

*К.Б. Бойков, В.А. Большаков, В.А. Миклуш*

**МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ  
В ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

*К.В. Boykov, V.A. Bolshakov, V.A. Miklush*

**MICROCONTROLLERS AND THEIR APPLICATION  
IN HYDROLOGICAL AND HYDROLOGICAL  
INFORMATION-MEASUREMENT SYSTEM**

*В статье приводится обзор микроконтроллеров, предназначенных для работы в качестве встроенных средств автоматизации процессов сбора и обработки данных в измерительных и управляющих системах. Описаны области применения некоторых распространённых микроконтроллеров в составе гидрологических и гидрофизических измерительных систем, решаемые с их помощью задачи, особенности применения различных семейств микроконтроллеров в зависимости от решаемых задач.*

*Ключевые слова: микроконтроллер, автоматизация процессов сбора и обработки данных в измерительных и управляющих системах.*

*A survey of microcontrollers used as devices for automatisisation of data collecting and processing in measurement and control systems is given. The article describes the areas of application of some known microcontrollers in hydrological and hydrological information-measurement system, presents the problems that can be solved with their help. Dwells on specific features of application of various microcontrollers families depending on the task to be solved.*

*Key words: Microcontroller, automation of data collection and processing in measuring and controlling systems.*

Микроконтроллеры входят в состав большинства современных систем сбора и обработки информации, выполняя в них наряду с этими функциями функции автоматического управления. Основные особенности состава технических средств этих интегральных микросхем: наличие цифровых и аналоговых устройств ввода/вывода; отдельные адресные пространства энергонезависимой памяти программ и констант и оперативной памяти данных; развитые подсистемы поддержки режима реального времени, такие как система прерываний, таймеры/счетчики, аналоговые компараторы, разнообразные режимы энергопотребления.

В настоящее время выпускаются микроконтроллеры с разрядностью шины данных 8, 16 и 32 бита, но основной объем реализации приходится на 8- и 16-разрядные микроконтроллеры. К числу ведущих фирм производителей микроконтроллеров, относятся: Atmel, Silicon Laboratories, Texas Instruments, Philips, Microchip, Fujitsu Microelectronics, Motorola, Holtex, Zilog, Renesans Technology, Cypress MicroSystems, Infineon, STMicroelectronics.

Фирма Atmel специализируется, в основном, на выпуске восьмиразрядных микроконтроллеров общего назначения AVR с быстрым процессорным ядром [Курилин, 2000]. Эти RISC-микроконтроллеры благодаря Гарвардской архитектуре отличаются высокой производительностью, которая может достигать 1 MIPS на 1 МГц. Микроконтроллеры AVR работают на тактовых частотах до 16 МГц, имеют Flash-ПЗУ емкостью до 128 кбайт, Энергонезависимую память данных EEPROM емкостью до 4 кбайт (100 000 циклов перезаписи), внутреннее ОЗУ SRAM емкостью до 4 кбайт, 10-разрядный АЦП с программируемым усилителем, 32 регистра-аккумулятора, до 6 параллельных 8-битных портов, последовательные интерфейсы UART, SPI, TWI. Фирма Atmel выпускает также микроконтроллеры с ядром x51 и с 2004 г. 32-разрядные Flash-микроконтроллеры, которые находятся в одной ценовой группе с 8-разрядными, но существенно расширяют область решаемых задач.

Для осуществления разработок на базе микроконтроллеров AVR фирма Atmel предоставляет бесплатный пакет интегрированной среды AVR Studio, объединяющий в себе текстовый редактор, ассемблер и симулятор. Этот пакет поддерживает аппаратные средства отладки: стартовые наборы разработчика, эмуляторы, программаторы. Микроконтроллеры семейства ATmega имеют встроенный интерфейс JTAG для внутрисхемного программирования и фоновой отладки программ.

Восьмиразрядные микроконтроллеры SiLabs фирмы Silicon Laboratories [Гладштейн, 2008] предназначены для интеграции аналоговой и цифровой электроники в системах сбора, обработки и передачи данных. В этих микроконтроллерах обеспечивается совместная работа высокопроизводительного ядра микроконтроллера и АЦП, что позволяет не останавливать цифровую часть устройства при проведении высокоточных измерений. Логическая организация и система команд микроконтроллеров SiLabs соответствуют архитектуре MCS-51. За счет использования конвейерного ядра производительность микроконтроллеров SiLabs достигает 100 MIPS. Это самая высокая производительность среди восьмиразрядных микроконтроллеров. К особенностям этих микроконтроллеров относятся также высокая разрядность АЦП (до 16 разрядов АЦП последовательного приближения и до 24 разрядов сигма-дельта АЦП) с возможностью дифференциального включения входов и программируемым предварительным усилением, наличие 12-разрядного ЦАП, малое энергопотребление (0,3–0,6 мА/MIPS). В состав микроконтроллеров серии C8051F350 входят программируемые цифровые фильтры и ЦАП с токовым выходом для питания датчиков.

Микроконтроллеры семейства SiLabs имеют внутреннюю программную память Flash объемом до 128 кбайт и до 8448 байт ОЗУ. Данные могут записываться как в ОЗУ, так и во Flash-память программ. На кристалле содержатся также до пяти таймеров/счетчиков и программируемый массив счетчиков с 16-битным таймером/счетчиком и пятью 16-битными модулями захвата/сравнения, интерфейс внешнего ОЗУ с 16-битной шиной адреса и 8-битной шиной данных,

интегрированный источник опорного напряжения 2,43/2,5 В с током нагрузки до 200 мкА, встроенный датчик температуры с точностью  $\pm 1\%$ , до 64 линий параллельных портов ввода/вывода с нагрузочной способностью линии до 50 мА, последовательные интерфейсы SMBUS, SPI, UART, USB, CAN. Уникальная особенность микроконтроллеров SiLabs – наличие цифрового коммутатора (CROSSBAR), с помощью которого можно подключать цифровые и аналоговые узлы микроконтроллера к разным выводам, в том числе в процессе выполнения программ.

Для поддержки разработок фирма Silicon Laboratories выпускает наборы разработчика, включающие плату-прототип на базе микроконтроллера с макетной площадкой, последовательный адаптер EC2 для внутрисхемной отладки и программирования, набор кабелей для подключения адаптера к компьютеру и плате, блок питания, программное обеспечение и документацию на CD-диске. В состав программного обеспечения входят распространяемая бесплатно интегрированная среда разработки IDE (Integrated Development Environment) с программированием на языке Ассемблер, примеры программ и файлы определения регистров специального назначения, оценочная версия компилятора C фирмы Keil с ограничением по коду до 2 кбайт. На диск также записана техническая документация для микроконтроллеров. В состав устройств микроконтроллеров входит также встроенный отладочный интерфейс JTAG (в ИМС с малым количеством выводов – C2) для внутрисхемного программирования и отладки программ в режиме реального времени. Для упрощения конфигурирования коммутатора CRJSSBAR поставляется программа CONFIG, назначающая функции выводов с использованием графического интерфейса и генерирующая код на языках Ассемблер и C.

Компания Microchip Technology Inc. выпускает малопотребляющие восьмиразрядные Flash-микроконтроллеры PIC [Афанасьев, 2004], имеющие тактовую частоту до 40 МГц с широким набором периферийных модулей, многоканальным 10-разрядным АЦП и разнообразными последовательными интерфейсами ( $I^2C$ , SPI, USART, LIN, CAN). Система команд микроконтроллеров PIC разработана с учетом эффективного использования языка высокого уровня C. Микроконтроллеры PIC имеют повышенную надежность. В них, в частности, предусмотрен переход на резервный источник синхронизации в случае отказа основного генератора или уходе его параметров. Благодаря перечисленным качествам микроконтроллеры PIC широко применяются в системах промышленной автоматики, автомобилестроении, охранной техники и жизнеобеспечения. Низкое энергопотребление позволяет использовать эти микроконтроллеры в приборах с батарейным питанием.

В состав средств поддержки разработок на микроконтроллерах PIC входят программные пакеты компилятора с языка C CCS-PICC и распространяемая бесплатно интегрированная среда разработки MPLAB, включающая в себя

средства отладки, в том числе с помощью встроенного модуля ICD, интерфейс программирования и внутрисхемного эмулятора.

Восьмиразрядные микроконтроллеры Encore компании ZiLOG на базе ядра eZ8 имеют Flash-память до 64 кбайт и регистровую память до 4 кбайт. Полностью сохранен набор команд популярного в 90-х годах прошлого века ядра Z8. Микроконтроллер содержит 10-разрядный АЦП (до 10 каналов), четыре 16-разрядных таймера с широким набором режимов работы, последовательные интерфейсы (2 UART, I<sup>2</sup>C, SPI), 60 линий ввода/вывода, 12 входов прерываний, 3 канала прямого доступа в память. Производительность процессорного ядра достигает 10MIPS.

Отладочный инструментарий фирмы ZiLOG для микроконтроллеров eZ8 представляет собой набор разработчика, включающий полную версию компилятора C и интегрированную среду разработки программного обеспечения ZiLOG Developer Studio. Разработка может проводиться на языках Ассемблер и C. На кристалле имеется встроенный аппаратный отладчик с одной интерфейсной линией, поэтому внешний эмулятор не нужен и отладочная среда подключается непосредственно к микроконтроллеру через модуль отладочного интерфейса.

Компания NEC Electronics выпускает недорогие восьмиразрядные микроконтроллеры 78KOS/Kx1+ с малым количеством выводов [Горюнов, 20005], позволяющие эффективно решать задачи управления различными устройствами, такими как интеллектуальные датчики, электродвигатели, автомобильная электроника и т.п. Основные технические характеристики: объем памяти Flash до 8 кбайт, ОЗУ до 256 байт, тактовая частота до 10 МГц, минимальное время выполнения инструкции 200 нс, четырехканальный 10-разрядный АЦП. Поддерживаются внутрисхемное программирование и самопрограммирование. Микроконтроллер имеет встроенные средства повышения надежности: алгоритм коррекции ошибок памяти; защиту от бросков напряжения питания; интерфейс, обеспечивающий закрытие доступа к памяти.

Для поддержки разработок на базе микроконтроллера 78KOS/Kx1+ фирма NEC Electronics предлагает оценочный комплект, включающий программное обеспечение IAR Embedded Workbench (компилятор C, Ассемблер и симулятор), который подключается к компьютеру через порт USB, позволяет создавать программы и может использоваться как программатор. Фирмой поставляется также недорогой эмулятор.

В последнее время многие производители предлагают так называемые конфигурируемые системы на кристалле (System on Chip – Soc). Например, компания Cypress MicroSystems выпускает восьмиразрядные микроконтроллеры PSoC серии CY8C2 (ядро M8C) с конфигурируемыми цифровыми периферийными устройствами и аналоговыми элементами [Емец, 2004]. По архитектуре эти микроконтроллеры относятся к типу CISC. Микроконтроллер PSoC имеет небольшой набор стандартной периферии и блок конфигурируемых элемен-

тов, которые делятся на две группы: аналоговые (для построения АЦП, ЦАП, компараторов, активных фильтров и т.п.) и цифровые (для построения счетчиков, интерфейсов, сдвиговых регистров и т.п.). Процедура конфигурирования заключается в установке необходимых значений битов управления во время исполнения программы. Таким образом, набор периферии микроконтроллера можно менять при выполнении программы, используя один и тот же конфигурируемый блок для решения разных задач, что позволяет снизить стоимость микроконтроллера и обеспечить экономичность выполняемых на его основе разработок. К особенностям микроконтроллера PSoC можно отнести и возможность работы от напряжения 1 В.

Микроконтроллеры PSoC фирмы Cypress MicroSystems сопровождаются удобными средствами разработки приложений, которые обеспечивают наглядное проектирование разных конфигураций периферии. Имеется C-компилятор и символьный отладчик, работающий с внутрисхемным эмулятором.

Реконфигурируемую 32-разрядную систему на кристалле (CSoC) A7 выпускает фирма Trissend. Центральный процессор системы включает в себя 32-разрядное RISC-ядро ARM7TDMI, имеющее адресное пространство 4Гбайт и 32 регистра общего назначения. Большинство команд выполняются за один такт (20 нс для максимальной тактовой частоты). Для ускорения операции умножения используется аппаратный умножитель с накоплением, что позволяет реализовать задачи цифровой обработки сигналов.

Лидеры в производстве 16-разрядных микроконтроллеров – японские компании Hitachi, Fujitsu, Mitsubishi, NEC, Toshiba. В частности, компания Fujitsu Microelectronics выпускает 16-разрядные Flash-микроконтроллеры семейства F<sup>2</sup>MC-16LX с напряжением питания 3 В [Крылов, 2004]. Для этих микроконтроллеров характерна высокая производительность, возможность вычислений с повышенной точностью с использованием 32-разрядного аккумулятора, 24-разрядная внутренняя шина памяти, обеспечивающая адресное пространство до 16 Мбайт, Flash-память программ с внутрисхемным программированием и перепрограммированием в условиях применения, большие наборы встроенных периферийных устройств и интерфейсов, встроенные средства отладки, упрощающие процесс разработки приложений.

Для поддержки разработок с микроконтроллерами фирмы Fujitsu используется интегрированный пакет Softune Workbench, содержащий компиляторы языков C и Ассемблер и эмулятор. Используются также внутрисхемные интерфейсы отладки JTAG и Nexus.

В России получили более широкое распространение 16-разрядные микроконтроллеры американских и европейских компаний: Motorola, Texas Instruments, Infineon, STMicroelectronics, Philips и др.

В компании Motorola основным промышленным стандартом 16-разрядных микроконтроллеров является в настоящее время семейство 68HCS12 [Шагурин, 2004]. В его состав входит ряд серий микроконтроллеров – А, С, Dх, Е, Н, Т для

разных применений. Микроконтроллер содержит 16-разрядный процессор HCS12, внутреннее ОЗУ емкостью до 12 кбайт, электрически программируемое ПЗУ данных емкостью до 4 кбайт, Flash-память до 256 кбайт, 10-разрядный АЦП последовательного приближения и другие периферийные устройства. Максимальная рабочая частота – 25 МГц. Микроконтроллеры семейства 68HCS12 обеспечивают реализацию широкого круга приложений в промышленной автоматике, контрольно-измерительной аппаратуре и других областях, требующих значительного объема внутренней памяти микроконтроллера и широкого набора периферии. Вместе с тем компания Motorola выпускает и более дешевые микроконтроллеры с 8-разрядным ядром M68HC08 для использования в бытовой технике и специализированной аппаратуре, не требующей больших ресурсов.

В микроконтроллерах фирмы Motorola реализованы средства, позволяющие существенно упростить процесс отладки программного обеспечения, в частности режим отладки BDM (Background Debug Mode). Встроенный блок, реализующий этот режим, обеспечивает ввод в микроконтроллер команд отладки от компьютера и получение данных от микроконтроллера через один вывод по принципу последовательного обмена. Компания предлагает BDM-адаптер, реализующий функции эмулятора, обеспечивающего процесс отладки в реальном времени и программирование внутренней Flash-памяти без отключения микроконтроллера от разрабатываемой системы. Поставляются также платы развития с наборами периферийных устройств, автономные программаторы и интегрированная среда программирования. Поддерживается программирование на языках С и Ассемблер.

16-разрядные микроконтроллеры фирмы Infineon C16x [Белецкий, 2004] имеют высокую производительность. В их архитектуре использованы преимущества RISC, CISC и DSP-процессоров. В каждом микроконтроллере имеется многоканальный 10-разрядный АЦП со встроенной автоматической калибровкой, корректирующей влияние температуры и условий работы на результат преобразования. Микроконтроллеры C16x работают с тактовой частотой до 40 МГц. Из эксплуатационных показателей следует отметить хорошую электромагнитную совместимость, обеспечивающую нормальную работу микроконтроллера в условиях сильных электромагнитных помех. Основное назначение микроконтроллеров C16x – применение в системах автоматике автомобилей, но они могут успешно использоваться и в промышленной автоматике. Для реализации приложений микроконтроллер имеет встроенный контроллер отладки с интерфейсом JTAG.

Одно из основных преимуществ микроконтроллеров семейства C16x фирмы Infineon – встроенная поддержка отладки (On Chip Debug Support – OCDS). Она дает пользователю возможность эмулировать аппаратные средства без эмуляционного кристалла. Фирма бесплатно распространяет пакет DAVE – инстру-

мент разработчика, позволяющий существенно сократить время разработки программ.

Компания Renesas Technology Europe выпускает высокопроизводительные 16-разрядные микроконтроллеры серий H8 для мобильных приложений, сетей, автомобильной промышленности, цифровой бытовой и промышленной электроники. Например, серия H8/36014 недорогих 16-битных малогабаритных микроконтроллеров. Микроконтроллеры этой серии имеют высокопроизводительное 16-разрядное ядро, работающее с тактовой частотой до 20 МГц, до 32 кбайт Flash-память и 2 кбайт ОЗУ, 4 канала 10-разрядных АЦП, 11 внешних входов прерываний.

Микроконтроллеры компании Renesas Technology достаточно хорошо обеспечены средствами поддержки разработок, включающими эмулятор реального времени E6000 и отладочную систему E10T, использующую встроенное устройство отладки.

Фирма Texas Instruments выпускает микроконтроллеры [Редькин, 2006], которые, как и рассмотренные выше микроконтроллеры SiLabs относятся к микросистемам для обработки смешанных сигналов. Они также имеют вычислительное ядро, соответствующее стандарту 8051. Восемьразрядные микроконтроллеры семейства MSC12xx ориентированы на прецизионные измерения напряжения и обработку результатов этих измерений техническими средствами, размещенными на кристалле. В состав аппаратных средств аналоговой части входят высокоточный АЦП (до 24 разрядов), усилитель аналоговых сигналов с программируемым коэффициентом усиления от 1 до 128, до 8 дифференциальных/несимметричных аналоговых каналов, встроенный датчик температуры, четыре 16-битных ЦАП с возможностью программирования выходов (по напряжению или токовый). На кристалле в цифровой части размещается процессорное ядро, Flash-память программ/данных объемом до 32 кбайт, СОЗУ данных объемом до 1280 байт, загрузочное ПЗУ объемом до 2 кбайт и цифровая периферия. Максимальная тактовая частота до 40 МГц, длительность выполнения одной инструкции – 100 нс. Выпускаются также 16-разрядные микроконтроллеры, отличающиеся низкой потребляемой мощностью, наличием высокоточных АЦП и низкой стоимостью. Например, новый микроконтроллер MSP430FG4270, построенный на основе 16-разрядного RISC-ядра, имеет 5 режимов энергопотребления. В режиме ожидания он потребляет ток 1,1 мкА. Время перехода в активный режим 26 мкс. Микроконтроллеры фирмы Texas Instruments применяются, в основном, в измерительной технике и промышленной автоматике. Разработки поддерживаются большим набором средств отладки, в состав которых входят программные и аппаратные внутрисхемные отладчики и интегрированная среда программирования. Используются языки С и Ассемблер.

Микроконтроллеры информационно-измерительных систем должны отвечать ряду специальных требований, анализ которых позволяет выбрать тип

микроконтроллера конкретного приложения. В частности, системы гидрометеорологического мониторинга отличаются высокими требованиями к точности измерений и большим разнообразием типов измерительных преобразователей.

Повышение требований к точности и повторяемости результатов измерений гидрологических и гидрофизических параметров в различных точках земного шара, а также повышение эксплуатационных качеств измерительного оборудования, используемого в экспедициях, приводит к необходимости использования в измерительных приборах цифровых методов обработки информации и связанных с этим современных схемотехнических решений, основанных на применении микропроцессорных средств.

Современные гидрологические и гидрофизические измерения, проводимые *in situ*, требуют длительного накопления информации о средних значениях параметров водной среды (температуре, электропроводности, скорости течения, оптических и химических показателях, радиоактивности), а также о пульсационных значениях некоторых из указанных параметров. Методы сбора измерительной информации от подобных систем, основанные на накоплении результатов аналого-цифрового преобразования первичной информации без предварительной обработки, требуют больших объёмов встроенной энергонезависимой памяти для записи получаемой в процессе измерений информации, что приводит к снижению эксплуатационных качеств и надёжности аппаратуры. В ряде случаев, например при использовании систем для измерений гидрологических параметров в районах Арктики и Антарктиды, требуется длительная работа систем (1 год и более) от автономных источников электроэнергии с ограниченной ёмкостью (от 8 до 14 А/ч). В подобных случаях схемотехнические решения исходят из минимизации энергопотребления, не наносящей ущерба точности и стабильности измерений, следовательно, на цифровую часть оборудования должен приходиться минимальный расход электроэнергии.

В разрабатываемых системах используются 8-разрядные микроконтроллеры семейства PIC производства фирмы Microchip, AVR RISC производства фирмы Atmel и 32-разрядные микроконтроллеры LPC2214, LPC2294, AT91SAM7X256 и AT91RM9200 на базе ядер ARM7 и ARM9 производства фирм Philips и Atmel.

Микроконтроллеры семейства PIC находятся вне конкуренции по величине энергопотребления в «спящем» режиме (Sleep mode). Даже у устаревших моделей PIC16Fxxx оно находится на уровне 1 мкА и менее. Напряжение питания составляет от 2,5 до 5 В, что позволяет питать их непосредственно от литиевых батарей, служащих источниками питания в автономных измерительных приборах (без использования стабилизаторов напряжения). Эти микроконтроллеры находят применение в аппаратуре, разрабатываемой по заказам Института Арктики и Антарктики РАН (ААНИИ). Задачи, решаемые этими контроллерами: управление электропитанием приборов при длительных автономных постановках, обслуживание аналого-цифровых преобразователей и часов реального вре-

мени, запись получаемых данных в энергонезависимую память сравнительно небольших объёмов (от 256 кБайт до 2 Мбайт), а также передача накопленной информации на внешние вычислительные средства (персональный компьютер) для вторичной обработки. Количество обслуживаемых каналов измерений в случае применения контроллеров данного типа – от 3 до 6, частоты дискретизации входной информации – от 1 отсчёта в час до 100 Гц при тактовых частотах контроллеров от 1 до 4 МГц, встроенные алгоритмы обработки информации минимизированы и включают в себя арифметическое осреднение результатов измерений по каналам, вычисление контрольных сумм, формирование протоколов обмена данными и обработку команд внешней аппаратуры. Недостатками контроллеров семейства PIC являются: малый объём оперативной памяти, длительный машинный цикл (4 такта), невозможность наращивания памяти. Основным языком, используемым при разработке встроенного программного обеспечения для данных контроллеров – Ассемблер, среда разработки – Microchip MPLAB версии 7.41.

Микроконтроллеры семейства AVR RISC используются для обработки информации либо в измерительных системах, имеющих питание от бортовых сетей судов, либо в системах, имеющих питание от периодически заряжаемых аккумуляторных батарей. Эффективность контроллеров AVR RISC превосходит эффективность контроллеров семейства PIC более чем в два раза для большинства алгоритмов, использующихся при проведении обработки гидрологической и гидрофизической информации.

В информационно-измерительных системах контроллеры AVR RISC используются для организации сбора и цифровой передачи информации от датчиков пульсаций скорости и удельной электрической проводимости при числе каналов от 3 до 6, частотах дискретизации входной информации от 5 Гц до 10 кГц при тактовых частотах контроллеров от 7 до 16 МГц. Типовой ток потребления этих контроллеров составляет 15 мА в номинальном режиме и менее 2 мкА в «спящем» режиме.

Встраиваемые алгоритмы для высокочастотных каналов включают синхронизацию отсчётов, поступающих от пространственно разнесённых приборов в системе, вычисление средних и среднеквадратических значений измеряемых величин по каналам, помехозащитное кодирование и декодирование при передаче измерительной информации по линиям связи. Для низкочастотных каналов при помощи контроллеров AVR RISC производится алгоритмическая обработка данных по каналам удельной электрической проводимости, температуры и давления с целью вычисления *in situ* значений солёности в соответствии с ШПС-78, плотности воды в соответствии с УС-80 и скорости звука в соответствии с ГСССД 202. Кроме этого, запас быстродействия позволяет производить запись в энергонезависимую память по усовершенствованным алгоритмам, содержащим коды, исправляющие блочные ошибки, присущие Flash-памяти

больших объёмов. Подобные методы записи позволяют повысить надёжность передачи и хранения информации.

Перенос части алгоритмов обработки первичных данных во встраиваемое программное обеспечение средств измерений позволяет частично разгрузить бортовые вычислительные средства вторичной обработки и повысить надёжность информационно-измерительных систем в случае повреждения программного обеспечения вторичной обработки (получение измерительной информации, выраженной в физических величинах, возможно при помощи стандартной программы «Терминал», имеющейся в любой операционной системе). Используемые языки программирования для контроллеров AVR RISC – C (компилятор avr-gcc 4.1.1, стандарт C99) и Ассемблер (avra, синтаксис фирмы Atmel). Средства отладки – среды Kontrollerlab, avr-gdb под управлением операционной системы GNU Linux и AVRStudio под управлением операционной системы Microsoft Windows.

Микроконтроллеры LPC22xx, AT91SAM7X256 на базе ядра ARM7 и AT91RM9200 на базе ядра ARM9, являясь высокопроизводительными 32-разрядными вычислителями с тактовой частотой до 70 МГц (ARM7) и до 200 МГц (ARM9), позволяют переносить подавляющую часть алгоритмов первичной обработки (цифровую фильтрацию, корреляционную и свёрточную обработку), требующие значительных затрат процессорного времени центральных вычислительных машин информационно-измерительных систем в состав встраиваемого программно-математического обеспечения средств измерений.

Учитывая широкую номенклатуру периферии контроллеров ARM7 и ARM9 (интерфейсы Fast Ethernet, CAN, USB), имеется возможность создавать локальные подсети контроллеров средств измерений, работающие в составе общих вычислительных сетей информационно-измерительных систем. Отдельные узлы этих подсетей служат шлюзами для обмена текущей обработанной информацией и командами между средствами измерений и центральными вычислительными машинами. Контроллеры семейств ARM7 и ARM9, имея архитектуру фон Неймана, могут поддерживать функционирование ряда операционных систем, включая клоны известной операционной системы Linux (uClinux для контроллеров ARM7 и полнофункциональный GNU Linux с ядрами версий 2.4.x.x и 2.6.x.x для контроллеров ARM9).

Работа контроллеров средств измерений под управлением операционной системы создаёт дополнительные эксплуатационные удобства (возможность быстрой замены алгоритмов обработки при проведении испытаний или научных исследований без необходимости вскрытия корпусов приборов и использования специализированных программаторов). Значительный запас по производительности в большинстве случаев позволяет реализовать защиту потоков данных и команд от несанкционированного использования методами прикладной криптографии. Потребляемый контроллерами семейств ARM7 и ARM9 ток составляет не более 70 мА в номинальном режиме и не более 0,5 мА в «спя-

щем» режиме. Используемый язык программирования для контроллеров ARM7 и ARM9 – C (компилятор arm-elf-gcc 4.1.2, стандарт C99), средства отладки – gdb, среды разработки Eclipse 3.2.2 под операционной системой GNU Linux, Rowley Crossworks for ARM под операционной системой Microsoft Windows.

Перспективным является создание комбинированного специализированного вычислителя, совмещающего достоинства контроллеров семейства PIC по энергопотреблению в «спящем» режиме с вычислительной мощностью контроллеров семейств ARM7 и ARM9. Достигнуть этого можно путём глубокого управления электропитанием (включения и отключения) основного вычислительного устройства, реализованного на основе контроллера ARM при помощи вспомогательного таймерно-событийного устройства управления на основе контроллера PIC. Однако трудность заключается в должной проработке встроенного программного обеспечения основного вычислительного устройства с тем, чтобы получить минимальное время его инициализации (непроизводительных расходов машинного времени и электроэнергии). В противном случае, баланс потребляемых мощностей будет нарушен в сторону более потребляющего устройства, и результат снижения потребляемой мощности в режиме ожидания за счёт глубокого управления питанием будет утерян. Требуется детальный расчёт машинного времени, рациональное распределение частей алгоритма между частями специализированного вычислителя на основе контроллеров PIC и ARM.

Использование подобных специализированных вычислителей со встроенными графическими или алфавитно-цифровыми индикаторами в автономных зондах, буйковых станциях, других гидрологических и гидрофизических информационно-измерительных системах, расположенных в удалённых районах, позволит полностью отказаться от использования традиционных персональных компьютеров в экспедиционных условиях и сократить расходы на транспортировку источников питания (аккумуляторов и передвижных электростанций).

Другая обширная сфера применения микроконтроллеров – системы гидроакустики и радиолокации. В их состав входят гидроакустические средства наблюдения, связи и телеметрии, подводного звуковидения и акустической голографии, изучения Мирового океана, обеспечения глубоководных исследований, морской геологии; радиолокационные станции (в том числе спутниковые). Все эти средства измерений имеют разные диапазоны рабочих частот и области применения, от которых зависят требования к ресурсам микроконтроллеров. В частности, для обработки и отображения гидроакустической и радиолокационной информации необходимы, как минимум, 16-разрядные микроконтроллеры, а задачи управления приемными и передающими антеннами вполне успешно могут решаться на базе 8-разрядных микроконтроллеров, например, семейства AVR. Поэтому техническая реализация таких систем обычно предусматривает комплексное использование микроконтроллеров разного типа.

**Литература**

1. *Курилин А.* Микроконтроллеры AVR: Что нового? // Компоненты и технологии, 2006, № 1.
2. *Гладштейн И.А.* Микроконтроллеры смешанного сигнала C8051Fxxx фирмы Silicon Laboratories и их применение. Руководство пользователя. – М.: Издат. дом «Додека-XXI», 2008. – 336 с., ил. (Сер. «Мировая электроника»).
3. *Афанасьев И.* Новое расширенное ядро PIC18 микроконтроллеров компании Microchip // Компоненты и технологии, 2004, № 6.
4. *Горюнов Г.* Новые микроконтроллеры NEC с малым количеством выводов и области их применения // Компоненты и технологии, 2005, № 6.
5. *Емец С.* Микроконтроллеры с реконфигурируемой периферией PSOG производства Cypress Microsystems – восьмиразрядники нового тысячелетия // Компоненты и технологии, 2004, № 4.
6. *Крылов Е.* Новый виток развития. 16-разрядные Flash-микроконтроллеры семейства F<sup>2</sup>MC-16LX фирмы Fujitsu // Компоненты и технологии, 2004, № 6.
7. *Шагури И., Мокрецов М.* Семейство 68HCS12 – новое поколение 16-разрядных микроконтроллеров компании Motorola // Компоненты и технологии, 2004, № 2.
8. *Белецкий В.* XC166 – новое семейство 16-разрядных микроконтроллеров фирмы Infineon // Компоненты и технологии, № 3, 2004.
9. *Редькин П.П.* Прецизионные системы сбора данных семейства MKS12xx фирмы Texas Instruments: архитектура, программирование, разработка приложений. – М.: Издат. дом «Додека-XXI», 2006. – 608 с., ил. (Сер. «Мировая электроника»).