

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.3

АДАПТАЦИЯ ИНДУСТРИАЛЬНОЙ МИКРОЭВМ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НЕГЕРМЕТИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Д.А. Куимов, С.В. Дорожкин, Д.С. Толчельников
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Адаптированная промышленная микроЭВМ устанавливается на малом космическом аппарате «Университетская-Татьяна-2». Она изготовлена из серийно выпускаемых комплектующих изделий с использованием уже имеющихся на предприятии технологических процессов. Приведены конструкция микроЭВМ, программное обеспечение и программное обеспечение отладочных средств.
Ключевые слова: космический аппарат, экспериментальная БЦВМ, микроЭВМ.

Введение

При создании КА актуальна проблема сопряжения бортовых систем с различными интерфейсами, в частности, аппаратуры полезной нагрузки со служебными системами КА. Для аппаратуры полезной нагрузки, как правило, необходимо обеспечивать не только управление, но и сбор, накопление и формирование потока целевой информации для передачи её на Землю. Особенно актуальна эта проблема для малобюджетных КА, создающихся в сжатые сроки.

Один из путей решения данной проблемы – использование специализированных адаптеров, выполненных на основе предназначенных для жестких условий эксплуатации промышленных микроЭВМ.

Для малого космического аппарата (МКА) «Университетская-Татьяна-2» проведена работа по созданию экспериментальной БЦВМ на базе промышленной микроЭВМ формата PC/104, в ходе которой:

- определены режимы работы БЦВМ, ее место в МКА, способы включения, управления, контроля и передачи информации;
- определена функциональная схема и выбран минимально необходимый состав БЦВМ;
- разработаны конструктивное исполнение и технология изготовления блока;
- разработаны логические протоколы интерфейсов связи с системами МКА и испытательным оборудованием (CAN2, RS 232 и др.);
- определены функции и состав испытательного оборудования;
- изготовлена БЦВМ и испытательное оборудование;
- разработано и отлажено ПО БЦВМ и испытательного оборудования.

Работа была выполнена с целью оценки возможности применения подобных устройств в МКА негерметичного исполнения, а также отработки

технологического процесса их изготовления, испытаний, разработки программного обеспечения.

Проблемы использования промышленных микроЭВМ на КА

К бортовой аппаратуре МКА негерметичного исполнения предъявляются следующие требования [1 – 3]:

- стойкость к механическим воздействиям при запуске и транспортировке;
- работа в условиях вакуума;
- устойчивая работа в условиях повышенного радиационного излучения.

Для обеспечения стойкости к механическим воздействиям бортовых блоков на основе промышленных микроЭВМ при изготовлении следует использовать комплектующие изделия, устойчивые к механическим нагрузкам, и, при необходимости, выполнять некоторые доработки: дополнительную фиксацию ЭРИ на печатных платах с помощью приклейки или привязки, закрепление внутриблочного проводного монтажа на элементах конструкции и т. п.

Обеспечение работы создаваемых блоков в условиях вакуума может быть достигнуто применением соответствующей комплектации или их полной заливкой (герметизацией) теплопроводящим компаундом, а также созданием теплового контакта между тепловыделяющими ЭРИ и корпусом за счет использования дополнительных радиаторов.

Для обеспечения радиационной стойкости блоков необходимо, чтобы накопленная доза соответствовала применяемым элементам, а организация работы блоков обеспечивала их устойчивость к воздействию высокоэнергетических частиц (одиночные сбои).

Приемлемая величина накопленной дозы для применяемой в промышленных микроЭВМ элементной базы может быть обеспечена экранами, в



Рис. 1. Общий вид блока EM

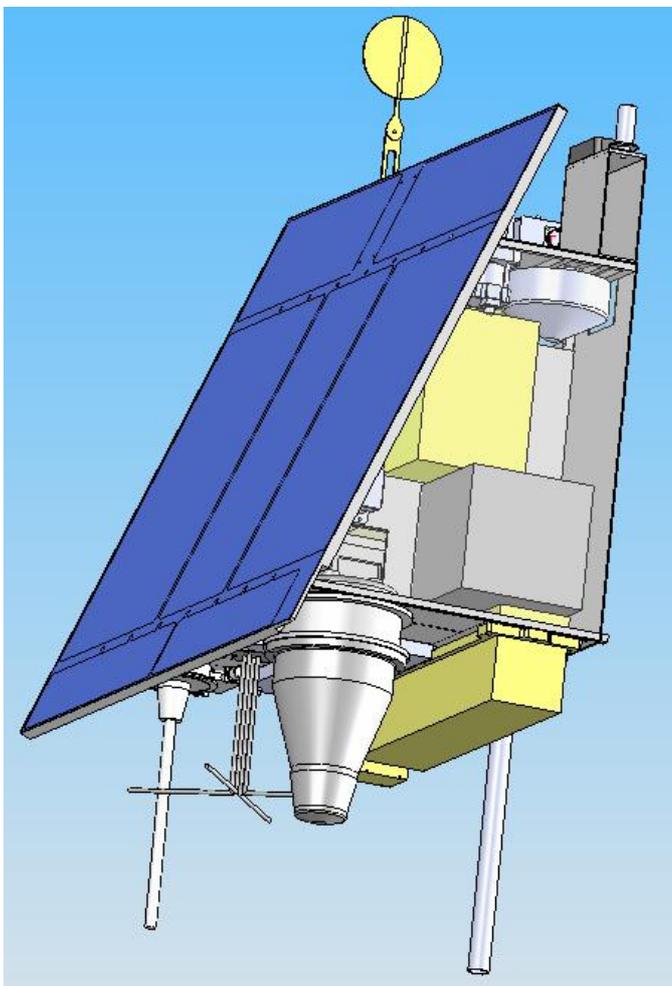


Рис. 2. МКА «Университетский-Татьяна-2»

качестве которых могут выступать корпуса блока и КА, а при заливке, также и компаунд.

Одиночные сбои возникают вследствие попадания в чувствительные области элементов СБИС вы-

сокоэнергетичных (с энергией более 1 МэВ) частиц (ВЭЧ) космического пространства.

Отличительной особенностью архитектуры IBM совместимых компьютеров является загрузка операционной системы и рабочих программ с дисков в оперативную память перед началом работы и хранение их там вместе с обрабатываемыми данными в процессе вычислений.

В качестве оперативной памяти используется КМОП СБИС динамической памяти высокой степени интеграции. СБИС динамической памяти служат основными источниками сбоев из-за высокой вероятности инверсий логического состояния ячеек памяти при попадании в них ВЭЧ.

В то же время вероятность сбоев процессора, контроллеров, ПЗУ и других СБИС из-за «случайных» ионизационных эффектов значительно ниже (более чем на два порядка), а вероятность инверсий логического состояния ячеек флэш-памяти практически равна нулю. Таким образом, очевидной возможностью минимизировать последствия сбоев является сохранение промежуточных результатов работы программ в процессе её исполнения на диске микроЭВМ, в качестве которого для КА оптимально использование твердотельного диска на основе флэш-памяти.

Не все сбои в ячейках памяти ОЗУ проявляются через ошибки в вычислениях или сбоях программы. К некоторым ячейкам просто не бывает обращения, и среднесуточное число сбоев программы и данных может оказаться меньше числа сбоев памяти.

Однако реально с течением времени число искажённых ячеек будет увеличиваться и одновременно будет увеличиваться вероятность сбоев в работе программы. Отсюда следует, что целесообразно проводить перезагрузку оперативной памяти, не дожидаясь проявления сбоя, с предварительной записью текущего состояния программы и текущих данных на твердотельный диск. Для обнаружения сбоев, вызванных нарушением предусмотренного хода программы, в блоках должен использоваться специальный таймер-сторож (сторожевой таймер).

Во всех вариантах корректного выполнения программы должен быть предусмотрен периодический сброс таймера-сторожа. Если такого сброса нет в течение заданного времени, таймер-сторож вырабатывает сигнал прерывания или перезагрузки программы с твердотельного диска.

Опыт НПП ВНИИЭМ в применении индустриальных микроЭВМ на КА

В НПП ВНИИЭМ уже имеется опыт создания адаптеров на базе индустриальных микроЭВМ: при разработке КА «Ресурс-О1» №4 были успешно применены БЦВМ для обслуживания итальянской и

французской научной аппаратуры, представлявшие собой микроЭВМ в формате MicroPC (блоки Е и ЕМ).

Они были выполнены на основе монтажного каркаса фирмы Octagon Systems, который был установлен в силовой корпус, разработанный в НПП ВНИИЭМ, процессорной платы 5025А фирмы Octagon Systems, а также содержали модуль флеш-памяти объемом 64 Мбайт фирмы M-Systems, и ряд других плат.

Данные БЦВМ были установлены в гермоконтейнере КА.

Общий вид блока ЕМ показан на рис.1.

Экспериментальная БЦВМ МКА «Университетский-Татьяна-2»

Экспериментальная БЦВМ (далее блок ВСК) устанавливается на МКА «Университетский-Татьяна-2» в качестве одного из приборов полезной нагрузки для определения целесообразности применения индустриальных микроЭВМ для МКА негерметичного исполнения. В отличие от блоков Е и ЕМ КА «Ресурс-01» №4 блок ВСК создан на базе индустриальной IBM совместимой микроЭВМ в формате PC/104 и применяется без использования гермоконтейнера.

Внешний вид МКА «Университетский-Татьяна-2» приведен на рис. 2, расположение блока ВСК на раме МКА показано на рис. 3, внешний вид блока ВСК представлен на рис. 4. Взаимодействие блока ВСК с системами МКА «Университетский-Татьяна-2» представлено на рис. 5, где БКУ – бортовой комплекс управления; ПСИ – передатчик информации полезной нагрузки; БИ – информационный блок полезной нагрузки.

Электропитание блока ВСК осуществляется через блок БИ. Включение и выключение электропитания ВСК выполняется в блоке БИ по командам, поступающим из БКУ по шине CAN интерфейса.

Информация о функционировании ВСК (кроме температурных датчиков) объемом 248 байт передается в блок БИ по интерфейсу RS-232 один раз в минуту. Также один раз в минуту по интерфейсу 1-Wire блоком БИ опрашиваются температурные датчики ВСК (10 шт.) и осуществляется замер тока потребления блока ВСК по цепям питания. Перечисленная информация накапливается блоком БИ и передается на Землю в сеансах связи по радиоканалу полезной нагрузки.

Помимо связей с БИ, блок ВСК, в отличие от остальных приборов полезной нагрузки, по сетевому CAN-интерфейсу подключен к БКУ. ВСК обеспечивает:

– передачу в БКУ основной телеметрической информации объемом 32 байта, ее накопление, хранение и передачу на Землю в сеансах связи по ТМ радиоканалу МКА;

– синхронизацию своего времени с бортовым временем;

– изменение режима работы и настройки с помощью управляющих команд, поступающих из БКУ;

– загрузку различных массивов данных.

Для выполнения поставленных задач выбран следующий минимально необходимый состав блока ВСК:



Рис. 3. Расположение блока ВСК на МКА



Рис. 4. Общий вид блока ВСК

жиме сквозной и обратной записи. Процессор поддерживает 8-, 16- и 32-бит типы данных и работает в реальном, виртуальном 8086 и в защищенном режимах. Процессор способен адресовать 256 Мбайт физической памяти, используя 32-бит шину с режимом пакетного доступа. Инструкции с плавающей точкой выполняются параллельно при помощи математического сопроцессора.

Блок North Bridge традиционно присутствует в архитектуре процессоров Pentium класса. North Bridge реализован на PC87750 PCI системном контроллере, разработанном для процессоров класса Pentium.

Модуль South Bridge является улучшенным PCI-ISA-мостом, обеспечивая ISA/AT-функциональность.

Интегрированная подсистема ввода/вывода системы на кристалле ZF_x86 содержит:

- контроллер Floppy-дисков;
- два стандартных последовательных порта полностью совместимых с 16550A и 16450 со скоростью передачи данных до 1,5 Мбод;
- параллельный порт (EPP, ECC, IEEE 1284 полностью совместимый);
- часы реального времени (совместимые с DS1287, MC146818 и CP87911);
- интерфейс ACCESS BUS (совместим с SMBus и I²C).

Для предотвращения «зависания» программного обеспечения предусмотрен сторожевой таймер, который перезагружает ЭВМ, если к нему не было обращений в течении определенного времени.

Плата CAN-интерфейса имеет следующие характеристики:

- содержит два канала CAN 2.0B;
- скорость по каждому каналу до 1000 кбод/с;

Плата источника электропитания имеет следующие характеристики:

- DC/DC преобразователь;
- диапазон входных напряжений 6 – 40 В;
- мощность до 60 Вт.

Плата имеет возможность программного обращения к ней через стандартные порты ввода-вывода для получения информации о текущем входном напряжении электропитания, токе потреблении и потребляемой мощности.

Для контроля теплового режима элементов на платах и корпусе в блоке ВСК установлены десять цифровых термодатчиков с последовательным интерфейсом 1-Wire типа DS18S20, объединенных в две сети по 5 датчиков в каждой.

Блок ВСК функционирует под управлением операционной системы FreeDOS 1.0 и специального программного обеспечения, реализующего необходимую логику работы блока и связь с системами МКА.



Рис. 6. Процессорная плата блока

Конструкция блока ВСК

Блок ВСК собран в корпусе Pandora, который представляет собой литой алюминиевый трубчатый корпус, на один торец которого устанавливается крышка блока с внешними соединителями блока, на другой торец – основание блока. Крышка и основание фиксируются винтами.

На основании блока, на алюминиевых стойках размещаются три платы блока одна на другой.

Внешний вид корпуса Pandora в сборе с поставленной верхней крышкой показан на рис. 7.

Из-за не соответствия имеющихся на штатной крышке внешних соединителей требуемым для МКА была изготовлена другая крышка (рис. 8), на которой установлены следующие соединители:

- 4 соединителя для последовательных портов RS-232 (два – для связи с блоком БИ МКА, два – для технологических целей);
- 1 соединитель для параллельного порта LPT (для обеспечения с помощью перемычек во внешнем разъеме режима испытаний и летного режима);
- 1 соединитель для подключения дисковода 3,5 дюйма;
- 1 соединитель для электропитания дисковода 3,5 дюйма;
- 1 соединитель для технологических цепей, используемых при перепрограммировании BIOS блока ВСК;
- 2 соединителя для двух каналов CAN-интерфейса (для связи с БКУ МКА);
- 1 соединитель для подключения к бортовой сети МКА и передачи информации термодатчиков.

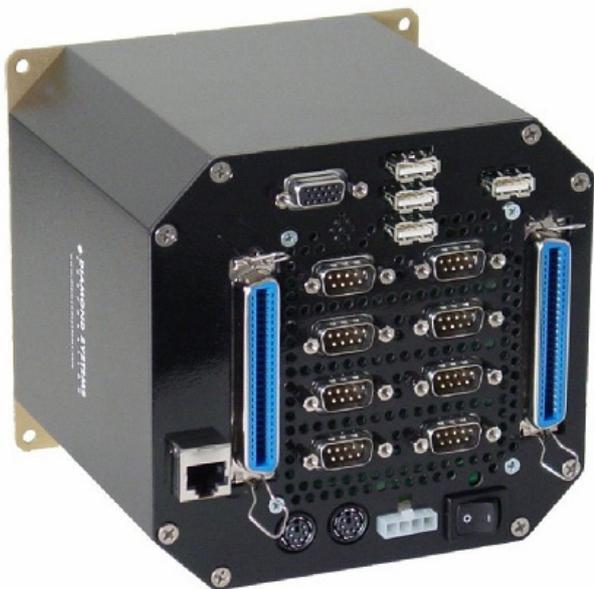


Рис. 7. Внешний вид корпуса Pandora с поставленной верхней крышкой

Соединители для интерфейсов дисков и перепрограммирования BIOS обеспечивают, при необходимости, смену ПО полностью изготовленного блока ВСК без его вскрытия.

Внутриблочные кабели – это, в основном, доработанные кабели, поставляемые с корпусом Pandora.

Вид блока ВСК без корпуса с внутриблочными кабелями представлен на рис. 9.

Собранный и проверенный блок заливается теплопроводящим компаундом, обеспечивающим работу электронных элементов промышленного исполнения в вакууме, передачу тепла от электронных

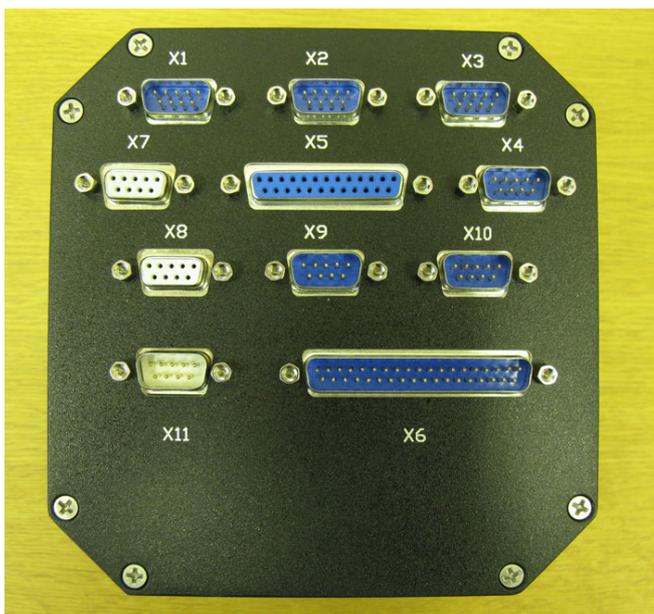


Рис. 8. Специально изготовленная крышка блока

элементов на корпус блока, устойчивость электронных узлов и внутриблочных соединений блока к механическим воздействиям, а также снижающим радиационное воздействие на элементы блока.

Процесс изготовления блока ВСК:

- 1) изготовление верхней крышки блока из заготовки Diamond Systems и изготовление основания блока из листа АМГ толщиной 3 мм;
- 2) изготовление втулок металлизации под винт М4;
- 3) доработка корпуса блока;
- 4) изготовление внутриблочных кабелей и жгутов;
- 5) приклейка термодатчиков к платам, основанию и крышке блока;
- 6) определение адресов термодатчиков в сети 1-Wire;
- 7) установка джамперов на платах в необходимое положение;
- 8) установка платы флеш-диска на процессорную плату;
- 9) последовательная установка трех плат на основание блока;
- 10) подсоединение внутриблочных жгутов к платам и их подвязка к межплатным стойкам;
- 11) проверка сопротивления изоляции блока;
- 12) проверка функционирования блока;
- 13) снятие показаний о температуре в блоке;
- 14) установка корпуса блока на основание;
- 15) подсоединение внутриблочных жгутов к верхней крышке и закрепление крышки блока на корпусе блока;
- 16) проверка сопротивления изоляции блока;
- 17) проверка функционирования блока;
- 18) снятие показаний о температуре в блоке;
- 19) подготовка блока к заливке компаундом и заливка блока;
- 20) проверка сопротивления изоляции блока;
- 21) проверка функционирования блока;
- 22) снятие показаний о температуре в блоке.

Программное обеспечение блока ВСК

Программное обеспечение блока ВСК создано с применением только бесплатного ПО, которое включает:

- операционную систему FreeDOS 1.0 (применена без изменений);
- специальное ПО (далее СПО), реализующее циклограмму работы блока ВСК в процессе орбитального полета и связь с системами МКА и обеспечивающее испытания блока (собственная разработка).

СПО разработано в среде Turbo C 2.0.

СПО выполняет:

- тестирование части ОЗУ процессорного модуля;
- тестирование флеш-диска;
- сбор информации о работоспособности модуля CAN-интерфеса;

- сбор информации о работоспособности портов RS-232;
- загрузку по CAN-интерфейсу файлов (в том числе и исполняемых);
- запуск внешних исполняемых файлов;
- периодическую передачу своей общей телеметрической информации в БКУ МКА по CAN-интерфейсу;
- передачу по запросу в информационный блок полезной нагрузки МКА своей расширенной телеметрической информации по интерфейсу RS-232.

Логика работы СПО следующая.

При подаче электропитания на блок ВСК происходит его автоматическое включение, после проверки BIOS работоспособности аппаратуры управление передается ОС FreeDOS, которая, в свою очередь, осуществляет запуск СПО. СПО проверяет наличие логического нуля на контактах 10 и 11 LPT порта. Если логический ноль на них отсутствует, то программа завершает свою работу и выходит в DOS, в противном случае программа переходит к исполнению летной части алгоритма.

После перехода к летной части программа осуществляет инициализацию аппаратных средств (CAN и RS-232) и выдает в технологический интерфейс (RS-232) информацию о своем старте. Шины CAN и RS-232 дублированы (резерв горячий). В исходном состоянии контроллер резервной шины находится в рабочем режиме.

Далее осуществляется циклическое выполнение режима работы, задаваемого по командам с Земли или КПА МКА и передаваемых в блок ВСК по CAN интерфейсу. После подачи питания на блок ВСК или его перезапуске по умолчанию устанавливается

режим ожидания управляющих команд.

Раз за цикл вызывается модуль CAN-интерфейса и модуль сбора текущей телеметрической информации.

Логика работы модуля CAN-интерфейса следующая. При первом вызове модуля он запускает процесс установления связи с БКУ МКА по CAN-интерфейсу. После установления связи он осуществляет пересылку в БКУ своей телеметрической информации и запрашивает из него бортовое время в соответствии с установленными интервалами запроса.

Контроллер CAN-интерфейса в плате CAN-интерфейса программно инициализирован на прием кадров, относящихся только к блоку ВСК, что обеспечивает защиту от обработки ненужных кадров.

Модуль сбора телеметрической информации осуществляет сбор информации о функционировании ПО (режиме работы, текущей активной CAN-шины, текущем канале обмена с информационным блоком полезной нагрузки МКА, напряжении, токе, мощности потребления, количестве успешно и ошибочно принятых/переданных кадров по CAN и RS-232 шинам).

Под управлением СПО в блоке ВСК реализованы следующие режимы работы:

- ожидания управляющих команд;
- циклического тестирования;
- выполнения 1-го внешнего исполняемого файла;
- выполнения 2-го внешнего исполняемого файла;
- выполнения 3-го внешнего исполняемого файла;
- выполнения 4-го внешнего исполняемого файла.

В режиме ожидания процессор в течении 10 с находится в режиме пониженного энергопотребле-

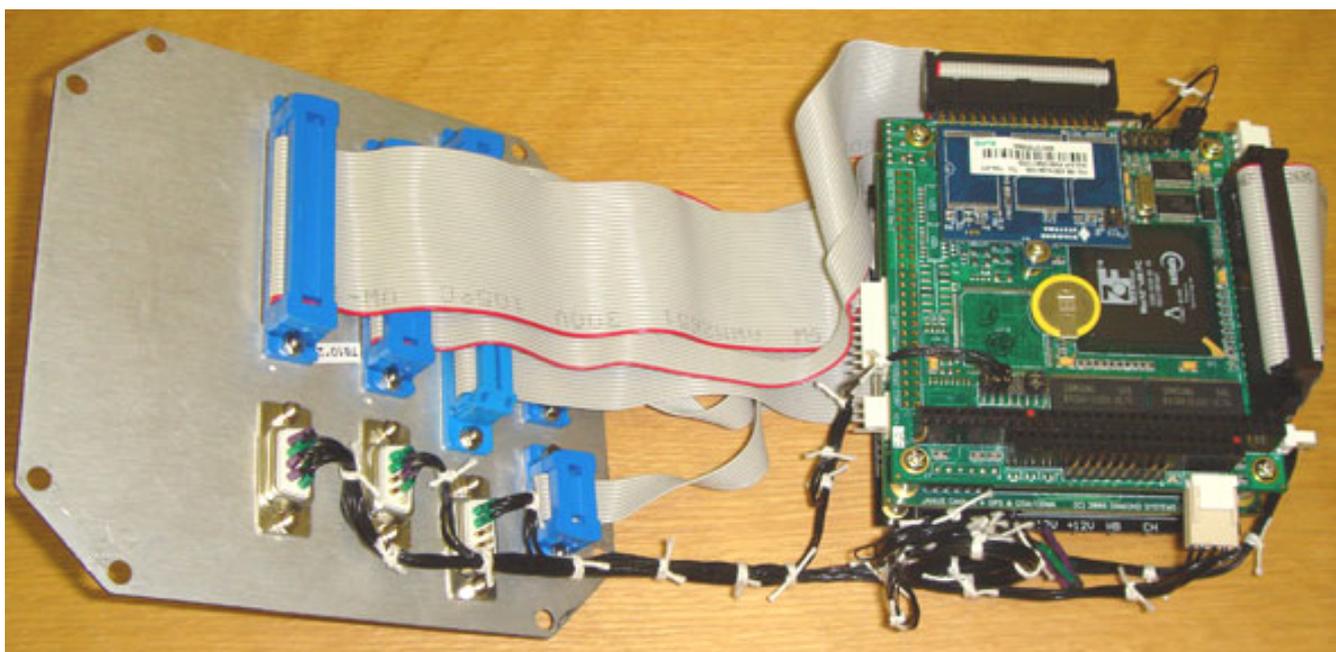


Рис. 9. Вид блока ВСК без корпуса



Рис. 10. Процесс обновления ПО блока

ния, при этом возможно обработка любых прерываний. По истечении 10 с осуществляется один циклический проход для обновления телеметрической информации.

Режим циклического тестирования состоит из 4-х частей:

- 1) тестирование части ОЗУ на чтение. Чтение 1 Мбайт со значением 0x55. Если прочитанное значение отличается от 0x55, данный факт фиксируется;
- 2) тестирование части ОЗУ на чтение и запись. Запись и чтение 64 кбайт со значением 0x55, 0xAA (тест шахматы). Если прочитанное значение отличается от записанного то данный факт фиксируется;
- 3) тестирование флеш-диска на чтение. Тестируемый файл имеет размер 5 Мбайт и заполнен байтами 0x55. За один цикл прохода тестируется 512 кбайт файла, при следующем проходе тестируются следующие 512 кбайт и т. д. Если прочитанное значение отличается от 0x55 то данный факт фиксируется;
- 4) тестирование флеш-диска на чтение и запись.

Тестируемый файл имеет размер 512 кбайт и в него записываются байты 0x55, 0xAA затем производится их чтение. Если прочитанное значение отличается от предполагаемого, то данный факт фиксируется. Так как контроллер флеш-диска сдвигает вновь перезаписываемый файл, то осуществляется проверка всего объема флеш-памяти.

В режиме выполнения внешнего исполняемого файла (1 ... 4) вызывается заданный исполняемый файл. Если при вызове внешнего исполняемого файла возникает ошибка, информация о ней фиксируется в телеметрической информации. Внешний исполняемый файл записывает свои результаты в соответствующие байты массива информации, предназначенной для передачи в информационный блок полезной нагрузки.

Внешние исполняемые файлы загружаются по CAN-интерфейсу блоками по 2 кбайт. Загрузка исполняемого файла может выполняться в любом режиме работы.

Внешний исполняемый файл может использовать файлы настроечных параметров. Их загрузка осуществляется блоками по 128 байт аналогично исполняемому файлу.

Информационная посылка при передаче исполняемого файла и файлов настроечных параметров содержит информацию об имени файла, признаке начала или продолжения передачи файла, объеме данных в посылке, контрольную сумму.

Отсчет временных интервалов в СПО осуществляется с помощью системного интервального таймера, генерирующего прерывание с частотой 18,2 Гц. В критичных по времени выполнения участках программы осуществляется перезапуск сторожевого таймера для предотвращения его ложного срабатывания.

Управление режимами и параметрами СПО блока ВСК осуществляется с помощью 20-ти команд, передаваемых по CAN интерфейсу: установка режима работы, включение и выключение сторожевого таймера, установка интервалов выдачи телеметрической информации и запроса бортового времени.

Передача информации в информационный блок полезной нагрузки МКА осуществляется по запросу этого блока, выдача информации производится в тот канал интерфейса RS-232, по которому поступил запрос. Состав массива пересылаемых данных зависит от режима работы ВСК.

Изменение программного обеспечения блока ВСК осуществляется с помощью дисководов подключаемого к блоку (рис. 10).

Управление копированием файлов производится через технологический интерфейс RS-232 блока ВСК (консольный интерфейс), подключенный к на-

стойкой ПЭВМ с запущенной терминальной программой HyperTerminal.

Полное обновление программного обеспечения реализуется загрузкой блока ВСК с гибкого диска. Такой способ обусловлен отсутствием возможности загрузки блока ВСК через USB интерфейс.

Испытательное оборудование блока ВСК

Испытательное оборудование блока ВСК разработано и собрано из стандартных устройств и включает:

- настольную ПЭВМ;
- кабель CAN-интерфейса с терминаторами;
- нуль-модемные кабели интерфейса RS-232;
- жгут с линиями электропитания и опроса термодатчиков блока ВСК;
- два переходника RS-232 – 1-Wire;
- 6 переходников USB – RS-232;
- USB – хаб;
- второй комплект блока ВСК для имитации бортового CAN-интерфейса.

Испытательное оборудование оснащено стандартным ПО и разработанным в среде Turbo C 2.0 СПОи. СПОи устанавливается на второй комплект блока ВСК и обеспечивает полную имитацию ПО БКУ МКА в части взаимодействия с блоком ВСК.

Управление работой СПОи осуществляется через интерфейс RS-232 с персонального компьютера.

Поступила в редакцию 12.12.2008

Заключение

Представленный в данной работе малобюджетный блок ВСК создан за достаточно короткий срок на основе серийно выпускаемых комплектующих изделий на производственной и испытательной базе НПП ВНИИЭМ. Программное обеспечение блока может корректироваться или заменяться полностью при наземных работах без вскрытия блока и в процессе орбитального полета КА.

Аналогичные по конструкции блоки, отличающиеся набором плат (в частности с поддержкой интерфейса МКО), а также с использованием операционных систем реального времени (в частности QNX) могут быть созданы, в случае необходимости, в короткий срок для других КА, разрабатываемых в НПП ВНИИЭМ.

Литература

1. Гобчанский О. Устойчивость IBM PC совместимых контроллеров к радиационным сбоям на орбитах космических аппаратов / О. Гобчанский, Н. Кузнецов // Современные технологии автоматизации. – 2001. – № 4.
2. Гобчанский О. Проблемы создания бортовых вычислительных комплексов малых космических аппаратов / О. Гобчанский // Современные технологии автоматизации. – 2001. – № 4.
3. Гобчанский О. Повышение радиационной стойкости индустриальных средств автоматики в составе бортовой аппаратуры / О. Гобчанский, В. Попов, Ю. Николаев // Современные технологии автоматизации. – 2001. – № 4.

*Дмитрий Александрович Куимов, инженер.
Сергей Владимирович Дорожкин, инженер.
Денис Сергеевич Толчельников, инженер.*

Т. 366-26-11.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.