

РАДИАЦИОННОСТОЙКИЕ 16-РАЗРЯДНЫЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ 1874BE7T И 1887BE6T

ВАЛЕРИЙ КРЮКОВ, главный конструктор, к.т.н., ОАО НИИЭТ
ВЛАДИМИР СМЕРЕК, нач. лаборатории, ОАО НИИЭТ
ДМИТРИЙ ШЕХОВЦОВ, ведущий инженер, к.т.н., ОАО НИИЭТ
ВЛАДИМИР ГОРОХОВ, зам. главного конструктора, к.т.н., ОАО НИИЭТ

В статье рассматриваются характеристики и эксплуатационные возможности разработанных в ОАО НИИЭТ радиационностойких 16-разрядных микроконтроллеров (МК) 1874BE7T, 1887BE6T, предназначенных для систем управления космической техники и объектов атомной энергетики. Микроконтроллер 1874BE7T создан на базе усовершенствованной архитектуры MCS-96 (AMCS-96), а 1887BE6T — на базе процессорного ядра C166. Высокая производительность микроконтроллеров в сочетании с широким набором портов, интерфейсов, встроенных модулей отладки OCDS, а также высокие показатели по радиационной стойкости обеспечивают требуемые функциональные и надежность характеристики конечных образцов космических объектов и другой специальной техники.

Микроконтроллер 1874BE7T представляет собой развитие созданной в ОАО НИИЭТ линейки МК серии 1874 на базе архитектуры и системы команд MCS-96 (Intel) [1]. В число микросхем этой серии входит также и радиационностойкий микроконтроллер 1874BE05T, производство которого было освоено в 2008 г. Данный микроконтроллер применяется в подсистемах ввода-вывода информации общих бортовых систем управления космическими аппаратами (КА), однако его возможности достаточно ограничены из-за отсутствия в его составе многоканального АЦП и ряда важных интерфейсов. С учетом требований разработчиков аппаратуры новый радиационностойкий микроконтроллер 1874BE7T содержит 12-разрядный 8/16-канальный АЦП, контроллеры интерфейсов ГОСТ Р 52070-2003, Space Wire, блок ШИМ и еще целый ряд встроенных устройств, что подробно рассматривается далее.

16-разрядный RISC-микроконтроллер 1887BE6T с повышенной стойкостью к СВВФ создан на базе процессорного ядра с архитектурой C166 (Infineon Technologies). В отечественной промышленности микроконтроллеры с подобной архитектурой и системой команд выпускаются в ОАО НИИЭТ. В частности, к ним относятся МК 1887BE3T [2], уровень радиационной стойкости которого, однако, недостаточен для аппаратуры космического назначения. В состав встроенных модулей радиационностойкого микроконтроллера 1887BE6T входят блок ШИМ, порты USART, интерфейсы SPI, контроллер двоемного интерфейса CAN, многофункциональный таймерный модуль,

три блока захвата/сравнения (CAPCOM) и др.

Ниже представлены основные технические характеристики микроконтроллеров 1874BE7T и 1887BE6T, в т.ч. данные по радиационной стойкости.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МК 1874BE7T

Общие данные. Как уже отмечалось, микроконтроллер 1874BE7T создан на базе нового ядра с усовершенствованной архитектурой AMCS-96 разработки ОАО НИИЭТ. Такое ядро впервые было использовано в отечественном 16-разрядном микроконверторе 1874BE96T [3]. Модель ядра отличается увеличенной производительностью по сравнению с другими ИМС серии 1874 с архитектурой MCS-96 (в среднем на 35–40% при работе на одинаковой частоте). Архитектура микроконтроллера 1874BE7T ориентирована на создание управляющих систем, функционирующих в режиме реального времени и обладающих возможностью адаптации и модификации под конкретные приложения.

Микроконтроллер с тактовой частотой 24 МГц имеет регистровое ОЗУ объемом 2024 байт, встроенный модуль отладки и сторожевой таймер (WDT). Периферия микроконтроллера представлена трехканальным блоком ШИМ, двумя последовательными портами ввода-вывода UART, блоком высокоскоростного ввода-вывода HSI-HSO, контроллерами интерфейсов SPI, I2C, Space Wire, ГОСТ Р 52070-2003 и 16-канальным 12-разрядным АЦП с возможностью работы с дифференциальными и несимметричными сигналами. В АЦП реализован механизм повышения точности

за счет двух дополнительных битов. Напряжение питания цифровой и аналоговой части составляет $3,3 \text{ В} \pm 10\%$, диапазон рабочих температур: $-60 \dots 85^\circ\text{C}$.

Специальные конструктивные и схемотехнические решения, реализованные в микроконтроллере 1874BE7T, обеспечивают его устойчивую работу при уровне накопленной дозы (D_T) не менее 250 Крад и линейной потери энергии (ТЗЧ) до $60 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$.

Полный набор классификационных параметров МК 1874BE7T при нормальной температуре представлен в таблице 1, а на рисунке 1 приведена структурная схема микроконтроллера.

Встроенные интерфейсы и модули. Из анализа структурной схемы микроконтроллера 1874BE7T следует, что определенная часть встроенных устройств заимствована из микроконвертора 1874BE96T [3]. К ним относятся порты UART, блоки ШИМ и HSI-HSO, интерфейсы SPI и I2C, периферийный сервер PTS, тактовый генератор, сторожевой таймер и др. К числу новых устройств относятся контроллер интерфейса ГОСТ Р 52070-2003, контроллер интерфейса Space Wire и многоканальный АЦП. Ниже приведены некоторые особенности этих новых устройств.

Модуль контроллера интерфейса ГОСТ Р 52070-2003 представляет собой устройство, поддерживающее обмен данными с другими устройствами (контроллерами) через магистральный последовательный интерфейс (ГОСТ Р 52070-2003), совместимый со стандартом MIL-STD-1553B. На физическом уровне интерфейс представляет собой последовательную шину данных (экранированная витая пара), к которой

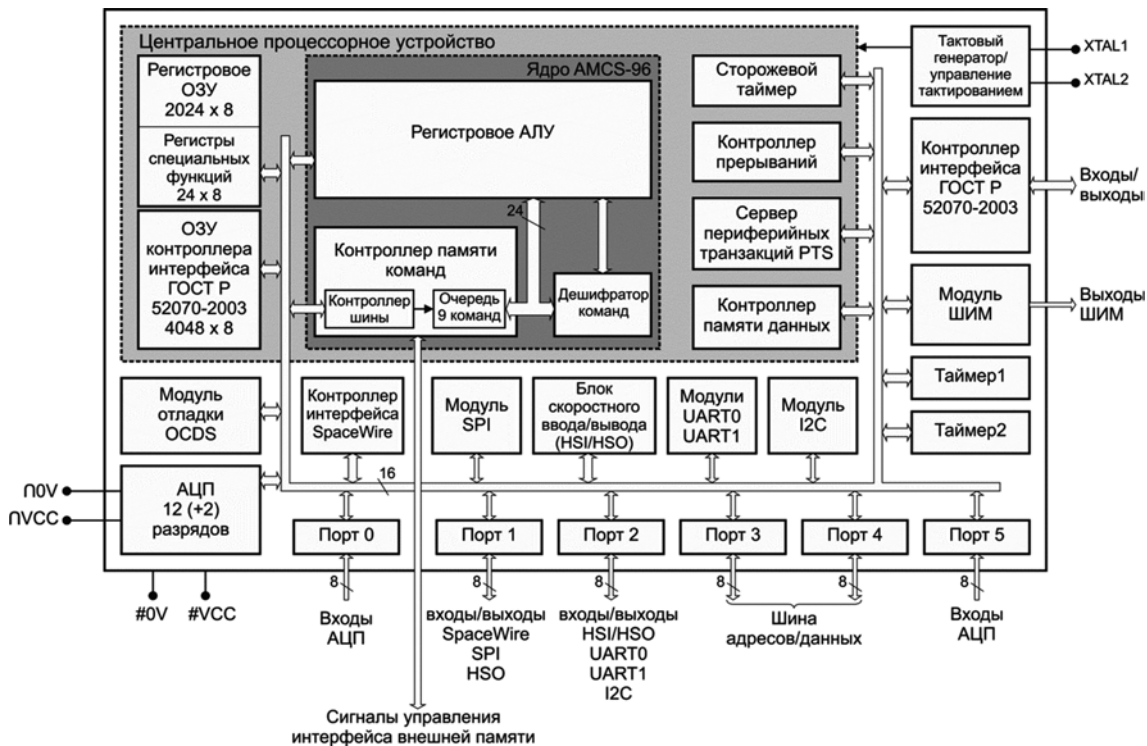


Рис. 1. Структурная схема микроконтроллера 1874BE7T

подключены устройства. Допустимыми устройствами являются: контроллер шины, монитор шины и удаленные терминалы (оконечные устройства). Контроллер шины является ведущим устройством. Он единственный ини-

цирует любой обмен информацией и контролирует работу сети. Контроллер шины может обращаться к любому из удаленных терминалов (макс. количество — 31), каждому из которых присвоен уникальный 5-бит адрес. Монитор

шины — пассивное устройство, подключенное к шине данных и занимающееся только отслеживанием и записью передаваемой по шине информации. Модуль магистрального последовательного интерфейса имеет два канала при-



НИИЭТ

ИЗДЕЛИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Радиационно стойкие
16-разрядные микроконтроллеры



1874BE7T

Система команд и архитектура MCS-96, разрядность данных 16 бит, ОЗУ 2024x8 бит, АЦП, ШИМ, UART, SPI, контроллеры интерфейсов ГОСТ 52070-2003 и Space Wire, блок HSI/O.

1887BE6T

Система команд и архитектура C166, разрядность данных 16 бит, ОЗУ 6Кбайт, ШИМ, USART, SPI, 3 модуля CAPCOM, CAN, OCDS.

аппаратура и системы космического назначения

объекты промышленной и специальной атомной энергетики

встроенные системы управления спецназначения

394033, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5

Тел./факс (473) 222-91-70

www.niiet.ru



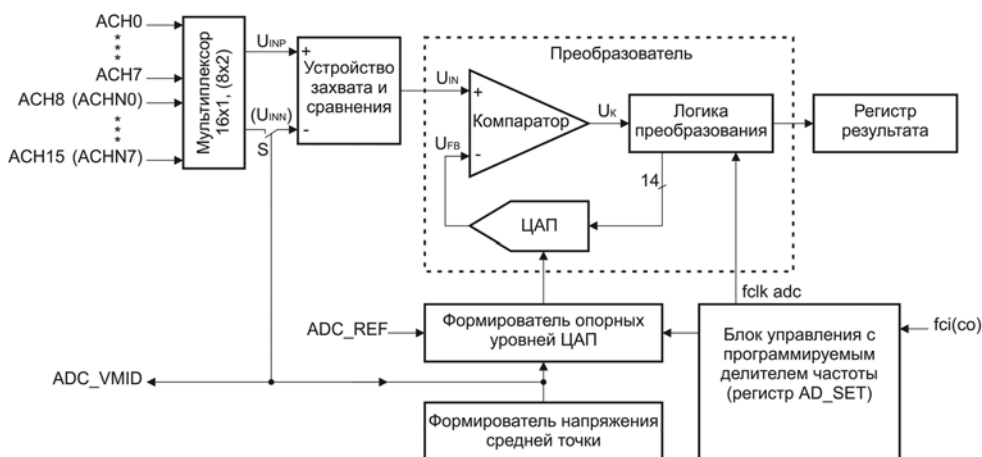


Рис. 2. Структурная схема модуля АЦП

ема/передачи — основной и резервный, которые полностью идентичны. Модуль функционирует в одном из трех режимов: контроллер шины (КШ), удаленный терминал (УТ) и монитор шины (МШ). Установка режима, а также других дополнительных параметров работы осуществляется посредством регистра конфигурации BSICONFIG.

В микросхеме 1874BE7T реализована также память сообщений контроллера интерфейса ГОСТ Р 52070-2003 объемом 4 Кбайт, которая используется как дополнительное внутреннее ОЗУ.

Контроллер интерфейса Space Wire обеспечивает взаимодействие микроконтроллера с другими устройствами как посредством подключения к сети, так и напрямую по протоколу Space Wire.

Связь осуществляется в полнодуплексном режиме; при этом скорость передачи/приема данных зависит от частоты работы микроконтроллера. Модуль последовательного интерфейса Space Wire имеет следующие основные особенности:

- возможность взаимодействия с устройствами, функционирующими на частоте, отличной от частоты работы модуля;
- 13 источников прерываний и возможность их выборочного включения;
- встроенные FIFO-буферы на передаче и прием;

- контроль состояний FIFO-буферов;
- возможность упрощенной отправки кодов времени;
- возможность корректировки временных соотношений состояний модуля;
- контроль паритета.

Для подробного ознакомления с протоколом передачи и организацией сети см. [4].

Модуль аналого-цифрового преобразователя (АЦП) реализован по схеме последовательного приближения и имеет структурную схему, представленную на рисунке 2.

АЦП программируется на работу в режиме однократного/непрерывного преобразования выбранного канала или в режиме последовательного сканирования каналов.

Мультиплексор подключает один из 16 входов к устройству захвата и хранения в режиме однополярного включения входов — таким образом организуются 16 каналов. В режиме дифференциального включения входов организуются восемь каналов, каждый из которых имеет два входа.

Устройство захвата и хранения фиксирует уровень напряжения входного сигнала в момент начала преобразования на входных емкостях и обеспечивает его хранение до окончания преобразования.

Преобразователь включает в свой состав компаратор, логику преобразо-

вания с регистром последовательного приближения и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). В результате преобразования на выходе формируется цифровой код, соответствующий входному напряжению ΔU_{IN} с точностью до одного U_{LSB} . Результат преобразования сохраняется в регистре результата АЦП и может быть считан до конца следующего преобразования.

Формирователь опорных уровней напряжения ЦАП задает диапазон преобразования U_{FSR} на основе входного опорного напряжения U_{REF_ADC} ($0 \dots U_{MID} - 0,2$ В). Настройка диапазона преобразования осуществляется путем изменения коэффициента преобразования K_{PGA} , задаваемого регистром ADC_SET.

Формирователь напряжения средней точки позволяет задать напряжение на уровне приблизительно $\frac{1}{2}U_{CC2}$ с одновременной выдачей этого напряжения на вывод ADC_VMID. Напряжение средней точки также может задаваться внешним источником через вывод ADC_VMID. При использовании внешнего источника напряжения средней точки внутренний источник должен быть отключен.

Блок управления с программируемым делителем частоты f_{ADC} позволяет осуществлять дискретную подстройку частоты преобразования f_{CLK_ADC} . Коэффициент деления задается с помощью регистра ADC_SET.

Таблица 1. Классификационные параметры микроконтроллера 1874BE7T

№ п/п	Параметр (характеристика), ед. измерения	Значение	№ п/п	Параметр (характеристика), ед. измерения	Значение
1.	Система команд и архитектура	AMCS-96	12.	Число каналов блока ШИМ	3
2.	Разрядность данных, бит	16	13.	Число последовательных портов UART	2
3.	Тактовая частота f_{cl} , МГц	24	14.	Синхронный последовательный интерфейс SPI	1
4.	Динамически конфигурируемая шина данных, бит	8 или 16	15.	Контроллер интерфейса ГОСТ Р 52070-2003	1
5.	Адресуемая память, бит	64K × 8	16.	Контроллер интерфейса Space Wire	1
6.	Регистровое ОЗУ, бит	2024 × 8	17.	Число 16-разрядных таймеров/счетчиков	2
7.	ОЗУ сообщений контроллера ГОСТ Р 52070-2003, бит	4K × 8	18.	Блок высокоскоростного ввода-вывода	1
8.	Число источников прерываний	44	19.	Программируемый 16-разрядный сторожевой таймер	1
9.	Число параллельных 8-разрядных портов ввода-вывода	6	20.	Периферийный сервер PUS	1
10.	Число каналов встроенного АЦП	8/16	21.	Модуль отладки DEBUG UNIT (OCDS)	1
11.	Число разрядов встроенного АЦП	12 + 2	22.	Число режимов пониженного потребления мощности	3

Отдельно следует остановиться на особенностях еще одного встроенного модуля, входящего в состав микросхемы 1874BE7T, а именно, модуля отладки OCDS. Он предназначен для упрощения отладки программного обеспечения пользователя, а также для контроля хода выполнения программы. Блок формирует несколько типов откликов по нескольким типам событий. События могут быть следующие:

- обращение к адресам внешней памяти;
- появление на шине адресов заданного адреса операнда;
- появление на шине данных заданного слова;
- появление на шине данных заданного младшего и старшего байта;
- превышение значения основного счетчика команд заданной величины;
- точное совпадение значения основного счетчика команд с заданной величиной.

При обнаружении того или иного из указанных событий может формироваться отклик:

- прерывание DEBUG (2060h);
- переход в режим IDLE;
- аппаратный сброс микроконтроллера.

Схема работы модуля отладки представлена на рисунке 3.

Программно-аппаратные средства. Для написания и отладки программ для микроконтроллера 1874BE7T доступны следующие программно-аппаратные средства:

1. Интегрированная среда разработки Codemaster-96 с возможностью написания программ на языках Ассемблер и Си и возможностью отладки ПО на программной модели ядра.
2. Макетно-отладочная плата КФДЛ.421457.001.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МК 1887BE6T

Микросхема 1887BE6T представляет собой радиационностойкий 16-разрядный RISC-микроконтроллер с высокопроизводительным процессорным ядром архитектуры C166 и большим количеством современных интерфейсов, позволяющих не только организовывать каналы обмена между различными микроконтроллерами, но и управлять микросхемами внешних периферийных устройств — АЦП, EEPROM и др. Тактовая частота микроконтроллера составляет 25 МГц. Поддержка сетевого протокола обмена CAN- и DSP-функций позволяют использовать МК 1887BE6T в легко масштабируемых помехоустойчивых сетях обмена и обработки данных. Внутренние средства отладки OCDS/CERBERUS через отладочный JTAG-интерфейс обеспечивают быструю разработку про-

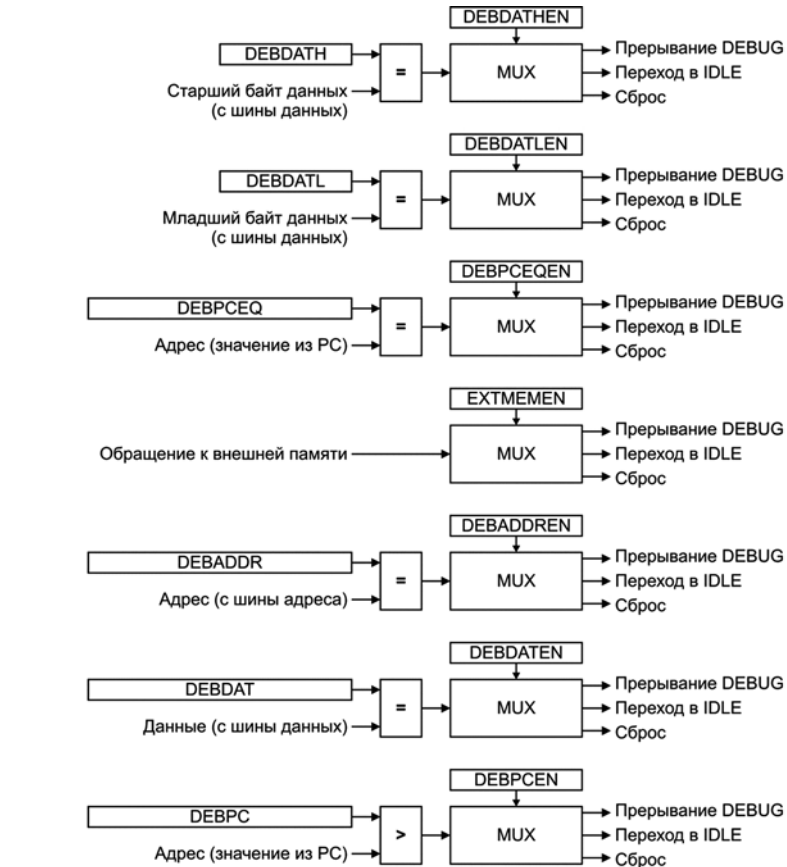


Рис. 3. Схема работы модуля отладки

граммного обеспечения и интеграцию систем.

Общие данные. Архитектура микроконтроллера 1887BE6T объединяет в себе хорошо сбалансированные между собой преимущества архитектур процессоров RISC и CISC. Микроконтроллер не только имеет мощное процессорное ядро и набор периферийных модулей, но и эффективную систему взаимодействия между ними. Наравне с другими шинами в микроконтроллере используется внутренняя шина X-периферии (шина XBUS), обеспечивающая стандартный способ интеграции в микроконтроллер специальных блоков для различных систем. На рисунке 4 показана структурная схема микроконтроллера.

Встроенные устройства и модули. Ниже представлены краткие характеристики основных устройств и блоков (модулей), входящих в состав МК.

Центральное процессорное устройство (ЦПУ) с четырехступенчатым конвейером команд имеет следующие характеристики:

- время умножения двух 16-разрядных чисел составляет 400 нс на частоте 25 МГц;
- время деления 32-разрядного числа на 16-разрядное составляет 800 нс на частоте 25 МГц;
- многочисленные внутренние шины данных с высокой пропускной способностью;

- переключение банков регистров общего назначения (контекста) одной командой;
- 16 Мбайт адресного пространства для кода и данных (архитектура фон Неймана);
- системный стек с аппаратным контролем переполнения/опустошения. Обеспечивается высокоэффективная система команд, в т.ч.:
 - базовая, непосредственная, косвенная, непосредственно-косвенная адресация для работы с битами, байтами и словами;
 - улучшенные логические операции для управления периферией и работы с флагами пользователя;
- аппаратный механизм обнаружения исключительных и ошибочных ситуаций;
- поддержка языка высокого уровня для управления операциями семафора и эффективного доступа к данным. Входящий в ЦПУ контроллер внешней шины имеет следующие функции:
 - мультиплексная/демультиплексная конфигурируемая шина с возможностью переключения между режимами 8- и 16-разрядной шины данных;
 - возможность сегментации и формирования сигнала выбора внешнего устройства;
 - изменяемые временные параметры циклов шины для пяти программируемых адресных окон.

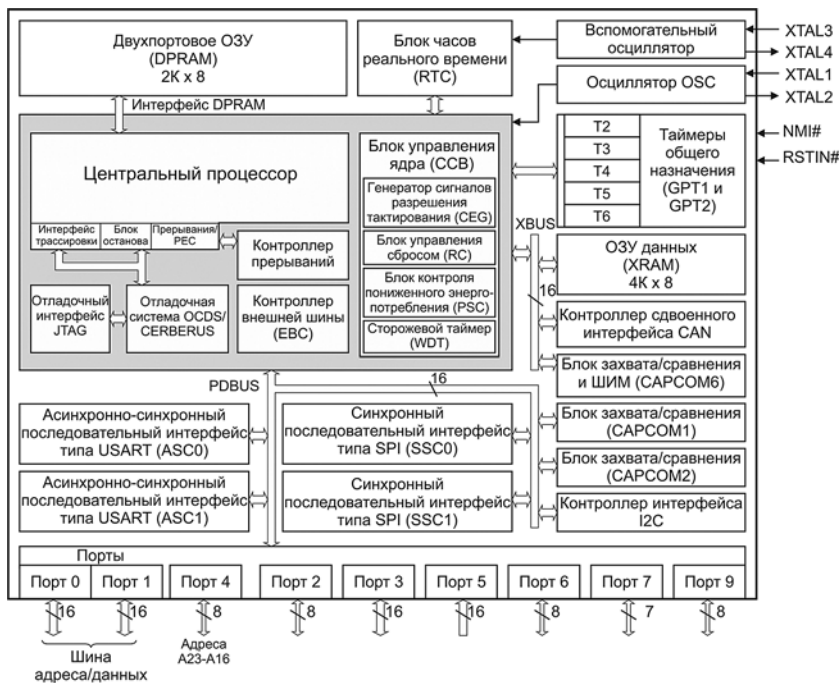


Рис. 4. Структурная схема микроконтроллера 1887BE6T

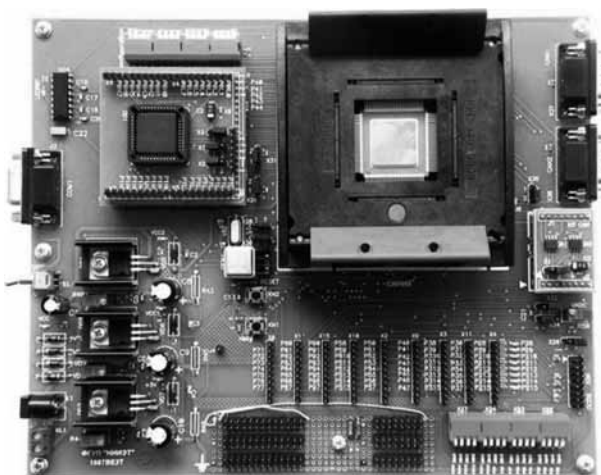


Рис. 5. Макетно-отладочная плата для микроконтроллера 1887BE6T

16-канальный контроллер периферийных событий (прерываний) обеспечивает прерывание работы ЦПУ на один машинный цикл для передачи данных, компоновку каналов и исключение лишних действий на сохранение и восстановление состояния системных регистров во время операций обслуживания прерываний. Имеется также счетчик числа передач (прерывание ЦПУ после запрограммированного количества передач PEC). Общее число источников прерываний составляет 77, каждый со своим независимым вектором.

Как уже отмечалось, в состав микроконтроллера 1887BE6T входит большое количество интегрированных периферийных модулей. К их числу относятся:

- девять параллельных портов;
- многофункциональный 16-разрядный таймерный модуль;

- часы реального времени (RTC);
- блоки захвата/сравнения (CAPCOM1, CAPCOM2);
- блок захвата/сравнения и ШИМ (CAPCOM6);
- два асинхронных/синхронных последовательных приемо-передатчика USART;
- два высокоскоростных синхронных последовательных приемо-передатчика с поддержкой интерфейса SPI;
- контроллер сдвоенного интерфейса CAN;
- программируемый сторожевой таймер (WDT);
- блок управления выходом из режимов пониженного энергопотребления;
- отладочная система OCDS/CERBERUS и интерфейс JTAG.

Особенности работы и состав основных периферийных модулей подробно описаны в работе [2].

Напряжение питания МК составляет 3,3 В ±10%, диапазон рабочих температур: — 60...85°C. По стойкости к воздействию специальных факторов обеспечивается уровень не менее 250 Крад по накопленной дозе, а по эффекту отказов при воздействии ТЗЧ (тиристорный эффект) пороговое значение линейных потерь энергии составляет не менее 60 МэВ · см²/мг.

К числу дополнительных возможностей микросхемы относятся три режима пониженного энергопотребления, отключение ядра и внутренней периферии, а также отключение только ядра при работе внутренней периферии.

Программно-аппаратные средства. В качестве программно-аппаратных средств для микроконтроллера 1887BE6T можно рекомендовать макетно-отладочную плату КФДЛ.421457.003 разработки ОАО НИИЭТ (см. рис. 5), а в качестве средств разработки — Keil 166 Development Tools.

Макетно-отладочная плата предназначена для освоения, изучения МК 1887BE6T и построения систем на ее основе. С помощью платы обеспечивается подключение внешних элементов к выводам и оценка прикладных программ. Макетно-отладочная плата имеет развитую систему коммутации, которая позволяет выборочно подключать к линиям портов микроконтроллера устройства ввода-вывода и формировать аппаратную конфигурацию микроконтроллерной системы в соответствии с требованиями проекта.

В состав макетно-отладочной платы входят основная плата с разъемами портов ввода-вывода и макетным полем, плата модуля с микроконтроллером 1887BE6T, плата модуля внешней флэш-памяти (64К 16-разрядных слов), модуль CAN-интерфейса и источник питания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ачкасов В., Медведев Н., Потапов И., Горохов В., Хорошунов В. Новые отечественные 16-разрядные микроконтроллеры серии 1874 для встраиваемых систем управления//Chip News. №10. 2007.
2. Смерек В., Шеховцов Д., Медведев Н., Горохов В., Потапов И. 16-разрядный RISC-микроконтроллер 1887BE3T на базе ядра C166 SV1.2//Электронные компоненты. № 7. 2011.
3. Смерек В., Потапов И., Крюков В., Горохов В. Первый отечественный 16-разрядный микроконвертор на базе MCS-96// Электронные компоненты. № 12. 2010.
4. Спецификация ECSS-E-ST-50-12C. Space Wire — Links, nodes, routers and networks. 31.07.2008.