

## Применение общепромышленных стандартов для построения космических вычислителей

Алексей Медведев

Активно применяемая в зарубежных и отечественных разработках специального назначения COTS-технология является хорошим средством снижения временных и финансовых затрат. В статье рассматривается опыт использования COTS для создания вычислителей, эксплуатируемых на борту космических аппаратов.

В последнее время из-за необходимости сокращения стоимости военных и аэрокосмических систем разработчики стали активно использовать технологию COTS (Commercial Off-The-Shelf – «готовый к использованию продукт»). Смысл данной технологии в том, что для построения систем специального назначения применяется подход, в рамках которого используются промышленные вычислительные модули, а крейты, стойки, блоки коммутации и кабели имеют специальное исполнение и обеспечивают требуемые условия эксплуатации (например, устойчивость к климатическим, вибрационным, акустическим и другим воздействиям). В COTS-технологии применяются готовые аппаратные и программные технологии открытого типа, ранее широко апробированные и/или стандартизованные на рынке общепромышленных гражданских приложений.

Исторически концепция COTS возникла как инициатива министерства обороны США и оборонных ведомств ряда других западных стран, желающих сократить свои расходы за счёт уменьшения доли дорогостоящих уникальных решений и технологий. Для российских разработчиков в настоящее время в условиях усложнения экономической ситуации и введения санкций, перекрывающих доступ к элементной базе оборонного и двойного назначения, такой способ экономии средств на создание аппаратуры с высокими техническими характеристиками особенно актуален.

Общий тренд построения систем на базе стандартизованных COTS-компонентов проник и в космическую отрасль. Тому способствовали чрезвычайно бурный темп освоения космического пространства, усложнение решаемых задач, требования сокращения сроков разработки и модернизации систем, повышение их быстродействия и надёжности. В настоящий момент в космосе постоянно присутствует большое количество обитаемых и необитаемых летательных аппаратов различных стран. Эта отрасль превратилась в мощную индустрию, связанную с исследованиями, производством новых материалов, обороной и другими актуальными задачами [1].

### Как влияет радиация на микросхемы

В «штуках частиц» космическое излучение состоит на 90% из протонов (то есть ионов водорода), на 7% из ядер гелия (альфа-частиц), ~1% составляют более тяжёлые атомы и ~1% – электроны. Звёзды, включая Солнце, ядра галактик, Млечный Путь, обильно освещают всё не только видимым светом, но и рентгеновским и гамма-излучением. Во время вспышек на Солнце радиация от Солнца увеличивается в 1000–1 000 000 раз, что может быть серьёзной проблемой, как для людей будущего, так и нынешних космических аппаратов за пределами магнитосферы Земли.

Вокруг Земли есть 2 пояса заряженных частиц – так называемые радиационные пояса Ван Аллена: на высоте ~4000 км

из протонов и на высоте ~17 000 км из электронов. Частицы там движутся по замкнутым орбитам, захваченные магнитным полем Земли. Также есть бразильская магнитная аномалия, где внутренний радиационный пояс ближе подходит к Земле до высоты 200 км.

Когда гамма- и рентгеновское излучение (в том числе вторичное, полученное из-за столкновения электронов с корпусом аппарата) проходит через микросхему, в подзатворном диэлектрике транзисторов начинает постепенно накапливаться заряд, и соответственно начинают медленно изменяться параметры транзисторов – пороговое напряжение транзисторов и ток утечки. Обычная гражданская цифровая микросхема уже после 5000 рад может перестать нормально работать (впрочем, человек может перестать работать уже после 500–1000 рад).

На низкой орбите 300–500 км (там, где летают люди) годовая доза может быть 100 рад и менее, соответственно, даже за 10 лет набранная доза будет переносима гражданскими микросхемами. А вот на высоких орбитах >1000 км годовая доза может быть 10 000–20 000 рад, и обычные микросхемы наберут смертельную дозу за считанные месяцы.

Самой большой проблемой космической электроники является столкновение с тяжёлыми заряженными частицами (ТЗЧ) – это протоны, альфа-частицы и ионы больших энергий. ТЗЧ имеют такую высокую энергию, что «пробивают» микросхему насквозь (вместе с корпусом

спутника) и оставляют за собой «шлейф» заряда. В лучшем случае это может привести к программной ошибке (0 становится 1 или наоборот), в худшем — к тиристорному защёлкиванию. У защёлкнутого чипа питание закорачивается с землёй, через него может идти очень большой ток, в результате может сгореть микросхема. Если успеть отключить питание и подключить до сгорания, то всё будет работать, как обычно.

Тяжёлые заряженные частицы космического пространства, воздействуя на интегральные микросхемы (ИМС), могут вызвать искажения отдельных битов данных или программы. Интенсивность сбоев зависит от типа используемой памяти, параметров орбиты и активности Солнца.

Бороться с защёлкиванием можно несколькими способами.

1. Следить за потребляемым током и быстро передёргивать питание.
2. Использовать микросхемы на сапфировой подложке (Silicon-on-sapphire, SOS, в более общем виде Silicon-on-insulator, SOI) — это исключает формирование биполярных паразитных транзисторов и защёлкивание. Программные ошибки, тем не менее, могут быть. Пластины из кремния на сапфире стоят дорого, обрабатывать их сложно, и они имеют ограниченное применение в гражданском секторе, следовательно, производство получается дорогим. В настоящее время в большинстве случаев применяют SOI в общем виде — с оксидом в виде диэлектрика.
3. Использовать так называемый процесс triple-well — он также очень сильно снижает возможность защёлкивания микросхемы за счёт дополнительной изоляции транзисторов p-n-переходом, но не требует каких-то особенных пластин или оборудования, и в результате само производство намного дешевле кремния на сапфире. Исторически в СССР и России чаще работают с кремнием на сапфире, а на Западе стараются как можно больше использовать обычный кремний с triple-well (чтобы совмещать с коммерческими продуктами и снижать стоимость), но и SOS/SOI тоже делают по необходимости.

В случае когда из-за ТЗЧ в космической аппаратуре произошло искажение содержимого памяти или логика сработала неправильно, бороться с этим остаётся только архитектурными способами, например:

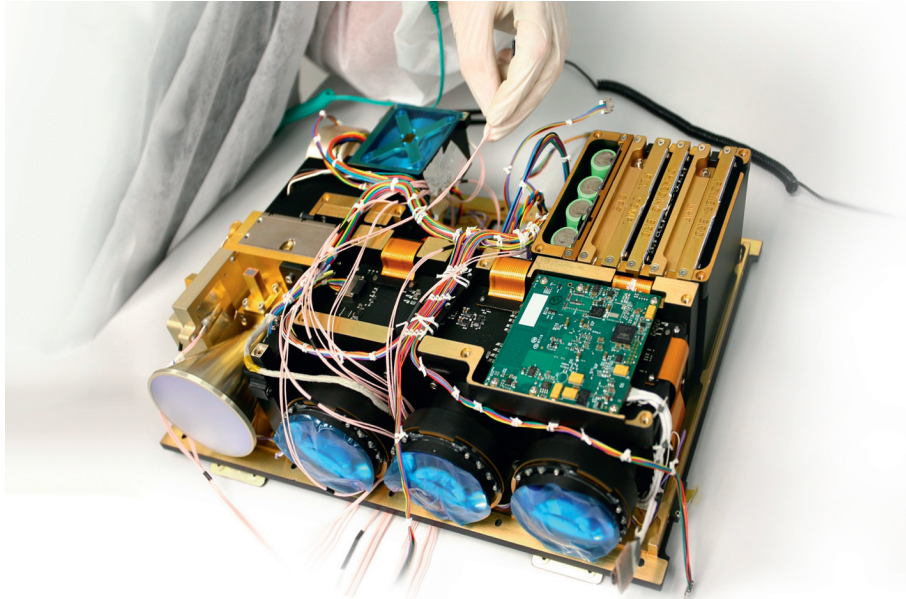


Рис. 1. Спутник стандарта CubeSat компании «Даурия Аэроспейс»

- мажоритарной логикой, когда мы соединяем по 3 копии каждого нужного нам блока на некотором расстоянии друг от друга — тогда 2 правильных ответа «пересылят» один неправильный, использованием более стойких к ошибкам ячеек памяти (из 10 транзисторов вместо обычных 6),
- использованием кодов коррекции ошибок в памяти, кэш и регистрах.

Но полностью от ошибок избавиться невозможно, ведь может случиться, что ТЗЧ (вернее, целый веер вторичных частей) пройдут точно вдоль чипа, и часть компонентов чипа может сработать с ошибкой. Тут и нужна высоконадёжная система из нескольких независимых компьютеров и правильное их программирование.

В итоге использование гражданских микросхем в космосе ограничено эффектом защёлкивания и возможно в лучшем случае на низких орбитах. На высоких орбитах и в дальнем космосе нужны специальные радиационно-стойкие микросхемы, так как там мы лишены защиты магнитного поля земли, а от высокоэнергетических частиц космической радиации спасёт разве что метр свинца [2]. Сферы применения COTS-технологии должны быть чётко очерчены, их неправильное использование может привести к отрицательным результатам.

### ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ COTS-ТЕХНОЛОГИЙ В КОСМОСЕ

Подтверждением использования в космосе COTS-технологий и промышленной ЭКБ является растущая по-

пулярность спутников, выполненных по стандарту CubeSat.

CubeSat (кубсат) — формат малых (сверхмалых) искусственных спутников Земли для исследования космоса, имеющих объём 1 литр и массу не более 1,33 кг или несколько (кратно) более (рис. 1).

Эти спутники обычно используют шасси-каркас спецификации CubeSat и покупные стандартные комплектующие — COTS-электронику и прочие узлы. Спецификации CubeSat были разработаны в 1999 году Калифорнийским политехническим и Стэнфордским университетами, чтобы упростить создание сверхмалых спутников.

Спецификация CubeSat включает в себя стандартизированные габариты и архитектуру. Все CubeSat подразделяются на размерности 1U (10×10×10 см), 2U (10×10×20 см), 3U (10×10×30 см) и так далее.

Стандарт CubeSat не ограничивает фантазию разработчиков и инженерные подходы для построения космических аппаратов. Здесь не существует общепринятых инструкций по сборке, то есть универсальных стандартов, описывающих информационные, механические или электрические интерфейсы. Есть рекомендации по соответствию габаритов электронных плат форм-фактору PC/104, некоторые подходы к распайке контактов, по информационным шинам и шинам питания, но конкретная реализация у каждого разработчика может быть индивидуальной [3].

Создаются спутники CubeSat из электроники промышленного класса, то есть той, которая предназначена для

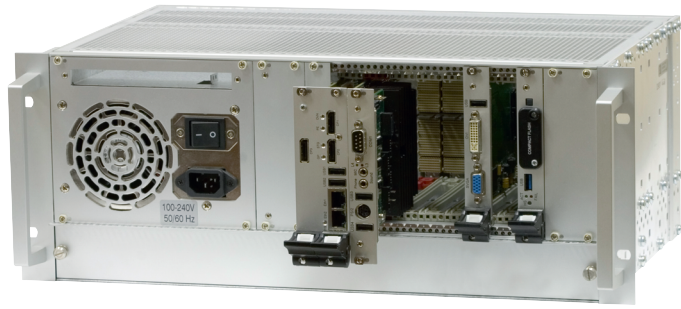


Рис. 2. Система стандарта CompactPCI

эксплуатации на Земле и не готовилась для работы в космосе. Несмотря на это, возможности современных чипов позволяют им работать в, казалось бы, неприемлемых условиях. Они могут быть недолговечны, но обеспечивают работоспособность аппаратов до года, а то и в несколько раз больше [4].

**ДРУГИЕ COTS-СТАНДАРТЫ CompactPCI**

Системы на базе стандарта CompactPCI имеют в своём составе механический конструктив, позволяющий устанавливать процессорные и периферийные модули в пассивную кросс-плату с определёнными стандартом интерконнектами обмена данными между модулями системы. Характеристики конструктивов, типы и топологии используемых интерконнектов хорошо документированы в соответствующем стандарте, разработанном консорциумом международных компаний под эгидой PICMG (www.picmg.org). Пример конструктива приведён на рис. 2. Системы строятся в конструктиве Евромеханика 3U, 6U.

Основные преимущества стандарта CompactPCI:

- возможность построения многопроцессорных гетерогенных вычислительных систем;
- высокая устойчивость к ударам и вибрациям;
- эффективное охлаждение;
- поддержка режима «горячей» замены;
- поддержка резервирования;
- применение стандартных шасси от разных производителей.

Показательный пример надёжности систем, выполненных по стандарту CompactPCI, – система управления марсохода Opportunity, который управляется двумя компьютерами на базе стандарта CompactPCI [5].

На Красную планету марсоход Opportunity прибыл 24 января 2004 года и до сих пор продолжает функционировать.

Ядро системы управления – одноплатный компьютер RAD6000 (производитель BAE Systems), выполненный в формате CompactPCI 6U версии 2.0.

RAD6000 – радиационно-стойкий одноплатный компьютер на базе RISC-процессора, выпущенный подразделением IBM (позже это подразделение стало частью BAE Systems). Компьютер имеет максимальную тактовую частоту 33 МГц и быстродействие около 35 MIPS. На плате установлено 128 Мбайт оперативной памяти с ECC. Обычно на этом компьютере работает ОС PV VxWorks. Частота процессора может устанавливаться в 2,5, 5, 10 или 20 МГц.

В настоящее время рабочая группа PICMG начала разработку новой спецификации Space CompactPCI Serial, в которой учитываются специальные требования к применению в космической технике.

В разрабатываемой спецификации исключены некоторые невостребован-

ные функции с целью сделать стандарт более гармоничным. В то же время добавлены новые свойства, чтобы оптимизировать стандарт Space CompactPCI Serial для космических приложений.

В разрабатываемую спецификацию вносятся два основных нововведения: использование архитектуры «двойная звезда» и интеллектуальной системы управления питанием. Кроме того, дополнительно к Ethernet и PCI Express возможно использование других последовательных интерфейсов, таких как SpaceWire, SpaceFibre, TT-Ethernet и rapid I/O, для взаимодействия плат в системе.

Базовая спецификация CompactPCI Serial определяет топологию «звезда» для межмодульного взаимодействия. В спецификации Space CompactPCI Serial добавляется симметричное дублирование интерконнектов. Таким образом, выход из строя одного центрального процессора никак не сказывается на функциональности системы в целом. Высокая степень готовности очень важна в космосе, так как, например, вы не можете просто заменить процессорный модуль, установленный в спутнике на орбите. В добавлении к системному слоту (А) с левой стороны системы второй системный слот (В) размещается в правой части, дублируя все межмодульные связи (рис. 3, [6]). Все семь периферийных слотов подключены к обоим системным, которые также соединены между собой. Эти связи образуют сеть

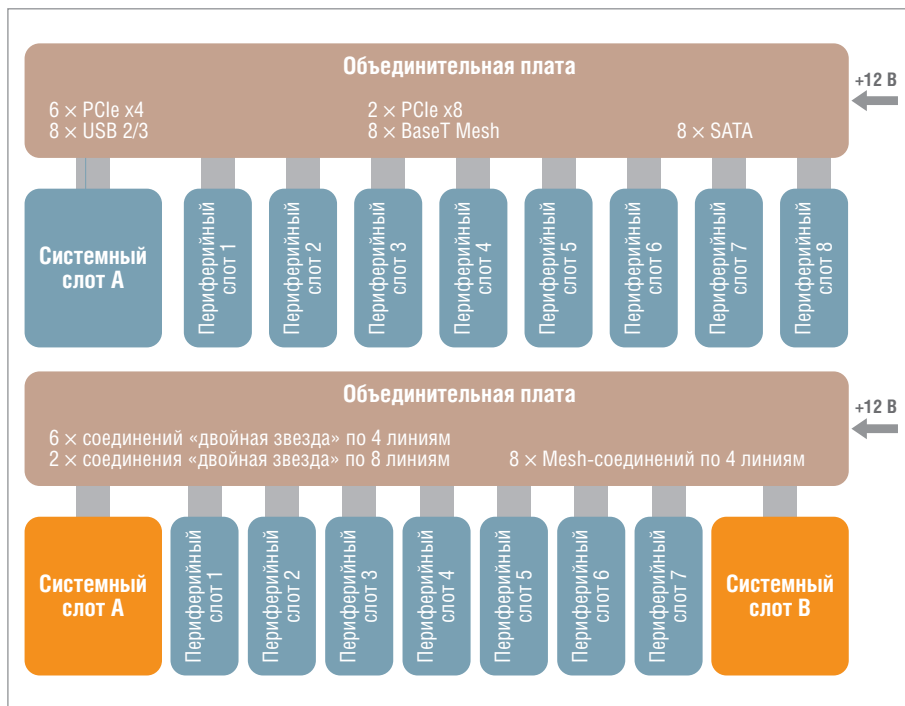


Рис. 3. Space CompactPCI Serial предполагает второй системный слот для реализации топологии «двойная звезда» через PCI Express



Full Mesh, или «каждый с каждым». Сеть Full Mesh не ограничена каким-либо протоколом и может использоваться для физического взаимодействия, например, следующие стандарты: Ethernet, SpaceWire, TTEthernet, Ether-Space и т.п. Параллельно с сетью Full Mesh оба системных слота могут быть соединены с любым периферийным модулем посредством восьми дифференциальных пар. Эти связи могут также использоваться любой протокол, в зависимости от применения и конструкции модулей. Такая архитектура называется «двойная звезда» и предназначена для использования в высоконадёжных решениях с высокой степенью готовности. В результате параллельно используется сеть Full Mesh на базе Ethernet, а также архитектура «двойная звезда» через PCI Express или любой другой последовательный протокол.

В добавление к нововведению в межмодульном взаимодействии спецификация Space CompactPCI Serial определяет наличие сервисного разъёма, через который может быть осуществлено управление и конфигурирование модулей по шине управления. Сервисный разъём, так же как и уже имеющиеся в стандарте CompactPCI Serial, поддерживает технологию «горячей» замены, позволяющую менять модуль без выключения питания системы.

Space CompactPCI Serial обеспечивает возможность построения систем с кондуктивным теплоотводом. В такой системе шаг размещения модулей равен 5НР (25, 4 мм). Платы CompactPCI Serial с кондуктивным теплоотводом шире плат с воздушным теплоотводом (ширина 4НР), так как они строятся на базе конвекционного модуля, заключённого в металлический кожух, что существенно снижает затраты на производство модуля и, как следствие, уменьшает себестоимость.

В настоящее время рабочая группа PICMG работает над специальной объединительной платой для Space CompactPCI Serial. Высокоскоростные разъёмы существующих объединительных плат обеспечивают пропускную способность до 12,5 Гбит/с по дифференциальной паре. Совокупная пропускная способность сети Full Mesh составляет 400 Гбит/с, плюс интерконнект «двойная звезда» одновременно поддерживает пропускную способность до 1 Тбит/с. Инфраструктурные сигналы обеспечивают удобную и гибкую систему управления. В дополнение к шине I<sup>2</sup>C под-

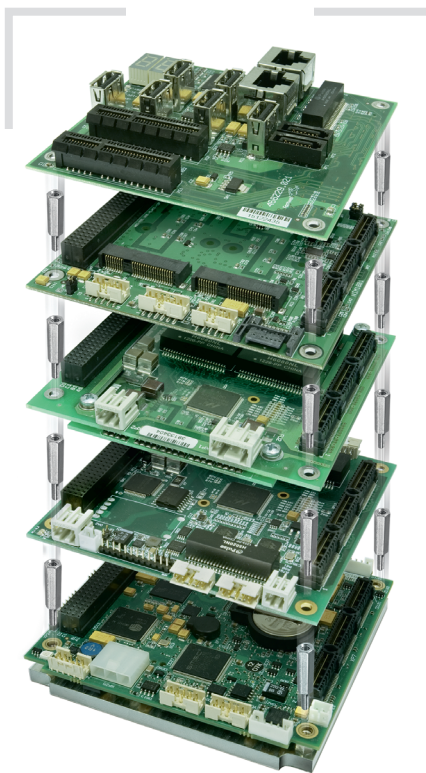


Рис. 4. Стек модулей формата PC/104

держивается шина CAN. Напряжение питания 12 В. Опционально возможно использование резервного напряжения 5 В для режимов энергосбережения и сна. Поддерживается интеллектуальная система управления питанием, обеспечивающая возможность отключения и подключения питания к каждому слоту по отдельности.

Суровые космические условия эксплуатации и особенно вакуум, предъявляют особые требования к разъёмам. Материал не должен воспламеняться и выделять вредные вещества. Проведённые тесты уже подтвердили пригодность выбранных разъёмов для Space CompactPCI Serial. С другой стороны, многие требования к механическим и климатическим воздействиям, например, стойкость к одиночным сбоям (самоустраняемый отказ), не описаны в стандартной спецификации и определяются техническим заданием на разрабатываемую систему или модули. Рабочая группа заканчивает работу над спецификацией и планирует внести её на голосование в консорциум PICMG во 2–3 квартале 2017 года.

### PC/104

Форм-фактор PC/104 был принят в 1992 году в ответ на требования об уменьшении габаритных размеров и энергопотребления для компьютерных систем. Каждая из этих целей была до-

стигнута без снижения аппаратной и программной совместимости с популярными компьютерными стандартами. Спецификация PC/104 предлагает полную архитектурную, аппаратную и программную совместимость с компьютерными стандартами в компактных размерах плат 3,6×3,8 (91,44×96,52 мм). Название стандарта связано с применением 104-контактной шины ISA, расположенной в нижней части платы (рис. 4).

Стандарты PC/104 описывают модульный принцип построения компактных встраиваемых систем в виде колонны состыкованных друг с другом плат. Эти стандарты прекрасно зарекомендовали себя среди разработчиков компактных бортовых компьютерных систем. Многие инженеры выбирают PC/104 из-за преимуществ, которые дают малый вес и габариты таких устройств, привлекательны также механическая надёжность разъёмов и всего конструктива в целом.

Семейство стандартов PC/104 состоит из 5 спецификаций и описывает обмен данными между модулями по параллельным шинам ISA 16 бит, PCI 32 бит и с использованием последовательных интерконнектов PCI Express, USB 2.0 и SATA. Помимо самого компактного размера 90×96 мм в семейство стандартов входят форм-факторы EPIC и EBX.

Один из примеров применения — это использование модулей формата PC/104 для построения аппаратуры для космического эксперимента «Терминатор». В рамках космического эксперимента осуществлялось наблюдение в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра слоистых образований на высотах верхней мезосферы — нижней термосферы в окрестности солнечного терминатора.

Для данного космического эксперимента компания РОБИС разработала и изготовила блоки электроники (БЭ) для управления микрокамерами и связи со служебными системами PC MKC (рис. 5).

Ядром блока электроники является процессорная плата FASTWEL CPC1600 — встраиваемый одноплатный компьютер формата PC/104-Plus для высокопроизводительных бортовых систем. Плата создана на базе центральных процессоров Intel Pentium M/Celeron M с рабочей частотой до 2,0 ГГц.

Дополнительная надёжность компьютера обеспечивается системой мониторинга рабочих параметров, сторо-



Рис. 5. Научный аппарат «Терминатор»: а – комплект для регистрации СО; б – комплект для регистрации эмиссионного слоя в окрестности солнечного терминатора

живым таймером и наличием резервной копии CMOS. Диапазон рабочих температур CPC1600 в промышленном исполнении составляет от  $-40$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ .

CPC1600 поддерживает операционные системы Windows XP Embedded, QNX и Linux.

### MicroPC

MicroPC – форм-фактор IBM PC-совместимых (x86) промышленных компьютеров для жёстких условий эксплуатации.

Размер плат MicroPC  $124 \times 112$  мм. Благодаря оригинальной концепции разработки изделия стандарта MicroPC являются одними из наиболее устойчивых к воздействию жёстких факторов окружающей среды на рынке встраиваемых компьютеров.

Модули MicroPC позволяют оперативно строить недорогие высоконадёжные встраиваемые системы и системы автоматизации из готовых «кирпичиков» (рис. 6).

Особенности конструкции:

- пассивная материнская плата (объединительная панель или шлейф);
- 4-точечное крепление плат расширения;
- возможно наличие дополнительных дискретных и аналоговых портов ввода-вывода или расширения PC/104 у процессорных модулей;
- сторожевой таймер;
- расширенный диапазон рабочих температур от  $-40$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ ;
- низкое энергопотребление и выделение тепла.

Ярким примером использования модулей формата MicroPC в космосе служит пульт космонавтов «НЕПТУН-МЭ» пилотируемого транспортного корабля «Союз ТМА-М».

В настоящее время доставка экипажей на околоземную орбиту осуществляется с помощью транспортных пилотируемых кораблей серии «Союз ТМА-М», являющихся модификацией кораблей «Союз ТМА». На кораблях устанавливаются пульта космонавтов нового поколения – «НЕПТУН-МЭ»

(рис. 7), разработанные НИИАО. Пульт представляет собой трёхпроцессорную вычислительную систему, включающую два канала отображения информации на основе матричных жидкокристаллических индикаторов, средства обмена с бортовыми системами корабля, органы ручного управления бортовым комплексом.

Пульт космонавтов «НЕПТУН-МЭ» предназначен для контроля бортовых систем космического корабля и оперативного управления, осуществляемого членами экипажа.

Технические средства разрабатывались и выбирались с учётом требований работоспособности в условиях невесомости и разгерметизации спускаемого аппарата, то есть с учётом работы космонавтов в скафандре.

Вычислительная часть построена с использованием модулей MicroPC. За свою долгую историю пульт управления прошёл несколько этапов модернизации. В настоящее время пульта управления планируется выпускать на базе модулей FASTWEL CPC152.

Процессорный модуль CPC152 выполнен на базе процессора Vortex 86DX с частотой 600 МГц. Применение платы CPC152 позволяет системным интеграторам решить сразу несколько задач, в первую очередь, связанных с продлением жизненного цикла систем технологического управления, основанных на платах стандарта MicroPC. При проектировании изделия были учтены требования максимальной совместимости с процессорными платами Octagon Systems, широко представленными в системах АСУ ТП нижнего уровня добывающей и обрабатывающей промышленности.

В то же время по функциональности CPC152 находится на переднем крае со-

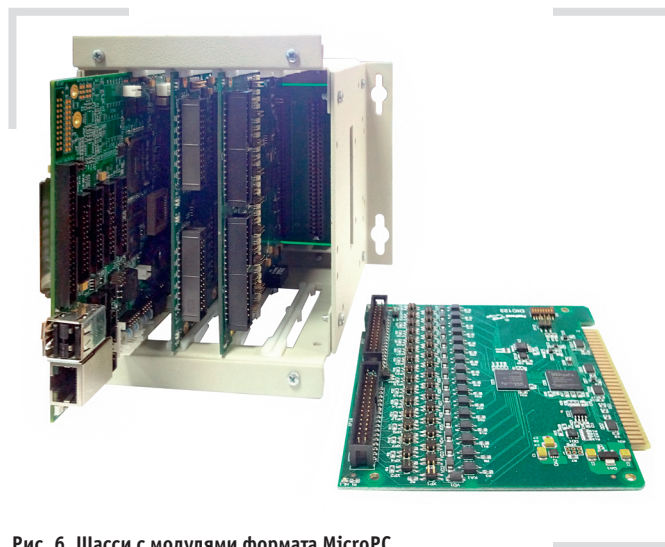


Рис. 6. Шасси с модулями формата MicroPC

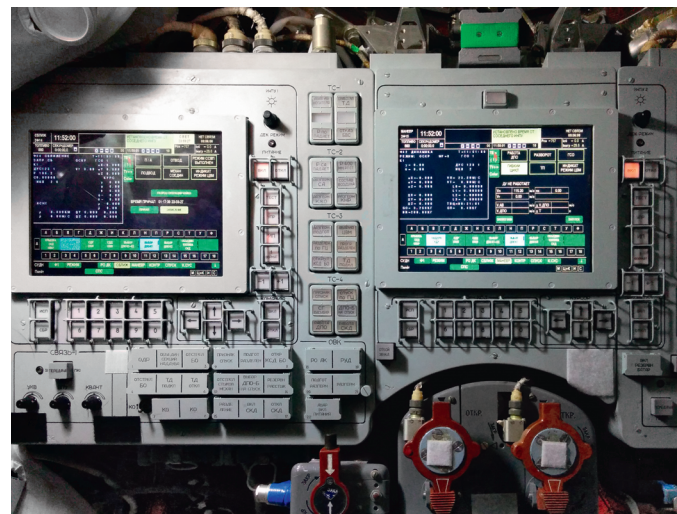


Рис. 7. Пульт «НЕПТУН-МЭ» космического корабля «Союз ТМА»

Иллюстрация с сайта <http://www.robis.ru>

временных технологий вычислительной техники для встраиваемых систем. Производительность процессора соответствует уровню Intel Pentium, что позволяет обрабатывать самые сложные алгоритмы технологического управления в реальном времени. Напаянный твердотельный диск объёмом 2 Гбайт позволяет устанавливать операционную систему прямо на плату, а в большей части проектов обойтись вообще без дополнительных накопителей.

Для выполнения технологических задач СРС152 может комплексироваться как с модулями ввода-вывода в формате MicroPC, так и с платами расширения формата PC/104, для чего на плате предусмотрен соответствующий разъём. Его наличие в сочетании с разъёмом внешнего питания позволяет применять СРС152 также в бортовых системах и системах специального назначения.

Благодаря полностью напаянным компонентам модуль СРС152 выдерживает высокий уровень механических нагрузок, а влагозащитное покрытие (опция) позволяет эксплуатировать плату в условиях высокой влажности. Диапазон рабочих температур составляет от  $-40$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ .

История пульта космонавтов является показательным примером: впервые в отечественной и мировой практике создана одноэкранный бортовая система отображения информации (СОИ) сложного объекта на основе средств и методов наземных технологий. Основные технические и программные решения защищены патентами и свидетельствами [7].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование COTS позволяет быстро разработать изделие в условиях высокой конкуренции. Как показали примеры, COTS применяются не только западными компаниями-разработчиками, но и в РФ.

COTS позволяют создавать конкурентоспособные вычислительные системы. Данная технология является гарантом долговременного успеха, обеспечивая применение новейших общемировых бизнес-тенденций и инженерных достижений в области современных встраиваемых компьютерных технологий. ●

### ЛИТЕРАТУРА

1. SpaceVPX – космическая надёжность магистрально-модульных систем // МКА: ВКС. – 2016. – № 2.

2. Микроэлектроника для космоса и военных [Электронный ресурс] // Сайт Хабрахабр. – Режим доступа : <https://special.habrahabr.ru/kyocera/p/156049/>.
3. Осторожно, кубсаты! [Электронный ресурс] // Сайт СПУТНИКС. – Режим доступа : <http://www.sputnix.ru/ru/analytics/item/360-ostorozhno-kubsaty>.
4. Когда кубсаты стали большими [Электронный ресурс] // Сайт Geektimes. – Режим доступа : <https://geektimes.ru/company/dauria/blog/248976/>.
5. Медведев А. CompactPCI – стандарт для построения космической вычислительной техники // Современные технологии автоматизации. – 2017. – № 1.
6. Schmitz M. CompactPCI Serial now reaches out into space // Boards & Solutions / ECE Magazine. – 2017. – March. – P. 32–33.
7. Тяпченко Ю.А. Интегрированная СОИ космического корабля «Союз-ТМА» и пульт ручного контура управления Российского сегмента МКС «Альфа» [Электронный ресурс] // Космический Мир. – Режим доступа : <http://www.cosmoworld.ru/spaceencyclopedia/publications/tma.25.08.05.pdf>.

**Автор – сотрудник**

**фирмы ПРОСОФТ**

**Телефон: (495) 234-0636**

**E-mail: info@prosoft.ru**

