

F. A. Lukin, A. V. Shakhmatov, K. V. Mushovets, P. V. Zelenkov

MECHANISM OF OPERATED TELEMETRY FOR A SPACECRAFT

This article presents query-oriented method of receiving telemetry information from the board of a spacecraft, analyses advantages of this method. For implementing this method, the possibility of creation of hardware database is considered.

Keywords: spacecrafts, telemetry, space CCU (command and control units), telemetry hardware storage.

© Лукин Ф. А., Шахматов А. В., Мушовец К. В., Зеленков П. В., 2012

УДК 681.3:629.7

В. Х. Ханов, А. В. Шахматов, С. А. Чекмарев, М. Ю. Вергазов, Ф. А. Лукин

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ*

Описываются основные технические решения, принятые при проектировании бортового комплекса управления для малых космических аппаратов. Определены открытые технологии и продукты, используемые в проекте. Представлены сетевая архитектура и конструкция бортового комплекса управления. Приведены результаты разработки экспериментального макета.

Ключевые слова: малые космические аппараты, бортовой комплекс управления, сетевая архитектура, конструкция бортового комплекса управления, экспериментальный макет бортового комплекса управления.

Проектирование малых космических аппаратов (МКА) является новейшим быстроразвивающимся направлением мировой космонавтики. Применение МКА открывает новые возможности для исследования космического пространства, проведения эффективных научных экспериментов, отработки новых перспективных технологий.

Исходные данные для проектирования подобных аппаратов задают жесткие требования к массогабаритным показателям, энергопотреблению, параметрам надежности при приемлемом уровне аппаратных задач, стоимости как в целом МКА, так и ко всем составляющим узлам и блокам, в том числе и к бортовому комплексу управления (БКУ). Стремление к удовлетворению этих требований обуславливает необходимость применения новых подходов и технологий проектирования.

Целью проекта является разработка бортового комплекса управления (БКУ) для малых космических аппаратов на основе применения ряда новых технологий, позволяющих достичь высоких технических и эксплуатационных характеристик БКУ.

Большинство реализуемых в проекте новшеств можно отнести к категории так называемых COTS-решений, COTS-продуктов (Commercial Off-The-Shelf – коммерческие, готовые к использованию) [1]. COTS-подход заключается в использовании при разработке систем военного или космического назначения

открытых технологий, многократно использованных в коммерческих приложениях, а поэтому надежных и дешевых.

При инициализации проекта было принято решение использовать только открытые продукты и технологии. Это касается и аппаратных решений и программного обеспечения. К числу основных открытых решений, принятых в проекте, следует отнести:

- использование только стандартизированных интерфейсов и сетей: SpaceWire, AMBA;
- использование только открытых сложно-функциональных блоков (IP-блоков): LEON 3, SpaceWireLight;
- использование только открытых операционных систем: RTEMS;
- использование открытых стандартов телеуправления/ телеметрии: соответствующие стандарты Европейского космического агентства Packet Telecommand Standard ESA PSS-04-107 и Telecommand Decoder Specification ESA PSS-04-151 [2; 3].

Основной элементной базой реализации основных устройств проекта были определены программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Данное решение приводит к снижению габаритов, массы и энергопотреблению устройств. Часть устройств, требующих повышенной функциональной гибкости, принято реализовать в виде «систем-на-кристалле» [4].

*Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» № П1032 от 27.05.2010.

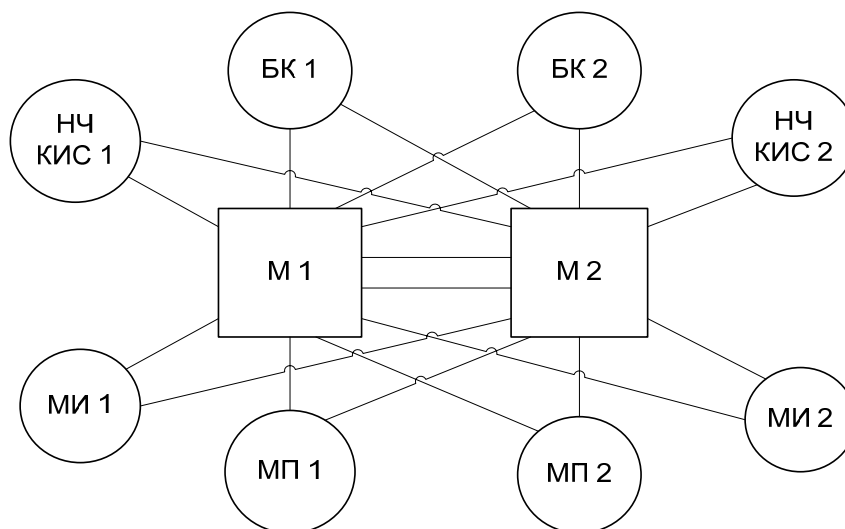


Рис. 1. Топология типа «двойная звезда»

Основополагающим проектным решением стала сетевая архитектура построения БКУ. Особенностью сетевой архитектуры является создание инфраструктуры передачи данных, позволяющей легко дублировать основные и инфраструктурные компоненты сети, иметь несколько альтернативных путей передачи данных, масштабировать или модифицировать сеть под имеющееся оборудование на борту КА. В качестве базы для сетевой архитектуры определена технология SpaceWire, получающая в настоящее время бурное развитие.

За основу в качестве базовой использована топология типа «звезда» с быстродействующим коммутатором (маршрутизирующим коммутатором в случае технологии SpaceWire) в качестве центрального узла. В качестве наиболее вероятного кандидата на сетевую архитектуру БКУ определена топология «двойная звезда» [5], представленная на рис. 1.

Сетевая архитектура предполагает использование в качестве инфраструктурных компонентов «связку» двух маршрутизаторов (М), один из которых является активным, другой находится в «холодном» резерве. Для повышения надежности связь маршрутизаторов обеспечивают 2 физических линка. К каждому маршрутизатору подключается свой полукомплект устройств, составляющих БКУ. Кроме того, каждое устройство из одного полукомплекта подключается к маршрутизатору другого полукомплекта. В текущий момент времени один полукомплект находится в активном режиме, другой – в «холодном» резерве. При отказе устройства из одного полукомплекта, автоматически включается аналогичное устройство из другого полукомплекта.

Данную архитектуру можно определить как наиболее оптимальную для МКА, имеющего небольшие значения для срока активного существования (САС) КА (от 2 до 5 лет). Он обеспечивает достаточную для МКА надежность при приемлемом уровне аппаратного резервирования. Для аппаратов со сроком САС более 5 лет представленная архитектура хорошо мас-

штабируется до более высоких значений кратности резервирования: 2 или 3. Для аппаратов с совсем малым САС (1–2 года) и с малым бюджетом разработки от второго маршрутизатора и резервного полукомплекта можно отказаться.

Устройствами, входящими в каждый полукомплект для МКА, являются:

- модуль бортового компьютера (БК), реализующий основные вычислительные и управляющие действия на борту МКА;
- модуль низкочастотной части командно-измерительной системы (НЧ КИС), предназначенный, с одной стороны, для сбора телеметрических данных от систем КА, преобразования их в телеметрические пакеты и передачи пакетов в высокочастотную часть командно-измерительной системы (ВЧ КИС) для их передачи по радиоканалу; с другой стороны, для приема от ВЧ КИС телекоманд управления, их дешифрации и передачи по адресуемым системам КА, в основном в БК;
- модуль преобразования интерфейсов (МИ) имеет чисто технологическую функцию; он предназначен для преобразования некоторого множества интерфейсов, используемых системами космического аппарата (UART, CAN и др.) к интерфейсу SpaceWire; кроме того, он может принимать аналоговые сигналы с датчиков и передавать сигналы на исполнительные устройства (ИУ);
- модуль питания (МП), предназначен для стабилизации напряжения, поступающего в БКУ от внешней бортовой питающей сети.

Для обеспечения жестких требований к массогабаритным показателям КА принципиально важным решением стал отказ от внутриблочной кабельной сети. В настоящее время масса кабельной сети составляет от 7 до 10 % от веса всего КА. Постоянно разрабатываются новые подходы по оптимизации кабельной сети в сторону уменьшения веса. Но лучшим решением мог бы стать отказ от кабельных соединений, конечно, в тех случаях, когда это выполнимо, например,

для организации внутрислотных интерфейсов. Для создания внутрислотных связей в проекте предложено использовать межплатные соединители и стековую структуру построения конструкции БКУ. Стековая конструкция БКУ представлена на рис. 2. Подобная стековая конструкция уже прошла апробирование в ряде зарубежных изделий, для ее реализации был разработан особый тип межплатных соединителей с так называемыми гиперболическими контактами [6], обеспечивающих высокое качество соединения. По межплатным соединителям происходит как передача информационных сигналов, так и питающих напряжений. Металлическая рамка модуля обеспечивает необходимую радиационную защиту и нормальный тепловой режим.

Принятая стековая конструкция определила следующую схему взаимодействия устройств БКУ МКА с сетевой архитектурой (рис. 3). БКУ состоит из пяти плат, соединенных межплатными разъемами. На каждой плате располагаются по два одинаковых устройства из разных полукомплектов. Одно устройство является основным (включено), другое находится в ненагруженном резерве (выключено). Устройства на плате гальванически развязаны по питанию. Переключение устройств в случае отказа основного происходит коммутатором питания, располагаемым на плате питания.

Все устройства БКУ связаны SpaceWire. Маршрутизаторы SpaceWire каждого полукомплекта обеспечивают как внутренние связи посредством межплатных разъемов, так и внешние посредством кабельных

соединений. Плата интерфейсов осуществляет связь с внешними устройствами, не имеющими SpaceWire.

В качестве кодека SpaceWire определен открытый кодек SpaceWireLight [7], отличающийся от аналогичных открытых кодеков хорошей технической поддержкой. Тестирование кодека аппаратной реализации кодека SpaceWireLight с помощью аппаратного тестера SpW Conformance Tester and Packet Generator показало его полное соответствие стандарту ECSSE-ST-50-12C SpaceWire – Links, nodes, routers and networks [8].

Анализ процессоров для реализации БК показал, что сегодня из имеющихся космических процессоров наилучшим выбором является процессор LEON 2/3 по следующим причинам:

- процессорное IP-ядро является открытым, оно базируется на открытой архитектуре SPARC v8;
- процессор LEON разработан по инициативе Европейского космического агентства (ESA) и рекомендован ESA для применения в новых европейских проектах;
- процессор поддерживается двумя крупными в области создания космической компонентной базы компаниями: европейским отделением компании Atmel и американской Aeroflex;
- имеются отказоустойчивые версии FT процессора, известна его отказоустойчивая архитектура;
- процессор имеет хорошую летную историю;
- процессор взят в разработку БК для КА средних и тяжелых типов Ижевским радиозаводом, ведущим производителем бортовых космических систем, в том числе и для ОАО «Информационные спутниковые системы».

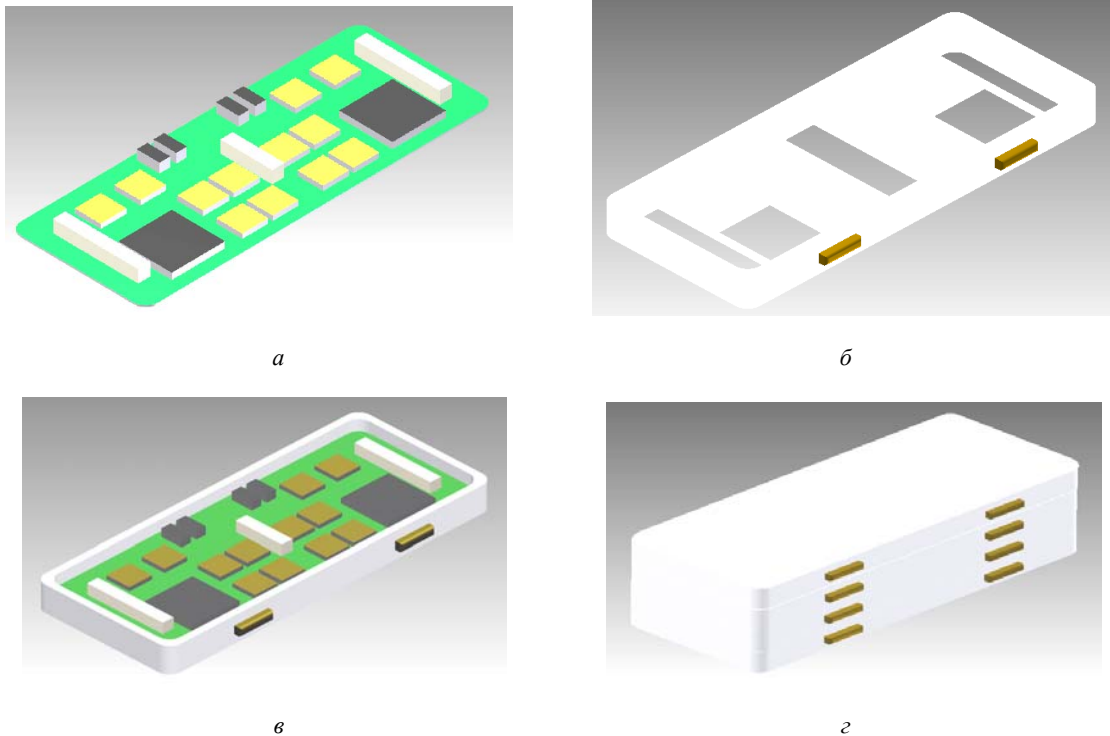


Рис. 2. Стековая конструкция БКУ МКА:
а – плата модуля БКУ; *б* – рамка для платы модуля; *в* – модуль БКУ в сборе; *г* – модули БКУ в сборе

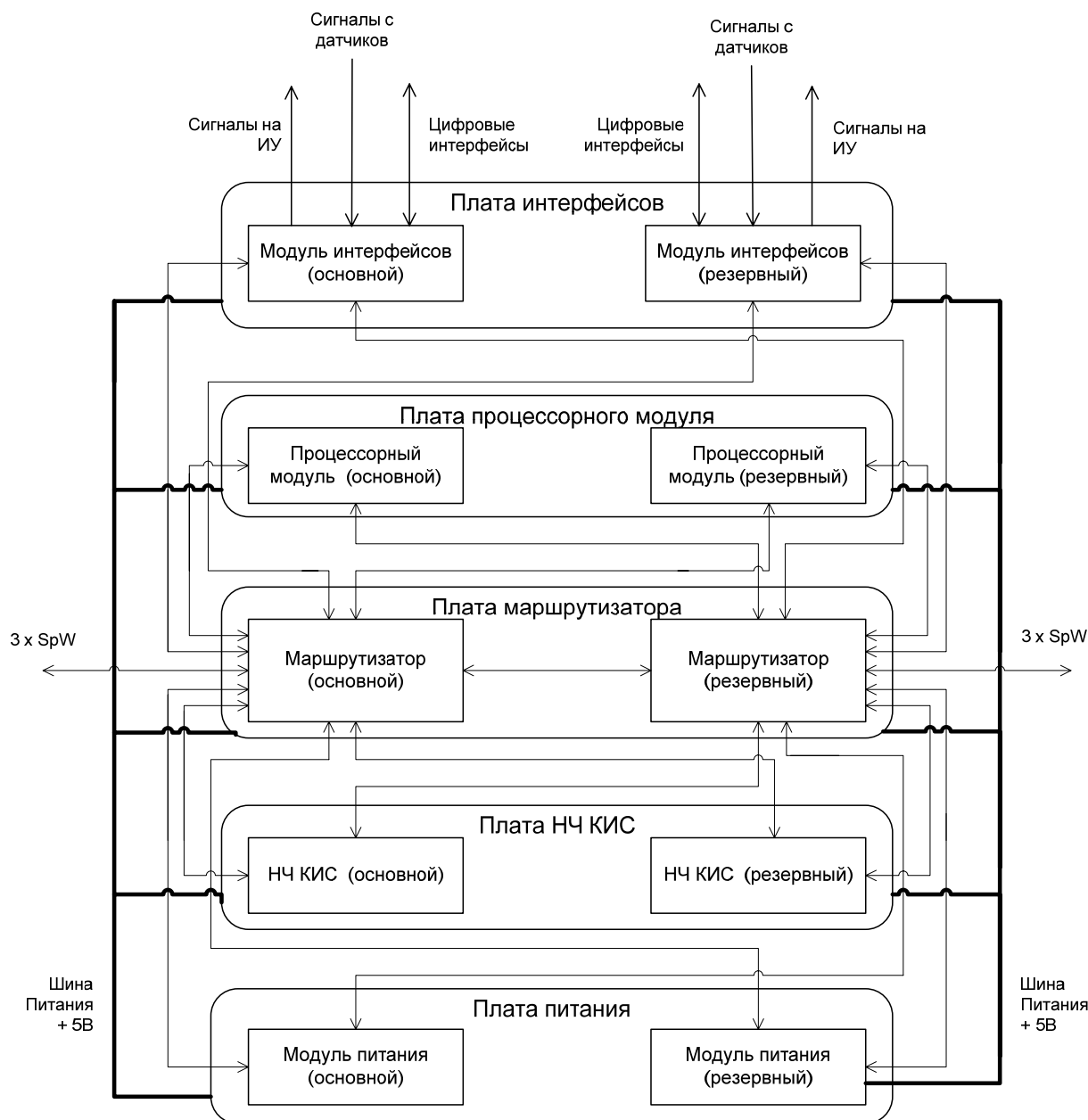


Рис. 3. Структурная схема БКУ для МКА

Проведенные экспериментальные исследования по оценке применимости процессора LEON 2/3 позволили получить количественные характеристики БК при различных типах ПЛИС (компаний Actel, Altera, Xilinx) и разной конфигурации процессора, на основании которых сделан вывод о возможности его использования в проекте. Так, для ПЛИС компании Xilinx Virtex 4 тактовая частота процессора составила 75 МГц, при этом ресурсы ПЛИС оказались заняты на 50 %.

Процессор LEON 2/3 поддерживают большое число операционных систем. Однако операционной системой БК определена открытая операционная система реального времени RTEMS, рекомендованная ESA для европейских космических миссий. Для данной операционной системы экспериментальными иссле-

дованиями определены минимально достаточная конфигурация процессора, в частности размеры кэш-памяти данных и инструкций.

НЧ КИС, как отмечалось выше, предполагается выполнить по стандартам ESA. Алгоритмы формирования транспортных пакетов и дешифрации команд являются «жесткими», а поэтому хорошо реализуемыми на ПЛИС. Аутентификацию телекоманд предполагается выполнить по спецификациям ESA, однако криптографический алгоритм заменяется на алгоритм, согласно ГОСТ 28147–89 «Системы обработки информации. Защита криптографическая. Алгоритм криптографического преобразования». Проведенные исследования показали, что ГОСТ 28147–89 вписывается в схему стандартов и рекомендаций ESA. Поэтому он может быть рекомендован для отечественных

КА для реализации режима аутентификации телекоманд [9].

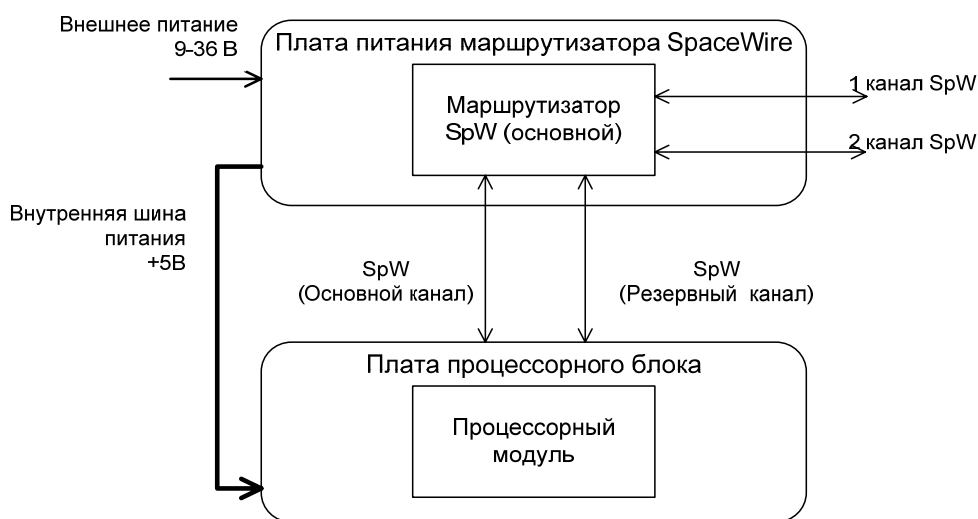
Для отработки основных проектных решений разработан и изготовлен экспериментальный макет БКУ МКА, представленный на рис. 4.

Макет состоит из двух устройств: модуля питания и маршрутизатора SpaceWire и процессорного модуля LEON 3. Связь между ними осуществляется посредством двух линков SpaceWire: основного и резервного. Кроме того, имеются два канала SpaceWire для подключения внешних устройств. Конструкция является стековой с использованием межплатных соединителей, располагаемых на противоположных сторонах плат. Оба устройства выполнены на ПЛИС компании Actel A3PE1500, для которой имеются радиационно-стойкие аналоги.

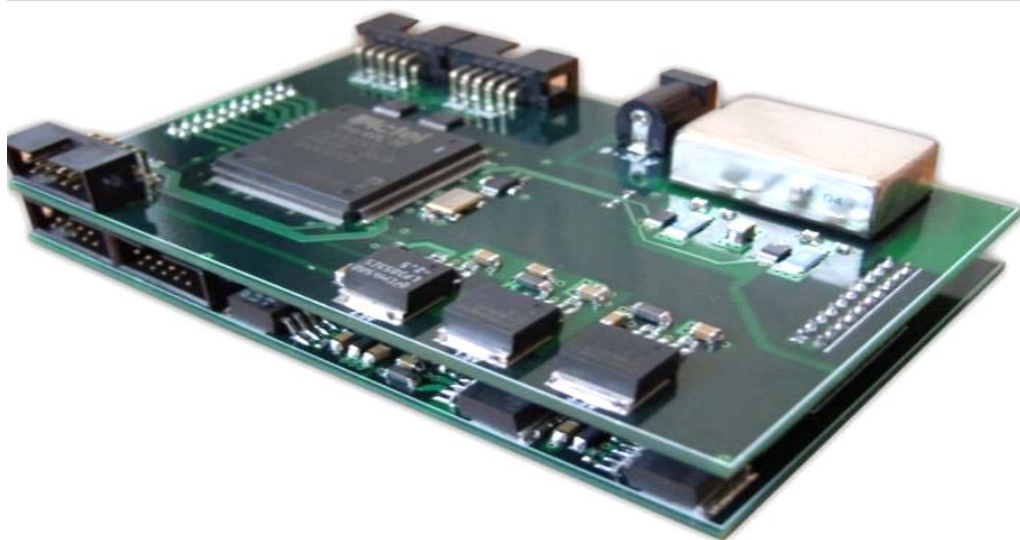
Основные характеристики макета:

- тактовая частота процессора – 30 МГц;
- ОЗУ – 8 МБ;
- ПЗУ – 8 МБ;
- максимальная скорость SpaceWire – 120 Мбит/с;
- количество портов маршрутизатора – 4;
- общее потребление – 2,5 Вт;
- габариты – 122 мм × 78 мм × 30 мм;
- масса – 0,2 кг.

Экспериментальные исследования макета, включавшие тесты производительности процессорного модуля, тесты памяти, тесты сети SpaceWire и маршрутизатора, тесты операционной системы, подтвердили его работоспособность. Работы над созданием макета показали реализуемость принятых проектных решений.



а



б

Рис. 4. Экспериментальный макет БКУ для МКА:
а – структурная схема; б – внешний вид

Таким образом, в результате проведенных исследований определена общая концепция проектирования БКУ для МКА, апробированная разработкой, изготовлением и тестированием экспериментального макета.

Библиографические ссылки

1. Рыбаков А. Н. Открытые компьютерные COTS-технологии в военных приложениях // Мир компьютерной автоматизации. № 4. 1999. С. 4–8.
2. Packet Telecommand Standard ESA PSS-04-107.ESA, 1992.
3. Packet Telemetry Standard ESA PSS-04-105.ESA, 1988.
4. Немудров В., Мартин Г. Системы на кристалле. Проектирование и развитие. М. : Техносфера, 2004. С. 216.
5. Сетевая архитектура бортового комплекса управления / Д. А. Никитин [и др.] // Технические и

программные средства систем управления, контроля и измерения : тр. конф. М. : ИПУ РАН, 2012. С. 1539–1546.

6. PCB Connectors – HDLP. URL: <http://www.hypertac.com/webapp/en-gb/products/223/pcb-connectors-hdhp.aspx/>

7. Joris van Rantwijk. SpaceWire Light v20110709. URL: http://opencores.org/project,spacewire_light.

8. ECSSE-ST-50-12C SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2008. 129 с.

9. Жданов О. Н., Чалкин Т. А., Лукин Ф. А. Аутентификации канала телеуправления малым спутником аппаратными криптографическими средствами // Электронные средства и системы управления : материалы докл. Междунар. науч.-практ. конф. Томск : В-Спектр, 2011. С. 215–219.

V. Kh. Khanov, A. V. Shakhmatov, S. A. Chekmaryov, M. Yu. Vergazov, F. A. Lukin

PRINCIPLES OF ON-BOARD CONTROL COMPLEX DEVELOPMENT FOR SMALL SPACECRAFTS

This paper describes the main technical decisions made during design of the on-board control complex for small spacecrafts and determines open technologies and products used in the project. Network architecture and on-board control complex design are presented. The results of the development of the experimental model are given.

Keywords: small spacecrafts, on-board control complex, network architecture, on-board control complex design, on-board control complex experimental model.

© Ханов В. Х., Шахматов А. В., Чекмарев С. А., Вергазов М. Ю., Лукин Ф. А., 2012