

# Atmel: AVR32-микроконтроллеры в 2011 году

Николай КОРОЛЕВ  
korolev@ineltek.com

В последние годы наблюдается тенденция повсеместного применения 32-разрядных микроконтроллеров, даже в тех приложениях, где обычно использовались 8-разрядные микросхемы. Причины этого процесса объясняются низкими ценами на 32-разрядные контроллеры: они сопоставимы с ценами 8-разрядных. Таким образом, разработчик может позволить себе заложить солидный запас производительности в новой разработке, что сэкономит время и средства в будущем, при модернизации изделия. В статье рассмотрены 32-разрядные контроллеры AVR32, которые компания Atmel предлагает в 2011 году.

## Введение

Компания Atmel выпускает два класса 32-разрядных микроконтроллеров: на базе ядер ARM7/ARM9/Cortex M3 по лицензии компании ARM и на базе собственного ядра AVR32. ARM-микроконтроллеры Atmel предназначены для бытовых и стандартных промышленных приложений, тогда как AVR32 позиционируются как контроллеры повышенной надежности с расширенным температурным диапазоном.

32-разрядные микроконтроллеры Atmel AVR UC3 представляют новый уровень эффективности. Базовая система команд содержит DSP-инструкции над числами с фиксированной точкой, а также команды типа Read-Modify-Write и команды битовой обработки данных, находящихся в памяти. Двухпортовая память SRAM, многослойная шина данных, интеллектуальные периферийные модули с выделенным DMA-контроллером обеспе-

чивают скорость приема/передачи данных до 33 Мбит/с по интерфейсам SPI и USART при загрузке ядра не более 15%. Периферийная система событий (Event System) позволяет микроконтроллеру AVR UC3 передавать сигналы (события) непосредственно на другие периферийные модули контроллера без участия ЦПУ. Это обеспечивает очень короткое и предопределенное время отклика (два такта частоты ядра), что одновременно уменьшает загрузку ЦПУ, устраняет узкие места при высокоскоростных передачах и снижает энергопотребление.

Применение собственной микроархитектуры ядра с тремя исполнительными модулями (АЛУ, умножитель/делитель и модуль работы с памятью) позволяет получить уровень производительности до 1,51 DMIPS/МГц.

Первоначально семейство AVR32 состояло из микросхем серий AP7000 и UC3, однако, в связи с резким увеличением спроса, сейчас компания Atmel уделяет основное внимание

развитию семейства UC3. Состав семейства контроллеров UC3 приведен на рис. 1.

Готовится к выпуску серия UC3D0/D1. Эти контроллеры будут выпускаться в 64- и 48-выводных корпусах и представляют собой бюджетную версию семейства UC3B0/B1 с пониженной до 48 МГц частотой ядра и отсутствием некоторых периферийных модулей.

Краткая информация о микроконтроллерах серий UC3A и UC3B приведена в [1], в этой же статье более подробно рассматриваются контроллеры, не описанные ранее.

В новых контроллерах сохранились «родовые черты» семейства: высокопроизводительное ядро с комплексным набором команд; «контроллерные» и DSP-инструкции, выполняемые в одном потоке; гибкая система тактирования, включающая несколько RC-генераторов, возможность подключения двух внешних кварцев; два модуля PLL, позволяющие формировать параллельно несколько сеток частот, требуемых для тактирования ядра и различных периферийных модулей; многослойная высокоскоростная 32-разрядная шина данных, которая совместно с многоканальным периферийным DMA-контроллером обеспечивает одновременную передачу нескольких независимых потоков данных; богатый набор стандартных периферийных модулей USB/UART/USART/I<sup>2</sup>C/SPI/I<sup>2</sup>S.

## Микроконтроллеры AT32UC3C

Архитектура AVR32 изначально создавалась как соответствующая требованиям повышенной надежности. Топология кристалла разработана с учетом мер повышенной помехозащищенности. В 2010 году выпущены микроконтроллеры семейства AT32UC3C, которые разработаны и производятся в соответствии со строгими требованиями международного стандарта ISO-TS 16949. 2 марта 2011 года компания Atmel объявила

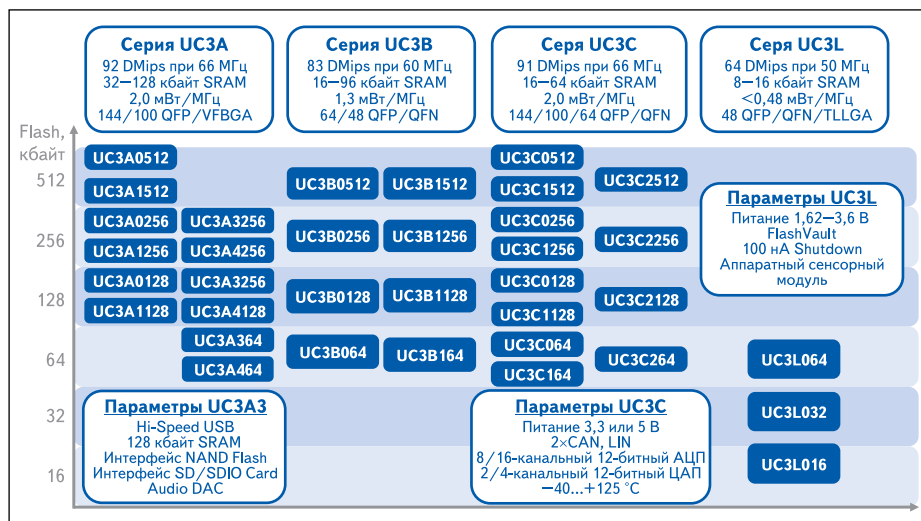


Рис. 1. Состав семейства контроллеров UC3

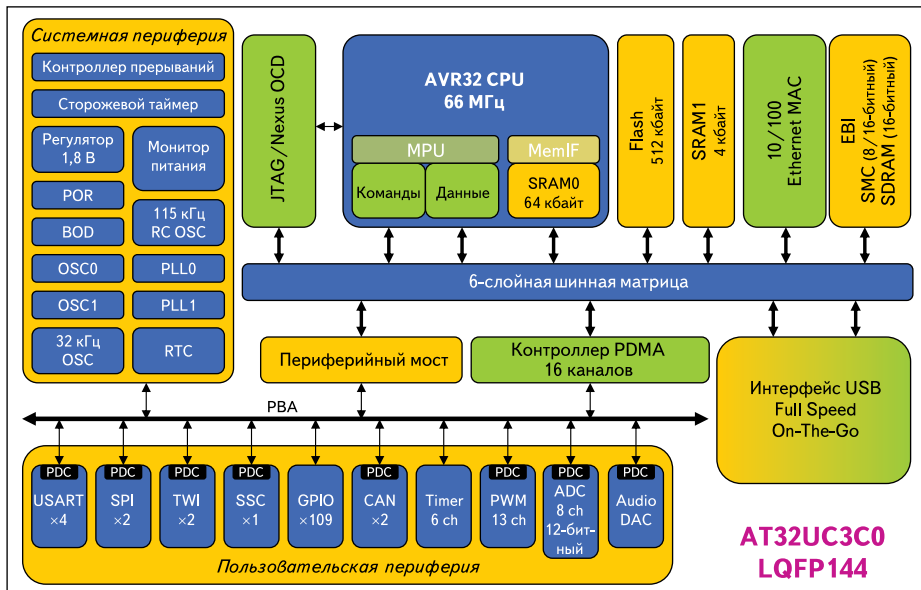


Рис. 2. Блок-схема контроллера AT32UC3C0

Таблица 2. Набор DSP-команд контроллеров AT32UC3

Категория	Состав
Фильтры	FIR, IIR, Interpolation, Least Mean Square
Векторы	Add, Subtract, Multiply, Divide, Copy, Negate, Convolution
Генерация сигналов	Sine, Square, Saw tooth, Dirac comb, Ramp, Step, Noise
Преобразования	Fast Fourier Transform (FFT), Inverse FFT
Операторы	Add, Subtract, Multiply, Divide, Sine, Square Root, Logarithm, Power, Random
Оконные функции	Rectangular, Gauss, Hamming, Hann, Kaiser, Welch, Bartlett, Blackman
Расширения	ADPCM encoder/decoder, Frequency resampling

**Модуль вычислений с плавающей точкой**

Все контроллеры семейства UC3 имеют поддержку DSP-команд с фиксированной точкой. Система команд содержит 70 DSP-инструкций, которые объединены в 7 категорий (табл. 2).

Время выполнения команд достаточно короткое, например, команда умножения с накоплением  $16 \times 32 = 48$  *Multiply Accumulate* выполняется за два такта, а команда деления  $16/16$  *Divide* — за 9 тактов.

UC3C3 — первый в промышленности 32-разрядный контроллер с аппаратной поддержкой команд с плавающей точкой. Эти операции повышают точность вычислений в таких приложениях, как робототехника, управление перемещением, управление двигателями, а также при формировании аналогового сигнала прецизионной формы в реальном времени.

Модуль получает операнды и сохраняет результат в том же самом регистровом файле, который используется при выполнении стандартных команд. Операция floating-point compare модифицирует флаг в регистре статуса контроллера, следовательно, стандартная команда перехода может быть выполнена непосредственно после этой операции. В состав модуля входит умножитель-накопитель, выполняющий операцию типа  $\pm A \pm (Y \times X)$  как одиночную, без промежуточного округления. Таким образом, получаемый результат имеет более высокую точность, чем при выполнении отдельных операций умножения и суммирования. Модуль также поддерживает преобразования типов для данных integer and floating-point при выполнении операций сравнения переменных в формате floating-point и при вычислениях обратных значений.

Аппаратная часть модуля соответствует требованиям стандарта Си, основанного на стандарте IEEE 754. Поддерживается работа с денормализованными числами. В таблице 3 представлен перечень групп операций с плавающей точкой и время их исполнения.

Таблица 3. DSP-команды с плавающей точкой

Тип операции (Floating point)	Время исполнения
Arithmetical instructions	2 такта
Conversion instructions	1 такт
Compare instructions	1 такт
Approximation instructions	1 такт

Таблица 1. Основные характеристики контроллеров AT32UC3C

Характеристики	AT32UC3C0512C	AT32UC3C1512C	AT32UC3C2512C
	AT32UC3C0256C	AT32UC3C1256C	AT32UC3C2256C
	AT32UC3C0128C	AT32UC3C1128C	AT32UC3C2128C
	AT32UC3C064C	AT32UC3C164C	AT32UC3C264C
Память Flash, кбайт	512/256/128/64	512/256/128/64	512/256/128/64
Память SRAM, кбайт	64/64/32/16	64/64/32/16	64/64/32/16
HSB RAM, кбайт	4K	4K	4K
16-разрядная шина адреса/данных	1	Нет	Нет
Число линий ввода/вывода	123	81	45
Внешние прерывания	8	8	8
Peripheral DMA, каналы	16	16	16
Система реакций на события	1	1	1
Интерфейс TWI	3	3	2
Интерфейс USART	5	5	4
Интерфейс SPI	2	2	1
Интерфейс I <sup>2</sup> S	1	1	1
Интерфейс CAN, каналы	2	2	2
USB Device/Host Full Speed	1	1	1
Ethernet MAC 10/100	1	1	1
Таймер/счетчик, каналы	6	6	3
Асинхронный таймер	1	1	1
Сторожевой таймер	1	1	1
ШИМ (20-разрядный), каналы	4x2	4x2	4x2
Квадратурный декодер, каналы	2	2	1
Частотомер	1	1	1
Менеджер питания	1	1	1
12-битный АЦП/каналы	1/16	1/16	1/11
12-битный ЦАП/каналы	2/4	2/4	1/2
Аналоговые компараторы	4	4	2
Тип корпуса	LQFP144	TQFP100	TQFP64/QFN64

об успешном окончании тестирования: качество и надежность AT32UC3C соответствует «автомобильным» нормам AEC-Q100 grade 1, что допускает функционирование в температурном диапазоне от -40 до +125 °С. Flash-память микроконтроллеров семейства AT32UC3C характеризуется временем хранения 15 лет и выдерживает не менее 100 000 циклов стирания/записи. Блок-схема старшего представителя семейства, контроллера AT32UC3C0, приведена на рис. 2.

Семейство состоит из 12 типов контроллеров и имеет строгую иерархию. Есть три типа корпуса — на 144, 100 и 64 вывода, в каждом из кото-

рых выпускаются контроллеры четырех типов, различающиеся, в первую очередь, объемом памяти на кристалле. Основные характеристики контроллеров приведены в таблице 1.

Типичные современные контроллеры, как правило, имеют напряжение питания в диапазоне 1,8–3,3 В. Отличие микроконтроллера AT32UC3C — работа при напряжении питания как 3,3 В, так и 5,0 В. При использовании напряжения питания 5 В достигается повышение помехозащищенности и становится возможным непосредственное подключение к 5-вольтовой периферии. Ниже рассматриваются некоторые модули AT32UC3C.

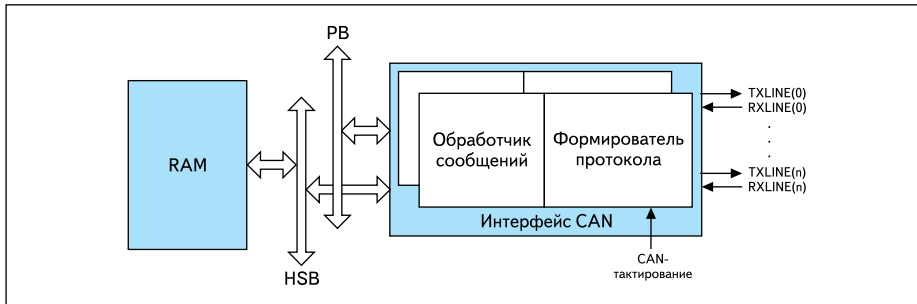


Рис. 3. Структурная схема интерфейса CAN

Добавление в контроллер AT32UC3C аппаратного модуля для работы с плавающей точной не увеличило энергопотребление кристалла.

### Контроллер DMA память/память

В дополнение к периферийному DMA-контроллеру, осуществляющему прием/передачу данных от/в периферийные модули, AT32UC3C содержит также DMA-контроллер для пересылок память/память, MDMA-контроллер.

MDMA-контроллер может использовать до четырех каналов DMA и имеет два интерфейса для доступа к высокоскоростной шине, HSB master. Один интерфейс используется для чтения данных, а другой — для записи. Данные передаются одним пакетом либо цепочкой пакетов. После окончания пересылки генерируется соответствующее прерывание. Формат данных — 8/16/32 бит, при передаче возможна конверсия порядка следования байтов. MDMA-контроллер обычно используется для обмена данными с графическим дисплеем, который подключается к контроллеру по шине данных как внешняя память.

### Модуль защищенного доступа

Во многих системах ошибочный доступ к периферийным модулям может привести к катастрофическим последствиям. В качестве примера подобного периферийного модуля можно назвать широтно-импульсный модулятор (ШИМ), используемый для управления электродвигателями. Модулятор формирует последовательность импульсов, управляющих двигателем. Если управляющие регистры модуля ШИМ будут непреднамеренно перезаписаны неверными значениями, двигатель выйдет из рабочего режима, что может привести к повреждению устройства. Тем не менее время от времени для изменения режима работы двигателя требуется обновлять значения управляющих регистров ШИМ. Очевидно, что необходимо предусмотреть защиту этих регистров от ошибочного доступа из-за программных ошибок, а также от кратковременных ошибок в ЦПУ, вызванных, например, внешней электромагнитной помехой.

Во всех микроконтроллерах AT32UC3 для повышения помехозащищенности системы управления используется блок защиты памя-

ти Memory Protection Unit (MPU), который настраивается на ограничение доступа к специальным адресам памяти. MPU делит пространство памяти на зоны и устанавливает набор условий доступа к каждой зоне. Набор условий доступа может включать, например, разрешение чтения/записи, если ЦПУ работает в режиме супервизора, или только чтения, если ЦПУ находится в режиме исполнения. Зоны доступа могут быть разного размера, но обычно не менее 1 кбайт, то есть в одной зоне может находиться массив адресов нескольких периферийных модулей. Обращение к каждой зоне осуществляется как в управляющем режиме ЦПУ, то есть супервизора (supervisor mode), так и в режиме работы с приложением (application mode). Такой упрощенный механизм управления не обладает достаточной гибкостью и приводит к выполнению микроконтроллером бесполезной работы — частым обращениям ЦПУ к зонам памяти, запрещенным для доступа.

В микроконтроллерах AT32UC3C эта проблема решается применением совместно с MPU дополнительного модуля защищенного доступа — Secure Access Unit (SAU). Если MPU предназначен для защиты зон памяти от несанкционированного доступа, то SAU используется для обеспечения безопасного канала доступа к специальным зонам памяти, защищенным MPU. Модуль SAU производит переназначение адресов, находящихся в за-

щищенной области памяти, таким образом, ЦПУ может получить доступ к конкретному адресу, обращаясь к адресу из незащищенной области памяти. При этом нет необходимости снимать блокировку на доступ ко всей защищенной области, что повышает помехоустойчивость системы.

### Интерфейс CAN

CAN (Controller Area Network) — это сетевой последовательный коммуникационный интерфейс с высоким уровнем безопасности транзакций. Любой узел в сети CAN является «мастером», но в каждый момент времени только один из узлов может передавать данные. Описание протокола обмена можно посмотреть, например, в [6].

Микроконтроллер ATUC3C содержит 2-канальный CAN-контроллер с поддержкой протоколов CAN 2.0A и 2.0B и скоростью обмена до 1 Мбит/с. Возможны передача одиночных пакетов и автоматическое переключение режимов приема/передачи. Есть поддержка режима сна; переход в активный режим осуществляется при наличии сигнала на шине.

Структурная схема контроллера CAN представлена на рис. 3.

### Квадратурный декодер

В приложениях управления двигателями нужно получать информацию о скорости и направлении вращения вала двигателя. Эта информация обычно получается декодированием сигналов, которые формируются датчиками, размещенными соответствующим образом около диска, закрепленного на валу двигателя. Для декодирования таких сигналов используется квадратурный декодер. AT32UC3C имеет на кристалле 3-канальный квадратурный детектор. Точность измерений обеспечивается 16-разрядным счетчиком положения и 16-разрядным счетчиком числа оборотов. Структурная схема системы управления двигателем с использованием квадратурного декодера приведена на рис. 4.

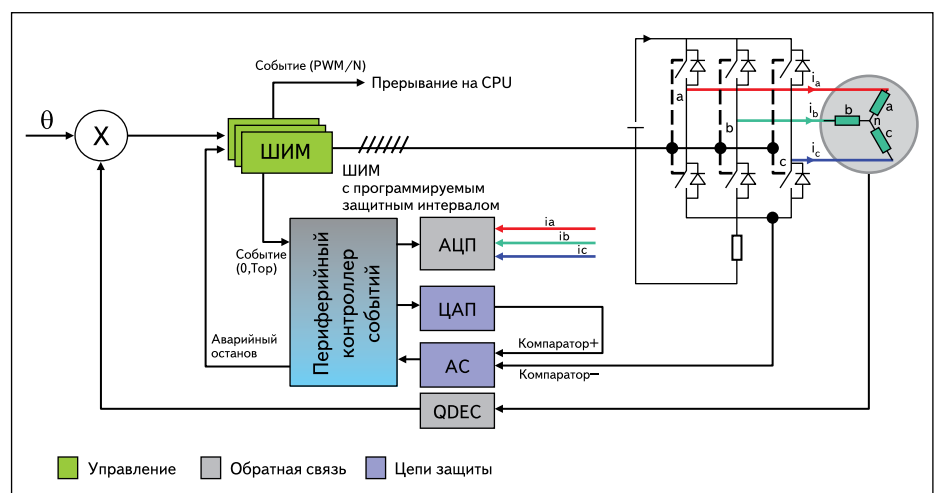


Рис. 4. Система управления двигателем

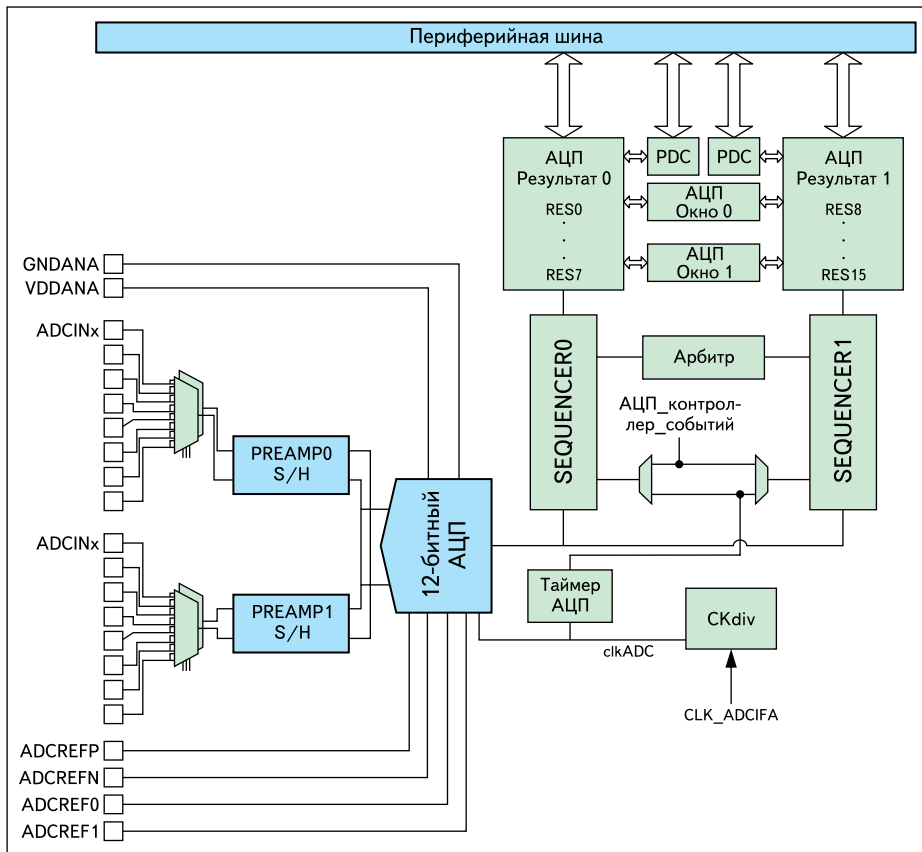


Рис. 5. Структурная схема модуля АЦП

и в качестве опорного напряжения использует внутренний или внешний источник. Структурная схема модуля АЦП приведена на рис. 5.

Контроллер AT32UC3C имеет два модуля ЦАП с временем преобразования 1 Msps и временем установки 1 мкс, каждый из которых может функционировать в 1- или 2-канальном режиме. 2-канальный режим организован на двух входных регистрах мультиплексора ЦАП. Для работы в этом режиме требуется применение двух внешних схем выборки-хранения. Этот режим удобен, например, для формирования 2-канального аудиосигнала. Структурная схема модуля ЦАП приведена на рис. 6.

Для работы контроллеров AT32UC3C компания Atmel предлагает отладочную плату AT32UC3C-EK. Плата построена на контроллере AT32UC3C0512C, и на ней размещен графический дисплей, два разъема USB, два разъема CAN и два разъема LIN. Кроме того, плата содержит четыре штырьковых разъема. К ним можно подключить дополнительные платы MC300 и MC400, которые содержат силовые цепи для управления низковольтными и высоковольтными двигателями соответственно. К недостаткам платы AT32UC3C-EK следует отнести отсутствие разъема интерфейса Ethernet. Внешний вид платы AT32UC3C-EK представлен на рис. 7.

**Частотомер**

Встроенный частотомер измеряет отношение частот двух источников. Для расширения диапазонов измерения частоты используется набор встроенных делителей. На выходе формируется 24-разрядный результат. Частотомер можно использовать для калибровки внутреннего RC-генератора, измерения внешней частоты и автоопределения скорости сигнала, который принимается по интерфейсу USART.

**Аналоговая периферия**

Контроллер AT32UC3C содержит на кристалле аналого-цифровой преобразователь с производительностью 1,5 Msps как при

напряжении питания 5, так и 3,3 В. Особенностью АЦП является наличие двух схем выборки-хранения, что позволяет производить измерение аналогового сигнала по двум каналам одновременно, без внесения фазовой погрешности. АЦП может работать в 16-канальном режиме с одиночными входами или в 8-канальном дифференциальном режиме. Возможно использование АЦП для формирования 8-разрядного выходного кода при увеличении скорости преобразования. Выход АЦП подключен к контроллеру периферийных событий. Результаты работы АЦП могут пересылаться в память с использованием режима прямого доступа к памяти. Модуль имеет встроенную схему калибровки

**Микроконтроллеры AT32UC3L0**

Контроллеры AT32UC3L0 были рассмотрены в [2], однако версия кристалла 2011 года имеет несколько существенных изменений, улучшающих потребительские качества. Низкое энергопотребление — важный параметр для мобильных приложений. Эти контроллеры позиционируются как низкопотребляющие микросхемы, оптимальные для применения в системах с батарейным питанием. Они могут работать от напряжения 1,62 В, то есть можно без потери надежности функционирования использовать источник напряжения 1,8 В с разбросом уровня выходного напряжения 10%. Типовой потребляемый ток в активном режиме со-

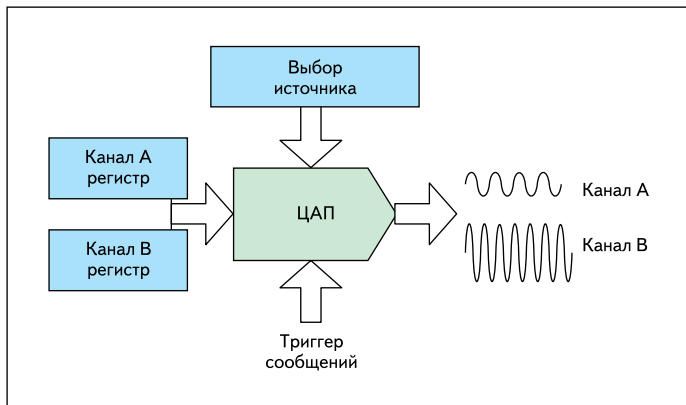


Рис. 6. Структурная схема модуля ЦАП

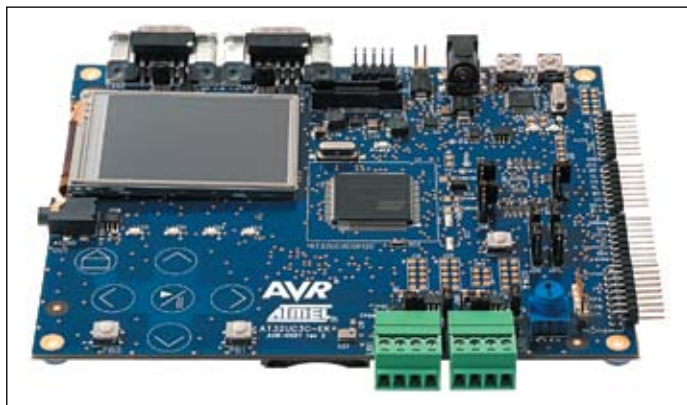


Рис. 7. Внешний вид платы AT32UC3C-EK

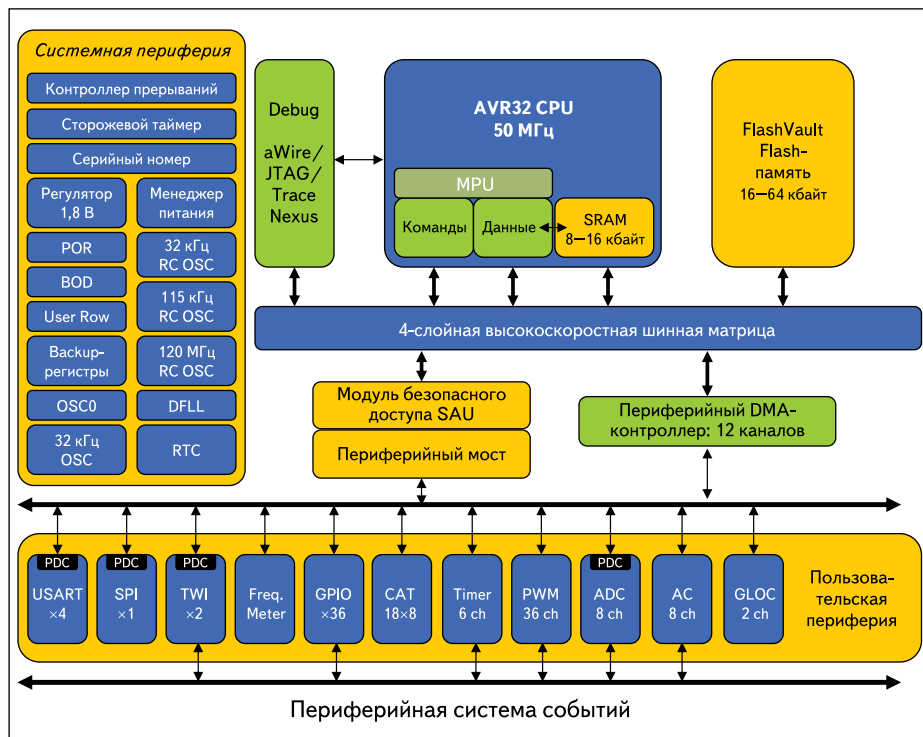


Рис. 8. Блок-схема контроллера AT32UC3L0

ставляет 165 мкА/МГц. В ждущем режиме, с работающим счетчиком часов реального времени, потребляемый ток составляет всего 600 нА. В режиме Shutdown потребляемый ток снизится до 9 нА. Блок-схема контроллера AT32UC3L0 приведена на рис. 8.

AT32UC3L0 — первый AVR32-контроллер, оснащенный аппаратным модулем считывания сигналов от емкостных сенсорных датчиков QTouch. Это могут быть кнопки, а также линейные и кольцевые сенсоры.

В микросхемах AT32UC3L0 впервые применена патентованная технология FlashVault. Преимущества технологии заключаются в возможности установки битов защиты от несанкционированного чтения на отдельные области Flash-памяти. Таким образом разработчик может защитить свой код, при этом оставив часть массива Flash-памяти открытой и доступной для модификации. Это позволяет дописывать в Flash-память новые функции, сохраняя защищенный код.

Еще одна особенность AT32UC3L0 — использование сверхширокополосного модуля цифровой ФАПЧ: Digital Frequency Locked Loop, DFLL, позволяющего получить рабочую частоту ядра контроллера из входной частоты 32 кГц.

В микросхеме AT32UC3L0, так же как и в AT32UC3C, есть частотомер, 32-разрядный таймер с возможностью работы в режиме часов реального времени и модуль безопасного доступа SAU и аппаратная схема Event System. Применение этой технологии, хорошо себя зарекомендовавшей в контроллерах ATxmega, позволяет получить время реакции на внешние события, равное двум

тактам частоты ядра, что составляет 40 нс при частоте ядра 50 МГц. Этот параметр является критическим для систем, работающих в режиме реального времени.

Основные параметры контроллеров серии AT32UC3L0 приведены в таблице 4.

### Средства разработки

Для разработки и отладки программ на контроллерах AVR32 фирма IAR выпустила коммерческий пакет IAR Embedded Workbench for Atmel AVR32, который можно заказать у европейского дистрибьютора IAR — компании Inetek GmbH.

Кроме того, для всех микроконтроллеров AVR32 корпорация Atmel предлагает единую среду разработки AVR32 Studio. В марте 2011 года вышла следующая версия пакета — AVR Studio 5. В отличие от предыдущих версий, новая AVR Studio включает поддержку всех типов AVR-контроллеров, как 8-, так

Таблица 4. Основные параметры контроллеров серии AT32UC3L0

Параметры	AT32UC3L064/32/16
Производительность	64 DMIPS при 50 МГц
Напряжение питания, В	1,62–3,6
Объем Flash, кбайт	64/32/16
Объем RAM, кбайт	16/16/8
Аналоговые компараторы	8
Таймеры	6
PWM, каналы	36
Интерфейс USART	4
Интерфейс SPI	1
Интерфейс TWI	2
АЦП	8 каналов, 10/11/12-битный
Тактирование	RC-OSC DLL 32k-Osc
Число входов/выходов	36
Сильноточные выходы	5 (8 мА)
Тип корпуса	QFP/QFN/TLLGA 48

и 32-разрядных. Также в состав пакета входит более 400 примеров исходных кодов, что существенно сокращает время по освоению новых контроллеров. Дистрибутив пакета можно загрузить с сайта [7].

Для отладки программ и загрузки кода во Flash-память микроконтроллеров компании Atmel, в дополнение к существующим, выпустила новый внутрисхемный эмулятор ATJTAGICE3. Он построен на контроллере AT32UC3A3 с интерфейсом USB 2.0 High Speed, что благоприятно сказалось на скорости процесса отладки. Внешний вид эмулятора представлен на рис. 9.

### Литература

1. Королев Н. Atmel: 32-разрядные Flash-микроконтроллеры на ядре AVR32 // Компоненты и технологии. 2008. № 11.
2. Королев Н. AVR-контроллеры: развитие семейства. Часть 2 // Компоненты и технологии. 2010. № 6.
3. Материалы технического семинара компании Atmel. Нюрнберг, март 2011 г.
4. Презентации — [www.inetek.com/presentations.php](http://www.inetek.com/presentations.php)
5. Редькин П.П. Микроконтроллеры AVR32 семейства AT32UC3: руководство пользователя. М.: Техносфера, 2010.
6. Стандарт Controller Area Network — [http://ru.wikipedia.org/wiki/Controller\\_Area\\_Network](http://ru.wikipedia.org/wiki/Controller_Area_Network)
7. [http://www.atmel.com/microsite/avr\\_studio\\_5/](http://www.atmel.com/microsite/avr_studio_5/)



Рис. 9. Эмулятор ATJTAGICE3