по блокам», при ориентации на платформы целые группы компонентов объединяются в некую архитектуру, допускающую повторное использование. Такая архитектура вместе с библиотеками предварительно проверенных и документированных прикладных аппаратных и виртуальных программных компонентов, представляет собой интеграционную платформу для однокристалльных систем.

Причин роста популярности платформено-ориентированного подхода к промышленному проектированию несколько. Среди них можно выделить повышение производительности труда разработчика, снижение рисков, возможность использования интегрированных виртуальных компонентов из других областей, а также возможность применения архитектур однокристалльных систем, разработанных высококлассными специалистами. Отраслевые платформы представлены законченными прикладными платформами для отдельных видов продукции, таких как Philips Nexperia и TI OMAP [5], перенастраиваемые платформы SoPC и платформы с ориентацией на процессор. Последние (примером которых могут служить

## Технологии встроенных систем

платформы на основе нескольких предварительно сконфигурированных процессоров Tensilica или платформы ARM PrimeXsys) строятся вокруг процессора с учетом архитектуры его шин и базового набора периферийных устройств, а также ОС реального времени и базовых драйверов.

Платформы FPGA и устройства SoPC можно рассматривать в качестве «мета-платформ», т. е. платформ, применяемых для создания платформ. Такие устройства обладают рядом наиболее общих функций и снабжаются встроенными процессорами, шинами, специальными блоками, такими как MAC и SERDES, и различными другими разработками, прошедшими предварительный отбор. Проектировщики могут приобрести эти устройства у таких компаний, как Xilinx и Altera, а затем модифицировать мета-платформу в соответствии с нуждами конкретной области применения путем добавления специализированных библиотек. Полученные в результате системы могут быть переданы коллективам, выполняющим окончательную проработку.

### Сетевые встроенные системы

Другой важный аспект эволюции встроенных систем – появление распределенных встроенных систем, часто называемых сетевыми встроенными системами, где слово «сетевые» подчеркивает важность сетевой инфраструктуры и протокола связи. Сетевая встроенная система – это набор пространственно и функционально разделенных встроенных узлов, связанных посредством кабельной или беспроводной коммуникационной инфраструктуры и протоколов связи и взаимодействующих с внешней средой (в случае датчиков и исполнительных механизмов) и между собой. В рамках такой системы при решении некоторых задач также может быть предусмотрен главный узел для координирования вычислительных процессов и обмена данными.

В контроллерах, встраиваемых в узлы или полевые устройства, такие как датчики и исполнительные механизмы, обычно в рамках ИС реализованы преобразование сигналов, обработка данных и сигналов, коммуникационные функции. Рост функциональности, повышение производительности и расширение коммуникационных возможностей контроллеров сделали возможным объединение полевых устройств в специализированные сети, которые часто называют полевыми сетями (field area network). Такая сеть обычно представляет собой цифровой двусторонний многоточечный канал связи [6]. В целом, применение специализированных (полевых) сетей характеризуется множеством преимуществ, в том числе: повышением гибкости за счет применения встроенного аппаратного и программного обеспечения, ростом производительности системы, а также простотой монтажа, модернизации и обслуживания системы.

В последнее время наблюдается распространение целостного подхода к проектированию сложных однокристалльных схем и повторному использованию виртуальных компонентов – он получил название «платформно-ориентированного проектирования».

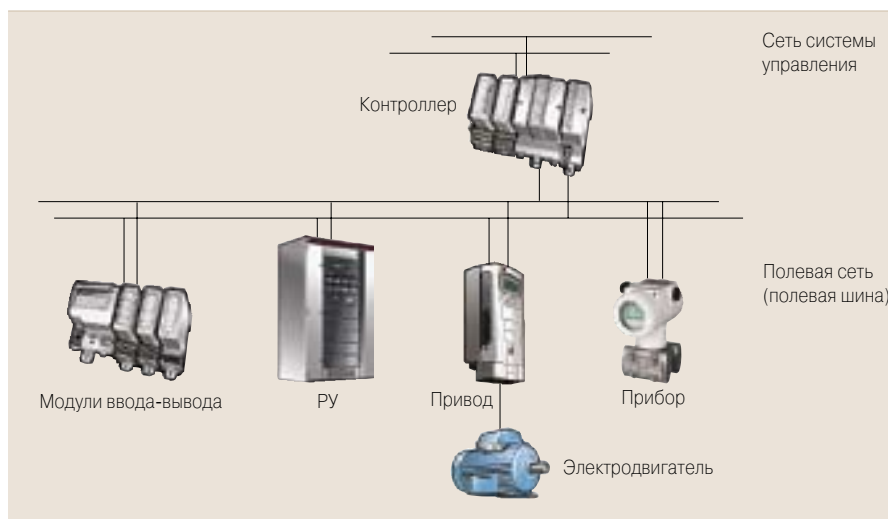
Сетевые встроенные системы применяются в различных прикладных областях, например, автомобильной и железнодорожной технике, авиации, офисных зданиях и на промышленных объектах, в первую очередь, для контроля и управления.

Сетевые встроенные устройства включают сети, соединяющие датчики и исполнительные механизмы с полевыми контроллерами, например, программируемыми логическими контроллерами (ПЛК) в системах промышленной автоматизации или электронными блоками управления в автомобилях. Они также используются в интерфейсах «человек-машина», например, в экранах на приборной панели автомобилей и системах SCADA в промышленной автоматике. Разнообразие применяемых сетей не уступает разнообразию сфер применения. Например, сети PROFIBUS, PROFINet и EtherNet/IP (обеспечивающие связь в режиме реального времени) применяются в промышленных системах управления и автоматизации; LonWorks, BACnet и EIB/KNX – в системах автоматизации зданий; CAN, TTP/C и FlexRay – в автомобилях; наконец, сеть Train Communication Network (TCN) используется в автоматизации на железнодорожном транспорте. Разноплановые требования, налагаемые прикладными задачами (режимы «мягкого» и «жесткого» реального времени, обеспечение безопасности, топология сети и т. п.), обуславливают необходимость применения целого спектра решений и использования протоколов, основанных на различных принципах. Следствием этого явилось возникновение целого ряда сетей, разработанных для конкретных областей применения [6] (см. рис. 3).

Характер требований, предъявляемых к сетям на практике, таков, что полевые сети – в отличие от ЛВС – обычно работают с малой скоростью передачи данных, небольшими пакетами данных, и обычно обеспечивают работу в режиме реального времени, для чего может потребоваться передача данных с детерминированными параметрами или с ограничением по времени задержки. Однако скорость передачи данных на уровне 10 Мбит/с, типичная для ЛВС, получила распространение и в полевых сетях. Для полевых сетей, применяемых в системах промышленной автоматизации (в отличие от систем автоматизации зданий) потребность в маршрутизации или сквозном управлении невелика. Как следствие, в таких сетях применяются только уровни 1<sup>1)</sup> (физический), 2 (канальный, неявным образом включается и уровень управления доступом к среде – MAC-уровень) и 7 (прикладной уровень с охватом уровня пользователя) эталонной модели ISO/OSI [7].

Необходимость гарантировать детерминированный отклик обуславливает использование подходов схем диспетчеризации, которые зачастую реализуются на основе специализированных ОС реального времени или с помощью отдельно разрабатываемых исполняемых модулей реального времени.

3 Типовая архитектура полевой сети в системе промышленной автоматизации.



<sup>1)</sup> Общая структура модели OSI представлена на рисунке 1 с. 47.

В сетевых встроенных системах, применяемых в задачах повышенного уровня опасности, таких как электродистанционные системы управления летательными аппаратами или автомобилями, требуется обеспечить высокий уровень надежности, чтобы отказ не приводил к нанесению ущерба здоровью людей и окружающей среде или материальному ущербу. При развертывании новой технологии этот фактор играет важнейшую роль.

Хотя наиболее распространены кабельные полевые сети, беспроводная техника (в том числе гибридные решения на основе кабельных и беспроводных устройств) обладает в ряде областей определенными преимуществами. Например, в системах промавтоматики сети беспроводных устройств – датчиков и исполнительных механизмов – могут повысить мобильность (в случае роботов) или сделать возможным управление оборудованием и контроль его работы в опасных и труднодоступных зонах. В отдельную категорию можно выделить сети беспроводных датчиков для целей мониторинга.

#### Перспективы и сложности реализации однокристалльных систем

Быстрое и безошибочное проектирование однокристалльных систем открывает множество возможностей. В частности, это касается многопроцессорных однокристалльных систем (MP-SoC), сочетающих преимущества параллельных вычислений с высокой степенью интеграции, характерной для однокристалльных систем. Кроме того, интерес представляют и такие области, как тестирование встраиваемых ядер в однокристалльных системах, разработка энергосберегающих вычислительных систем, обеспечение информационной безопасности, а также развитие высоконадежных систем для комплексов электродистанционного управления и других сфер [8].

Постоянное увеличение плотности упаковки интегральных схем и их рабочей частоты, а также применение однокристалльных систем привели к резкому росту объема данных, необходимого для тестирования современных интегральных схем на основе встраиваемых ядер. Сокращение объема данных и времени исполнения тестов – одни из важнейших задач, связанных с тестированием такого вида схем. Кроме того, представляет проблему увеличивающийся разрыв в быстродействии тестируемых схем и автоматического контрольного оборудования. Как следствие, проверка на рабочей частоте, в особенности для быстродействующих схем, становится затруднительной, она сопряжена со снижением процента выхода годных изделий, большими затратами на разработку функциональных тестов вручную и повышением стоимости быстродействующих тестеров с большим числом выводов.

Рост рассеиваемой мощности, связанный с повышением плотности упаковки и тактовой частоты, влечет за собой рост стоимости корпусов и систем охлаждения и неблагоприятно сказывается на надежности и сроке службы. В силу этих и других факторов, таких как питание от батарей и ограничения по габаритным размерам (в случае портативных устройств), снижение энергопотребления при проектировании встроенных систем является одной из наиболее приоритетных задач. Среди методов и принципов проектирования, направленных на снижение статической и динамической рассеиваемой мощности, можно выделить следующие категории: оптимизация на уровне системы и приложений, при которой исследуются способы реализации, характеризующиеся различным отношением затраченной энергии к качеству работы; применение энергосберегающих подсистем обработки, предусматривающих изменение напряжения и частоты, а также динамическое выделение ресурсов и выбор процессорных ядер; применение энергосберегающих принципов организации памяти, таких как адаптация иерархии кэш-памяти, новейшие схемы горизонтального и вертикального деления кэш-памяти, а также динамическое масштабирование элементов памяти.

#### Грант Мартин

Грант Мартин – ведущий научный сотрудник компании Tensilica, Inc. Степени бакалавра и магистра математики он получил в Университете Ватерлоо (Канада). Работал в компаниях Burroughs (Шотландия), BNR/Nortel (Канада) и Cadence Design Systems (Сан-Хосе, Калифорния), а с 2004 года работает в компании Tensilica.

#### Ричард Зуравски

Ричард Зуравски является президентом компании ISA Group (Сан-Франциско, США). Занимал руководящие должности в компаниях, расположенных в регионе залива Сан-Франциско, в компании Kawasaki Electric (Токио) и занимал должность профессора в Институте промышленности Токийского университета. Ричард Зуравски выступает редактором серии книг по промышленным информационным технологиям, выходящим в свет в издательстве CRC Press/Taylor & Francis. Имеет степени магистра в области электротехники и доктора информатики.

Относительно невысокие показатели производительности, пропускной способности каналов связи и небольшие объемы памяти контроллеров встроенных систем (например, полевых устройств промышленной автоматики) существенно затрудняют реализацию эффективных механизмов защиты информации, как правило, отличающихся ресурсоемкостью. Ограничены возможности применения основных криптографических протоколов, даже версий, адаптированных под нужды конкретного изготовителя. В операционных системах, работающих на малогабаритных контроллерах, обычно реализованы лишь самые необходимые службы, и не предусмотрены средства аутентификации или управления доступом для защиты критически важных полевых устройств. С ростом популярности схем удаленного доступа к данным технологического процесса на производственных объектах системы автоматизации могут подвергнуться риску электронных атак, влекущих за собой нарушение в работе этих систем и снижение безопасности предприятий. В связи с необходимостью поддерживать непрерывное функционирование системы и предприятия в целом, обновление защитного ПО на работающих полевых устройствах может оказаться нецелесообразным или слишком рискованным.

#### Грант Мартин

Tensilica, CLJA  
gmartin@tensilica.com

#### Ричард Зуравски

ISA Group, CLJA  
r.zurawski@ieee.org

#### Литература

- [1] H. Chang, L. Cooke, M. Hunt, G. Martin, A. McNelly, L. Todd: *Surviving the SOC Revolution: A Guide to Platform-Based Design*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [2] A. Sangiovanni-Vincentelli, G. Martin: *Platform-Based Design and Software Design Methodology for Embedded Systems*. *IEEE Design and Test of Computers* 18 (2001) 6, 23-33.
- [3] M. Keating, P. Bricaud: *Reuse Methodology Manual for System-on-a-Chip Designs*. Kluwer Academic Publishers, 1998 (First Edition), 1999 (Second Edition), 2002 (Third Edition).
- [4] G. Martin, C. Lennard: Invited CICC paper. *Improving Embedded Software Design and Integration for SOCs*. Custom Integrated Circuits Conference, May 2000, 101-108.
- [5] G. Martin, H. Chang (Editors): *Winning the SOC Revolution: Experiences in Real Design*. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [6] R. Zurawski (ed.): *The Industrial Communication Systems, Special Issue*. *Proceedings of the IEEE*, 93 (2005) 6.
- [7] Zimmermann H.: *OSI Reference Model: The ISO model of architecture for open system interconnection*. *IEEE Transactions on Communications*, 28(4): 425-432, 1980.
- [8] R. Zurawski (ed.): *Embedded Systems Handbook*. Taylor & Francis, 2005.