

СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВСТРАИВАЕМЫХ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ

ИГОРЬ ШАГУРИН, проф., д.т.н., руководитель лаборатории «Микропроцессорные системы», кафедра микроэлектроники, МИФИ

В этой вводной статье рассматривается состояние современных встраиваемых систем, приводится их классификация и описываются наиболее общие проблемы их реализации.

Термин «встраиваемые системы» (embedded systems) получил в последние годы широкое распространение. Это связано с их бурным развитием и повсеместным применением. Встраиваемые системы окружают нас повсюду — на работе и дома, в транспорте и на отдыхе. В то же время общепринятое определение этого термина пока отсутствует. Поэтому **будем считать встраиваемыми электронные системы, полностью или частично интегрированные в конструкцию обслуживаемых ими устройств (объектов)**. Практически все современные электронные системы используют цифровую обработку информации, поэтому более точным является термин «встраиваемые цифровые системы». Часто используется синоним «встраиваемые компьютерные системы», где под компьютером понимается процессор, являющийся основным блоком цифровых систем.

Можно считать, что почти все современные компьютерные (цифровые) технологии являются потенциально встраиваемыми. Эта потенциальная возможность реализуется на практике в виде встраиваемых систем при выполнении следующих условий.

1. Технико-экономическая целесообразность интеграции системы в конструкцию объекта обслуживания. Такая интеграция должна обеспечивать улучшение технических характеристик, уменьшение стоимости, снижение трудоемкости при изготовлении и эксплуатации изделия или какие-то другие преимущества.

2. Техническая возможность встраивания аппаратных и программных средств. Для этого должны выполняться требования по обеспечению необходимого температурного диапазона, реализации требуемой производительности, соблюдение ограничений на потребляемую мощность, массу и габариты конечного изделия, а также различные другие условия.

В общем виде структура типовой встраиваемой цифровой системы представлена на рисунке 1. В качестве процессора обычно используется серийно выпускаемый микропроцессор или процессорное ядро микроконтроллера. Периферийные устройства — таймеры, АЦП и ЦАП, контроллеры шин и др. могут входить в состав используемого МК или реализуются в виде отдельных устройств. Специализированные блоки обработки обеспечивают аппаратное выполнение функций, специфических для данной системы. Это могут быть, например, блоки цифровой обработки сигналов (DSP), реализованные в виде серийных DSP-процессоров или специально разработанных устройств. Специализированные блоки обработки для конкретных применений часто создаются на базе программируемых логических микросхем (ПЛИС) типа FPGA или CPLD. Различные типы модулей памяти (SRAM, DRAM, ROM, EEPROM, Flash) входят в состав МК или реализуются в виде отдельных блоков. Специальные блоки обеспечивают интерфейсы системы с объектом обслуживания и с внешними объектами (оператором или другими системами). Во

встраиваемых системах основная часть перечисленных блоков интегрирована в конструктив объектов обслуживания, хотя в качестве некоторых блоков могут использоваться автономные внешние устройства (например монитор).

Для обслуживания сложных объектов (промышленное производство, телекоммуникационная аппаратура, транспортные средства) используются распределенные системы (см. рисунок 2), где локальные встраиваемые модули объединяются стандартной шиной и работают под контролем центрального процессора (компьютера), который может быть интегрирован в конструкцию объекта или подключаться как автономный модуль. Для наиболее сложных объектов организуется иерархическая система обслуживания, разные уровни которой реализуются с использованием как встраиваемых, так и автономных модулей.

Отметим следующие характерные особенности современных встраиваемых систем.

1. **Быстрое расширение функций и областей применения** — от простых контроллеров для управления бытовой техникой до крупномасштабных распределенных систем АСУП (автоматизированные системы управления производством) и АСУТП (автоматизированные системы управления технологическими процессами), состоящих из десятков и сотен встраиваемых и автономных блоков. Как отмечено выше, встраиваемые системы уже сейчас используются практически во всех сферах человеческой

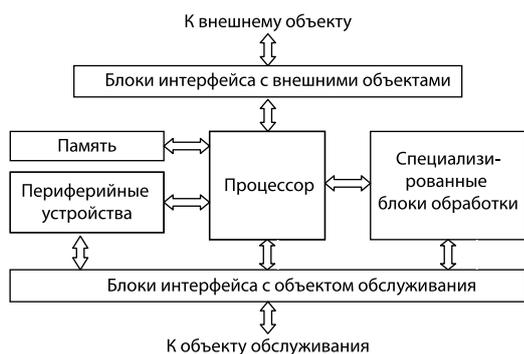


Рис. 1. Структура типовой встраиваемой цифровой системы

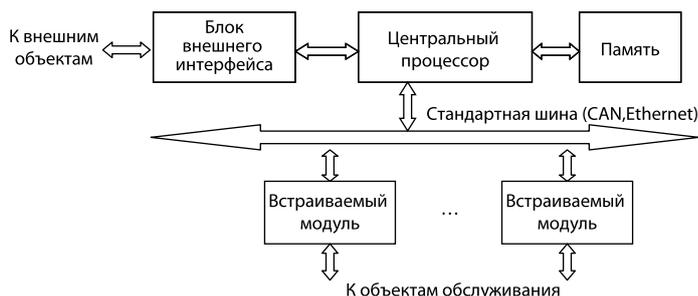


Рис. 2. Структура распределенной встраиваемой цифровой системы

деятельности. Расширение возможностей современной микро- и наноэлектронной технологии открывает новые перспективные области применения, в которых использование встраиваемых систем ранее было невозможно или экономически нецелесообразно.

2. **Использование широкой номенклатуры современных микропроцессоров и микроконтроллеров** — от относительно простых 8-разрядных МК до высокопроизводительных многоядерных 32-разрядных микропроцессоров, имеющих в своем составе кэш-память, блоки цифровой обработки сигналов, блоки, выполняющие операции над числами с плавающей точкой, и др. Множество процессорных и контроллерных модулей, реализованных на базе различных типов МК и микропроцессоров, предлагается зарубежными и российскими производителями для аппаратной реализации встраиваемых систем. Компонуя эти модули в соответствии с заданными функциями, имеется возможность создавать системы различной сложности и назначения.

3. **Возрастание роли и сложности программного обеспечения для встраиваемых систем.** Если для аппаратной реализации систем можно во многих случаях использовать готовые стандартные блоки и модули, то специализированное ПО позволяет аппаратным средствам обеспечить реализацию функций, необходимых для конкретного приложения. В настоящее время создание и тестирование ПО занимает при разработке систем до 80% времени и средств, тогда как аппаратная реализация проектов требует 20% ресурсов. Требования к ПО постоянно возрастают с ростом сложности систем и расширением выполняемых ими функций. В большинстве случаев требуется обеспечить функционирование системы в режиме реального времени (РВ). Наряду со специализированным прикладным ПО во многих приложениях необходимо использовать операционные системы (ОС), пакеты стандартных программ, среды программирования, отладки и другие программные средства широкого применения, поставляемые на коммерческой основе или имеющиеся в свободном доступе. Эффективная интеграция специализированного ПО (разработанного для данной системы) и программных средств общего применения (коммерческих или свободно распространяемых) позволяет значительно сократить сроки и стоимость разработки встраиваемых систем для конкретного приложения.

Каковы тенденции развития встраиваемых систем, какие проблемы решают разработчики для дальнейшего расширения функциональных возможностей? Все эти вопросы трудно рассмотреть в

небольшой статье, поэтому остановимся только на некоторых из них.

Одной из наиболее важных проблем, решаемых в этой области, является **стандартизация интерфейсов и конструктивов**. Благодаря стандартизации разработчик встраиваемых систем имеет возможность использовать в проектах аппаратные средства различных производителей, обеспечивая наилучшее сочетание параметров разрабатываемого изделия. Стандарты должны удовлетворять требованиям в определенной области применения встраиваемых систем, поэтому разрабатываемые группы стандартов ориентированы на определенные области их массового приложения: телекоммуникационное оборудование (стандарты AdvancedTCA/AdvancedMC/MicroTCA), автомобильная электроника (стандарт АЕС-Q100), военная и аэрокосмическая аппаратура (стандарты VME/VXS/VPX) и др. В связи с постоянным ростом требований к характеристикам встраиваемых систем стандарты должны непрерывно развиваться и корректироваться с целью удовлетворения этих требований. Необходимо отметить, что наряду со стандартизацией интерфейсов и конструктивов, которая оформляется документально соответствующими пакетами стандартов, де-факто наблюдается и определенная стандартизация архитектурно-структурных решений, используемых для построения встраиваемых систем. В совокупности все эти направления стандартизации нашли свое выражение в концепции развития платформ для реализации систем. Такие платформы в настоящее время формируются, что происходит, например, с COM Express, реализующей концепцию «компьютер-на-модуле». Итак, можно ожидать, что в ближайшем будущем большинство встраиваемых систем будет реализовано на одной из нескольких стандартизованных аппаратных платформ.

Стандартизация расширяет возможности **использования готовых коммерческих модулей для реализации встраиваемых систем**. Такая технология, получившая название COTS (Commercial-Off-The-Shelf — готовый продукт), в последнее время достаточно широко популяризируется. Однако реальное использование коммерческих изделий широкого применения в специализированных встраиваемых системах возможно далеко не всегда. Так, коммерческие серии микропроцессоров и МК в большинстве случаев предназначены для работы в температурных диапазонах $-10...700^{\circ}\text{C}$ или $-30...850^{\circ}\text{C}$, что не позволяет применять их в системах, функционирующих в более широком диапазоне температур.

Сейчас «изделия с полки» чаще всего служат для сборки и отладки прототипов будущих систем, которые затем реализу-

ются на специализированных модулях, обеспечивающих более высокие характеристики. Такая технология позволяет сократить сроки и стоимость разработки, т.к. функционирующий прототип создается из готовых дешевых модулей, а при разработке дорогостоящих специализированных модулей можно учесть недостатки прототипа, выявленные при его испытаниях. По отзывам специалистов, в настоящее время соотношение между использованием во встраиваемых системах коммерческих COTS-изделий и специализированных модулей, разработанных для того же проекта, составляет 20 на 80%. Увеличения доли COTS-изделий можно ожидать, когда производители организуют их выпуск в соответствии со стандартами, принятыми для определенной отрасли. Например, для использования в автомобильной электронике и в ряде авиакосмических и военных приложений начат серийный выпуск МК, работающих в расширенном температурном диапазоне $-40...1050^{\circ}\text{C}$ или $-40...1250^{\circ}\text{C}$. Чтобы производители были заинтересованы в массовом выпуске таких изделий, компании-разработчики систем должны опробовать, утвердить и принять к применению соответствующие стандарты. Предполагается, что развитие концепции стандартизованных аппаратных платформ сделает экономически целесообразным серийный выпуск комплектов необходимых COTS-модулей, что вызовет рост их производства и применения.

Как отмечено выше, основные затраты ресурсов при разработке встраиваемых систем связаны с созданием ПО. Разработка и тестирование собственных программных средств занимает достаточно большое время. Закупка и адаптация программных пакетов других фирм обычно связаны со значительными расходами. В ряде случаев сэкономить время и средства можно с помощью **свободно распространяемых программ, доступных в исходных кодах (Open Source)**. До недавнего времени разработчики встраиваемых систем отвергали возможности использования этих программ в связи с их ненадежностью, отсутствием необходимой поддержки, недостаточностью документации. В последние годы ситуация изменилась. Программная продукция сообщества Open Source во многих применениях проявила требуемую надежность и эффективность. Различные версии Linux продемонстрировали возможности работы в ряде ответственных приложений, в т.ч. в военной аппаратуре. По результатам опроса, более 20% специалистов-разработчиков встраиваемых систем используют Linux, а еще 30% собираются ее использовать в ближайшее время [1]. Ряд компаний на базе Linux реализовал ОСРВ, обеспечивающие работу в режиме «жесткого» реального време-

ни, что необходимо для многих встраиваемых систем. Разумеется, программная продукция Open Source имеет свои недостатки и, в первую очередь, плохую документированность. По этой причине чаще всего эту продукцию используют компании, имеющие штат квалифицированных программистов, которые могут провести необходимое тестирование и подготовить документацию, требуемую для применения программ в конкретном приложении. Однако быстрый прогресс сообщества Open Source и все больший интерес, проявляемый к этой продукции пользователями, в т.ч. разработчиками встраиваемых приложений, позволяют сделать вывод о дальнейшем увеличении доли используемого свободно распространяемого ПО, которое будет успешно конкурировать с коммерческими ОС во многих областях применения. Так, по результатам упомянутого выше опроса [1], доля проектов, использующих коммерческие ОС, сократилась с 50% в 2005 г. до 41% в 2007 г.

Термин «система-на-кристалле» весьма широко используется в последнее время, поэтому естественно встает вопрос о реализации **встраиваемых систем на кристалле**. Возможности современной полупроводниковой технологии позволяют реализовать на кристалле все или большую часть блоков, входящих в состав встраиваемой системы (см. рисунок 1). Такие системы можно изготовить в виде специализированной заказной СБИС (ASIC — Application-Specific Integrated Circuit) или реализовать на базе FPGA. Следует отметить, что реализация СнК в виде специализированной ASIC требует значительных затрат. Так, изготовление опытной партии специализированных СБИС (несколько тыс. образцов) по технологии 0,13...0,18 мкм стоит несколько сотен тыс. долл., а по технологии 0,09 мкм — свыше 1 млн. долл. Согласно имеющемуся опыту разработки СнК, только в 25% проектов первоначальный вариант соответствует заданным требованиям. В большинстве случаев для получения требуемого результата необходимо пройти несколько итераций, что значительно увеличивает стоимость выполнения проекта. По этой причине такой вариант реализации встраиваемых систем является приемлемым для

ограниченного числа высокобюджетных приложений.

Для значительного числа встраиваемых приложений более перспективным является их реализация на базе FPGA. Следует отметить, что FPGA в настоящее время широко используются в составе встраиваемых систем для создания блоков специализированной обработки (см. рисунок 1). В последние годы появились семейства больших FPGA с функциональными возможностями, эквивалентными миллионам логических вентиляей. В их состав входят аппаратно или программно реализуемые процессорные ядра различной производительности. Так, семейства FPGA, выпускаемые компаниями Xilinx (серия Virtex 4) и Altera (серия Stratix), содержат как 8-разрядные процессорные ядра PicoBlaze, NiosII Ecp1omtu, так и высокопроизводительные 32-разрядные ядра PowerPC, MicroBlaze, NiosII Fast, работающие с тактовой частотой до 200 МГц. Такие ядра позволяют реализовать на базе FPGA этого класса полную структуру встраиваемых систем (см. рисунок 1). Однако по данным ранее цитируемого опроса [1], в настоящее время только около трети разработчиков (36%) используют в составе проектируемых встраиваемых систем какие-либо варианты процессорных ядер. Несомненно, развитие технологии проектирования и выпуск FPGA, удовлетворяющих жестким условиям эксплуатации встраиваемых систем, позволят в ближайшем будущем существенно расширить возможности их применения в различных приложениях.

В данной короткой статье обозначены только некоторые важные, по мнению автора, аспекты развития встраиваемых цифровых систем. Можно отметить и ряд других перспективных направлений развития данной отрасли. Например, большие возможности расширения функциональности встраиваемых систем открывает **применение многоядерных процессоров**, эффективное использование которых требует решения ряда научно-технических проблем. Большие перспективы с точки зрения развития распределенных встраиваемых систем связаны с **внедрением беспроводных коммуникационных технологий**. Каждое из этих и ряд других направлений заслуживает подроб-

ного описания и анализа на страницах журнала. Более подробно современное состояние рынка встраиваемых систем и направления его развития рассмотрены в ряде цитируемых статей и др. публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Несс Р. Ежегодное исследование рынка встраиваемых систем//Электронные компоненты, 2007, №11, с. 69—77.
2. Шагури И. Рынок встраиваемых систем с точки зрения российского разработчика//Электронные компоненты, 2007, №12, с. 69—71.
3. Мир встроенной компьютерной автоматизации: новый этап эволюции//Мир компьютерной автоматизации — Мир встраиваемых компьютерных технологий, 2008, №1, с. 10—11.
4. Павлов П. Многопроцессорные системы: многоядерность, многопоточность и виртуализация во встроенных системах// Мир компьютерной автоматизации — Мир встраиваемых компьютерных технологий, 2008, №1, с. 28—35.
5. Бланш К. COTS сегодня — хорошо или все же плохо//Мир компьютерной автоматизации — Мир встраиваемых компьютерных технологий, 2008, №1, с. 12—20.
6. Акиншин Л. AdvancedTCA, AdvancedMC и MicroTCA: быстрые интерфейсы и высокопроизводительные процессоры под соусом стандартизации//Мир компьютерной автоматизации — Мир встраиваемых компьютерных технологий, 2008, №1, с. 43—53.
7. Бухтеев А. Проектирование встроенных систем: от концепции до кристалла//Электронные компоненты, 2007, №1, с. 36—41.
8. Шагури И., Шалтырев В., Волов А. «Большие» FPGA как элементная база для реализации систем на кристалле//Электронные компоненты, 2006, №5, с. 83—88.
9. Атавал А. ПЛИС с интерфейсом PCI Express завоевывают рынок встраиваемых систем//Электронные компоненты, 2006, №5, с. 89—93.
10. Бадин М., Воронков Д., Руткевич А., Стещенко В., Шлишкин Г. Платформенный принцип проектирования СБИС и ПЛИС//Электронные компоненты, 2008, №1, с. 17—23.
11. Хоскин Р. Как выбрать подходящую ПЛИС//Электронные компоненты, 2008, №1, с. 38—42.
12. Тайкович Г. Беспроводная связь в системах промышленной автоматизации//Электронные компоненты, 2007, №10, с. 89—92.