

УДК 681.3

БОРТОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ НЕГЕРМЕТИЧНЫХ ДОЛГОРЕСУРСНЫХ КА

И. В. Козлов

ОАО «Ижевский радиозавод»
Россия, 426034, Ижевск, ул. Базисная, 19. E-mail: ivkozlov@irz.ru

Эффективность и автономность функционирования информационных спутников существенно возросла после применения на них бортовых цифровых вычислительных комплексов.

Первые образцы бортовых цифровых вычислительных комплексов, созданные на ОАО «ИРЗ» для космических аппаратов информационного обеспечения, функционировали внутри герметичного контейнера спутника: Салют-32, Салют-32-02. Для негерметичных спутников связи на базе БЦВК «Салют-32-02» был создан безрамный вариант «Салют-32М». Использование в БЦВК унифицированного процессора отечественного производства с VAX архитектурой позволило применить задел по программному обеспечению и сократить сроки реализации космических проектов.

Для перспективных негерметичных космических аппаратов создан БЦВК «Салют-32М1» на основе зарубежного процессора AT697F, в котором устойчивость элементов комплекса к сбоям обеспечена применением тройного модульного резервирования внутри логических узлов, а устойчивость к отказам обеспечена дублированием составных частей БЦВК и возможностью реконфигурации комплекса.

Ключевые слова: бортовой вычислительный комплекс, космический аппарат, процессор.

ONBOARD COMPUTER COMPLEX FOR UNPRESSURISED LONG-RESOURCED SPACECRAFTS

I. V. Kozlov

JSC "Izhevskiy Radiozavod"
19 Bazisnaja str., Izhevsk, 426034, Russia. E-mail: ivkozlov@irz.ru

Efficiency and independence of information satellites operation increased considerably after the use of onboard computer complexes.

The first onboard computer prototypes created in the JSC "Izhevskiy Radiozavod" (IRZ) for information space vehicles operated inside the satellite pressurized container. For unpressurised communication satellites based on "Salut 32 02" onboard computers (OBCs) a frame-free "Salut 32M" OBC was developed. Use of the domestic unified processor inside OBC based on the VAX architecture allows to use the software backlog and to reduce timeframe of space projects implementation.

The article contains an overview of OBCs developed by IRZ and includes description of the OBS developed for the use in perspective spacecraft platforms produced by JSC "academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems".

Keywords: onboard computer, spacecraft, processor.

Группа компаний «Ижевский радиозавод» является крупным производителем радиоэлектронной аппаратуры в России и имеет большой опыт разработки бортовых и наземных приборов для космической отрасли. ОАО «ИРЗ» разрабатывает и производит широкий спектр продукции для космической отрасли:

- бортовую аппаратуру для непилотируемых космических аппаратов;
- бортовую аппаратуру ракетносителей и разгонных блоков;
- бортовую аппаратуру для пилотируемых космических кораблей;
- наземные радиотехнические комплексы.

Предприятие обладает всеми необходимыми технологиями и производственной базой для создания

качественной радиоэлектронной аппаратуры, отвечающей современным требованиям.

ОАО «Ижевский радиозавод» многие годы поставляет бортовую аппаратуру для ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева», в том числе бортовой цифровой вычислительный комплекс (БЦВК).

Работы по созданию вычислительного комплекса для космических аппаратов начались на Ижевском Радиозаводе еще в 1999 г.

За период с 1999 по 2003 гг. был создан БЦВК «Салют-32» для космических аппаратов (КА) «Глонасс-М». Дальнейшая модернизация комплекса позволила к 2007 г. создать БЦВК «Салют-32-02», который и в настоящее время производится для космических аппаратов «Глонасс-М».

Далее по заданию ОАО «ИСС» были проведены работы по созданию БЦВК для негерметичных КА на базе БЦВК «Салют-32-02» и в 2010 году был создан безрамный вариант «Салют-32М» для использования в негерметичных космических аппаратах. БЦВК «Салют-32М» используется в коммерческих проектах – АМОС5, Телком 3, Ямал 300К, Экспресс АМ5/АМ6 и других проектах ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева.

Модернизация БЦВК «Салют» проводилась путем применения оригинальных технических решений, интеграции составных частей и использования современных электронных компонентов отечественного и зарубежного производства.

Потребительские свойства БЦВК улучшались на каждом этапе модернизации. Так в БЦВК «Салют-32М» по сравнению с БЦВК «Салют-32» в два раза уменьшена масса и энергопотребление, увеличен срок активного существования с 7 до 15 лет.

Во всех БЦВК, выпускаемых в настоящее время нашим предприятием, используется процессор отечественного производства с VAX архитектурой. Использование одного и того же процессора во всех БЦВК, поставляемых для КА ОАО «ИСС» в течение почти 10-летнего периода, позволило Заказчику использовать задел по программному обеспечению (ПО) для успешной реализации коммерческих проектов в сжатые сроки.

На текущий момент достигнуты минимальные массогабаритные характеристики и максимальная производительность БЦВК для выбранного внутреннего построения и используемого процессора.

Внешний вид БЦВК «Салют-32» и БЦВК «Салют-32-02» представлен на рис. 1, внешний вид БЦВК «Салют-32М» представлен на рис. 2.

Всего изготовлено более 40 комплектов БЦВК «Салют-32-02», большая часть из которых успешно эксплуатируется. Изготовлено около десятка БЦВК

«Салют-32М», два из которых эксплуатируются штатно.

С началом работ ОАО «ИСС» по созданию перспективных платформ КА возникла потребность в бортовом вычислительном комплексе, значительно превосходящем по характеристикам образцы БЦВК, которые поставлялись нашим предприятием.

Требования к перспективному бортовому вычислителю выдвинутые специалистами ОАО «ИСС» невозможно было выполнить путем проведения дальнейшей модернизации БЦВК. Поэтому возникла необходимость в создании БЦВК с улучшенными техническими характеристиками, с более производительным процессором, с большими объемами оперативной и перепрограммируемой памяти.

В 2011 г. на ОАО «ИРЗ» были начаты работы по созданию БЦВК «Салют-32М1». На начальном этапе работ были рассмотрены возможные варианты реализации БЦВК и выбран процессор для перспективного вычислительного комплекса.

При выборе процессора были рассмотрены различные варианты процессоров и процессорных ядер отечественного и зарубежного производства. В результате изысканий был выбран процессор AT697F европейской компании Atmel. Выбранный процессор и его предшественники имеют богатую «летную историю» и используются на текущий момент во многих проектах Европы и Америки, например, Columbus (2008), Proba2 (2009), JUNO (2011), SVOM/Éclair (2012), SWARM (2012), Sentinels (2013), Alphasat (2013) и т. д.

Процессор AT697F удовлетворяет текущим требованиям заказчика и, по нашим оценкам, перспективным требованиям на 10 лет вперед. Производитель, в свою очередь, гарантирует производство этого процессора в течение более чем 10 лет. Для поставки в Россию процессоров Atmel с любым уровнем квалификации не требуется разрешения Государственного Департамента США.

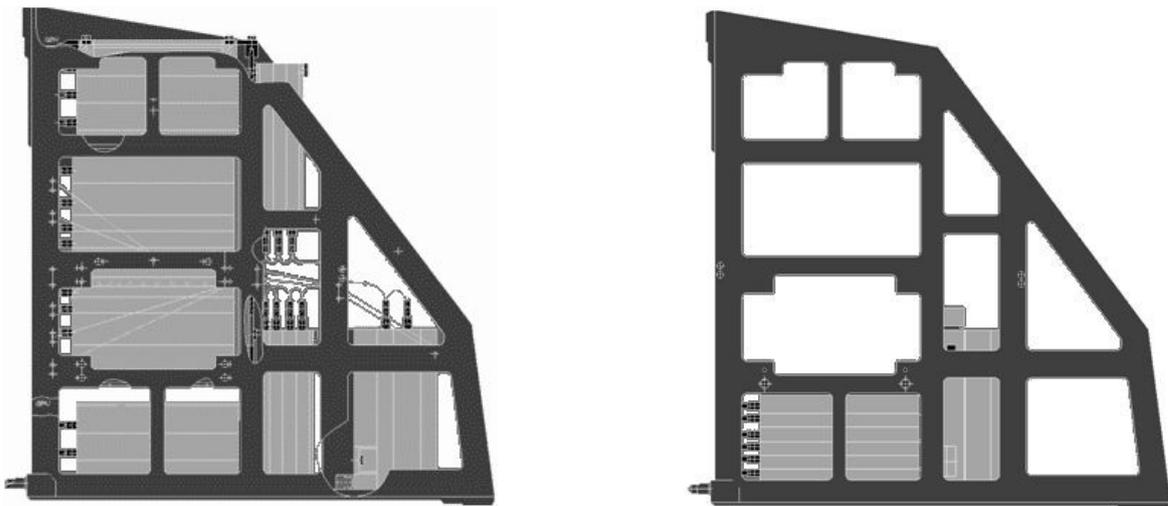


Рис. 1. Внешний вид БЦВК «Салют-32» и БЦВК «Салют-32-02»

Для достижения требуемых характеристик по производительности в БЦВК «Салют-32М1» применено отличное от предыдущих вариантов БЦВК внутреннее построение.

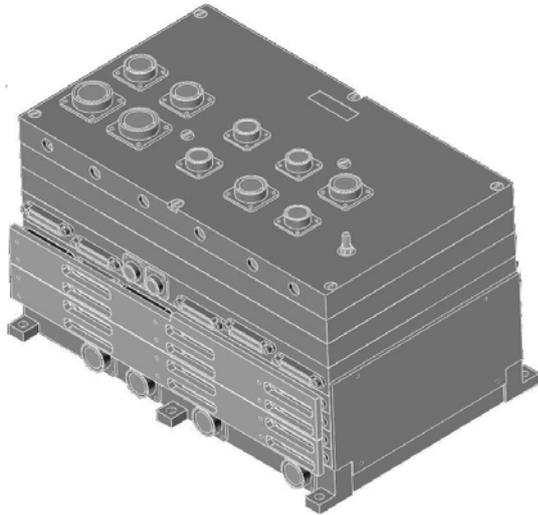


Рис. 2. Внешний вид БЦВК «Салют-32М»

В разработанных ранее БЦВК все составные части были троированы, в процессе функционирования непрерывно работали три канала, каждый из которых был запитан от отдельного источника вторичного электропитания. Восстановление информации в БЦВК при сбоях происходило за счет мажорирования информации от разных каналов на внешних мажоритарных элементах на каждом такте работы БЦВК.

В БЦВК «Салют-32М» и предшествующих модификациях БЦВК рост производительности ограничен как характеристиками применяемого процессора, так и временем восстановления информации, поступающей от разных каналов, на мажоритарные элементы каждого из работающих каналов БЦВК. Добиться требуемого роста производительности в создаваемом БЦВК не представлялось возможным без изменения внутреннего построения БЦВК.

При проектировании БЦВК «Салют-32М1» было принято решение обеспечить устойчивость элементов комплекса к сбоям путем применения тройного модульного резервирования внутри логических узлов, а устойчивость к отказам обеспечить дублированием составных частей БЦВК и возможностью реконфигурации комплекса.

Примененное решение позволит сохранить в создаваемом комплексе положительные свойства троированных БЦВК, создаваемых ранее, такие как:

- выполнение операции восстановления информации после единичного сбоя в БЦВК без прерывания вычислительного процесса и без привлечения программных ресурсов;

- нулевое время восстановления после сбоя.

Благодаря выбранному построению БЦВК «Салют-32М1» будет также обладать рядом дополнительных преимуществ, таких как:

- сокращение количества электронных компонентов (будут использованы два комплекта вместо трех);
- сокращение энергопотребления массы и габаритов;
- увеличение производительности и объемов памяти.

Еще одним значащим отличием создаваемого БЦВК от предшествующих вариантов является применение для информационных обменов между составными частями БЦВК последовательного интерфейса SpaceWire взамен троированного магистрального параллельного интерфейса (МПИ). Это решение позволит увеличить скорость и надежность обменов между составными частями БЦВК, уменьшить количество связей.

В результате проведенных работ был спроектирован БЦВК «Салют-32М1» с ожидаемыми Заказчиком характеристиками и предложен ОАО «ИСС» для применения в перспективных космических аппаратах.

По архитектуре БЦВК «Салют-32М1» – это резервированный вычислительный комплекс, реализующий функции управления и контроля КА под управлением бортового программного обеспечения (БПО) и взаимодействующий с бортовой аппаратурой космического аппарата посредством заданного набора интерфейсов.

БЦВК «Салют-32М1» имеет модульное построение, при этом все модули функционально закончены.

Данный БЦВК разрабатывается для КА с длительным сроком активного существования (не менее 15 лет). Требуемый уровень надежности и ресурс БЦВК «Салют-32М1» достигается применением электронных компонентов космического уровня качества и резервированием составных частей. Для повышения надежности функционирования и устойчивости к сбоям, вызванным факторами космического пространства, в БЦВК «Салют-32М1» используется тройное модульное резервирование всех цифровых узлов, включая процессор.

В таблице приведены основные технические характеристики БЦВК «Салют-32М», применяемого на текущий момент в проектах ОАО «ИСС», и БЦВК «Салют-32М1» предлагаемого для использования в перспективных КА.

Структура БЦВК «Салют-32М1» отражена на рис. 3.

Рассмотрим составные части БЦВК «Салют-32М1», отраженные на рис. 3.

Вычислительный модуль (ВМ) работает под управлением бортового программного обеспечения, реализует алгоритмы управления и контроля КА, выполняет вычислительные задачи. ВМ выполняет обмен информацией с бортовой аппаратурой КА и модулями БЦВК «Салют-32М1». ВМ выполняет подсчет временных интервалов от внутреннего или внешнего стабильного генератора, начальную обработку сигналов прерывания, реализует функции отладки БПО под управлением наземного комплекса отладки. Основным элементом ВМ является процессор AT 697F с архитектурой SPARC V8 (процессорное ядро Leon-2FT).

Технические характеристики БЦВК «Салют-32М» и БЦВК «Салют-32М1»

Характеристика	БЦВК «С-32М»	БЦВК «С-2М1»
Масса, кг	13,4	4,0
Габаритные размеры, мм	300×284×187	220×160×148,8
Энергопотребление в основном рабочем режиме, Вт, не более	30	10
Количество входов приема сигналов от внешних датчиков:	6 НК и 10 ИД	10 НК и 15 ИД
Процессорное ядро	VAX	SPARC V8 / LEON 2FT
Система команд	VAX 11/750	SPARC V8
Производительность ВМ (СЦВМ), MIPS/ MFLOPS	5 / 0,3	86 / 23
Объем ОЗУ / ПЗУ ВМ(СЦВМ), Мбайт	2 / 32Кбайт	8 / 8
Объем внешней памяти ОЗУ / ПЗУ, Мбайт	2 / 1	2 (MRAM)
Основные интерфейсы обмена информации с абонентами КА	МКО	МКО и SpaceWire
Срок эксплуатации по целевому назначению, лет	15,25	15,25

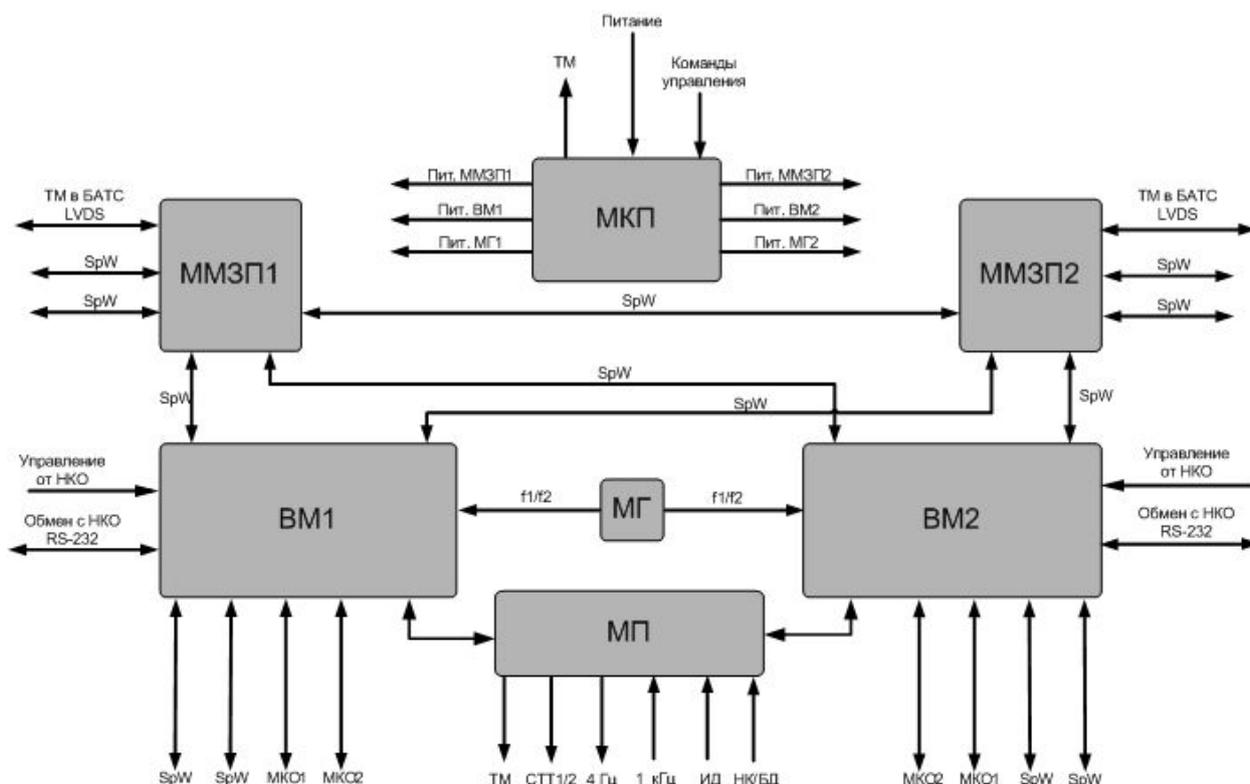


Рис. 3. Структура БЦВК «Салют-32М1»

Модуль преобразователей вычислительного модуля (МП ВМ) выполняет функции преобразования сигналов, принимаемых от бортовой аппаратуры (БА) КА в ВМ, и сигналов, формируемых ВМ в БА КА.

Модуль маршрутизатора и защищенной памяти (ММЗП) выполняет функции хранения контекстной информации в защищенной памяти и маршрутизации при обменах по внутренней сети SpaceWire. ММЗП содержит интерфейсы SpaceWire для подключения внешней бортовой аппаратуры и последовательный интерфейс для передачи телеметрии (ТМ) в бортовую аппаратуру телесигнализации (БАТС).

Модуль генераторов (МГ) формирует сигнал стабильной частоты для счетчиков бортового времени ВМ.

Модуль коммутации питания (МКП) формирует вторичное питание для составных частей БЦВК, вы-

полняет коммутацию питания модулей БЦВК по внешним импульсным командам.

Конструктивно БЦВК выполнен в виде моноблока. Модули имеют вертикальное расположение, что позволяет отводить тепло равномерно со всех составляющих БЦВК модулей. Расположение соединителей в верхней части БЦВК обеспечивает удобную стыковку внешних соединителей к прибору. Межмодульное соединение выполнено в нижней части прибора через микросоединители с многоточечным контактом, которые обеспечивают надежный контакт даже при значительных вибрационных воздействиях. Конструкция БЦВК позволяет менять приборный состав БЦВК без изменения конструкции входящих в состав модулей. Внешний вид БЦВК «Салют-32М1» приведен на рис. 4.

В БЦВК «Салют-32М1» предполагается использовать операционную систему заказчика, под операционную систему будут написаны драйвера устройств и штатные тесты, совместно будет разработан начальный загрузчик.

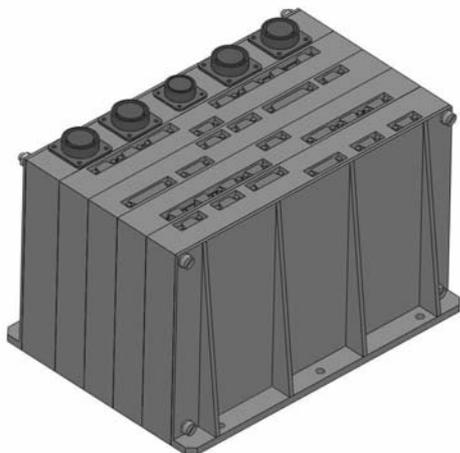


Рис. 4. Внешний вид БЦВК «Салют-32М1»

Процессорное ядро используемого процессора полностью соответствует спецификации SPARC V8 – это дает возможность использовать готовые операционные системы реального времени, такие как VX Works, RTEMS, LINXOS и других. При использовании готовых квалифицированных решений можно сократить время создания ПО.

На текущий момент на макетных образцах вычислительного модуля БЦВК «Салют-32М1» программами ОАО «ИРЗ» проведена работа по инсталляции операционной системы RTEMS, а также написаны драйвера под данную операционную систему.

Опыт разработчиков БЦВК, применение современных электронных компонентов высокой степени интеграции и оригинальных технических решений позволило значительно сократить сроки создания БЦВК «Салют-32М1». Разработка БЦВК для перспективных платформ КА была выполнена в два раза быстрее, по сравнению со сроками создания БЦВК для КА «Глонасс-М» и с меньшими затратами. Технические характеристики БЦВК «Салют-32М1» позволяют длительное время использовать БЦВК в проектах ОАО «ИСС». В БЦВК заложены решения, для интеграции в перспективе БЦВК «Салют-32М1» с другой аппаратурой, поставляемой нашим предприятием для бортового комплекса управления (БКУ) КА. Интеграция приборов БКУ КА в единый комплекс позволит сократить сроки наземной отработки космических аппаратов, улучшить характеристики и сократить стоимость БКУ КА.

Для перспективных негерметичных космических аппаратов создан БЦВК «Салют-32М1» на основе зарубежного процессора AT697F, в котором устойчивость элементов комплекса к сбоям обеспечена применением тройного модульного резервирования внутри логических узлов, а устойчивость к отказам обеспечена дублированием составных частей БЦВК и возможностью реконфигурации комплекса.

© Kozlov I. V., 2012

УДК 550.388.2

Посвящается памяти основателя иркутской школы радиоинтерферометрии ионосферных неоднородностей профессора Эдуарда Леонтьевича Афраймовича (12.03.1940–08.11.2009 гг.)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Ю. В. Ясюкевич^{1,2}, Н. П. Первалова¹, В. В. Демьянов³,
И. К. Едемский¹, А. А. Маркидонова^{1,2}

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291. E-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

²Иркутский государственный университет
Россия, 664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

³Иркутский государственный университета путей сообщения
Федерального агентства железнодорожного транспорта
России, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

Рассмотрена методика исследования состояния околоземного космического пространства с использованием регистрации полного электронного содержания и сбоев навигационно-временных определений по данным глобальных навигационных спутниковых систем.

Приведены данные по глобальному числу электронов в околоземного космического пространства, влиянию возмущенности околоземного космического пространства на увеличение числа сбоев, а также информация