
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ НАНОСПУТНИКОВ

УДК 004.2; 621.398
DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-403-408

БОРТОВОЙ КОМПЛЕКС УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НАНОСПУТНИКА CUBESAT НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ „СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ“

В. Х. ХАНОВ, А. В. ШАХМАТОВ, С. А. ЧЕКМАРЕВ, Е. С. ЛЕПЕШКИНА

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева,
660037, Красноярск, Россия
E-mail: khvkh@mail.ru*

Представлены результаты разработки бортового комплекса управления для наноспутников. В качестве основной элементной базы определены две программируемые логические интегральные схемы класса FPGA, вмещающие две „системы на кристалле“, связанные между собой сетевым интерфейсом SpaceWire. В первой FPGA размещен бортовой компьютер на базе процессора LEON3, во второй — контроллер системы электропитания и подсистема сбора информации с аналоговых датчиков. На базе технологии SpaceWire формируется бортовая сеть наноспутника, маршрутизирующие коммутаторы которой встроены в „системы на кристалле“ бортового комплекса управления. Для обеспечения сбоеустойчивости комплекса внешняя и внутренняя память (кэш и регистровый файл процессора LEON3) бортового компьютера защищены устройством обнаружения и коррекции однократных ошибок. Технические характеристики экспериментального образца бортового комплекса управления не уступают характеристикам таких комплексов для космических аппаратов малого, среднего и тяжелого классов. Однако потребляемая мощность разработанного бортового комплекса управления превосходит возможности солнечных батарей наноспутника формата 1U, поэтому его можно рекомендовать для сверхмалых космических аппаратов стандарта CubeSat формата 3U и выше.

Ключевые слова: *наноспутник, бортовой комплекс управления, система на кристалле, программируемые логические интегральные схемы, бортовая сеть наноспутника*

Космические аппараты стандарта CubeSat широко используются для различных научно-исследовательских, научно-образовательных и инженерно-технологических целей [1]. К инженерно-технологическим целям относится, в первую очередь, апробирование новых технических решений, перспективных для применения при создании бортовых систем космических аппаратов (КА) среднего и тяжелого классов. Представляемая разработка преследовала именно эту цель: используя технические решения, имеющие первостепенную перспективу для внедрения в отечественном космическом приборостроении бортовых систем управления, разработать бортовой комплекс управления (БКУ) для наноспутников класса CubeSat. К числу таких решений относится реализация „системы на кристалле“ (СНК), основанной на процессоре LEON3 [2], в базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), а также сетевая архитектура БКУ и в целом всего наноспутника на основе сети SpaceWire [3]. В соответствии с основным применяемым техническим решением разработка получила шифр

БКУ-СнК. С учетом возможностей технологии СнК [4] дополнительной задачей представляемой работы являлась реализация максимально возможных требований к БКУ-СнК по составу подсистем, функционалу, компонентной элементной базе, какие только можно выполнить для жестких условий, определяемых механической спецификацией на CubeSat [5].

В дополнение к традиционно возлагаемым на БКУ функциям, по замыслу разработки, БКУ-СнК является устройством, определяющим конфигурацию бортовой сети наноспутника [6]. Помимо основных своих подсистем, он содержит центральный маршрутизирующий коммутатор (МК_ц), обуславливающий топологию сети типа „звезда“ (рис. 1). Другие системы наноспутника — система ориентации (СО), командно-измерительная система (КИС), системы полезной нагрузки (ПН₁) — содержат периферийные маршрутизирующие коммутаторы МК₁, связанные линками SpaceWire не только с МК_ц, но и между собой. Таким образом, „звезда“ дополняется топологией „кольцо“. Это решение повышает отказоустойчивость сети: при отказе любого сегмента сети всегда имеется альтернативный маршрут передачи данных до любой системы наноспутника.

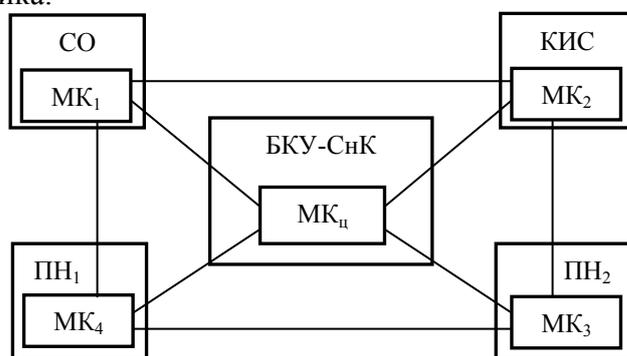


Рис. 1

БКУ-СнК состоит из следующих подсистем: бортового компьютера, подсистемы сбора аналоговых данных для телеметрической подсистемы наноспутника, контроллера системы электропитания, включая контрольно-распределительное устройство питания аппаратуры CubeSat. Кроме того, как отмечалось выше, он включает основные инфраструктурно определяющие компоненты системы передачи данных и сетевой архитектуры наноспутника (центральный и периферийный маршрутизаторы). Основной компонентной базой проекта являются ПЛИС типа FPGA компании “Microsemi” (Actel, США): цифровая АЗРЕ3000L и аналого-цифровая AFS600 [7]. Структурная схема БКУ-СнК представлена на рис. 2. Конструкция платы предполагает пакетную организацию радиоэлектронного блока наноспутника с применением межплатных соединителей, что позволило отказаться от кабельной сети наноспутника [8].

Основу СнК, имплементированной в цифровую FPGA АЗРЕ3000L, составляют IP-блоки из открытой библиотеки GRLIB компании “Cobham Gaisler” (Швеция) [9]. Из состава этой библиотеки используются блоки процессора LEON3, контроллера памяти Controller Memory, внутрисхемного отладчика DSU, внутрисистемной шины AMBA и внешних цифровых интерфейсов. Также в СнК размещен маршрутизирующий коммутатор SpaceWire (SpW) с переменным количеством портов собственной разработки [10].

Как видно на схеме, практически весь комплекс необходимых блоков для работы процессора размещен внутри ПЛИС. В виде отдельных микросхем выполнены только блоки памяти и драйверы физического уровня некоторых интерфейсов. Оперативная память представляет собой набор из двух микросхем CY62187EV30LL, каждая из которых имеет объем 64 Мбит и шину данных 16 бит. Для защиты памяти от воздействия заряженных частиц с высокой энергией (SEU) применяется защита данных оперативной памяти кодом Хсяо [11], который позволяет исправить единичную ошибку и обнаружить двойную. Данное решение приводит к необходимости хранения еще дополнительных 8 бит на каждое 32-битовое слово в специальной EDAC-памяти. Аналогичная по применяемому корректирующему коду защита

данных применена к внутренней памяти (кэш и регистровый файл) процессорного ядра LEON3, что потребовало внесения минимальных изменений в его внутреннюю структуру.

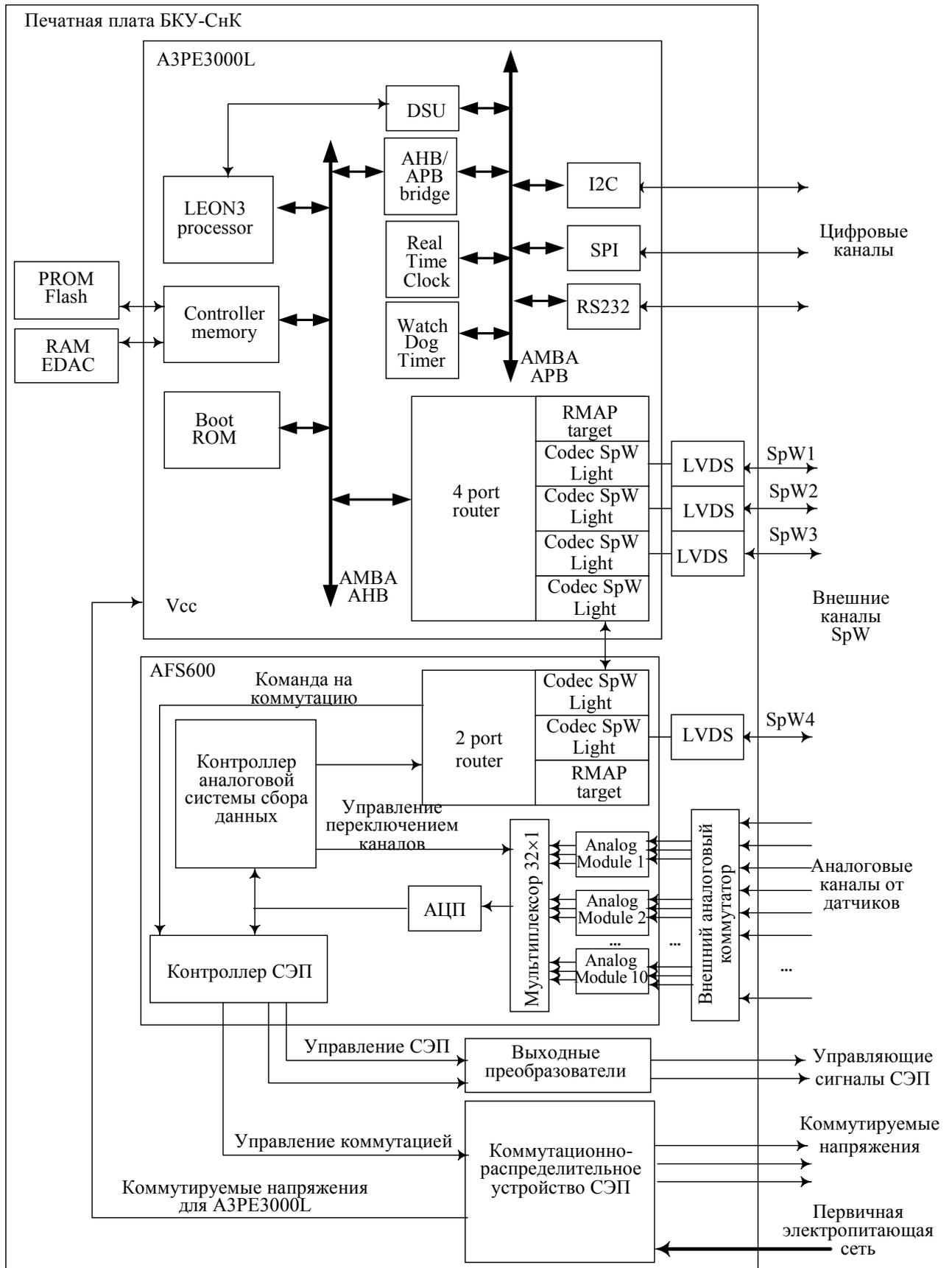


Рис. 2

Управление системой электропитания (СЭП), коммутация питания, сбор и обработка аналоговых параметров осуществляются безпроцессорной СнК, выполненной на ПЛИС AFS600; ее отличительной особенностью являются широкие возможности по работе с аналоговыми сигналами благодаря встроенному аналого-цифровому преобразователю и 30 независимым входным аналоговым трактам.

Взаимодействие между цифровой и аналого-цифровой ПЛИС, так же как и во всем наноспутнике, осуществляется с помощью интерфейса SpaceWire. Для этого аналого-цифровая ПЛИС имеет 2-портовый маршрутизатор SpaceWire, подобный маршрутизатору бортового компьютера и отличающийся отсутствием контроллера шины AMBA 2.0. Один порт маршрутизатора связан с маршрутизатором в FPGA A3PE3000L, другой порт — с периферийным маршрутизатором в командно-измерительной системе. Кодеком SpaceWire является открытый кодек SpaceWireLight [12]. Для конфигурирования таблиц маршрутов используется протокол RMAP [13], для чего каждый маршрутизатор БКУ-СнК имеет RMAP-контроллер [14] собственной разработки, определяемый как нулевой порт.

Питание устройств CubeSat, в том числе и бортового компьютера, осуществляется через коммутационно-распределительное устройство системы электропитания. При сбое бортового компьютера это устройство по поступившей от КИС команде имеет возможность кратковременно его отключить, а затем снова включить, чем обеспечивается дополнительная отказоустойчивость БКУ-СнК.

Внешний вид БКУ-СнК представлен на рис. 3.

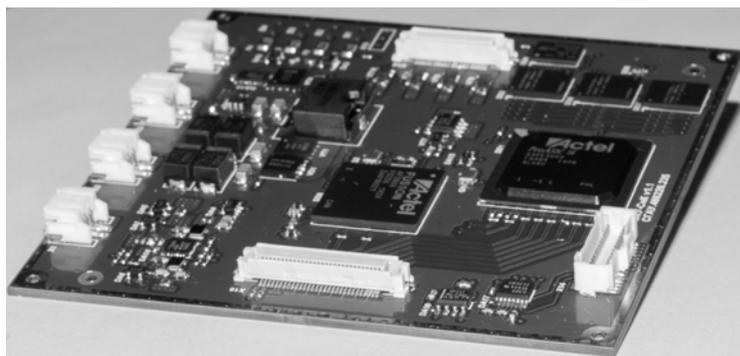


Рис. 3

В результате проведенных работ был изготовлен экспериментальный образец БКУ-СнК. Экспериментальные исследования подтвердили следующие технические характеристики БКУ-СнК.

Тактовая частота процессора LEON3, МГц	25
Размер оперативной памяти, Мбайт	16
Размер ПЗУ (Flash), Мбайт	8
Количество внешних портов маршрутизаторов SpaceWire	4
Максимальная скорость по сети SpaceWire, Мбит/с	100
Количество аналоговых входов, не менее	30
Дополнительные внешние интерфейсы	SPI, I2C, RS232
Энергопотребление, Вт	1
Размеры, мм	95×95
Масса, г	50,58

Можно отметить, хотя это сравнение не вполне корректно, что полученные характеристики соответствуют, а по некоторым параметрам превосходят отечественные системы, например бортовой компьютер Салют-32М [15], используемый на КА „Глонасс-М“. Единственным ограничивающим фактором является относительно высокая потребляемая мощность БКУ-СнК (порядка 1 Вт), тогда как с солнечных батарей CubeSat формата 1U можно снимать не более 1,5—2 Вт. Потребляемая мощность БКУ-СнК (в данной разработке) нарушает энергетический баланс наноспутника, для восстановления которого необходимо либо принятие

дополнительных системо- и схмотехнических мер, либо ограничение области применения разработанного экспериментального образца БКУ-СНК, т.е. применение его для наноспутников класса CubeSat начиная с форм-факторов 3U и выше.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.574.21.0041 от 19.06.2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключников В. Ю., Клементьев С. А. Наноспутники — наиболее перспективный класс малых космических аппаратов // *Инноватика и экспертиза*. 2016. Вып. 2 (16). С. 97—105.
2. LEON3FT Fault-Tolerant Processor [Электронный ресурс]: <<http://www.gaisler.com/index.php/products/processors/leon3ft>>.
3. ECSSE-ST-50-12C. SpaceWire — Links, nodes, routers and networks. 2008. P. 129.
4. Немудров В., Мартин Г. Системы на кристалле. Проектирование и развитие. М.: Техносфера, 2004. С. 216.
5. CubeSat Design Specification Rev. 13. California State Polytechnic University [Электронный ресурс]: <http://cubesat.org/images/developers/cds_rev13_final2.pdf>.
6. Khanov V. Kh., Borodina T. V. Topologies of the onboard networks for small spacecraft // Proc. Intern. Conf. on Information Processing and Control Engineering (ICIPCE-2015), Moscow, Russia, 15—17 Apr., 2015. P. 5
7. Microsemi. FPGA Families [Электронный ресурс]: <<https://www.microsemi.com/products/fpga-soc/fpgas>>.
8. Ханов В. Х., Вергазов М. Ю., Чекмарев С. А., Шахматов А. В., Лукин Ф. А. Концепция создания бортового комплекса управления для малых космических аппаратов // *Вестн. Сибирского гос. аэрокосм. ун-та*. 2012. № 5 (45). С. 144—149.
9. GRLIB IP Library User's Manual Version 1.4.1 - b4156. 2015. May. P. 92.
10. Shakhmatov A. V., Chekmarev S. A., Khanov V. Kh., Vergasov M. Y. Spacewire router IP-core with priority adaptive routing // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 94. P. 7.
11. Hsiao M. A class of optimal minimum odd-weight column SEC-DED codes // *IBM Journal of Research Development*. 1970. Vol. 14, N 4. P. 395—401.
12. Rantwijk J. SpaceWire Light, 2010 [Электронный ресурс]: <<http://www.opencores.org/>>.
13. ECSS-E-ST-50-52C. SpaceWire — Remote memory access protocol. 2010. P. 109.
14. Khanov V. Kh., Shakhmatov A. V., Chekmarev S. A. A verification system of RMAP protocol controller // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (XVII Intern. Sci. Conf. “Reshetnev Readings”). 2015. Vol. 70. P. 5.
15. Бортовые и наземные радиотехнические комплексы. Каталог продукции. 2013. ОАО „Ижевский радиозавод“. С. 24 [Электронный ресурс]: <http://www.irz.ru/uploads/files/catalog_11.pdf>.

Сведения об авторах

- Владислав Ханифович Ханов** — канд. техн. наук, доцент; СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Институт информатики и телекоммуникаций; E-mail: khvkh@mail.ru
- Александр Владимирович Шахматов** — СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Институт информатики и телекоммуникаций; инженер; E-mail: sanecsan@rambler.ru
- Сергей Анатольевич Чекмарев** — канд. техн. наук, доцент; СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Институт информатики и телекоммуникаций; E-mail: zaq259@yandex.ru
- Екатерина Сергеевна Лепешкина** — СибГУ им. М. Ф. Решетнева, Институт информатики и телекоммуникаций; инженер; E-mail: klepka1111.93@mail.ru

Поступила в редакцию
14.02.18 г.

Ссылка для цитирования: Ханов В. Х., Шахматов А. В., Чекмарев С. А., Лепешкина Е. С. Бортовой комплекс управления для наноспутника CubeSat на базе технологии „система на кристалле“ // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61, № 5. С. 403—408.

**CUBESAT ONBOARD CONTROL SYSTEM
ON THE BASE OF „SYSTEM-ON-CHIP“ TECHNOLOGY**

V. Kh. Khanov, A. V. Shakhmatov, S. A. Chekmarev, E. S. Lepeshkina

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
660037, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: khvkh@mail.ru*

Results of development of onboard control system for nanosatellite are presented. The system is a single-board device corresponding to dimensional specifications of CubeSat-class Spacecraft. The main idea of the development is creating of such an onboard control system that the CubeSat general operational requirements are maximally satisfied. Moreover, the used technologies are to satisfy prospects of future development of domestic electronic instrument making industry. The hardware components are represented by two FPGAs, included two „systems-on-chip“ which are interconnected by SpaceWire interface. The first FPGA includes an onboard computer based on the LEON3 processor; the second FPGA includes a power system controller and a subsystem for collecting information from analog sensors. The SpaceWire technology allows creating onboard network of nanosatellite with routing switches included in „system-on-chip“ of the onboard control system. To ensure the fault tolerance of the complex, the external and internal memory (cache and register file of the LEON3 processor) of the onboard computer are protected by a single-error detection and correction device. The power-switching device allows removing power from all nanosatellite systems including the onboard computer. Technical characteristics achieved in experimental model of the onboard control complex are not inferior to those of small, medium and heavy spacecraft. However, the consumed power of the developed onboard control system exceeds capabilities of solar panels of a 1U-nanosatellite, so it can be recommended for CubeSat-class spacecrafts starting from 3U and above.

Keywords: nanosatellites, onboard control system, system-on-chip, FPGA, nanosatellite onboard network

Data on authors

- | | |
|--------------------------------|---|
| Vladislav Kh. Khanov | — PhD, Associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Institute of Computer Science and Telecommunications; E-mail: khvkh@mail.ru |
| Aleksandr V. Shakhmatov | — Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Institute of Computer Science and Telecommunications; Engineer; E-mail: sanecsan@rambler.ru |
| Sergey A. Chekmarev | — PhD, Associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Institute of Computer Science and Telecommunications; E-mail: zaq259@yandex.ru |
| Ekaterina S. Lepeshkina | — Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Institute of Computer Science and Telecommunications; Engineer; E-mail: klepka1111.93@mail.ru |

For citation: Khanov V. Kh., Shakhmatov A. V., Chekmarev S. A., Lepeshkina E. S. CubeSat onboard control system on the base of „system-on-chip“ technology. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 5. P. 403—408 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-403-408