

УДК 629.7.05:004.3

**БОРТОВЫЕ ЦИФРОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ СЕМЕЙСТВА  
«МАЛАХИТ» ДЛЯ РАБОТЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

© 2013 В. М. Антимиров, А. Б. Уманский, Л. Н. Шалимов

ФГУП НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова, г. Екатеринбург

Рассматривается новое поколение бортовых цифровых вычислительных систем семейства «Малахит», созданных в НПО автоматики. Описываются структура и архитектурные особенности этого поколения, обеспечивающие высокую надёжность функционирования аппаратуры в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов. В статье также затрагиваются вопросы дальнейшего развития БЦВС производства НПО автоматики.

*Система автоматического управления, бортовая цифровая вычислительная система, магистрально-модульная архитектура, БЦВС «Малахит».*

Развитие отечественной микроэлектроники для создания систем автоматического управления (САУ), предназначенных для работы в экстремальных условиях в реальном времени, относится к приоритетному направлению технической политики РФ [1]. Главной задачей на ближайшую перспективу является достижение научной, технической и технологической независимости в разработке и применении бортовых цифровых вычислительных систем (БЦВС), которые используются в САУ.

Для решения основной задачи – гарантированной доставки полезной нагрузки с необходимой точностью – современные САУ, создаваемые в НПО автоматики (НПОА), строятся на основе БЦВС. БЦВС, создаваемые НПОА, прошли длительный путь развития от аналоговых вычислителей и цифровых дифференциальных анализаторов до мощных цифровых систем, обеспечивающих гарантированную надёжность функционирования в жёстких климатических условиях, ионизирующих полях космического пространства, при больших механических нагрузках и активном противодействии в виде радиационного и электромагнитного излучения большой мощности и различного спектрального состава [2].

На сегодняшний день основными задачами развития БЦВС НПОА являются:

- существенное повышение точности вычислений и сокращение времени решения сложных навигационных задач и задач стабилизации;
- сокращение (минимизация) времени предстартовой подготовки;
- снижение массы, габаритов и энергопотребления;
- повышение надёжности функционирования с минимизацией затрат аппаратуры;
- обеспечение надёжности САУ в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов (в том числе радиационного воздействия).

Стремление обеспечить выполнение этих задач привело к тому, что в 90-х–2000-х гг. в НПОА были разработаны и запущены в производство два семейства БЦВС с принципиально новой магистрально-модульной архитектурой – семейство модулей «Малахит-3» и семейство модулей «Малахит-7» [3]. Данные БЦВС представляют собой многомашинные резервированные вычислительные системы, построенные на следующих принципах:

1. Создание набора функционально и конструктивно законченных унифицированных модулей, обеспечивающих максимальную автономность отработки, модернизации и ориентированных на серийное производство для обеспечения высокого уровня качества.

2. Магистральная организация и унификация межмодульных связей.

3. Иерархическая организация комплекса с центральным модулем управления, реализующим задачи операционной системы.

4. Нарращивание вычислительной мощности или степени резервирования включением необходимого количества унифицированных функциональных модулей без переработки аппаратуры.

5. Учёт в процессе работы фактического состояния исправности и быстродействия модулей, включая параметрические изменения, и обеспечение динамиче-

ского перераспределения вычислительных ресурсов с учётом фактического состояния исправности модулей и их фактического быстродействия.

Структура БЦВС с магистрально-модульной архитектурой и централизованным управлением приведена на рис. 1. Внешний вид БЦВС приведён на рис. 2.

В состав комплекса входят центральный (системный) модуль (СМ) управления и функциональные вычислительные модули (ВМ) и модули связи (МС) с наземной и периферийной аппаратурой, включая полезную нагрузку, по магистральным мультиплексным линиям связи.

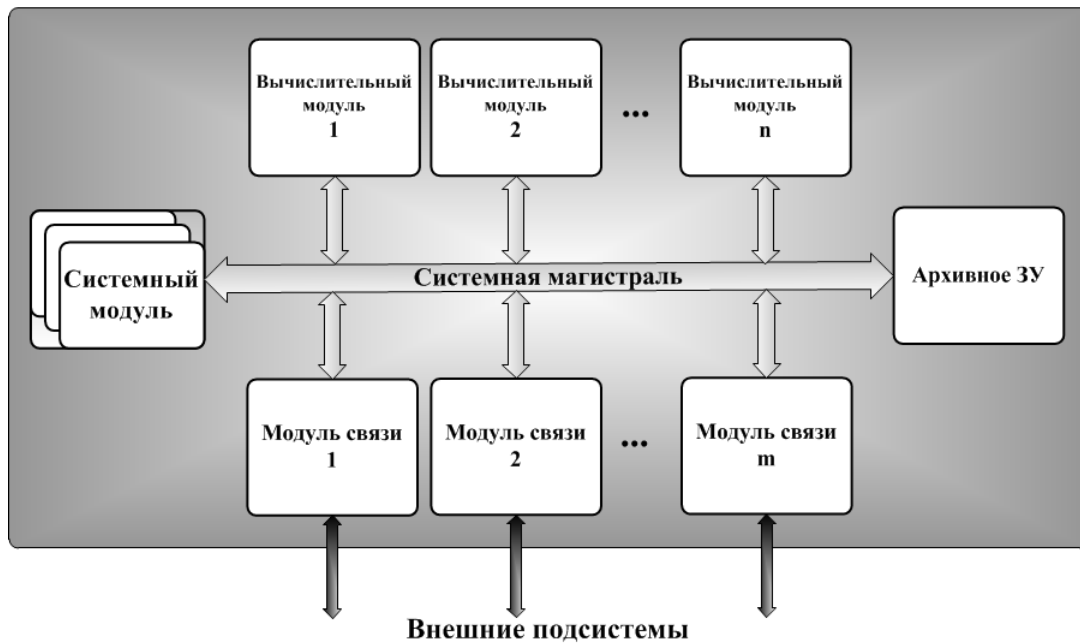


Рис.1. Структура БЦВС семейства «Малахит» с магистрально-модульной архитектурой

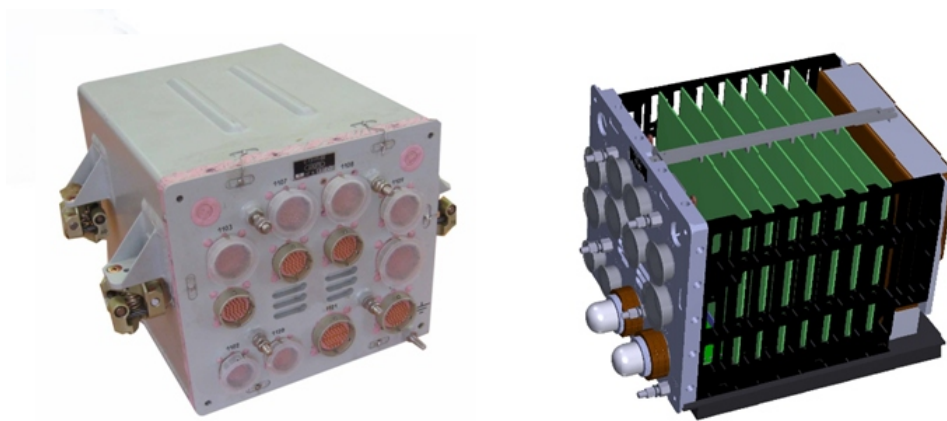


Рис.2. Внешний БЦВС семейства «Малахит»

СМ является функционально законченным вычислителем малой разрядности с набором команд, ориентированных на задачи операционной системы реального времени (ОСРВ). Высокая надёжность этого модуля достигается снижением требований к быстродействию и информативности, что обеспечивает малые аппаратные затраты на реализацию. Кроме того, внутренние связи модуля имеют магистральный характер, что ограничивает

быстродействие, но упрощает реализацию и позволяет при малых дополнительных затратах обеспечить мажоритаризацию всей перерабатываемой информации. С целью повышения надёжности системный модуль реализуется в трёхканальном исполнении с глубокой мажоритаризацией для «Малахит-3» либо программным сравнением входов и выходов внутрисистемной магистрали для «Малахит-7». Структура СМ приведена на рис. 3.

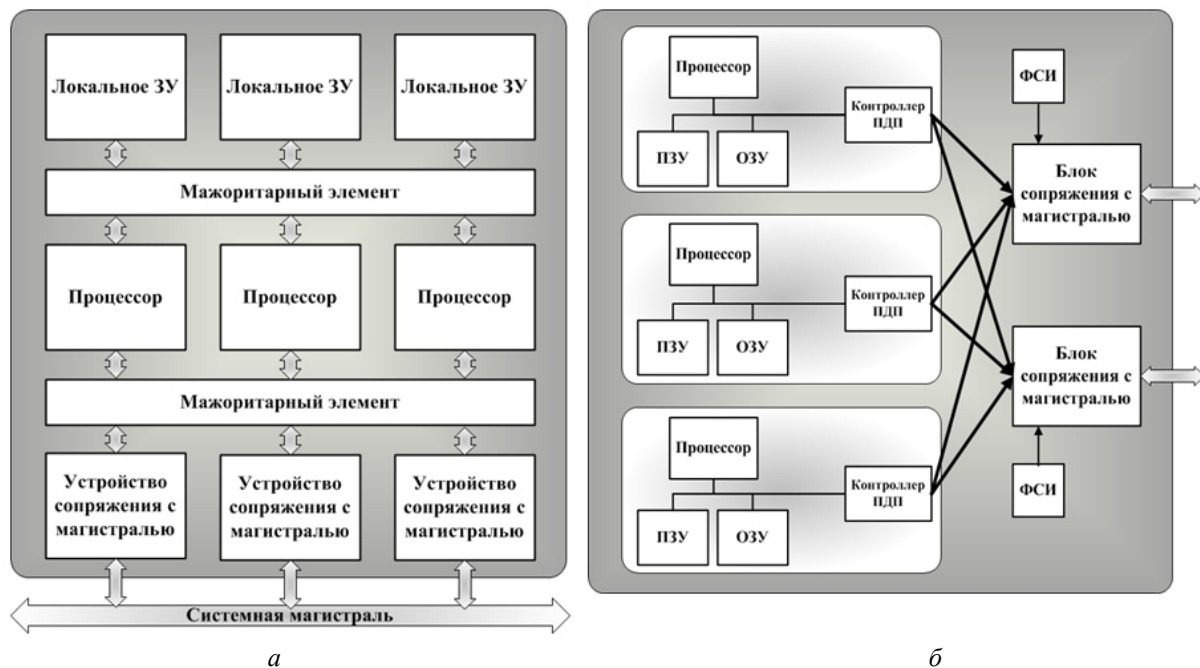


Рис.3. Структура СМ «Малахит-3» (а) и СМ «Малахит-7» (б)

Функциональными модулями являются: вычислители (ВМ) с процессорами универсального назначения и локальными запоминающими устройствами (ЛЗУ); системные ЗУ (архивные ЗУ); проблемно-ориентированные вычислители (сигнальные или матричные процессоры с ЛЗУ); устройства сопряжения с периферийными подсистемами (МС).

Основная вычислительная нагрузка возложена на вычислительный модуль. Модуль решает все основные функциональные задачи системы управления, за исключением задач по контролю исправности и нейтрализации возникающих отказов. Процессор работает по программам из ПЗУ, данные размещаются либо в ОЗУ,

либо во внутренних регистрах процессора. Процессор работает с 32- и 64-разрядными командами и данными.

Все модули объединены через общесистемную резервированную магистраль (троированную для модулей «Малахит-3», дублированную для «Малахит-7»), которая совместно с СМ составляет управляющее ядро комплекса [4]. Нарращивание вычислительной мощности обеспечивается подключением дополнительных ВМ и МС с организацией параллельной обработки данных. Резервные модули могут вводиться без переработки аппаратуры в пределах заданных объёмных и энергетических ограничений. Дорабатывается только соответствующая кабельная сеть и

корректируются таблицы операционной системы реального времени ОСРВ.

Говоря о структуре задач (рис. 4), решаемых БЦВС в штатном режиме, можно выделить две характерные группы.

К первой, «медленной», группе относятся задачи расчёта текущих и финишных параметров движения изделия, которые в зависимости от изделия решаются с циклом 0,5 – 1 с, а также расчёта требуемых параметров управления, т.е. расчёта входных данных для задач стабилизации и формирования команд управления. Ко второй группе относятся задачи приёма и контроля информации с датчиков и расчёта данных для стабилизации, а также решение задач навигации. Длительность цикла не превышает 60 мс.

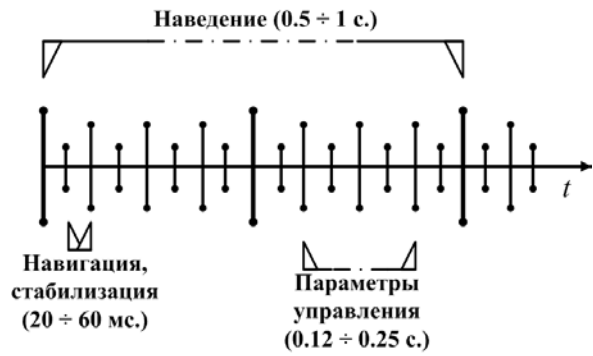


Рис.4. Структура задач реального времени

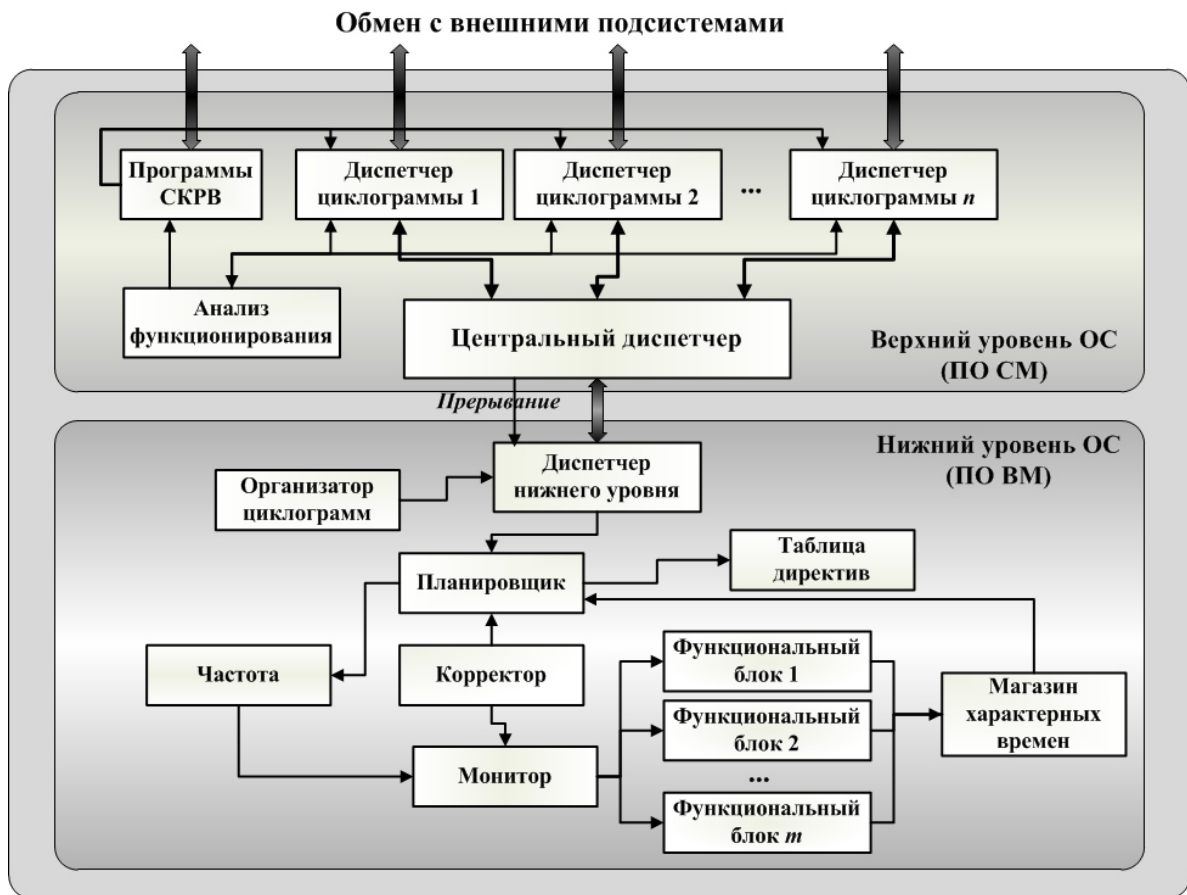


Рис.5. Структура ОСРВ



Рис.6. Контроль, реконфигурация и восстановление

С точки зрения реализации задач программы системного модуля на основании выходных данных вычислителя реализуют задачи по управлению изделием. Исходя из этого, структура ПО БЦВС реализуется в двухуровневом виде (рис. 5).

Нижний уровень обеспечивает необходимую вычислительную мощность решения всех задач БЦВС. Основная задача нижнего уровня состоит в построении в начале каждого цикла очереди задач, которые должны решаться в данном периоде, и подключении этих задач в соответствии с построенной очередью.

Основное назначение верхнего уровня – управление обменом информацией между внутренними и внешними абонентами системы и синхронизация работы БЦВС в целом. Также на верхнем уровне решаются дополнительные задачи, связанные с диагностикой функционирования оборудования и поддержкой работоспособности всей системы по алгоритму, представленному на рис. 6.

Диспетчер задействуется в конце каждого цикла основной программы. Диспетчер производит анализ необходимости проведения реконфигурации по данным основной программы (ОП) при смене задач или по данным периферийной аппаратуры при возникновении отказов. Программа-диспетчер анализирует возможность реконфигурации и восстанов-

ления или дополнительного контроля и включает при необходимости соответствующую программу или отдаёт управление функциональным программам.

Тестовый контроль служит для локализации места неисправности, определения отказов основного и дополнительного оборудования и поставляет соответствующую информацию через средства системного контроля программе анализа.

Задача реконфигурации включается для перестройки структуры при переходе в режим параллельного счёта и обратно в режим синхронного счёта, а также для проведения восстановления сбившегося модуля или подключения в работу исправных модулей отказавшей ВМ.

Процедура восстановления включается при необходимости после завершения очередного цикла ОП. Эта программа готовит зоны информации, предназначенные для сбившегося модуля, производит передачу данных между машинами и выводит сбившуюся машину в рабочий режим.

Программа анализа служит для формирования всех признаков, необходимых для работы остальных программ, и включается только через прерывание по сигналам средств контроля. Эта программа определяет место отказа, выбирает ведущую машину и определяет состояние остальных.

Централизация управления в одном модуле, организация программного управления и контроля работы и исправности функциональных модулей позволяют учесть не только их предельные состояния («исправен» – «неисправен»), но и промежуточные, когда возможно сохранение работоспособности, например, при пониженном быстродействии из-за воздействия дозовых факторов ионизирующего излучения, изменения температуры и времени работы или отказов отдельных узлов и блоков модулей [5]. При этом централизованное управление не только повышает отказоустойчивость БЦВС, но и позволяет использовать имеющуюся производительность при исправности функциональных модулей, увеличивая их фактическое быстродействие на каждом интервале работы.

Объединение всех функциональных модулей через общую унифицированную магистраль допускает их независимую доработку и модернизацию с целью повышения надёжности, повышения технологичности изготовления или совершенствования функциональных характеристик любого модуля без переработки БЦВС в целом. Дополнительная, функционально избыточная аппаратура, встраиваемая в эти модули, обеспечивает только подключение к резервированной магистрали и автономный контроль модулей, что максимально упрощает их реализацию и отработку.

В процессе отработки и применения БЦВС выявилось, что информационный обмен между вычислителями требует существенных затрат машинного времени.

Помимо этого, постоянно возрастают требования к производительности системы при реализации программного контроля и проведении процедур реконфигурации и восстановления в случае сбоя или отказа.

Решение данных проблем потребовало пересмотра структуры и дальнейшего развития архитектуры БЦВС. Поэтому в настоящее время как одно из направлений на НПОА прорабатывается реализа-

ция распределённой по функциональным задачам ЦВС с единым управлением.

В данной ЦВС для решения каждой задачи выделяются отдельные вычислительные контуры. Обмен информационными массивами между вычислителями осуществляется по магистрали ПДП напрямую из памяти в память, что разгружает основную системную магистраль, обеспечивая центральному модулю дополнительный резерв времени для решения задач управления системой, а также для реализации алгоритмов контроля и восстановления (рис.7).

Дальнейшее распределение функциональных задач посредством реализации подсистем управления с собственными вычислителями также позволит сократить межсистемные и межмодульные обмены, что, в свою очередь, дополнительно разгрузит центральную ЦВС.

Одним из возможных применений специализированных вычислительных устройств (СВУ) являются системы управления летательными аппаратами, включающие бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). Одной из причин, ограничивающих внедрение БИНС, является (несмотря на значительный прогресс в области создания отечественной элементной базы для бортовой вычислительной техники) ограниченное быстродействие программных вычислений алгоритмов БИНС в бортовых вычислительных системах, особенно в части вычисления тригонометрических функций. При использовании БИНС возникает необходимость в регулярном пересчёте матриц перехода от одной системы координат к другой. Эти расчёты включают в себя большое количество тригонометрических функций, и именно на них расходуется большая часть вычислительных ресурсов БЦВС систем управления подвижными объектами, оснащёнными БИНС.

Данное направление определило необходимость разработки в НПОА проблемно ориентированных СВУ (рис. 8).

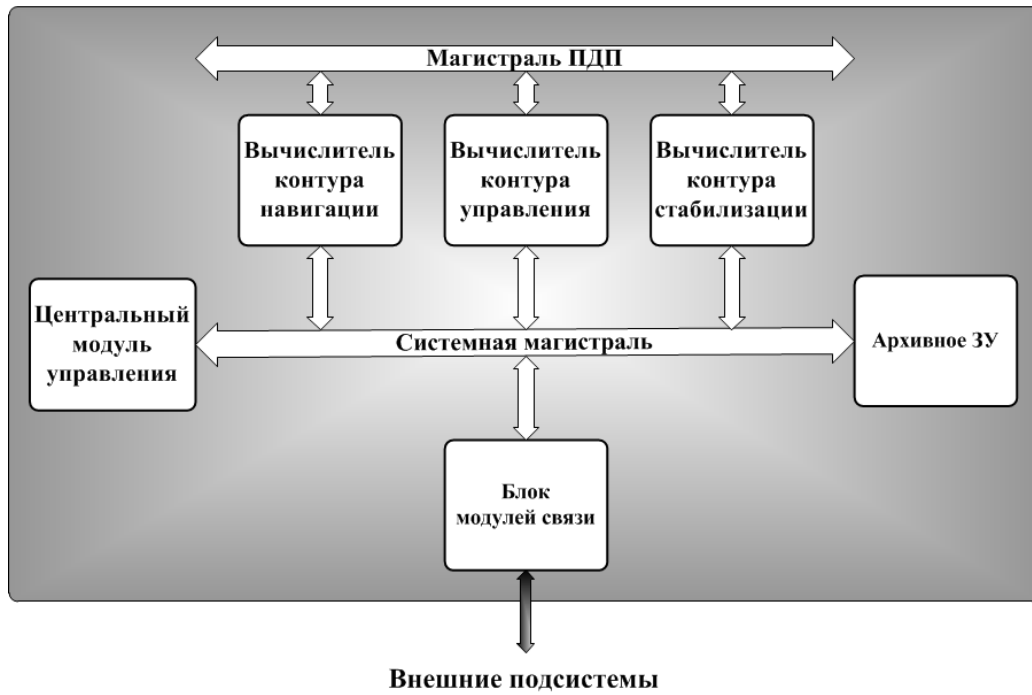


Рис.7. Структура перспективной БЦВС на базе модулей «Малахит»

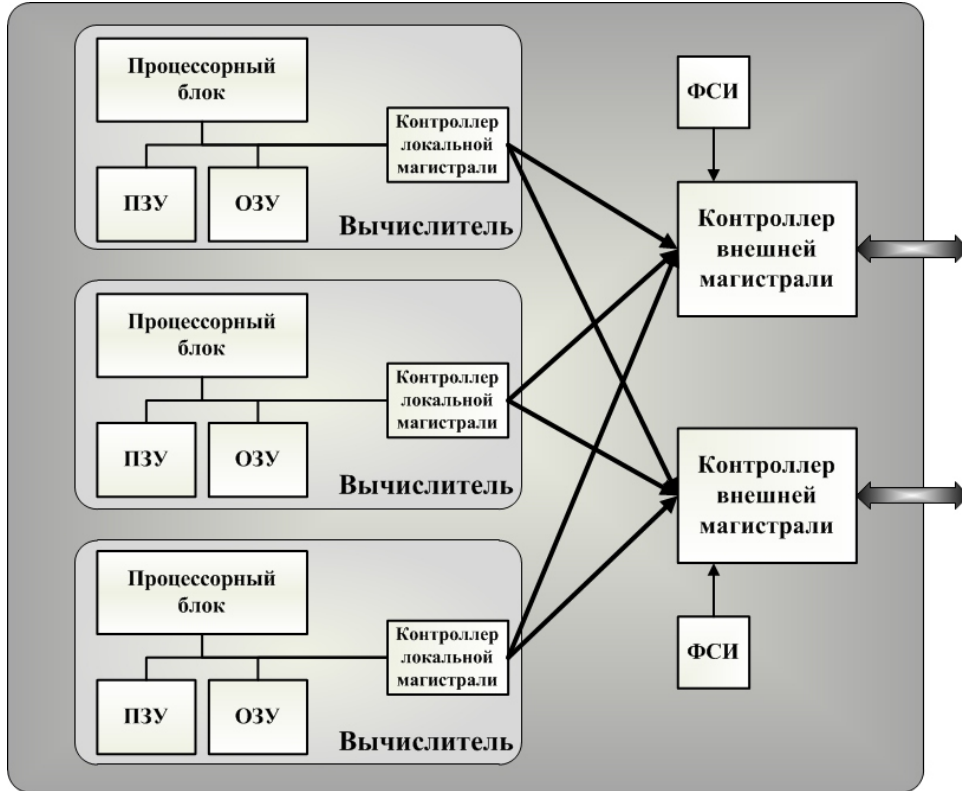


Рис.8. Структура резервированного СВУ

БЦВС семейства «Малахит» обладают современными характеристиками по функциональности, надёжности, производительности при одновременном уменьшении энергопотребления, габаритов и массы. Переход к магистрально-модульной структуре с централизованным программируемым управлением позволил реализовать все основные принципы повышения надёжности БЦВС, упростив её компоненты. За счёт программ ОСРВ обеспечивается приспособление (самоорганизация) БЦВС к особенностям использования в конкретных системах, изменению характера отказов и экстремальным условиям эксплуатации аппаратуры. Создаётся возможность максимально полного использования закладываемой избыточности для повышения отказоустойчивости и производительности.

В настоящее время БЦВС семейства «Малахит» оснащаются как эксплуатируемые (ракета-носитель «Союз 2-1а(б)»), так и модернизируемые («Союз 2-1в») и перспективные (разгонный блок «Волга») комплексы вывода на орбиту космических аппаратов, к которым предъявляются повышенные требования по надёжности при работе в неблагоприятных внешних условиях, включающих широкий диапазон изменения температуры окружающей среды, внешние механические воздействия, электромагнитные воздействия и ионизирующее излучение.

### Библиографический список

1. Антимиров, В.М. Современные вычислительные комплексы двойного назначения систем управления нового поколения: монография / В.М. Антимиров, В.Е. Межов, В.К. Зольников. – Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2006. – 246 с.
2. Антимиров, В.М. Особенности построения радиационно-стойкой автоматической системы управления / В.М. Антимиров // Вестник Воронеж. гос. тех. ун-та. Сер. САПР и системы автоматизации производства, – 2005. – Вып. 3.5(4). – С. 54-59.
3. Антимиров, В.М. Современные вычислительные комплексы для бортовых систем управления / В.М. Антимиров, В.Н. Ачкасов, П.Р. Машевич // Полет. – 2005. – №8. – С. 65-71.
4. Антимиров, В.М. Исследование вариантов резервирования магистральных связей в вычислительной системе / В.М. Антимиров, В.Н. Ачкасов, П.Р. Машевич // Информационные технологии моделирования и управления: сб. науч. тр. Вып. 18. Воронеж. гос. техн. ун-та. – Воронеж, 2005. – С. 12-17.
5. Антимиров, В.М. Повышение надёжности управляющих вычислительных комплексов / В.М. Антимиров // Интеллектуализация управления в социальных и экономических системах: сб. науч. тр. Воронеж. гос. техн. ун-та. – Воронеж, 2005. С. 5-11.

## ONBOARD DIGITAL COMPUTER SYSTEMS OF THE «MALACHITE» FAMILY FOR EXTREME CONDITIONS

© 2013 V. M. Antimirov, A. B. Umansky, L. N. Shalimov

Development and Production Center of Automation  
named after academician N.A. Semikhatov, Ekaterinburg

The paper is devoted to up-to-date onboard computing systems of the «Malachite» family, created at the Center. The structure and architectural features of this computing system generation that provide high reliability of the equipment in terms of external destabilizing factors. The paper also addresses issues of further development of onboard digital computer systems produced by the Center.

*Automatic control system, onboard digital computer system, bus-modular architecture, onboard digital computer system «Malachite».*



### **Информация об авторах**

**Антимиров Владимир Михайлович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, НПО автоматики, Екатеринбург. E-mail: [vmantimirov@mail.ru](mailto:vmantimirov@mail.ru). Область научных интересов: разработка архитектур управляющих вычислительных комплексов повышенной надежности для систем автоматического управления, работающих в экстремальных условиях.

**Уманский Алексей Борисович**, кандидат технических наук, начальник группы, НПО автоматики, Екатеринбург. E-mail: [pdwn1982@yandex.ru](mailto:pdwn1982@yandex.ru). Область научных интересов: разработка бортовых систем управления реального времени и программно-математических средств, обеспечивающих надежность их функционирования при воздействии неблагоприятных условий.

**Шалимов Леонид Николаевич**, кандидат технических наук, генеральный директор, НПО автоматики, Екатеринбург. E-mail: [avt@npoa.ru](mailto:avt@npoa.ru). Область научных интересов: разработка высоконадёжных систем автоматического управления ракетно-космической техники.

**Antimirov Vladimir Mikhailovich**, doctor of technical science, professor, chief research associate, Development and Production Center of Automation. E-mail: [vmantimirov@mail.ru](mailto:vmantimirov@mail.ru). Area of research: development of architectures of control computer systems of enhanced reliability for automatic control systems working in extreme conditions.

**Umansky Aleksey Borisovich**, candidate of technical science, team chief, Development and Production Center of Automation. E-mail: [pdwn1982@yandex.ru](mailto:pdwn1982@yandex.ru). Area of research: development of real-time onboard control systems, software and mathematical tools to ensure the reliability of their operation when exposed to adverse conditions.

**Shalimov Leonid Nikolayevich**, candidate of technical science, chief executive officer. Development and Production Center of Automation. E-mail: [avt@npoa.ru](mailto:avt@npoa.ru). Area of research: development of high-reliability systems of automatic control of space-rocket equipment.