

СИГНАЛЬНЫЕ КОНТРОЛЛЕРЫ ДВА В ОДНОМ



В.Майская

Изготовители полупроводниковых приборов, стремясь расширить номенклатуру выпускаемых изделий, зачастую вспоминают "реальный мир" и напоминают создателям цифровых систем, что этот мир – аналоговый. Для сопряжения с внешним миром в цифровых системах необходимо применять аналоговые схемы. И хотя разработчики цифровой аппаратуры, конечно, помнят об аналоговом мире, такое напоминание весьма удобно для продвижения новых изделий на рынок. Тот же подход сегодня используют и производители процессоров, обнаружившие, что слияние микроконтроллеров и сигнальных процессоров дает лучшие результаты, чем совместное применение отдельных самостоятельных устройств. На рынке появились "гибридные" процессоры – так называемые цифровые сигнальные контроллеры (Digital Signal Controller, DSC), в которых либо контроллер и сигнальный процессор размещены на одном кристалле, либо набор команд контроллера расширен, с тем чтобы выполнять функции сигнального процессора (или наоборот). Правда, баланс оптимальных ресурсов сочетаемых устройств зависит от области применения "гибридной" микросхемы. Объединение сигнальных процессоров и микроконтроллеров позволяет получать при минимальных затратах приемлемое решение для многих бытовых и промышленных систем. И сегодня, аналогично тому, как из класса микропроцессоров выделились микроконтроллеры, сформировался новый класс цифровых микросхем – сигнальные контроллеры, или DSC. Что же сейчас представлено на рынке этих микросхем?

ЧТО ЖЕ ТАКОЕ ЦИФРОВОЙ СИГНАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЛЕР?

Исторически микроконтроллеры и сигнальные процессоры (DSP) предназначены для различных приложений. Микрокон-

троллеры в основном используются в средствах управления, выполняющих функции опознания и контроля события. Типичное назначение контроллера – реакция на внешние события, т.е. анализ входных данных и статуса системы, с тем чтобы своевременно изменить ее состояние. Основные его операции – условные переходы, манипулирование большим объемом данных и последовательное перемещение разрядов регистра или ячейки памяти. Они легко программируются на языке Си. Но микроконтроллеры малопригодны для сложной обработки сигналов.

Специализированные цифровые сигнальные микропроцессоры (DSP) традиционно применяются в системах, требующих прецизионной обработки аналоговых сигналов. Сигнальные процессоры представляют собой "цифродробилки" и выполняют математические действия с чрезвычайно высокой скоростью, непрерывно питая при этом вычислительные блоки необходимыми данными. Эта последняя задача и делает программирование DSP менее привлекательным в сравнении с микроконтроллером.

Таким образом, основные свойства микроконтроллеров – возможность управления в реальном времени и детерминированный отклик, DSP – высокая производительность. Микроконтроллеры, как правило, выполняются на одном кристалле, DSP зачастую требуют применения внешних схем памяти, ПЛИС, контроллера и связующих логических схем.

Сегодня, по мере увеличения сложности систем, микроконтроллеры уже способны выполнять некоторые функции обработки сигнала, а DSP – функции отклика на событие в реальном времени, сохраняя при этом свое непосредственное назначение. В системах прецизионного управления электродвигателями, робототехнике, драйверах накопителей на жестких дисках, ряде электронных средств измерения с целью увеличения скорости выполнения математических операций предусмотрена возможность доступа DSP к внешней памяти микроконтроллера. А в цифровых фотоаппаратах, сканерах на ПЗС, сотовых телефонах возможна совместная работа двух устройств, выполняющих различные операции системы. И, конечно, у разработчиков систем возник вопрос: "А почему



бы не сократить затраты и не объединить микроконтроллеры и сигнальные процессоры на одном кристалле?"

Существуют два способа объединения микроконтроллера и DSP. Согласно первому, в микроконтроллере можно предусмотреть возможность выполнения функции сигнального процессора. Согласно второму, микросхема сигнального процессора "обогащается" функциями микроконтроллера и располагает набором периферии, присущим микроконтроллеру.

Некоторые производители микроконтроллеров пытались добавить в выпускаемые схемы функции умножения и суммирования (MAC) сигнального процессора. Но функции DSP гораздо сложнее, чем просто умножение и суммирование: ввод и вывод данных, обработка различных типов данных, решение проблем насыщения и переполнения во время операций вычисления. Эти функции, а также выполнение специальных алгоритмов DSP нельзя просто "добавить" существующим микроконтроллерам. И микроконтроллеры с дополнительными блоками MAC не смогли работать с быстродействием, присущим DSP. Такой подход оказался приемлем для создания цифровых сигнальных контроллеров, используемых в системах с малым объемом математических действий.

Были и попытки изготовителей цифровых сигнальных процессоров "обогатить" свои схемы периферийными устройствами микроконтроллеров (по крайней мере, UART, SPI и одним таймером). Но микроконтроллеры, выполненные на основе DSP-ядер, уже не обладают быстрым детерминированным откликом или возможностью побитовой обработки. Единственное приемлемое решение заключалось в разработке цифрового сигнального контроллера "с нуля" с учетом всех особенностей микроконтроллеров и сигнальных процессоров. В результате разработаны микросхемы цифровых сигнальных контроллеров с быстрой реакцией на прерывание и периферийными устройствами, рассчитанными на выполнение функций управления, такими как ШИМ и программируемые сторожевые таймеры, и с такими присущими большинству DSP блоками, как MAC, многорегистровые схемы циклического сдвига и сумматоры большого объема.

Первоначальным стимулом к созданию цифровых сигнальных контроллеров явилось стремление обеспечить повышение частоты вращения электродвигателей, получение точной реакции на изменение нагрузки и снижение энергозатрат. Замена электродвигателей с фиксированной частотой вращения двигателями с регулируемой частотой приводит к сокращению их энергопотребления почти в два раза. (До последнего времени две трети энергии, потребляемой промышленностью США, приходилось на долю электродвигателей, и почти все они — двигатели с фиксированной частотой вращения.)

Возникло множество других приложений, где применение новых микросхем давало ощутимую выгоду. Появление программируемого цифрового сигнального контроллера от-

крыло создателям разнообразного оборудования широкие возможности. Пользователи смогли ввести в традиционные средства управления такие функции, как голосовые команды, сжатие речевого сигнала/воспроизведение речи, шифрования, распознавания образов и т.п. Термин "цифровой сигнальный контроллер" был введен в 2002 году компанией Microchip Technology с выпуском DSC серии 6000. Он принят большинством, но не всеми поставщиками этих микросхем (так, компании Infineon и Renesas относят выпускаемые сигнальные контроллеры к классу микроконтроллеров). Благодаря сокращению энергопотребления электродвигателей и источников питания, в сети управления которых используются сигнальные контроллеры, эти микросхемы отнесены к классу "зеленой" продукции.

ВЫБОР НУЖНОГО ДЛЯ ДАННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ЦИФРОВОГО СИГНАЛЬНОГО КОНТРОЛЛЕРА

Значения производительности и выполняемые функции сигнальных контроллеров весьма разнообразны, поэтому выбор контроллера, необходимого для конкретного приложения, — задача достаточно обременительная. Такие факторы, как срок службы батареи и стоимость, могут иметь тот же вес, что производительность и требуемая поддержка аппаратных средств.

Конечно, цифровой сигнальный контроллер должен обладать соответствующими применению ресурсами. Однако память программ и производительность DSC одного типа, но различных поставщиков не всегда одинаковы. Так, стандартные эталонные тесты показывают, что значения Си кода, полученные различными поставщиками при выполнении контрольных задач, могут отличаться на 50%. Цифровые сигнальные контроллеры могут не располагать всеми периферийными устройствами, необходимыми для конкретного применения, поскольку периферия существенно влияет на стоимость микросхемы.

Для цифровых сигнальных контроллеров, предназначенных для управления электродвигателями, важное значение имеют характеристики внутрисхемных специализированных ШИМ. Необходимо оценить возможности ШИМ для программируемой регулировки времени работы вхолостую, блокировки неисправностей, запуска АЦП.

ШИМ играют важную роль и при использовании цифровых сигнальных контроллеров в системах регулировки источников питания (двухтактных, полумостовых, мостовых). Вследствие высоких скоростей и необходимости точного контроля переключения микросхемы DSC должны содержать ШИМ с разрешением 1 нс, быстродействующий АЦП и аналоговый компаратор, обеспечивающий экономически эффективное цифровое управление цепью обратной связи инвертора.

Входящие в микросхему сигнального контроллера блоки сигнального процессора, контроллера и специализирован-

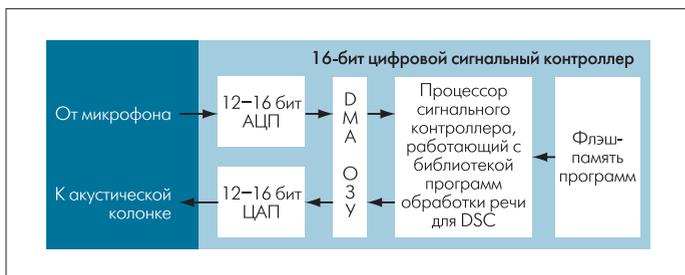


Рис. 1. Применение 16-бит цифрового сигнального контроллера в системе речевой связи

ные периферийные модули обеспечивают применение DSC в высококачественных и дешевых средствах речевой и телекоммуникационной связи. Многие компании предлагают разнообразные библиотеки программ обработки речевых сигналов, соответствующие промышленным стандартам и не требующие от конечного пользователя изучения всех принципов работы сигнального процессора. Тем не менее, важно знать основные свойства сигнального контроллера, предназначенного для конкретной области применения. Сейчас для систем голосовой связи все большую популярность получают микросхемы DSC с ШИМ периферийными устройствами, выходной сигнал которых до передачи на акустическую колонку поступает на фильтр нижних частот, а периферийный модуль прямого доступа к памяти обеспечивает автоматическую буферизацию данных, исключая издержки процессора, связанные с выполнением прерываний (рис.1).

Цифровые сигнальные контроллеры все чаще применяются в портативных устройствах с батарейным питанием. Основные параметры, требуемые для таких DSC, – малый ток в спящем режиме, широкий диапазон рабочих напряжений и значение тактовой частоты.

ЧТО СЕГОДНЯ ПРЕДСТАВЛЕНО НА РЫНКЕ DSC?

На сегодняшний день крупнейшие поставщики микросхем сигнальных контроллеров – компании Microchip Technology, Texas Instruments и Freescale Semiconductor, основная продукция которых представлена в таблице.

Microchip Technology

Микросхемы сигнальных контроллеров семейства dsPIC компании Microchip выполнены на основе семейства 8/16-бит контроллеров PIC, в которых модифицированное RISC-ядро сочетается с набором команд сигнального процессора. Цифровые сигнальные контроллеры компании предназначены для двух групп пользователей. Представители первой приобретают DSC под конкретное приложение, например для систем управления электроприводом. Микросхемы этого типа включают такие блоки, как программируемые ШИМ-генераторы, интерфейсы импульсных датчиков положения. Представители второй группы отдают предпочтение универсальным контроллерам, обеспечивающим переход пользователей от 8-бит

к 16-бит микросхемам и используемым в системах распознавания голоса или отпечатков пальцев, в программных модемах, системах связи на основе сетевых протоколов TCP/IP.

К последним разработкам компании Microchip относятся шесть микросхем DSC семейства dsPIC33F – три сигнальных контроллера общего назначения и три для систем управления электроприводом/преобразованием энергии. Производительность микросхем обоих типов составляет 40 Mips, они содержат флэш-память емкостью 32 или 16 Кбайт, по одному UART, SPI и I²C порту. Поставляются в 28-выводных корпусах типа SDIP, SOIC и QFN, а также в 44-выводных корпусах типа TQFP и QFN. Размер герметизированных микросхем 6×6 мм. В микросхемы обеих серий также входит блок выбора выводов периферийных устройств, позволяющий переназначать цифровые входы/выходы и оптимизировать компоновку платы.

В микросхемы сигнальных контроллеров для систем управления электроприводом/преобразования мощности серии dsPIC33FJ32MC входит АЦП с числом каналов до девяти и устанавливаемым пользователем разрешением 10 или 12 бит. Кроме того, они содержат ШИМ с двумя независимыми источниками тактовых сигналов, который может использоваться и для преобразования мощности, и для управления питанием осветительных устройств. В микросхеме сигнальных контроллеров серии также входит интерфейс импульсного датчика положения. По утверждению компании, новые микросхемы этой серии – отличная платформа для выполнения расширенных алгоритмов управления электроприводом, таких как алгоритмы векторного управления (Field Oriented Control, FOC).

Микросхемы сигнальных контроллеров общего назначения серии dsPIC33FJ32GP содержат АЦП с числом каналов до 13 и с тем же, что и у контроллеров серии dsPIC33FJ32MC,

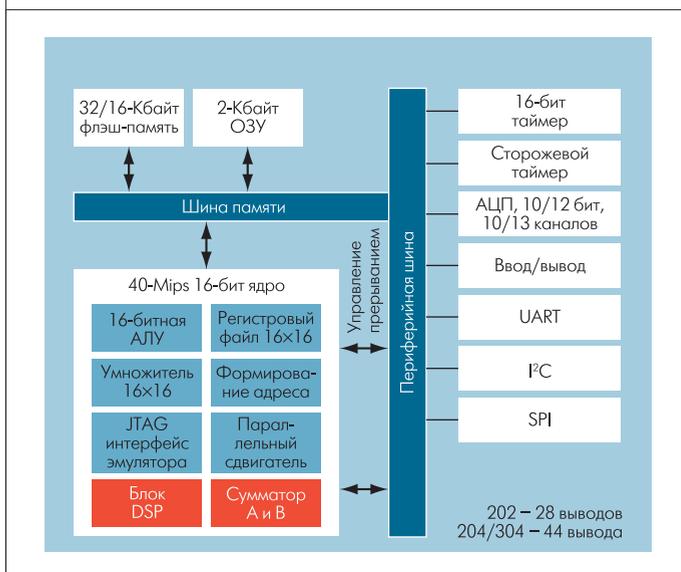


Рис.2. Блок-схема цифрового сигнального контроллера dsPIC33FJ32/16GP/202/204/304



Характеристики микросхем цифровых сигнальных контроллеров трех основных производителей (по состоянию на середину 2007 года)

Компания	DSC	Тактовая частота, МГц	Емкость флэш-памяти, Кбайт	ШИМ			АЦП			Основные периферийные устройства	Число выводов
				число каналов	разрешение, бит	рабочий цикл, нс	число каналов	разрешение, бит	производительность, Мвыборки/с		
Microchip Technology	dsPIC30F	30	6–144	4–8	16	1 или 16,5 в зависимости от изделия серии	6–16	10	1,0 или 2,0 в зависимости от изделия серии	ICSP, UART, SPI, I2C, опции CAN и Codegurd	28–64
	dsPIC33F	40	12–256	8	16	12,5	4–24	10	1,1 или 2,2 в зависимости от изделия серии	ICSP, UART, SPI, I2C, Codegurd, опция CAN	20–100
Texas Instruments	TMS320F280x	60–100	32–256	16	13	150 нс	16	12	6,25	SPI, SCI, CAN, I2C, MoSSP	100
	TMS320F240x	40	16–64	7–15	11	150 нс	5–16	10	2,0	SCI, SPI, CAN	32–144
Freescale	MC56F83xx	60	48–280	12	15	10	8	12	2,67	I2C, SPI, SCI, CAN	48–160
	MC56F80xx	32	12–64	5–6	15	10	6–16	12	2,67	I2C, SPI, SCI, (на MC56F803x – I2C QSP, QSCI, CAN)	32–64
	MC56F81xx	40	40–572	12	15	10	8, 16	12	2,67	I2C, SPI, SCI	48–160

устанавливаемым пользователем разрешением (рис.2). Микросхемы найдут применение в разнообразных встраиваемых приложениях, требующих высокую производительность и малую площадь под компоненты.

Для новых DSC компания Microchip предоставляет библиотеки приложений и полный набор инструментальных средств, общий для всех ее сигнальных контроллеров.

В начале 2008 года компания Microchip выпустила еще шесть новых 16-бит цифровых сигнальных контроллеров семейства dsPIC33, четыре из которых (FJ64GP802/804 и FJ128GP802/804, рис.3) предназначены для аудиосистем, два других (FJ64MC802/804 и FJ128GP802) – для управления электроприводом/преобразования мощности. Микросхемы сигнального аудиоконтроллера содержат двуканальный 16-бит ЦАП с пропускной способностью 100 Квыборков/с. Предусмотрен прямой доступ к оперативной памяти общей емкостью 16 Кбайт, включающей двухпортовое ОЗУ емкостью 2 Кбайт. Флэш-память микросхем контроллеров емкостью 64 или 128 Кбайт может использоваться для хранения команд или данных. В микросхемы также входят два аналоговых компаратора, АЦП с устанавливаемым пользователем разрешением 10/12 бит, датчик истинного времени и календарь, блок выбора периферийных выводов, модуль контроля с помощью циклического избыточного кода, последовательные интерфейсы – два UART, два SPI, I²C и CAN2.0B. Параллельный ведущий/ведомый порт обеспечивает подключение к внешним схемам памяти, периферийным связным устройствам или дисплеям. Кроме того, в микросхемы аудиоконтроллеров входит кодек-интерфейс, поддерживающий протоколы I²S и AC'97. Новые сигнальные контроллеры способны обрабатывать, сжимать или восстанавливать аудиоданные, при

этом большинство команд контроллера и все команды цифровой обработки сигнала выполняются за один цикл. Микросхемы для аудиосистем поставляются в 28-выводных корпусах SOIC, QFN и SPDIP, а также в 44-выводных корпусах TQFP и QFN размером 6×6 мм. Рассчитаны на промышленный (-40...85°C) и расширенный (-40...125°C) диапазоны рабочих температур.

Компания Microchip в помощь разработчикам предоставляет также библиотеки программ сжатия речи, такие как G.711, ADPCM G.726A SPEEX.

Texas Instruments

В отличие от Microchip, компании Texas Instruments и Freescale идут по пути добавления функций управления к своим DSP-микросхемам – семействам TMS320 и 56000, соответственно.

В середине 2007 года компания Texas Instruments выпустила первые 32-разрядные цифровые сигнальные конт-

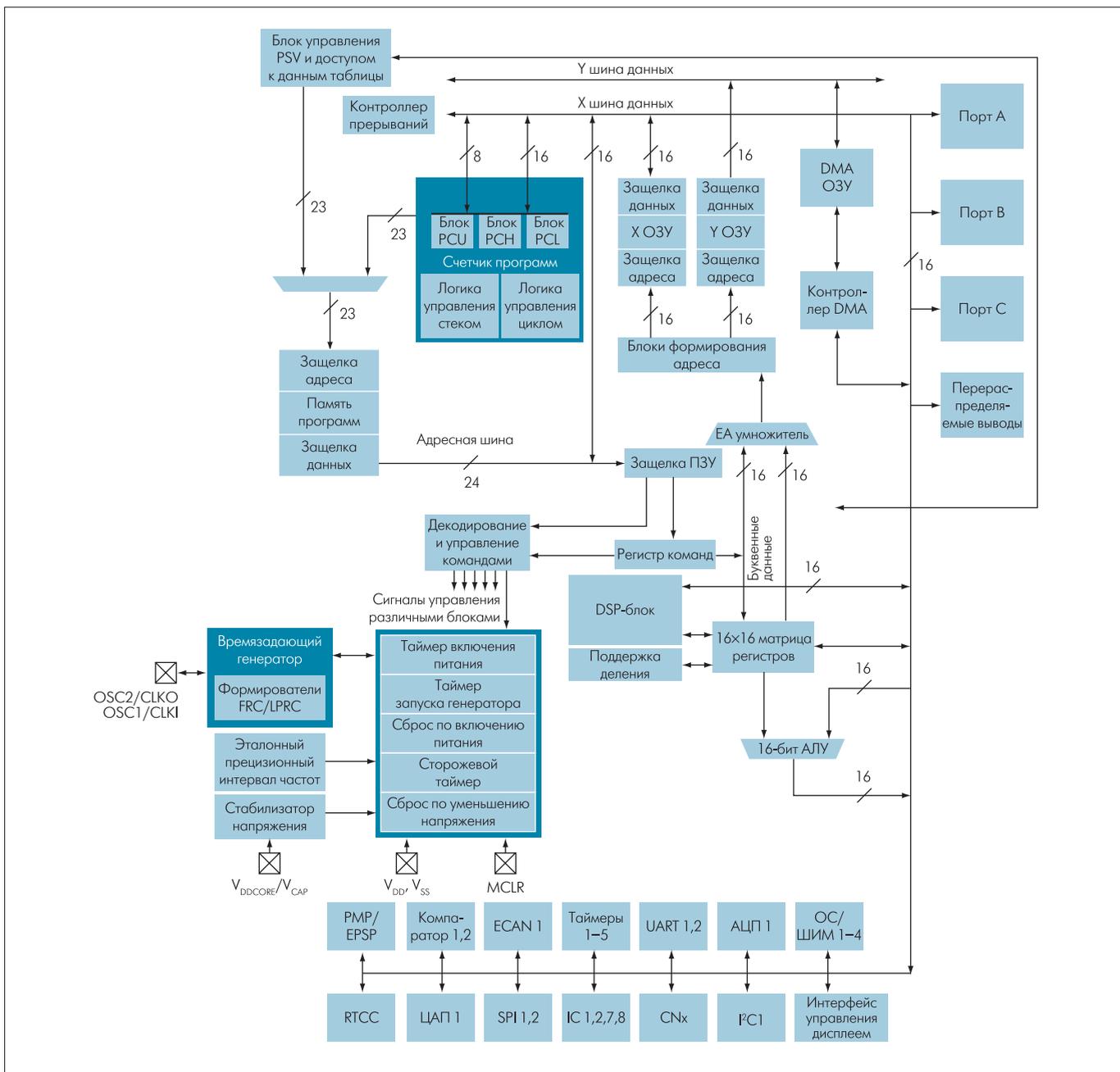


Рис.3. Блок-схема цифровых сигнальных контроллеров для аудиосистем типа dsPIC33FJ64GP802/804 и dsPIC33FJ128GP802/804

роллеры с плавающей точкой серии TMS320F2833x с производительностью 300 Mflops на частоте 150 МГц, сопоставимые по стоимости с процессорами с фиксированной точкой. Контроллеры серии F2833x содержат 12-бит 16-канальный АЦП, быстродействие которого составляет 12,5 Мвыборок/с (на сегодняшний день самое высокое быстродействие для внутрипроцессорных АЦП). Кроме того, в микросхему входят до 18 ШИМ-каналов, шесть из которых выполнены по технологии обеспечения высокого разрешения (High-Resolution PWM, HRPWM), достигающего 150 нс. Последовательные интерфейсы микросхем – CAN, I²C, UART, SPI и буферизованные многоканальные последовательные порты (Multichannel Buffered Serial Ports, McBSP). Внутрисхемные блоки памяти микросхем серии

F2833x – флэш емкостью от 64 К×16 бит до 256 К×16 бит, ОЗУ емкостью 26К–32 Кбайт и ПЗУ загрузки емкостью 1К×16 бит – защищены 256-бит паролем. Шестиканальный контроллер прямого доступа к памяти (DMA) разгружает центральный процессор, освобождая его совместно с программируемым пользователем 16/32-бит интерфейсом внешней памяти от обслуживания быстродействующего внутрисхемного АЦП, и тем самым обеспечивает увеличение общей пропускной способности системы. Контроллеры серии имеют 88 портов ввода/вывода (рис.4). Диапазон рабочих температур составляет -40...85°C (индекс А) или -40...125°C (индекс S). Все цифровые сигнальные контроллеры серии TMS320F2833x программно совместимы с предыдущими контроллерами семейства TMS320C28x.

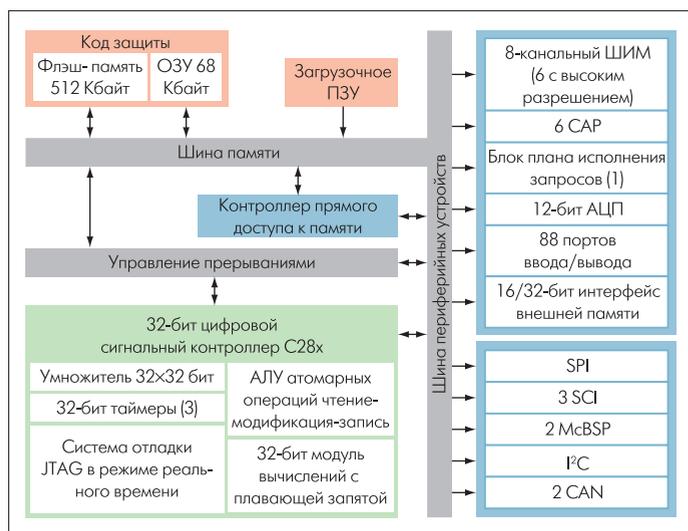


Рис.4. Блок-схема цифрового сигнального контроллера TMS320F28335

По утверждению разработчиков, замена цифровых сигнальных контроллеров предыдущих серий, работающих на частоте 150 МГц, новыми контроллерами с плавающей точкой позволит увеличить быстродействие систем на 50%. Скорость выполнения алгоритмов БФП возрастет на 200% по сравнению со скоростью эквивалентного 32-бит сигнального контроллера с фиксированной точкой типа F2812.

Для программирования новых DSC можно использовать отладочную плату eZdsp F28x и библиотеки IQ Math, "виртуальную" библиотеку программных средств для числений с плавающей точкой компании Texas Instruments. Программное обеспечение, разработанное с помощью IQ Math, автоматически запускается на сигнальных контроллерах F2833x.

Благодаря работе с плавающей точкой и упрощению тем самым разработки программного обеспечения, а также высокой производительности новые цифровые сигнальные контроллеры компании Texas Instruments найдут применение в трехфазных инверторах для солнечных батарей*, в робототехнике и ЧПУ типа CNC с асинхронными электродвигателями**, автомобильных радиолокаторах.

Компания планировала начать поставки образцов сигнальных контроллеров с плавающей точкой в сентябре 2007 года, и освоить их серийное производство в середине 2008 года.

Freescal Semiconductor

Компания Freescal также пошла по пути создания цифровых сигнальных контроллеров семейства 568000 на базе ядра сигнального процессора 56800E. Сейчас компания выпускает три группы сигнальных контроллеров семейства 56F8xxx, выполненных на базе ядра 56800E (см.табл., рис.5).

16-бит ядро 56800E с Гарвардской архитектурой содержит 16x16 умножитель, выполняющий операцию умножения с накоплением за один цикл, четыре 32-бит аккумулятора, 32-бит арифметическое и логическое многобитное сдвигающее устройство, три адресных шины и четыре шины данных (рис.6). Векторы прерываний (с пятью уровнями приоритета) могут располагаться в любом месте памяти. Под-

* По данным Европейской ассоциации фотоэлектрической промышленности, мощность солнечных электростанций за период 2005–2010 годы возрастет на 397% до — 5500 МВт.

** Доходы от продаж серводвигателей, в том числе и асинхронных электродвигателей, по оценкам компании IMS Research, до 2012 года ежегодно будут возрастать примерно на 8%.

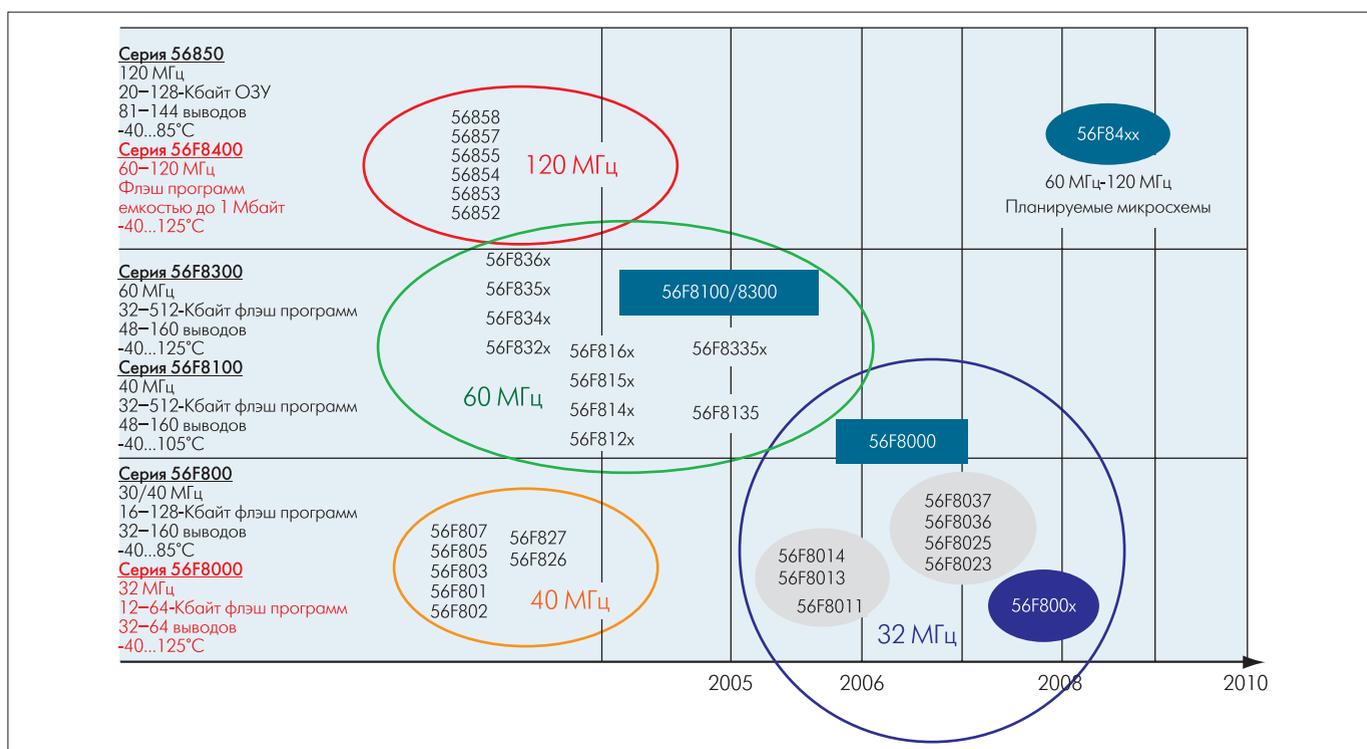


Рис.5. Перспективный план развития цифровых сигнальных процессоров компании Freescal

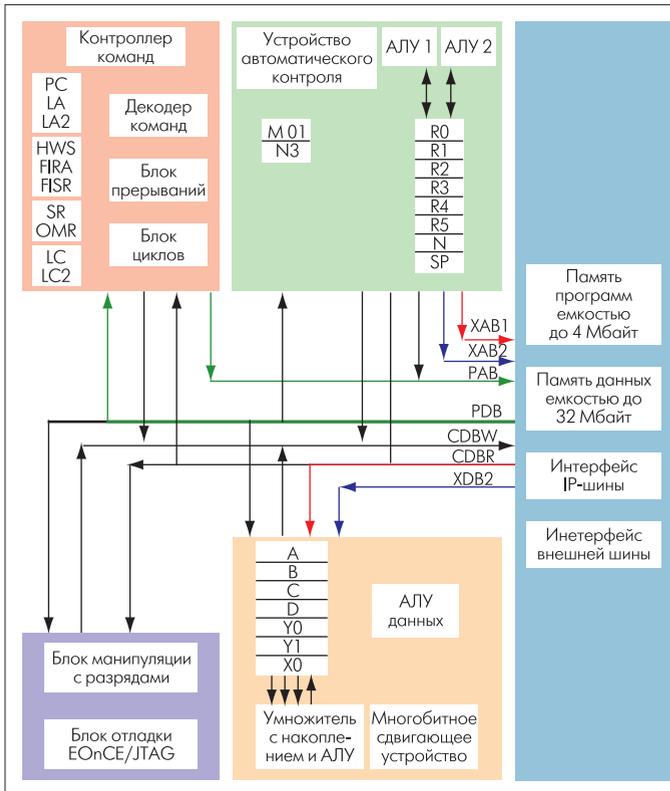


Рис.6. Ядро 56800E цифровых сигнальных контроллеров семейства 54F8xxx

держиваются быстрые прерывания, что позволяет в два-три раза повысить скорость обработки события.

Самый большой набор периферийных устройств у сигнальных контроллеров серии 56F83xx (рис.7).

Цифровые сигнальные контроллеры компании находят применение в автомобильных электронных системах (средствах торможения, трансмиссии, стартерах, определения давления шин, управления двигателем); в бытовых устройствах (стиральных машинах, посудомоечных машинах, холодильниках); импульсных и бесперебойных источниках питания; торговых автоматах, измерительных устройствах, системах безопасности, интеллектуальных игрушках.

Флэш-память программ до 512 Кбайт	ОЗУ программ до 4 Кбайт	Загрузочная флэш до 32 Кбайт	Интерфейс внешней памяти
Порт отладки JTAG/EonCE	56800E ядро 60 Mips 60 МГц		ОЗУ данных до 32 Кбайт
Стабилизаторы напряжения			Флэш-память данных до 32 Кбайт
Контроллер прерываний			6-канальный ШИМ
Диспетчер мощности			6-канальный ШИМ
Генератор тактового сигнала системы			16 многофункциональных 16-бит таймеров
SIM			Квадратный декодер
COP			
FlexCAN			SPI
Датчик температуры			SCI
Порты ввода/вывода до 76			АЦП с 2x4 входами

Рис.7. Блок-схема сигнальных контроллеров серии 56F83xx

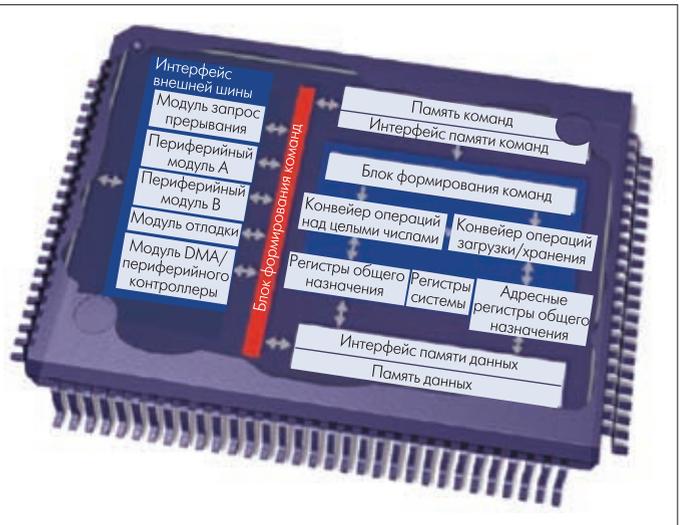


Рис.8. Основные модули контроллера TriCore

Микросхемы, сочетающие функции микроконтроллера и сигнального процессора, других компаний

Вычислительная мощность сигнальных процессоров семейства Blackfin компании Analog Devices, тактовая частота двухъядерных образцов которых составляет 750 МГц, позволяет им выполнять не только обработку сигналов, но и функции управления через интерфейсы USB 2.0 и 100-bit Ethernet. Ядро представляет собой 32-разрядный RISC-процессор. Микросхемы содержат блоки умножения с накоплением и специализированные блоки обработки. Отказавшись от названия "цифровые сигнальные контроллеры", компания представляет микросхемы этого семейства как встраиваемые медиа-процессоры. Микросхемы семейства могут выполнять функции "чистого" сигнального процессора, микроконтроллера или совместно того и другого устройства.

Еще один подход к реализации микросхем, способных выполнять функции обработки сигнала и управления, – использование многоядерных архитектур. Известный пример такой микросхемы – 32-разрядный микроконтроллер TriCore компании Infineon (рис.8), сочетающий возможность работы в реальном времени микроконтроллера, вычислительную мощность цифрового сигнального процессора и соотношение стоимость-производительность суперскалярного RISC-процессора. Микросхемы TriCore, выполняемые по 0,18-мкм технологии на кристалле площадью менее 3 мм², могут работать на частотах 166–200 МГц.

Выбор микропроцессора или цифрового сигнального контроллера для того или иного приложения означает не только выбор прибора с соответствующими внутрисхемными ресурсами. Большое значение имеет наличие нужных программных средств, инструментальных средств, а также то, насколько они могут способствовать своевременному выпуску изделия на рынок. Выбор, производимый сегодня, повлияет на конкурентоспособность не только современного, но и грядущих поколений приборов.



РАБОТЫ ПО СОЗДАНИЮ ТРАНЗИСТОРА НА ГРАФЕНЕ РАЗВОРАЧИВАЮТСЯ

Четыре года назад ученые Университета Манчестера (Англия) одни из первых описали свойства графена – материала толщиной в один атомный слой, который может быть представлен как атомная плоскость углерода. С тех пор графен стал одной из самых горячих тем, обсуждаемых учеными в области полупроводникового материаловедения, поскольку сегодня графен рассматривается как наиболее перспективное решение для формирования одноэлектронных транзисторов.

Исследователи Университета Манчестера успешно продолжают работы в этом направлении. С помощью стандартной полупроводниковой технологии ими создан «подтверждающий концепцию» транзистор толщиной в один атом и шириной менее 50 атомов. Прибор состоит из центрального островка, расположенного между электродами стока и истока. Управление транзистором обеспечивает электрод с емкостной связью с центральным островком. Подача небольшого отрицательного напряжения на электрод вызывает кулоновскую блокаду, препятствующую туннелированию электрона истока через островок к стоку. При подаче положительного напряжения электрон

свободно проходит к стоку. Важное достоинство графеновых транзисторов – работа при комнатной температуре.

Пока для создания пригодных для производства транзисторов на графене необходимо решить множество проблем, сходных с задачами, которые приходилось решать на ранних этапах развития полупроводниковой технологии. По мнению ученых Университета Манчестера, их удастся решить через пару лет.

Тем временем сотрудники Университета штата Мэриленд (США) обнаружили, что графен нечувствителен к изменениям температуры. Измерения подвижности электронов графена в диапазоне температур от 50 до 500К показали, что подвижность в этом диапазоне неизменна и составляет примерно $15000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ (самое большое известное значение подвижности электронов в антимониде индия равно $77000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$). Колебания решетки графена, измеренные учеными университета, оказались столь незначительными, что используемые примеси и подложка оказывали большее воздействие на свойства материала, чем фотоны. Поэтому исследователи предполагают, что в случае очистки графена от примесей, его подвижность электронов достигнет $200000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, т.е. окажется в 100 раз выше, чем у кремния!