

**АЛЕКСЕЙ
ПЛАТУНОВ,**

д. т. н., профессор
кафедры вычислительной
техники НИУ ИТМО
генеральный
директор
ООО «ЛМТ»

platonov@lmt.ifmo.ru

ВСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В статье рассматриваются существующие и перспективные технологии, платформы и компонентная база Embedded-отрасли, вопросы идеологии проектирования и подготовки специалистов.

ВВЕДЕНИЕ

Современные встраиваемые системы управления реального времени (Embedded Systems, или — в нашей терминологии — ВСС,) представляют собой результат междисциплинарного проектирования, в котором условно можно выделить три основных составляющих.

- Этап решения задачи на прикладном уровне, когда необходимо найти правильные методы и алгоритмы без деталей реализации. Это сфера деятельности прикладных специалистов из соответствующих

областей (физика, энергетика, медицина, лингвистика, биология и др.).

- Процесс программирования, в ходе которого требуется отобразить полученное прикладное решение на технологическую базу информатики и вычислительной техники (ВТ). Это работа специалистов из области информатики, сегодня все чаще ее называют архитектурным, высокоуровневым или системным проектированием.
- Фаза реализации, в ходе которой инженеры, программисты и прикладные специалисты обеспечивают выполнение ранее сформулированных требований, таких как необходимая функциональность, динамика поведения, надежность и безопасность функционирования, габариты, энергопотребление, стоимость и технологичность при тиражировании.

Чтобы получить цельное представление о ВСС, необходимо быть в курсе существующих и перспективных технологий, платформ и компонентной базы данной

В 2001 г. в отчете Embedded Everywhere Национального исследовательского совета США была предсказана новая волна ИТ-революции: «Число физических устройств со встроенными компьютерами, объединенными в сети, будет стремительно расти... Это радикально изменит взаимодействие человека с окружающим миром». Десятилетие спустя мы в этом мире живем.

отрасли, изучить вопросы идеологии проектирования и подготовки специалистов.

МИР ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ

Первые опыты использования цифровых вычислительных машин для управления физическими объектами начались в 60-х годах XX в. В следующем десятилетии ЭВМ начинают активно применяться в составе информационно-управляющих систем (ИУС) для задач сбора информации о состоянии различных технических систем, а также для управления ими. Это определяется развитием интегральных микросхем и, особенно, появлением микропроцессоров. На данном этапе развития для ИУС с небольшими габаритами, конструктивно объединенными с физическим объектом контроля (управления), удачным стало назва-

ние «встраиваемые системы управления реального времени». Термин «реальное время» здесь означает, что ВСС должна выполнять определенные действия, например считывание данных с датчиков и выдачу команд на исполнительные устройства, не раньше и не позже, а в строго заданные моменты и интервалы времени.

Как понимают термин «ВСС» специалисты сегодня? После градации ВТ на универсальные и специализированные ЭВМ по назначению, на суперЭВМ, «мэйнфреймы» (большие ЭВМ), мини- и микроЭВМ по размеру и производительности, признанной и эффективной классификацией стало деление вычислительных систем (ВС) на три класса, предложенное Д. Паттерсоном (David A. Patterson) и Дж. Хеннесси (John L. Hennessy) в 1996 г. [1]:

1. Персональные компьютеры (ПК) — компьютеры для инди-

видуальной обработки информации, потребляемой человеком.

2. Серверы — развитие мэйнфреймов как ЭВМ коллективного пользования (также для обработки пользовательской информации).
3. ВСС — все остальное.

На рис. 1 приведены диапазоны изменения показателей «общая стоимость ВС» и «средняя стоимость одного процессора в составе ВС» для этих классов, а также перечислены критичные для проектирования показатели качества ВС по каждой группе. Следует заметить, что ПК обычно считаются однопроцессорными ВС, серверы и ВСС могут содержать от одного до тысяч процессоров. Простейшие процессоры ВСС, которые используются в бесконтактных метках и пластиковых картах, могут стоить единицы центов, тогда как спецпроцессоры ВСС

РИС. 1. ▾
Классы вычислительных систем

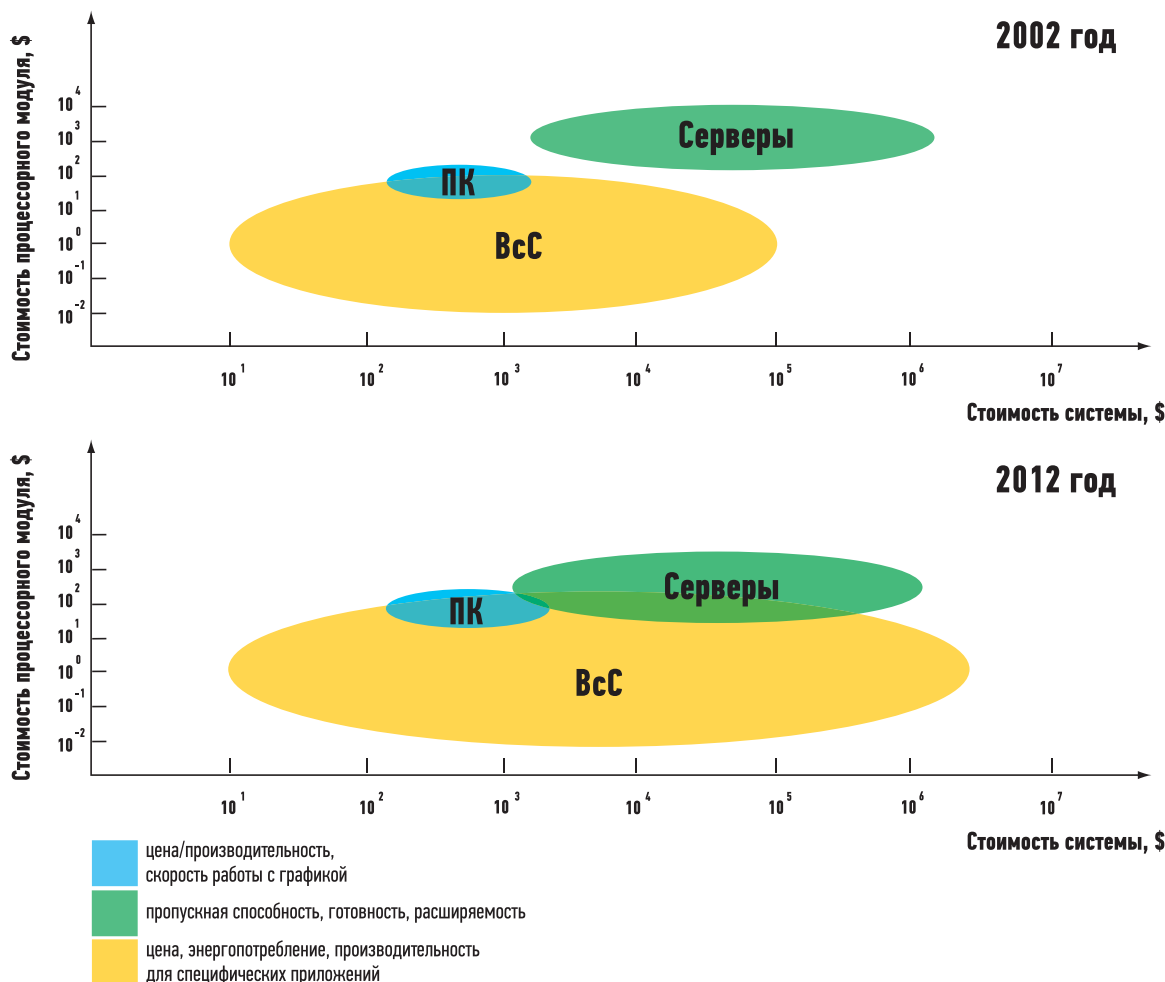




РИС. 2. ▲
Многообразие применений встраиваемых систем

для космических аппаратов стоят тысячи USD.

Сегодня даже эта классификация находится под вопросом, так как «чистых» ПК и серверов становится все меньше. Они вытесняются комбинированными, с точки зрения функциональности, устройствами, которые интегрированы в телекоммуникационные и мультимедийные среды, и значительная (если не большая) часть их аппаратно-программных ресурсов выполняют действия по непосредственному обслуживанию физических объектов и процессов.

Что же тогда выступает на первый план в вопросе «что такое ВСС?» Мы видим, что разнообразие и диапазон сложности таких систем огромны. Это системы от контроллера офисного двер-

ного замка или елочной гирлянды до инфокоммуникационной «начинки» заводов-автоматов, интеллектуальных энергетических систем (Smart Grid), зданий, транспортных систем и даже умных (Smart) городов. Примеры некоторых наиболее крупных областей применения ВСС (рис. 2): промышленная автоматика; энергетика; транспорт; авионика и военная техника; телекоммуникации; медицина; интеллектуальное здание; ЖКХ; бытовая техника и др.

ВСС определяется сегодня как специализированная ВС, которая в силу решаемой задачи непосредственно взаимодействует с физическими объектами и процессами.

В состав простой ВСС входят:

- микропроцессорный модуль с памятью;
- периферийная система (датчики, исполнительные элементы и контроллеры ввода-вывода для связи с объектом контроля/управления, устройства человеко-машинного интерфейса — при необходимости);
- система электропитания;
- объединяющий конструктив (шасси, корпус);
- управляющее программное обеспечение (ПО).

Устройства связи с объектом (УСО) обычно содержат аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, порты дискретного ввода-вывода, схемы гальванической изоляции и другие элементы. Все это может дополняться разнообразными коммуникацион-

ными модулями и устройствами памяти.

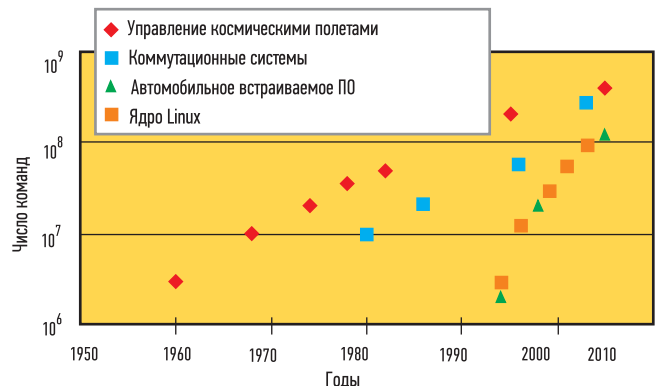
Основными особенностями ВСС считаются:

- работа в реальном масштабе времени (почти всегда);
- различные, часто тяжелые, условия эксплуатации;
- автономность работы (отсутствие оператора, ограничения электропитания);
- высокие требования по надежности и безопасности функционирования;
- ограниченные ресурсы;
- критические применения (Dependable Applications), связанные со здоровьем и жизнью человека.

ВСС относятся к категории систем с преимущественно программной реализацией (Software-Intensive или Software-Dominated Systems). Это означает, что большая часть функциональности системы реализуется программным способом. Программируемость и конфигурируемость пронизывают все уровни и компоненты ВСС во все большей степени. Сложность и удельный вес программной составляющей в ВСС стремительно растет (рис. 3, [2]). Появился даже термин «встроенное программное обеспечение» (Embedded Software), подчеркивающий особые свойства такого ПО и технологий его создания.

Элементную базу ВСС составляют электронные, оптические, механические и иные физические компоненты (элементы, модули, блоки), из которых складывается физическая реализация ВСС.

РИС. 3. ▼
Встроенное программное обеспечение



Сегодня в перечне таких компонентов — сложные микросхемы процессоров (микропроцессоры), контроллеров, акселераторов, системные платы вычислителей. В состав таких элементов входят программные средства (загрузчики, стеки протоколов и другие), размещаемые во встроенных блоках постоянной памяти. Таким образом, даже традиционное представление вычислительной элементной базы выходит далеко за границы описания только конструкции и схемотехники, затрагивая все больше вопросы системотехники, программирования, архитектуры.

КАК СОЗДАЮТСЯ ВСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ

Существует многообразие вариантов, технологий и платформ, используемых при создании ВcC. Владеть ими всеми на достаточном уровне невозможно, поэтому предлагается большое количество шаблонов, стереотипов, стандартов де-факто и настоящих отраслевых стандартов, нацеливающих на использование конкретных решений в конкретных случаях (или предписывающих их применение).

Как было отмечено, назначение ВcC — решение конечной (прикладной) задачи средствами ВТ. Это означает, что основу проектирования составляет вопрос организации целевого вычислительного процесса аппаратными и программными средствами. Многообразие вариантов реализации вытекает из многоуровневой организации ВcC — своеобразного «слоеного пирога» (рис. 4, [3]). Его слои частично соответствуют физической организации ВcC, но в большей степени такое деление определяется логической организацией, архитектурой системы. Одни и те же функции потенциально могут быть реализованы на любом уровне «пирога». На практике же выбор уровня должен быть компромиссом между стоимостью и получаемыми характеристиками. Этот выбор является одной из центральных проблем проектирования ВcC. На практике он обычно сводится к вопросу распределения функциональности между программной и аппаратной составляющими.

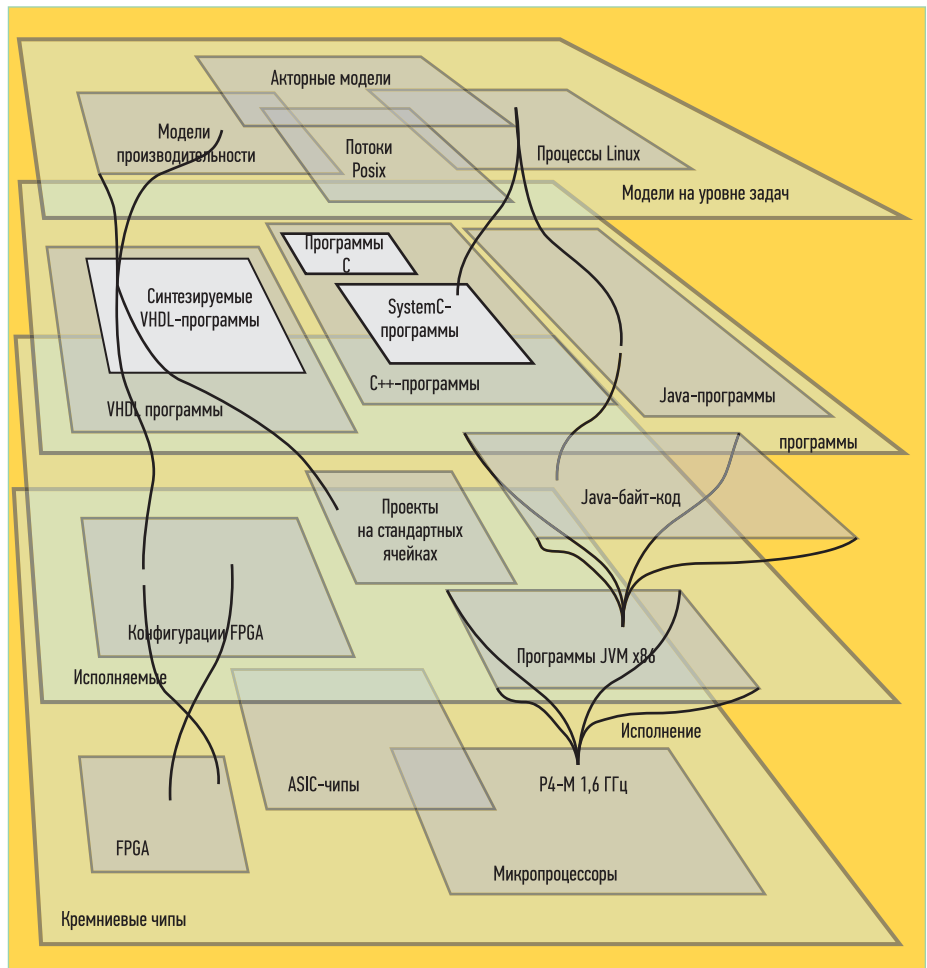
В плане архитектуры сегодняшние ВcC достаточно разнообразны. Они обладают различными по принципу работы процессорами, число которых составляет от одного до многих тысяч, причем иногда различных типов. Пространственно ВcC могут быть сосредоточенными или распределенными (сети компьютеров, контроллеров, сети на кристалле). В них могут использоваться различные операционные системы (ОС), средства виртуализации вычислений, стеки протоколов сетевого взаимодействия. Вычисления могут строиться на базе большого числа разнообразных моделей вычислений, которые составляют основу языков программирования (например С, Java, Prolog, Haskell, IEC 61131-3) и проектирования (например Verilog, SystemC, AHDL, UML).

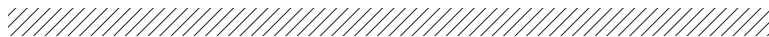
Выполняя требования технического задания на ВcC, разра-

ботчики могут в качестве основы использовать «вычислительные полуфабрикаты» (будем называть их платформами), которые потребуют различных затрат на проектирование, так как предоставят существенно разные уровни «развитости» или «завершенности» ВС, от которых надо будет строить «вверх». Например, аппаратная платформа ПК позволяет решать прикладную задачу программным путем с использованием стандартную ОС, ОС реального времени (ОСРВ), программирование «на голом железе». Создаваемые системы будут существенно отличаться по реактивности (реакции на события реального времени), надежности и предсказуемости работы, требуемой квалификации разработчиков, стоимости работ.

Анализ уровней «погружения» в вычислительную организацию

РИС. 4. ▾
Уровни абстракции в организации вычислительной системы





ВС в рамках проекта ВcС показывает, что на практике выполняются работы на всех уровнях, причем в различных сочетаниях. Ниже перечислены основные категории таких проектных работ:

- выбор или разработка прикладного ПО;
- выбор или разработка системного ПО;
- определение состава периферийных модулей (УСО) из готового набора;
- разработка УСО;
- определение состава центральных вычислительных ресурсов ВС (процессоров, памяти, интерфейсов);

- разработка центральных вычислительных ресурсов ВС на готовой компонентной базе;
- разработка компонентной базы.

Проектная платформа, как решение архитектурного уровня, в традиционных технологиях создания ВcС [4] определяет практически весь маршрут проектирования и разработки. Поэтому именно она может выступать в качестве классификационного признака технологий создания ВcС и определять уровень «погружения» в вычислительную иерархию, ожидающий разработчика. Технологии решения вычислительной задачи и платформы, которые фиксируют в значительной

степени эти технологии, следует рассматривать в качестве основных шаблонов проектирования ВcС. Наиболее широко используемыми сегодня в индустрии являются следующие платформы (рис. 5):

- промышленные ПК;
- программируемые логические контроллеры (ПЛК, PLC) и программируемые контроллеры автоматизации (ПАК, PAC);
- мобильные и интернет-устройства (смартфоны и планшеты);
- контроллерные (Fieldbus) и сенсорные сети;
- микроконтроллеры;
- сигнальные процессоры (DSP);

ТАБЛИЦА. ОСНОВНЫЕ ПРОЕКТНЫЕ ПЛАТФОРМЫ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ

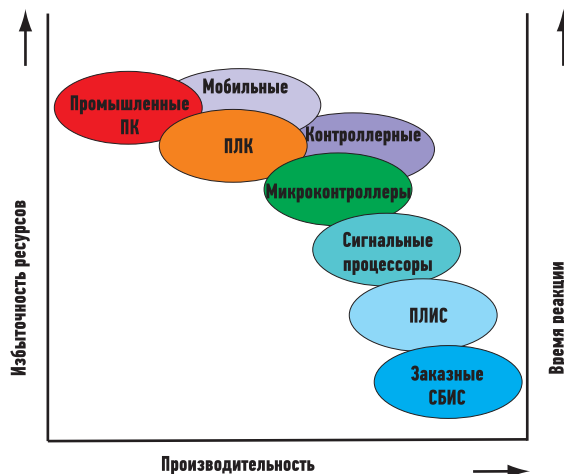
Тип платформы	Производители		Примеры продуктов	Область применения
	Отечественные	Иностранные		
Промышленные ПК	Fastwel, «ГРАНИТ-ВТ», «МЦСТ»	Advantech, Panasonic, AMP, Siemens	SIMATIC Box PC, IS-1U-SYS6, FRONT Station 432.87	Промышленность (SCADA, управление ПЛК), пользовательские терминалы, связь
ПЛК, ПАК	Fastwel, ОБЕН, ЛМТ, Segnetics	Siemens, Mitsubishi Electric, Mean Well, VIPA	System 300S, ADAM-5000, Simatic S7-300, APAX-5520CE	Автоматизация технологических процессов (промышленность, энергетика, транспорт, ЖКХ)
Мобильные и интернет-устройства	teXet, «Код безопасности»	Nokia, Samsung, Apple, HTC, Getac, Panasonic, Advantech	PWS-8033M, iPad, Континент Т-10, Nokia Lumia 900, Advantech P37B	Пользовательские интерфейсы: промышленность, военные, транспорт, спасательные службы, экология
Контроллерные и сенсорные сети	«ЭЛКУС», «Альтоника»	Freescale Semiconductor, Texas Instruments, Digi International, Moxa	MicaZ, TelosB, Intel Mote 2, STMicroelectronics, CAN-200PC104	Промышленность, автомобильная электроника, авиакосмическая и военная техника, ЖКХ, дом и офис, экология
Микроконтроллеры	«Мета», «Мультиклет», «МЦСТ», «ЭЛВИС»	NXP Semiconductors, Atmel, Microchip, Freescale, STMicroelectronics	LPC2000, Atmel AVR PIC-32, Coldfire, STM32	Любые электронные изделия малой и средней серийности
Сигнальные процессоры	«ЭЛВИС», НТЦ «Модуль»	Analog Devices, Freescale, Texas Instruments	SigmaDSP, ADSP-21xx, Blackfin, StarCore, DSP56K, TMS320, KeyStone, DaVinci, L1879BM1 (NM6403), 1892BM2Я	Обработка звука, видео, связь, радиолокация, сонары
ПЛИС	–	Altera, Xilinx, Actel, Lattice	Stratix V, Cyclone V, Virtex-6, Zynq-7000, Spartan-6, RTAX-S, Axcelerator, IGLOO, LatticeECP3	Мелкосерийные изделия, приборы, прототипирование
Заказные СБИС	«ЭЛВИС», «МЦСТ», НТЦ «Модуль», «Ангстрем», НИИМЭ, «Микрон»	Broadcom, Qualcomm, Realtek, Rockchip, Allwinner, Lucent, Freescale	–	Любые крупносерийные электронные изделия: контроллер ввода/вывода, процессор, RAM, SoC

- программируемая логика — ПЛИС (PLD, FPGA);
- заказные СБИС (ASIC, ASIP, SoC, Network on Chip – NoC).

В основу классификации положен нижний уровень ресурсов/сервисов/элементов ВсС, который закрепляет тип основного вычислительного элемента в проекте.

Платформы промышленных ПК и ПЛК/ПАК позволяют относительно просто и быстро создать прикладную систему, однако эта эффективность проявляется только в рамках типовых технических заданий. Проектные платформы микроконтроллеров и сигнальных про-

РИС. 5. ▶
Платформы и технологии для создания встраиваемых системы



Тактовая частота	Объемы памяти	Система ввода-вывода	Стандартные интерфейсы	Требуемые для разработки компетенции
Соответствует производительности офисных ПК. Сотни МГц, единицы ГГц	От сотен Мбайт до единиц Гбайт	HMI, расширение УСО посредством PCI, USB	USB, Ethernet, VGA, DVI, RS-232	Прикладное программирование, языки программирования высокого уровня, модели вычислений
Сотни МГц	От десятков кбайт до сотен Мбайт	Дискретные, аналоговые, релейные, цифровые	RS-232, RS-485, CAN, Ethernet	Интерфейсы периферийных устройств, языки стандарта IEC61131-3
От сотен МГц до единиц ГГц	От сотен Мбайт до единиц Гбайт	Сенсорные HMI, беспроводные сетевые и периферийные интерфейсы	USB, WiFi, Bluetooth, GSM, CDMA	Прикладное программирование для мобильных платформ, языки программирования высокого уровня, модели вычислений
От десятков кГц до единиц ГГц	От десятков кбайт до сотен Мбайт	Сетевые интерфейсы, в том числе и беспроводные	RS-485, CAN, LIN, IEEE-802.15.4 (ZigBee), Z-Wave, Ethernet, GSM, IEEE 1901 (PLC)	Системы массового обслуживания, сети, модели вычислений, интерфейсы периферийных устройств
От десятков кГц до единиц ГГц	От десятков кбайт до сотен Мбайт	Интерфейсы «машина-машина», примитивные HMI, дискретные, аналоговые, релейные	CAN, LIN, RS-485, RS-232, USB, Ethernet	ОСРВ, программирование на уровне аппаратуры, модели вычислений, интерфейсы периферийных устройств, архитектура вычислителей
От сотен кГц до единиц ГГц	От десятков кбайт до сотен Мбайт	Цифровые интерфейсы	SPI, I ² C, UART, PCI	Алгоритмы сигнальной обработки, интерфейсы периферийных устройств, архитектура вычислителей
До десятков ГГц	До сотен Мбайт	Цифровые интерфейсы (определяется техническим заданием)	TTL IO, LVDS, USB, Ethernet, PCI, CAN, UART, SPI, I ² C	Архитектура вычислителей, языки описания аппаратуры, цифровая схемотехника
Десятки ГГц	От единиц байт до единиц Гбайт	Определяется техническим заданием		Архитектура вычислителей, языки описания аппаратуры, цифровая схемотехника, микросхемотехника

цессоров предоставляют больше свободы разработчику. Они имеют свою специфику, в первую очередь в организации системного ПО и в степени открытости архитектуры. В качестве платформ с успехом используются ПЛИС, сочетающие гибкость программных и аппаратных средств. Существуют проекты, включающие создание специальной компонентной базы, в первую очередь SoC, ASIC, ASIP.

Особое положение занимают платформы мобильных и интернет-устройств, которые начинают активно использоваться в качестве мобильных терминалов ВcС, в том числе со SCADA «на борту», и сетевые контроллерные платформы, которые выступают системообразующими решениями в ВcС с распределенной организацией.

При движении по списку проектных платформ/шаблонов вниз в целом растет достижимая оптимальность проектных решений и суммарная сложность проектирования.

В таблице приведены примеры фирм-производителей, сравнительные данные по областям применения, типовые характеристики и требуемые компетенции проектирования ВcС для каждой из перечисленных выше проектных платформ.

ПРОБЛЕМЫ «ПЕРЕДНЕГО КРАЯ» В ПРОЕКТИРОВАНИИ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ

Растущая сложность прикладных задач, многообразие проектных платформ и технологий порождают все новые проблемы в проектировании ВcС. На первое место специалисты ставят необходимость совершенствования методик и инструментов проектирования системного уровня, вопросы надежного и безопасного проектирования ВcС для ответственных применений, развитие вычислительных архитектур в направлениях повышения параллелизма, гибкости, энергоэффективности вычислений. По-прежнему остро стоит проблема повторного использования на всех этапах проектирования ВcС. Отмечается необходимость развития и даже пересмотра основных принципов и абстракций организации ВcС для решения задач управления реального времени [5].

Программируемость на всех уровнях

Являясь системами с преимущественно программной реализацией, ВcС строятся на основе вычислительных платформ с большой долей программируемых средств и уровней (Highly Programmable

Platforms — «глубоко» программируемые платформы).

Вот некоторые из проблем, порождаемые такой программируемостью:

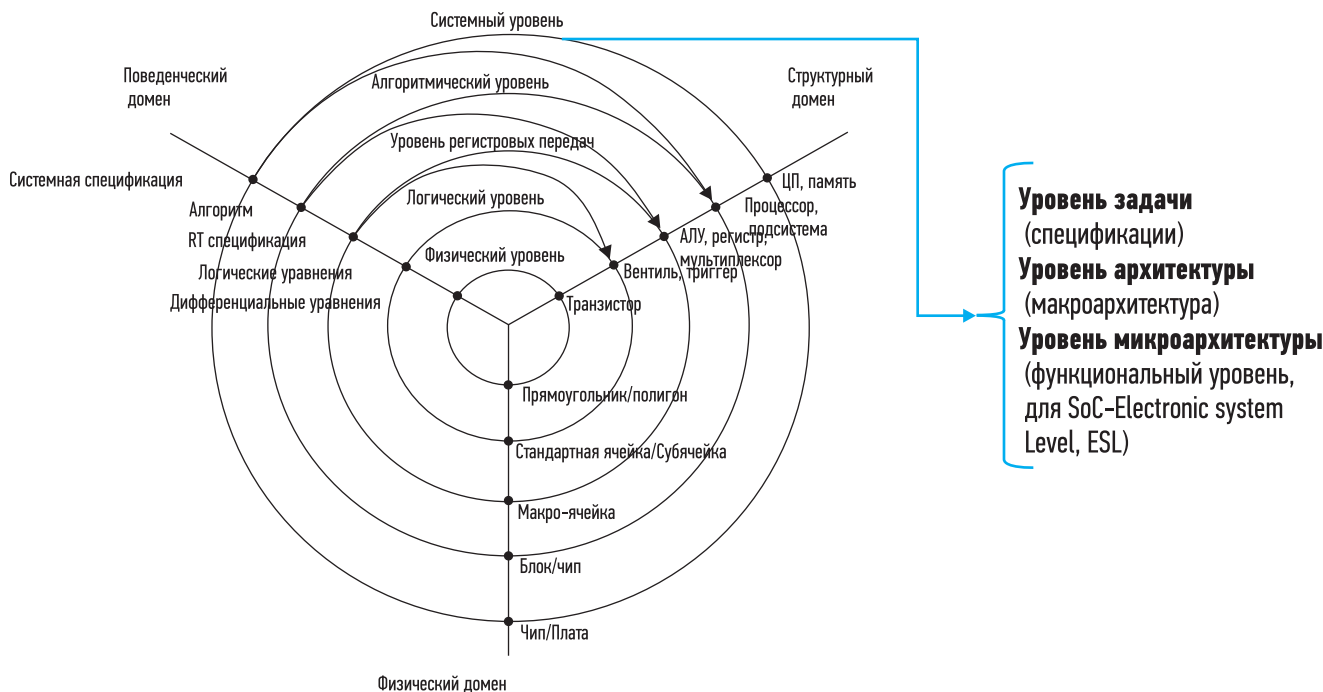
- противоречие между ростом уровня абстрактности в представлении задач ВcС и контролируемостью реализации;
- специфический «портрет специалиста», необходимого для работы в области программирования ВcС;
- неадекватность большинства современных технологий программирования требованиям проектирования ВcС в части надежности, безопасности функционирования и информационной защищенности;
- низкий коэффициент повторного использования результатов проектирования.

Программируемость расширяет возможности разработчика, одновременно резко увеличивая риск ошибки и трудоемкость низкоуровневого проектирования. Попытки вообще уйти от низкоуровневого проектирования ВcС пока успехом не увенчались.

Высокоуровневое проектирование

При создании ВcС все большее значение приобретает этап высоко-

РИС. 6. ▽
Подуровни в архитектурном проектировании встраиваемых систем



уровневого проектирования (High Level Design, HLD). На рис. 6 показаны подуровни верхнего уровня представления ВСС с помощью традиционной Y-диаграммы. Системный уровень разделен на три части: спецификация, архитектура (макроархитектура), микроархитектура.

Уровень исходной спецификации предполагает создание поведенческого представления ВСС непосредственно на основе технического задания. Уровень макроархитектуры содержит общее представление об устройстве ВСС, охватывая все ее компоненты, независимо от того, как они в дальнейшем будут реализованы.

Основные задачи этапа HLD ВСС:

- создание концепции решения целевой задачи, формирование исходных спецификаций;
 - выбор и согласование моделей вычислений;
 - формирование архитектуры и микроархитектуры;
 - формирование выходных спецификаций для этапа реализации.
- Тенденции в HLD ВСС:
- повышение уровня абстракции проектирования;
 - широкое применение моделирования и методов формальной верификации;
 - развитие средств абстрактного представления вычислительного процесса;

Большинство разработчиков ВСС недооценивают значимость этапов HLD. Проектирование на архитектурном уровне ведется с минимальной формализацией и официально составляет незначительную долю работ по проекту. В области ВСС такая ситуация объясняется в первую очередь недостаточным развитием HLD-технологий и инструментов и отсутствием должной подготовки в вузах по этим вопросам. Конечно, существует определенное число простых проектов ВСС, для выполнения которых с приемлемым качеством вполне достаточно традиционных технологий низкого уровня проектирования.

Кибер-физический подход

Создание ВСС, тесно взаимодействующих с физическими процессами, требует технически сложного проектирования на низком уровне. Разработчики ВСС вынуждены «бороться» с контроллерами прерываний, архитектурой памяти, про-

граммированием уровня ассемблера (чтобы использовать специализированные команды или точно управлять синхронизацией), проектированием драйверов устройств, сетевых интерфейсов и планированием процессов, вместо того, чтобы сосредоточиться на определении требуемого поведения системы. Масса отклонений от основного курса решения конечной задачи и сложность этих технологий заставляют искать новые подходы к проектированию. Специалисты из Калифорнийского университета (Беркли) считают, что в основе таких подходов должно лежать моделирование системы целиком и технологии совместного проектирования аппаратно-программного обеспечения, сетей и физических процессов [6]. Такой подход назван кибер-физическим от термина «кибер-физические системы» (Cyber-Physical Systems, CPS), который был введен Хелен Гилл (Helen Gill) в NSF, США, примерно в 2006 г., чтобы обозначить взгляд на системы с позиций интегрирования вычислений и физических процессов.

КТО БУДЕТ СОЗДАВАТЬ ВСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ

Несмотря на огромное число выпускников ВУЗов по направлениям информатики и ВТ, в области создания ВСС ощущается серьезная нехватка квалифицированных специалистов, владеющих как технологиями низкоуровневого проектирования, так и методологией и опытом высокоуровневого, архитектурного проектирования.

В профессиональном плане это объясняется типовой моделью знаний выпускника вуза в области ВТ, которая предполагает:

- доминирование ВСС с центральным программируемым процессором интерпретирующего типа;
- организацию прикладного вычислительного процесса в рамках ОС (комплекс системных программ) посредством создания программы на языке высокого уровня с последующей трансляцией в команды аппаратного процессора и вызовы функций ОС.

Такая модель профессиональных знаний пригодна в секторе прикладного программирования на стандартных аппаратно-программных

платформах и неэффективна в области создания ВСС.

Эффективное решение перечисленных проблем целевой подготовки разработчиков ВСС и СнК («система на кристалле», System on Chip, SoC) предложено в ряде ведущих университетов США и Европы. Остановимся на одном из наиболее интересных подходов. В Калифорнийском университете (Беркли) программа подготовки по ВСС и СнК уже около десяти лет основывается на методологии Platform Based Design (платформно-ориентированное проектирование, PBD) и включает следующие разделы: методология PBD, модели вычислений, проектирование архитектуры и встроенное ПО.

Дополнением и развитием этой методологии обучения выступает подход к проектированию ВСС в рамках понятия CPS, о котором говорилось выше. Акцент делается на критических размышлениях о технологиях проектирования ВСС и на том, как проектирование встроенного ПО влияет на поведение, безопасность и надежность CPS. Курс дает студентам опыт проектирования встроенного ПО на трех уровнях, а именно: программирование на уровне «голого железа» (ПО, которое выполняется при отсутствии ОС); программирование в пределах ОСРВ; высокоуровневое проектирование в технологии Model Driven Design (MDD, «модельно-ориентированное проектирование»). В каждом случае студентов учат глубоко исследовать механизмы и абстракции, которые им предоставлены, и понимать последствия выбора абстракций для проектирования всей системы.

На сходных идеях строится обучение на кафедре вычислительной техники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО)

в рамках направления «Встраиваемые вычислительные системы», включающее три магистерские специализации [7]:

- «Проектирование встраиваемых вычислительных систем» — организация ВСС с различной архитектурой; технологии и инструменты высокоуровневого проектирования, встроенное ПО, схемотехническое проектирование.

- «Системотехника интегральных вычислителей. Системы на кристалле» — создание вычислительных компонентов и ВcC в интегральном исполнении, технологии высокоуровневого проектирования SoC, тестопригодное проектирование, энергосберегающие технологии, средства моделирования и верификации SoC.
- «Сетевые встраиваемые системы». Акцент сделан на проектировании распределенных ВcC, интерфейсах и протоколах взаимодействия. Магистранты изучают вопросы организации сетей Fieldbus, сенсорных беспроводных сетей, сетей на кристалле (NoC).

НАУЧНЫЙ И ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ СПЕЦИАЛИСТОВ НИУ ИТМО И ООО «ЛМТ» В ОБЛАСТИ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ

Разработками в области ВcC активно занимаются сотрудники научно-учебно-производственного кластера «Проектирование встраиваемых систем и СнК», основу которого составляют кафедра вычислительной техники НИУ ИТМО и научно-производственная фирма «ЛМТ» [7, 8].

Результатами работ являются специализированные вычислительные платформы и комплексы технических средств (КТС), на основе которых серийно выпускается большое число систем и приборов различного назначения. Среди них системы распределенной автоматики для железнодорожного (КТС «Тракт», КТС «Бриз») и судового (КТС АР3000) транспорта, для объектов энергетики и ЖКХ (АСУНО «Луч2», СУМЭ «Луч3», АСКУЭ «Луч-ТС»); семейство прецизионных теплофизических приборов ИТС на базе контроллеров ТФК. Производятся и развиваются семейства зондовых сканирующих микроскопов «НаноЭдьюкатор» (платформы LIC5091 и «МиниЛаб»). Серийно выпускаются специализированные программируемые контроллеры различного назначения, например для управления наружными рекламносителями, системами кондиционирования. Большой интерес

представляет новое семейство ПЛК SCG-4 промышленного и транспортного назначения. Семейство обладает развитыми средствами пользовательского программирования, широкими коммуникационными возможностями, распределенной системой ввода-вывода с функциями локального управления, функциональными расширителями на основе технологии ASIP. Перечислим некоторые примеры промышленного внедрения разработанных ВcC:

- на транспорте (подвижной состав РЖД, метрополитенов, горная техника, отечественные и зарубежные суда различных классов — от судов береговой охраны до крупнотоннажных танкеров);
- на объектах энергетики и ЖКХ (города Вологда, Калининград, Новосибирск, Петропавловск-Камчатский, Рыбинск, Сыктывкар и др.);
- на промышленных и инфраструктурных объектах (дробильно-сортировочный комплекс «Гора Змеяева», г. Ревда, автотрасса М-8, железнодорожные депо и авиационные ангары).

В научном плане основными результатами коллектива являются оригинальные архитектурные платформы МЗМ, LIC, NL, keX, обладающие свойствами реконфигурирования и масштабирования, программируемостью на различных уровнях. На базе многолетних исследований и разработок в области вычислительных архитектур и средств автоматизации их проектирования и отладки специалистам коллектива удалось получить значительные теоретические результаты в области HLD ВcC. В первую очередь это система архитектурных абстракций для представления ВcC, оригинальные объектно-событийные модели вычислений и аспектная методология проектирования ВcC.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ВcC продолжают стремительно проникать во все области жизни человека. Параллельно растут и требования к качеству их работы, что проявляется в необходимости правильного выполнения функций, в надежности хранения и защиты информации, в дли-

тельности автономной работы и во многом другом. Разнообразие приложений и увеличение их сложности заставляют разработчиков активно совершенствовать технологии проектирования ВcC на всех уровнях: компонентной базы, архитектуры процессоров, средств программирования, моделей организации вычислений. Сегодняшние ВcC в подавляющем большинстве создаются как многопроцессорные системы, с процессорными ядрами hard и soft, с пространственно сосредоточенной и/или пространственно распределенной архитектурой. Стремительно набирает темпы создание динамически реконфигурируемых вычислительных платформ, которые позволяют резко снизить энергопотребление ВcC при росте их функциональности и производительности. Растет степень интеграции ВcC с объектами контроля (управления). Создаются технические системы, само существование которых без центральной роли ВТ и телекоммуникаций было невозможно. Такие системы называются кибер-физическими, что, по сути, определяет новую парадигму в проектировании.

Хочется отметить особую привлекательность бурно развивающейся отрасли ВcC для молодежи. Тот факт, что во встраиваемых системах сфокусированы ключевые проблемы и разнообразные решения из всех областей вычислительной техники и инфокоммуникационных технологий, определяет актуальность решаемых задач и огромный потенциал развития отрасли. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. John L. Hennessy, David A. Patterson. Computer architecture: a quantitative approach. San Francisco. Morgan Kaufmann publishers. 2007.
2. Кузнецов С. Миром правят встроенные системы // Открытые системы. 2009. № 4.
3. Actor-Oriented Design of Embedded Hardware and Software Systems // Journal of Circuits, Systems, and Computers. 2003. № 12.
4. Платунов А. Роль и проблемы высокоуровневого этапа проектирования встраиваемых вычислительных систем // Компоненты и технологии. 2009. № 4.
5. www.date-conference.com/
6. Edward A. Lee, Sanjit A. Seshia. Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach. 2011. <http://LeeSeshia.org>.
7. <http://embedded.fimo.ru>.
8. <http://lmt.fimo.ru>.