

# ПЕРВЫЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ 16-РАЗРЯДНЫЙ МИКРОКОНВЕРТЕР НА БАЗЕ MCS-96

**ВЛАДИМИР СМЕРЕК**, нач. лаборатории, ФГУП «НИИЭТ»

**ИГОРЬ ПОТАПОВ**, к.т.н., нач. отдела, ФГУП «НИИЭТ»

**ВАЛЕРИЙ КРЮКОВ**, к.т.н., нач. отделения, ФГУП «НИИЭТ»

**ВЛАДИМИР ГОРОХОВ**, к.т.н., зам. главного инженера, ФГУП «НИИЭТ»

*Представлены характеристики и особенности применения новой отечественной микросхемы — 16-разрядного аналогового микроконвертера K1874BE96T с усовершенствованной архитектурой MCS-96. Наличие на одном кристалле высокопроизводительного процессорного ядра, АЦП и ЦАП высокой разрядности, встроенного модуля отладки OCDS, а также ряда периферийных устройств позволяет создавать на основе микросхемы K1874BE96T законченные системы сбора и обработки информации, интеллектуальные датчики, устройства с автономным питанием и различные средства измерений, автоматизации и контроля.*

Микроконвертеры представляют собой отдельный класс микроконтроллеров, а именно специализированных аналоговых микроконтроллеров, в которых интегрированы стандартные процессорные ядра, флэш-память, высокоразрядные АЦП и ЦАП, модули генерации ШИМ, сторожевой таймер и другие многочисленные периферийные блоки. Объединение в одной микросхеме аналоговых и цифровых программируемых устройств упрощает проектирование электронных систем, особенно тех, где требуется выполнение прецизионных аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразований.

Появление микроконвертеров на рынке электронных компонентов связывают, прежде всего, с фирмой Analog Devices (США). Первое семейство микроконвертеров серии ADuC8xx на базе классического 8-разрядного ядра 8052 было создано этой фирмой более 10 лет назад [1]. Это семейство включает как 12-разрядные АЦП последовательного приближения (ADuC812, ADuC841), так и прецизионные 16- и 24-разрядные АЦП с сигма-дельта модуляцией (ADuC816, ADuC824, ADuC834 и др.)

В 2004 г. Analog Devices представила на рынок новое семейство микроконвертеров серии ADuC7000 (ADuC702x) на базе 16/32-разрядного RISC-ядра ARM7TDMI [2], [3]. Ядро обеспечивает производительность до 45 Мвыб/с и имеет встроенные средства отладки — EmbeddedICE и JTAG-интерфейс. Микроконвертеры серии ADuC702x имеют также мощную периферию — АЦП, ЦАП, порты I<sup>2</sup>C, UART, SPI, компаратор, ИОН и ряд других устройств (в зависимости от модификации).

В отечественной электронной промышленности разработкой и выпуском

микроконвертеров занимаются ЗАО ПКК «Миландр» (Москва, Зеленоград) и ФГУП «НИИЭТ» (Воронеж). В ПКК «Миландр» разработаны 8-разрядный микроконтроллер 1886BE6 на базе 8-разрядного RISC-процессора [4] и 32-разрядный микроконтроллер 1986BE91 на базе процессора ARM Cortex-M3 [5].

В состав микроконтроллера 1886BE6, предназначенного для построения различных аналоговых систем, входят память программ 12-разрядный АЦП и 12-разрядный ЦАП, блок ШИМ, компаратор, USART. Микроконтроллер 1986BE91 также содержит большинство из названных устройств и, кроме того, содержит интерфейсы CAN, USB, SPI, I<sup>2</sup>C.

В этой статье представлен первый российский 16-разрядный микроконвертер K1874BE96T, разработанный в 2009 г. во ФГУП «НИИЭТ» на базе нового процессорного ядра с усовершенствованной архитектурой MCS-96.

## ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ K1874BE96T

Микроконвертер K1874BE96T представляет собой однокристальную высокоинтегрированную систему сбора и обработки данных, и предназначен для выполнения вычислительных инструкций с повышенным быстродействием и точных аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразований. K1874BE96T ориентирован на обработку аналоговых сигналов от различных датчиков в системах управления специальной техники, автомобильной и авиационной электроники, в удаленных системах сбора информации и инструментальных средствах. Основные технические характеристики микроконвертера K1874BE96T представлены в таблице 1.

Высокая производительность ядра позволяет использовать микроконвертер K1874BE96T при решении задач обработки сигналов (для этого имеются умножитель и делитель, выполняющие операции за один и два машинных цикла при длительности цикла, равного двум периодам тактового сигнала). Средства инструментальной отладки и встроенный отладочный модуль OCDS обеспечивают как эффективное проектирование систем на основе микроконвертера, так и возможность смены алгоритма работы при модификации систем.

Возможность гибкого управления энергопотреблением микроконвертера (три режима пониженного потребления и возможность отключения неиспользуемых периферийных блоков) позволяют использовать эти микросхемы в критичных к потреблению приложениях.

## ОСОБЕННОСТЬ АРХИТЕКТУРЫ

Микроконвертер K1874BE96T имеет общую архитектуру и набор инструкций с другими микроконтроллерами серии 1874 [6], но базируется на новом ядре разработки ФГУП «НИИЭТ». Модель ядра была создана на языке описания аппаратуры Verilog и отличается увеличенной производительностью по сравнению с другими микросхемами серии 1874 (в среднем на 35—40% при работе на одинаковой частоте). Это достигается за счет введения конвейеризации процесса выборки — выполнения команд, полной оптимизации процесса выполнения инструкций, наличия быстрых сдвигателей, умножителя, делителя и других конструктивных особенностей. Увеличенная очередь команд (с 4 байт до 9 команд по 7 байт) и независимость процесса выполнения команд от их выборки (и наоборот) позволили уменьшить время

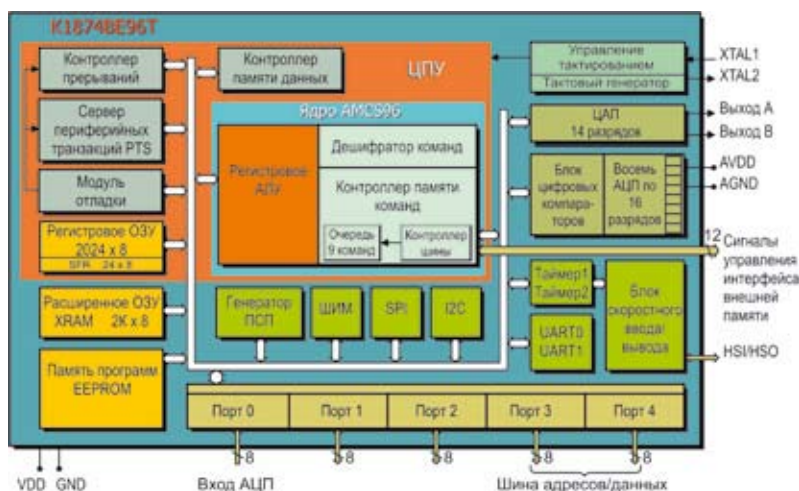


Рис. 1. Структурная схема микроконвертера K1874BE96T

простая, как ЦПУ, так и внутренней или внешней шины выборки команд. При общем адресном пространстве команд

Таблица 1. Основные технические характеристики микроконвертера K1874BE96T

№ п/п	Параметр (характеристика)	Значение
1.	Архитектура и система команд	MCS-96 (Intel)
2.	Разрядность данных, бит	16
3.	Тактовая частота, МГц	до 40
4.	Динамически конфигурируемая шина данных, бит	8 или 16
5.	Встроенная память программ типа EEPROM, бит	16 К×16
6.	Регистровое ОЗУ, бит	2024×8
7.	Расширенное ОЗУ, бит	2 К×8
8.	Объем адресуемой памяти, бит	64 К×8
9.	Число источников прерываний	31
10.	Число параллельных 8-разрядных портов ввода/вывода	5
11.	Число команд	112
12.	Разрядность сторожевого таймера (WDT)	16
13.	Число 16-разрядных таймеров/счетчиков	2
14.	Универсальный последовательный порт (UART)	2
15.	Синхронный последовательный интерфейс SPI	1
16.	Интерфейс I <sup>2</sup> C	1
17.	Число разрядов АЦП	16
18.	Количество АЦП	8
19.	Максимальное количество используемых АЦП при дифференциальном включении входов	4
20.	Минимальное время аналого-цифрового преобразования, мкс	16
21.	Число разрядов ЦАП	14
22.	Время установки токовых выходов ЦАП, нс	10
23.	Блок ШИМ сигналов (PWM)	3
24.	Блок высокоскоростного ввода/вывода (HSIO)	1
25.	Сервер периферийных транзакций (PTS)	1
26.	Встроенный модуль отладки On-Chip Debug System (OCDS)	1
27.	Число режимов пониженного энергопотребления	3
28.	Напряжение питания, В	3,3

и данных выборка команд осуществляется по своей независимой шине. Это означает, что при работе схемы происходит одновременное считывание/запись данных в ОЗУ или регистры и загрузка команд (как при гарвардской архитектуре). Все нововведения позволяют ЦПУ микроконвертера вплотную приблизиться по производительности к схемам с конвейерными архитектурами и использовать K1874BE96T в DSP-приложениях.

На рисунке 1 приведена структурная схема микроконвертера K1874BE96T. Микроконвертер обладает ОЗУ 2024×8 бит, доступным быстрым способом адресации, и расширенным (отключаемым) ОЗУ 2048×8 бит, доступным косвенным способом. Интегральная микросхема (ИС) имеет встроенную энергонезависимую память программ (ПЗУ) типа EEPROM емкостью 32 Кбайт с коррекцией ошибок по коду Хемминга и защитой записи/считывания, а также удобный для пользователя механизм программирования с возможностью аппаратного управления параметрами программирующего импульса. Фабрика, на которой производятся кристаллы микроконвертера, гарантирует хранение информации во внутреннем EEPROM в течение 10 лет и сто тысяч циклов стирания/записи.

В состав микроконвертера входит сервер периферийных транзакций PTS, позволяющий передавать данные в момент простоя шины данных. Это обеспечивает прямой доступ к памяти без остановки ЦПУ, что повышает общее быстродействие системы.

ИС имеет возможность запуска программ с трех различных стартовых адресов в зависимости от состояния входных сигналов. Это позволяет организовывать различные тестовые и сервисные режимы работы аппаратуры. Кроме того пользователи могут создавать собственные алгоритмы программирования и размещать их в сервисных адресных пространствах.

Для выполнения высокоточных аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразований в микросхеме имеются восемь 16-разрядных сигма-дельта АЦП с возможностью одновременного преобразования и 14-разрядный высокоскоростной ЦАП с токовым выходом (2...20 мА). Особенностью АЦП является возможность организации дифференциального режима включения входов. При этом могут одновременно работать четыре преобразователя. Имеется также возможность буферизированной выдачи высокостабильного опорного напряжения на вывод порта микроконвертера. ИС имеет четыре порта последовательного ввода-вывода информации: два порта UART, один синхронный последовательный интерфейс (SPI) и интерфейс I<sup>2</sup>C. Подсистема высокоскоростного ввода/вывода представлена блоком HSIO с разрешающей способностью в один машинный цикл. Он позволяет фиксировать события на входах блока и генерировать сигналы с необходимыми временными параметрами на соответствующих выходах. Отличием микроконвертера K1874BE96T от всех других ИС серии 1874 является наличие встроенного модуля (системы) отладки OCDS. Помимо выполнения стандартных функций (формирование событий по заданному адресу операнда, данным на шине данных, значению счетчика команд) эта система позволяет реализовать аппаратную защиту от выполнения кода из внешней области команд — так называемый режим защищенного микроконтроллера.

#### ПЕРИФЕРИЙНЫЕ УСТРОЙСТВА

Микроконвертер имеет два независимых 16-разрядных многофункциональных таймера-счетчика. В одном из таймеров используется внутренняя синхронизация (режим работы — таймер реального времени), в другом — внешняя (счетчик внешних событий). Содержимое таймеров может быть в любое время считано или программно модифицировано, а также сброшено программно или внешним сигналом.

Подсистема высокоскоростного ввода/вывода импульсных сигналов HSIO включает устройства высокоскоростного ввода HSI и устройство высокоскоростного вывода HSO. HSI может записывать время внешних событий с разрешающей способностью в один машинный цикл, а HSO может инициировать события в определенные моменты, базирующиеся на значениях таймера 1 или таймера 2. В целом подсистема HSIO может измерять ширину импульсов, вырабатывать импульсную последовательность и вызывать периодические прерывания с незначительным использованием ЦПУ. Встроенный блок ШИМ (PWM) предназначен для

генерации широтно-модулированного сигнала на выходе микросхемы без участия процессора и имеет три выхода PWM. Скважность импульса на выходе PWM является переменной величиной, импульсы повторяются каждые 256 или 512 тактов. PWM может использоваться в различных применениях. Различные типы моторов требуют использования PWM — формирователя импульсов для наиболее эффективной работы. Кроме того, фильтрация этой ШИМ-последовательности будет создавать постоянный уровень, который изменяется с изменением скважности.

Последовательные порты UART имеют по одному синхронному режиму и по три асинхронных. Асинхронные режимы полностью дуплексные, т.е. они могут передавать и принимать данные одновременно. Приемники портов ИС буферизованы так, что прием вторых байтов может начаться до считывания первых. Передатчики также дважды буферизованы.

Последовательный периферийный SPI-интерфейс предназначен для быстрого синхронного обмена информацией между микроконтроллером и периферией или между двумя микроконтроллерами. Кроме того, его можно использовать для программирования ПЗУ или отладки программы при использовании отладочного модуля. Обмен информацией через интерфейс может быть полностью дуплексным и осуществляться с использованием трех линий. Максимальная частота, на которой происходит передача, равна четверти значения частоты генератора (для 40-МГц частоты микроконтроллера — 10 МГц). Интерфейс поддерживает режим как ведомого, так и ведущего.

Блок ИС обеспечивает полную поддержку двупроводного последовательного синхронного интерфейса I<sup>2</sup>C/SMBus. Результат такой совместимости — легкое соединение со многими запоминающими устройствами и устройствами ввода-вывода, включая EEPROM, SRAM, счетчики, АЦП, ЦАП, периферийные устройства. Функциональные возможности модуля:

- совместимость с SMBus (Version 1.1 и 2.0), ACCESS.Bus, I<sup>2</sup>C (Version 2.1);
- поддержка стандартного, скоростного и высокоскоростного режимов;
- работа в режиме ведущего или ведомого;
- возможность подключения к шине нескольких ведущих устройств;
- один определяемый программно 7/10-разрядный адрес для Slave;
- возможность одновременного обращения ко всем устройствам шины, так называемый «общий вызов».

Восемь 16-разрядных аналого-цифровых преобразователей (АЦП),

реализованных в микроконвертере, построены на основе методики сигма-дельта преобразования, реализующей алгоритм сверхвыборки, когда норма о сущ е с т в л е н и я выборки во много раз превышает требуемую частоту. Такая реализация позволяет значительно уменьшить шумы и гарантирует стабильно высокие динамические параметры преобразователя. Блок-схема АЦП представлена на рисунке 2.

Аналого-цифровые преобразователи конвертируют аналоговые напряжения на входе в цифровой эквивалент. Минимальное время преобразования составляет 16 мкс. Особенностью организации АЦП является возможность работы как с однополярными, так и с дифференциальными сигналами. Поскольку каждый преобразователь управляется независимо, то можно реализовать различные варианты включений, например:

два АЦП — в режиме дифференциального включения, четыре — в режиме однополярных сигналов или один АЦП — в режиме дифференциального включения, шесть — в режиме однополярных сигналов и т.д. Единственное условие, чтобы общее количество выводов, с которыми работают преобразователи, не превышало восемь.

ИС имеет блок цифровых компараторов, позволяющих сравнивать результаты непрерывного аналого-цифрового преобразования с граничными условиями без использования ресурсов централь-



**FLANN MICROWAVE**

- Адаптеры (W/G→W/G, W/G→coax)
- Атенуаторы фиксированные, с ручной (дискретной и непрерывной) перестройкой, программируемые
- Направленные ответвители

- Антенны
- Нагрузки
- Делители/сумматоры мощности
- Фильтры
- Перестраиваемые фазовращатели
- Волноводные переключатели
- Элементы волноводного тракта

111024, Москва,  
Авиамоторная ул., д. 8  
Телефон: (495) 957-77-45;  
(495) 361-09-04  
Факс: (495) 925-10-64  
sales@radiocomp.net  
www.radiocomp.net



УНИКАЛЬНЫЕ  
РАДИОКОМПОНЕНТЫ  
ВЕДУЩИХ ФИРМ МИРА  
**РАДИОКОМП®**

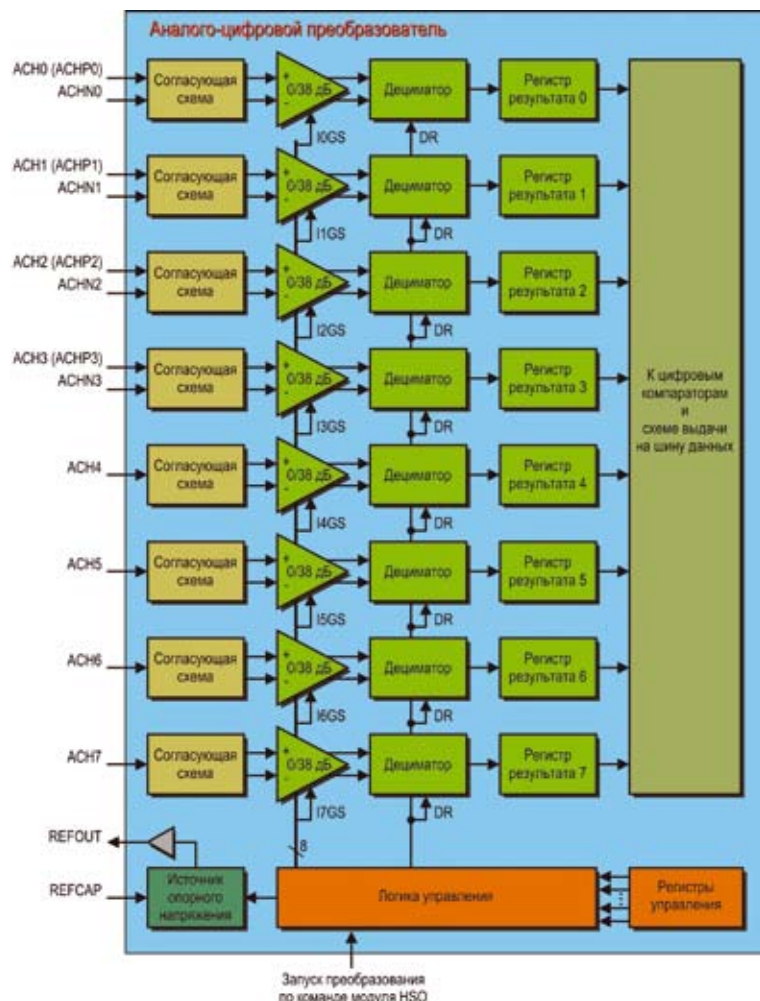


Рис. 2. Блок-схема подсистемы аналого-цифровых преобразователей



ного процессора. Блок вырабатывает прерывания, если: результат преобразования больше заданной границы; результат преобразования меньше заданной границы; результат преобразования выходит за границы заданного диапазона; результат преобразования попадает в границы заданного диапазона. Все границы указываются в соответствующих регистрах. Цифровые компараторы объединены в группы по четыре, и каждый имеет свой приоритет. Для срабатывания компаратора с меньшим приоритетом необходимо, чтобы условие с большим приоритетом не сработало. Это позволяет на аппаратном уровне реализовывать сложные следящие алгоритмы (например, прерывание вырабатывается, когда значение первого датчика превышает заданное значение, второго — выходит за пределы заданного диапазона, третьего — попадает в диапазон и т.д.). При такой реализации ядро может большую часть времени быть отключено (находится в режиме IDLE) и включаться только в короткие промежутки для обработки прерываний.

14-разрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) конвертирует цифровой код в аналоговый эквивалент. После записи кода в управляющий регистр на выходах ИС появляется ток, соответствующий этому коду. Время установившегося тока составляет 10 нс. Возможен перевод ЦАП в режим пониженного энергопотребления. Микроконвертеры имеют отдельный вход FSADJ для подстройки тока преобразователя.

Как уже отмечалось, в состав микроконвертера K1874BE96T входят сервер периферийных транзакций PTS и модуль отладки OCDS (Debug Unit). Блок PTS предназначен для аппаратной обработки прерываний. Он содержит набор встроенных алгоритмов, исходные данные для которых должны быть размещены программой пользователя, как в памяти кристалла, так и во внешней памяти. Алгоритмы PTS охватывают пересылку данных. Прерывания, обслуживаемые PTS, обрабатываются параллельно работе ЦПУ в моменты простоя шины данных, тем самым не мешая выполнению основной программы. Пересылка может осуществляться и в режиме IDLE без вывода ИС из этого режима. Сервер периферийных транзакций поддерживает обработку запросов на прерывание на микропрограммном уровне, не требуя вмешательства процессора.

Модуль отладки OCDS предназначен для упрощения процесса отладки программного обеспечения пользователей. По выбранному типу события (требуемые данные на шине данных, требуемый адрес операнда на шине адреса, значение счетчика команд, выход в область внешнего ПЗУ) этот блок генерирует следующие виды действий:

- немаскируемое прерывание;
- режим IDLE (режим ожидания, выход по прерыванию или сбросу);
- аппаратный сброс.

Аппаратный сброс вместе с настройкой контроля выхода в область внешней ПЗУ может использоваться для контроля выполнения программ и защиты от несанкционированного доступа к внешней памяти. Следует отметить, что в микроконвертере реализовано несколько механизмов восстановления после ошибок программного обеспечения и аппаратных средств.

Микроконвертер K1874BE96T содержит многократно программируемое ПЗУ типа EEPROM емкостью 32 Кбайт. В ПЗУ могут храниться как команды, так и данные. Возможна запись содержимого ПЗУ во время работы пользовательских программ, при этом нет необходимости размещать программирующий алгоритм в области внутреннего ОЗУ или внешней памяти. Пользователи могут переписать встроенное ПО ИС K1874BE96T и реализовать свои алгоритмы. ПЗУ может быть защищено от несанкционированного чтения или перезаписи, но биты защиты могут сниматься пользователями вместе с уничтожением всех данных ПЗУ.

Микросхема K1874BE96T поддерживает три специальных (энергосберегающих) рабочих режима: IDLE (холостый ход), POWERDOWN (низкое энергопотребление) и SLOW (уменьшение внутренней частоты). Существует также возможность перевода АЦП и ЦАП в режимы пониженного потребления, а для цифровых периферийных блоков — отключения тактирования.

В режиме IDLE работают только встроенные функциональные устройства, а микроконвертер находится в режиме ожидания разрешенного прерывания от внешнего или внутреннего устройства. В режиме POWERDOWN вся внутренняя синхронизация замораживается в состоянии логического нуля, генератор отключается, а блоки АЦП и ЦАП переводятся в режим SLEEP. Энергопотребление падает — ток потребления составляет всего несколько сот микроампер. Если напряжение питания сохраняется, то регистры ОЗУ и регистры специальных функций сохраняют данные. В режиме SLOW внутренняя частота уменьшается в два раза, и длительность машинного цикла становится равной четырем тактам сигнала XTAL. Работа ЦПУ и периферийных устройств замедляется.

В микроконвертере реализован также режим ONCE. Это режим тестирования, который электрически изолирует ИС от других устройств на печатной плате. При этом микроконвертер автоматически переводится в режим POWERDOWN. Этот режим может применяться в аппаратуре с резервированием компонентов.

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ПОДДЕРЖКИ

Микросхема K1874BE96T поддерживает режим программирования через последовательный порт. В этом случае для ее программирования не требуются специальные программаторы. Программирование выполняется с использованием COM-порта персонального компьютера и специальной программы. Программное обеспечение работает в среде Windows. В процессе программирования осуществляется самотестирование, обеспечивается контроль правильности установки микросхемы. Названные программные средства и схема подключения ИС для программирования доступны на [www.niiet.ru](http://www.niiet.ru).

Что касается отладочных средств, то может быть использована макетно-отладочная плата разработки ФГУП «НИИЭТ». С ее помощью возможно программирование микроконвертера, подключение внешних элементов к выводам, оценка работы прикладных программ. В разработке находится отладочная система (модуль) для K1874BE96T с более широкими функциональными возможностями. Она будет построена с использованием встроенного в микросхему модуля отладки OCDS и обеспечит возможность отладки прикладных программ в режиме реального времени. Имеется также возможность применения отладчика-симулятора PDS-96 ООО «ФИТОН» (Москва), который представляет собой интегрированный комплекс программных средств для разработки систем на основе микроконтроллеров семейства 196, программно совместимых с микросхемой K1874BE96T.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев О., Троицкий Ю. Аналоговые микроконтроллеры ADuC83x и ADuC84x// *Электронные компоненты*, № 1, 2005.
2. Торопов Д. Новые микроконвертеры с ядром ARM7 компании Analog Devices// *Электронные компоненты*, № 7, 2004.
3. Власенко А. Микроконвертеры серий ADuC702x на базе ядра ARM7TDMI// *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*, № 7, 2004.
4. Гусев С., Шумилин С., Реализация многозадачных приложений на МК серии 1886// *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*, №6, 2009.
5. Шумилин С. Новая серия отечественных 32-разрядных высокопроизводительных микроконтроллеров семейства 1986 на базе процессорного ядра ARM Cortex-M3// *Компоненты и технологии*, № 10, 2008.
6. Ачкасов В., Медведев Н., Потапов И., Горохов В., Хорошун В. Новые отечественные 16-разрядные микроконтроллеры серии 1874 для встраиваемых систем управления// *Chip News*, № 10, 2007.