

Д. т. н. В. С. ХАРЧЕНКО, Ю. Б. ЮРЧЕНКО

Украина, г. Харьков, Национальный аэрокосмический ун-т  
им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", НПП "Хартрон-Аркос"  
E-mail: arkos@sovam.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию  
05.11 2002 г.

Оппонент к. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО  
(ОНПУ, г. Одесса)

## АНАЛИЗ СТРУКТУР ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ БОРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ INDUSTRY

*Исследована возможность применения электронных компонентов Industry в условиях повышенной радиации. Показаны преимущества многоярусных НИИТ-структур.*

При проектировании отказоустойчивых бортовых управляющих и вычислительных комплексов (БК) для летательных аппаратов космического назначения или для других систем критического применения, таких как аппаратура АЭС, сталкиваются с рядом сходных проблем. Это, с одной стороны, повышенные требования к надежности и жесткий временной регламент работы системы управления (СУ), а с другой — постоянное воздействие потока частиц высоких энергий [1]. Радиационный фон вызывает локальные изменения в структуре кристаллической решетки электронных компонент. Происходящее накопление изменений от постоянного воздействия отдельных протонов, электронов или космических лучей может нарушать работу электронных систем БК, в том числе и необратимо [2].

Требование выполнения задачи управления в течение определенного времени вызвало потребность в специфических подходах при разработке электронных компонентов специально для применения в условиях радиации [3—5], дополнительно применяются и специальные методы резервирования [6—13].

Сегодня выбор элементов для аппаратуры БК представляет особую задачу, прежде всего, для его основной части — компьютерного блока. С одной стороны, наблюдается полное отсутствие радиационностойкой элементной базы производства стран СНГ [12, 14], с другой стороны, снимаются с производства интегральные схемы военного назначения (в том числе и класса SPACE) в странах дальнего зарубежья как морально устаревшие, дорогостоящие и не пользующиеся спросом. Производимые же элементы, помимо высокой стоимости, находятся под контролем и отсутствуют в свободной продаже.

Возможность применения электронных компонентов широкого использования при понижении стоимости, габаритов и массы аппаратуры БК без ухудшения технических и эксплуатационных показателей, в т. ч. показателя надежности, вызывает несомненный практический интерес. Исследования в этой области иллюстрируют стремление специалистов использо-

вать более дешевые электронные компоненты при соблюдении мер обеспечения надежности СУ в целом [15].

Цель статьи — анализ вариантов построения БК и СУ критичного и бизнес-критичного применения с использованием электронных компонентов Industry, путей уменьшения их стоимости, увеличения времени эксплуатации и улучшения других показателей без снижения надежности.

### **Возможности использования электронных компонентов Industry в системах критичного применения**

В последнее время наблюдается интенсивное развитие технологии производства электронных компонентов и стремительное увеличение функциональной номенклатуры БИС, представляющих собой полностью законченные узлы РЭА в коммерческом и индустриальном исполнении. Проведенные исследования позволили предложить технологии на основе Commercial-Off-The-Shelf (COTS) [16, 17] и Industry-Off-The-Shelf (IOTS) подходов [12, 13, 18—22] при проектировании БК для жестких условий эксплуатации. Такие подходы интересны как с финансовой стороны проекта, так и со стороны доступности электронных компонентов.

Зависимость уровня радиационной стойкости полупроводниковых ИС от технологии, топологии и качества материалов при изготовлении, предположения о которой сформулированы в [3], подтверждается тестированием [17]. Достижения в технологии производства, а также топологические решения, закладываемые при проектировании и направленные на реализацию механизмов парирования случайных сбоев, позволяют предположить, что БИС широкого применения могут обеспечить определенный уровень радиационной стойкости даже без специальных мер защиты. Исследования, проводимые в последние годы, дают оптимистические прогнозы [17, 23—26], а необходимость применения компонентов, не указанных в перечнях тестирования, порождает гипотезы о возможности расширения этого перечня за счет компонентов, аналогичных по технологии производства. Однако относительно этих компонентов отсутствует уверенность в возможности их применения в условиях повышенного радиационного фона.

Усредненные параметры стойкости одинаковых по функциональному назначению БИС различных клас-

сов исполнения и показатели их относительной стоимости приведены в **табл. 1**. Сопоставление отношения максимальной общей ионизационной дозы к стоимости, а также величины стойкости к одиночным сбоям для одинаковых по функциональному назначению БИС различных классов (**рис. 1**) показывает, что наилучшее соотношение имеют компоненты Industry для показателя стойкости к сбоям SEL в пределах 40...80 MeV·см<sup>2</sup>/(мг) [14].

Таблица 1

Сравнительные характеристики однотипных БИС различных классов исполнения

Класс исполнения	Показатель деградации TID, кРад (Si)*	Показатель одиночных сбоев SEL, MeV·см <sup>2</sup> /(мг)	Средняя стоимость Cost***, \$
Commercial	<3*	<30*	1
Industry	>30*	20...80*	5...10
Military Space	>100**	>40**	30...≥150

\*Усредненный показатель результатов испытаний, приведенный в отчетах [19, 21, 23—26].

\*\*Типовой показатель продукции Space Electronics Inc.

\*\*\*Приведенный показатель стоимости поставщиков электронных компонентов на Украине.

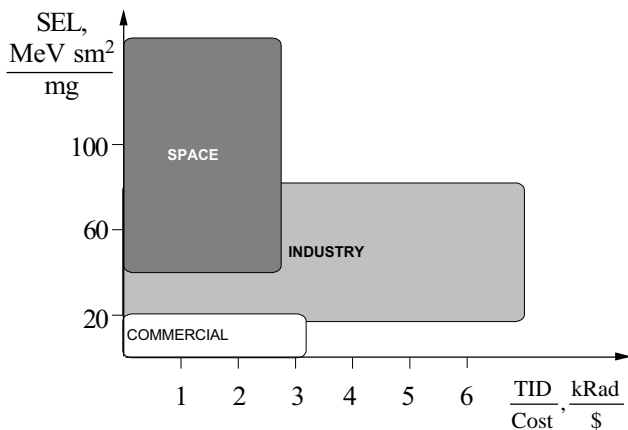


Рис. 1. Распределение электронных компонентов по показателям стойкости и стоимости

Однако, как отмечалось в [16], используя метод «аналогичных устройств», необходимо либо вводить запас при проектировании БК, либо проводить испытания компонентов от производителя и далее использовать продукцию только этого производителя, либо производить испытания модулей из поставляемой партии и далее использовать продукцию только этой партии. Последнее замечание необходимо учитывать при использовании продукции фирм-поставщиков готовых модулей, т. к. в модулях различных партий выпуска могут быть установлены аналогичные элементы различных производителей.

Применение отдельных элементов позволяет более гибко подходить к процессу разработки БК для конечного пользователя по показателям условий эксплуатации, надежности и стоимости всей СУ. Заметим также, что тестирование многих электронных компонентов класса Industry в части механических и климатических воздействий проходит по методикам MIL-883 либо аналогичным данному стандарту, а время наработки на отказ для всех классов исполнения составляет не менее десяти лет.

Сопоставляя публикуемые данные результатов испытаний на стойкость, можно предположить правомерность использования компонентов Industry для аппаратуры БК ракетоносителей и космических аппаратов (КА), а также СУ АЭС, с учетом выбора оптимальной структуры БК, допустимого времени парирования сбоев, назначения СУ и толщины естественной защиты корпуса прибора.

**Аппаратная реализация отказоустойчивых структур бортовых комплексов**

Структура БК определяется назначением СУ и должна обеспечивать сохранение работоспособности в условиях одиночных сбоев и отказов. Функционирование аппаратуры БК в условиях обратимых дефектов требует таких решений, которые в течение активного рабочего цикла выполняемой задачи либо обеспечивают парирование сбоев, либо их маскирование и восстановление процесса управления на борту. Полное тестирование и реконфигурация аппаратной части БК может происходить только в течение пассивного цикла выполняемой задачи [9].

Длительность активного рабочего цикла, соотношение его с пассивным и степень риска воздействия внешних факторов на аппаратуру СУ определяют требования при выборе структуры БК и его компонентов с COTS-подходом к проектированию СУ [19—22, 27]. Ниже проанализированы некоторые варианты структур построения БК для различных СУ с применением однокристальных процессорных элементов.

*Одноканальные структуры с автоматом контроля и восстановления информации (АКВИ)*

БК с таким типом структуры могут быть построены на основе одноканальных процессорных модулей и контроллеров таких фирм как Advantech, Fastwell или Octagon Systems, неоднократно рекламируемых для космического применения [18—21]. Простота, модульность, программная РС-совместимость последних позволяют затрачивать малое время для построения СУ на данной основе. Подтверждение работоспособности в жестких условиях эксплуатации для некоторых типов модулей по стандарту MIL STD-883 в части механических воздействий, время безотказной работы, гарантируемое фирмой-изготовителем (более 100 тыс. ч), а также данные по радиационной стойкости [18—21, 23—26] выглядят очень заманчиво при представлении процессорных модулей Industry для использования в БК. Базовая структура процессорного модуля такого типа представлена на **рис. 2**.

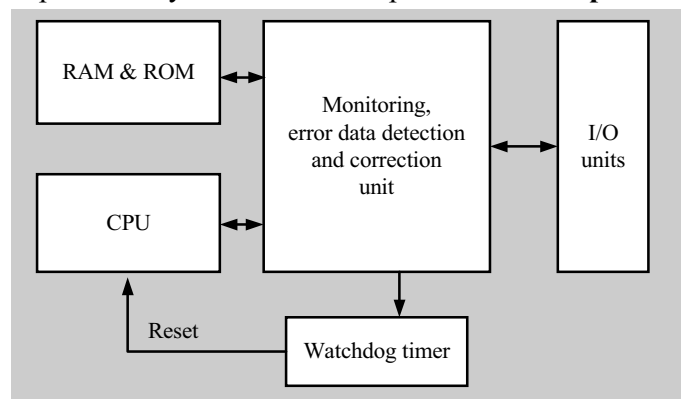


Рис. 2. Структурная схема процессорного модуля с АКВИ

Автоматом контроля здесь могут служить сторожевой таймер и система контроля и коррекции кода в ОЗУ. Автомат восстановления информации при сбое возможен при внедрении программных модулей обработкой ошибок по алгоритмам, заданным конечным пользователем после рестарта ОС и перегрузки основной программы.

Однако следует заметить, что в построенных на данном оборудовании СУ не определено время жизни скрытого состояния потенциального сбоя, его местоположение, а также количество и степень опасности каждого из них. Различными программными методами [28] можно достичь оптимального времени обнаружения и парирования сбоя в части области данных ОЗУ. В части области программ ОЗУ РС-совместимость в сочетании с применением COTS операционных систем (ОС) накладывают ограничения на возможности обнаружения и парирования сбоев. Реакцией на сбой может служить только уход с программы и рестарт по сторожевому таймеру. Единственно возможное парирование сбоя — перезагрузка COTS-ОС и программ пользователя, которое требует  $\geq 10$  секунд потерь в системе управления.

Таким образом, СУ, построенные на основе таких структур, применимы только либо для очень медленно изменяющихся процессов, либо для процессов, которые можно временно приостановить и отложить их выполнение до восстановления работоспособности СУ. Очевидно, что применение таких решений при построении СУ не допустимо ни для контроллерной и управляющей аппаратуры АЭС, ни для управляющей аппаратуры космического аппарата и, тем более, ракетносителя.

Альтернативным решением в части повышения надежности одноканальных БК и уменьшения времени жизни скрытого потенциального сбоя является отказ от применения готовых плат модулей, а также COTS-ОС, и построение БК на отдельных IOTS-компонентах с полной разработкой программного обеспечения элементов ОС и прикладных задач. Однако такие

решения влекут за собой увеличение как сроков готовности проектов, так и объемов финансирования.

*Многоканальные резервированные структуры с холодным и горячим резервом каналов со встроенным АКВИ*

В структурах таких БК за основу берется канал контроллерного или процессорного модулей рассмотренного выше типа. Для управления модулями в данной резервированной структуре необходимо введение специального блока контроля и управления реконфигурацией (БКУР). Это может быть либо разработка той же фирмы (как, например, модуль резервирования 1785-СНВМ фирмы Allen Bradley для контроллеров семейства PCL-5), либо специальная разработка для проектируемой СУ. Такой блок должен функционировать как жесткий автомат с идеально отработанными алгоритмами управления резервом при всех возможных ситуациях. Структура резервированного БК этого типа представлена на **рис. 3**.

Общий показатель безотказной работы данной структуры БК выше, чем у одноканальной. Однако следует отметить сильную зависимость общего показателя для БК от показателя безотказной работы собственно БКУР, величина которого должна быть выше, чем для остальных резервированных модулей БК.

Время жизни скрытого состояния потенциального сбоя в структуре с "горячим" резервом может быть сведено к нескольким тактам системной задачи СУ и зависит от построения алгоритмов работы канала процессора с БКУР. Для случая с "холодным" резервом и аналогичными алгоритмами взаимодействия БКУР может позволить сократить (по сравнению с одноканальной структурой БК) время рестарта управляющей задачи СУ путем подключения резервного канала сразу при отсутствии сигнала нормы от активного канала. В обоих случаях управление передается на предварительно протестированный резервный канал, а подозреваемый канал переводится в режим тестирования с последующей маркировкой пригодности.

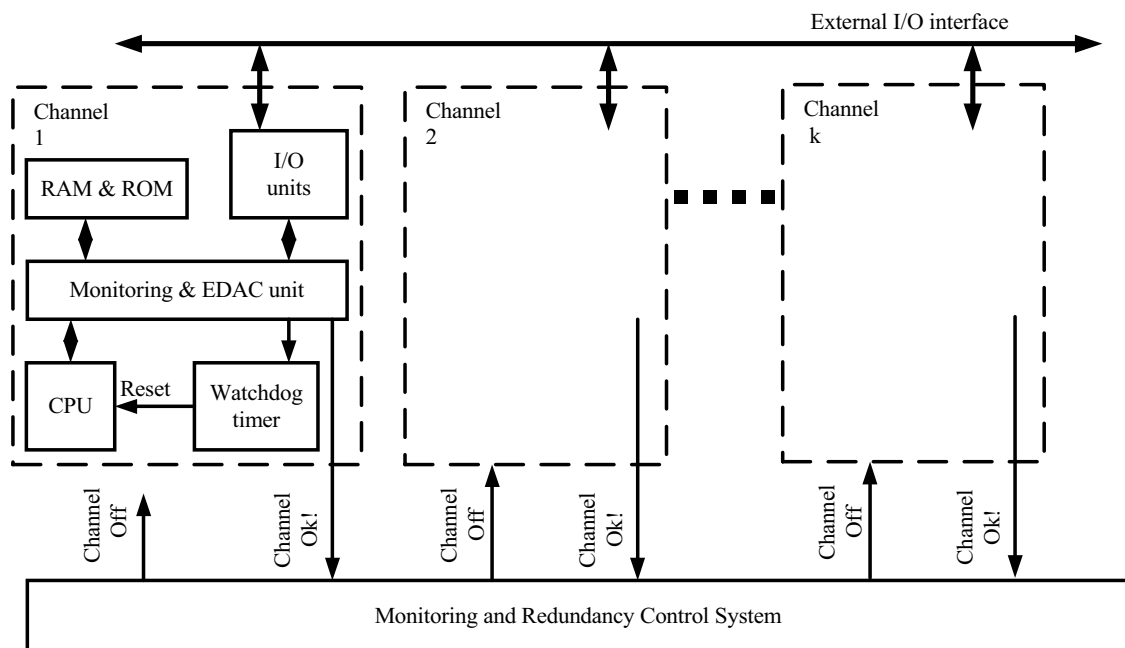


Рис. 3. Структурная схема резервированного БК на основе процессорного модуля с АКВИ

Здесь также существует риск попадания на канал с неисправностью на момент включения [28].

Сочетание IOTS-модулей, COTS-ОС, простота структуры и энергоэкономичность БК с холодным резервированием подводят к мысли о возможном использовании таких структур в длительно необслуживаемых системах с ограниченным энергопотреблением, не связанных с задачами жестковременной регламентации управления. Это могут быть системы для малых КА коммерческого назначения, в задачи которых не входит постоянное и точное поддержание ориентации и навигации. Поочередные циклы включения-выключения каналов необслуживаемых БК должны также положительно сказаться на длительности эксплуатации аппаратуры в условиях радиации [16, 17].

Однако для выполнения задач, связанных с управлением процессами с быстро изменяющимися данными (например, постоянного и точного поддержания ориентации и навигации), необходимо уменьшение времени реакции на сбой или отказ в оборудовании, что влечет за собой дальнейшее усложнение структуры БК как в аппаратной, так и в программной части. Кроме этого, необходимость развития функций БКУР превращает его в самостоятельный процессорный модуль с более жесткими требованиями по надежности.

*Многоканальные структуры с автоматом межканального обмена, программного контроля и восстановления информации в каналах (АМКВИ)*

Введение межканального обмена в структуру БК позволяет повысить достоверность истинной работы каналов БК и сократить до пределов такта задачи время обнаружения сбоя в одном из каналов БК. Предложено множество вариантов построения структуры с АМКВИ: SIFT [29], MAFT [30], FTTP [31], Delta-4 [32] и др. [15, 18—22, 33], где за аппаратную основу взято два и более идентичных процессорных модулей с коммуникационным оборудованием для организации межканального интерфейса.

Общая особенность таких БК состоит в практически полном переложении на программное обеспечение функций поддержания отказоустойчивости как БК, так и всей СУ. Теоретический показатель надежности оборудования высок, но работоспособность БК на практике начинает зависеть от правильности алгоритмов парирования сбоев и отказов. БК с такой структурой требуют выделения в такте задачи, кроме времени на самотестирование оборудования канала, дополнительных временных «щелей» для организации межканального обмена оперативными данными входной информации, данных вычислений, результатов самотестирования и обработки полученной информации [22].

Однако при реализации сложных задач управления с большим объемом обрабатываемой информации и требуемой длительностью такта системного времени менее 100 мс возрастает потребность в повышении вычислительной мощности процессора. При этом наблюдается недостаточная пропускная способность как системной магистрали однопроцессорных модулей, так и магистрали межканальной связи.

БК такой структуры отличается двухуровневым построением аппаратуры и программ [7, 9, 30]. Разделение функций позволяет снизить загруженность тактов — как для задачи прикладного приложения, так и для задачи контроля и обеспечения отказоустойчивости. При этом появляется возможность понизить скорость межканального обмена и произвести более глубокий анализ поступающей и выдаваемой информации. Такой подход возможен при наращивании вычислительной мощности разработанных и находящихся в эксплуатации СУ АЭС одноуровневых БК с АМКВИ.

Основными проблемами при построении таких структур становятся синхронизация процессов в каналах и поддержание планирования межканальной передачи информации [7, 22, 33]. Частично решение этих проблем предлагается на программно-аппаратном уровне. В структуре Delta-4 [32] синхронизация пары процессоров обеспечивается единством таймеров службы времени, в QPR-архитектуре [8] — перекрестными связями с периферийным оборудованием, в контроллере SC300E фирмы АВВ и микроконтроллере для космических применений [15] — аппаратным мажоритированием входной и выходной информации.

*Многоканальные многоярусные структуры с аппаратным мажоритированием сигналов каждого функционального узла БК (ML-HIFT)*

В отличие от одноярусных БК, где мажоритирование информации осуществлялось (программно и аппаратно) только на входных и выходных сигналах, в многоярусной структуре БК аппаратному межканальному мажоритированию подвергаются все основные магистральные сигналы процессора, памяти, блока сопряжения с устройствами ввода-вывода (УВВ) и т. п., чем достигается парирование сбоев и отказов в каждом из основных функциональных узлов БК. Типовая структура ML-HIFT БК представлена на рис. 4.

В данной структуре на каждый функциональный блок поступает информация, выбранная по принципу "два выхода из трех". Этим достигается снижение влияния возникшего локального сбоя или отказа на работу остального оборудования.

Для ранее рассматриваемых структур при одинаковом количестве каналов аналогичное распределение возникших сбоев или отказов оборудования в соответствующих блоках и каналах БК приведет:

- к необходимости приостановки процесса управления, реконфигурации на рабочий канал и быстрому истощению запасов резервного оборудования [22] (сбой);
- к полной потере работоспособности БК (отказы).

Что же касается рассматриваемой структуры, то даже грубая оценка показывает, что ML-HIFT БК без адаптации структуры сохранит свое функционирование и без приостановки процесса управления закончит задачу управления, находящуюся на активной фазе выполнения, при одном сбое или отказе в ярусе каждого из каналов.

Применение многоярусного магистрального мажоритирования позволяет аппаратно фиксировать,

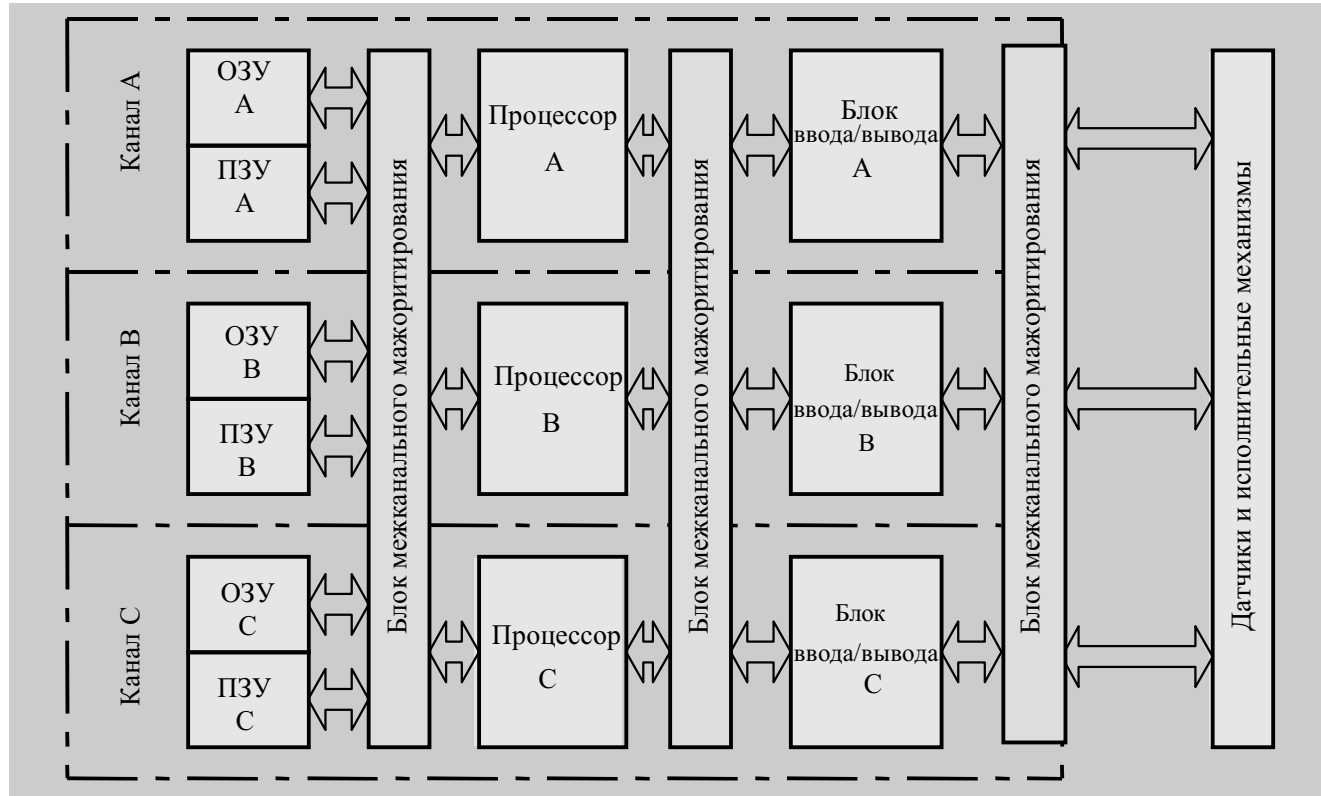


Рис. 4. Структура ML-NIFT БК

локализовать и парировать возникающие сбои не далее как к следующему циклу процессорной шины, а к концу такта задачи иметь четкую карту работоспособного состояния как БК, так и комплекса аппаратуры СУ [14]. Такая высокая скорость обнаружения и парирования отказов (с учетом опасений, касающихся применения в системах управления цифровой обработки и применения элементов дальнего зарубежья [34]) позволяет рекомендовать данную структуру БК для применения в необслуживаемых СУ с задачами, требующими очень жесткого регламента времени с тактом до единиц миллисекунд. Потребителями таких БК могут быть также СУ жесткого регламента времени с высокой длительностью активной фазы задачи управления, где не допустима ни приостановка процесса управления, ни потеря информации за предыдущий период (ракетоносители высокоточного выведения КА и космические транспортные челноки с функцией автоматической стыковки типа Hermes [9]).

Показатели по массе, габаритам, стоимости для структуры ML-NIFT сравнимы по значению с показателями для БК с АМКВИ и I/O-NIFT аналогичной канальности. Показатели надежности такого БК можно повышать (и создавать ее требуемый запас) либо увеличивая число ярусов мажоритирования оборудования, либо применяя методы адаптивного мажоритирования [12, 13], что не приводит к увеличению каналов БК и росту сопутствующих накладных расходов, отмеченных в [14]. Показатель прикладной вычислительной производительности к потреблению для данной структуры БК лучше, по сравнению с АМКВИ-структурами [14]. Очень важно заметить, что в БК с такой структурой применимо программное обеспечение одноканальной структуры, а также возмож-

но применение COTS-операционных систем — при условии сохранения компьютерной архитектуры оборудования [12, 35], т. к. обеспечение надежности происходит на аппаратном уровне.

#### Сравнительный анализ вариантов структур БК

Целесообразность использования в проекте БК СУ структуры из какой-либо группы определяется учетом интегральных показателей — радиационной стойкости, отказоустойчивости, стоимости, массы, габаритов, энергопотребления и прочих характеристик. Для детальной оценки целесообразности применения каждой из вышеизложенных структур рассматривались БК, построенные на однотипных элементах. Для каждой из структур рассчитаны ключевые параметры. При этом принималось во внимание замечание [14] о том, что структуры БК с преимущественно программным обеспечением отказоустойчивости (по сравнению с одноканальными структурами и структурами с преимущественно аппаратным обеспечением отказоустойчивости) требуют повышения вычислительной мощности процессора пропорционально времени в такте, выделенному для служебного пользования и достаточному для обеспечения задачи истинности работы.

Полученные данные приведены в табл. 2. В качестве канальной основы взят базовый набор БИС для одноканального БК с АКВИ. Для реализации специфических блоков предложены БИС программируемой логики с емкостью кристалла в 8000...25000 эквивалентных вентилях. Вычисления проведены укрупненно. В качестве единицы измерения была принята одна БИС при минимальном количестве необходимых для реализации структуры БК блоков. Прогноз затрат времени составлен по результатам анализа времени обнаружения скрытого сбоя или отказа в аппа-

Сравнительные характеристики БК различных структур на однотипных БИС

Структура типовой каналности	Количество каналов/процессоров	Приведенные на один БК масса/габариты/стоимость	Способ обеспечения отказоустойчивости	Минимальное количество тактов времени жизни скрытого сбоя	Прогнозированное количество затраченных тактов на восстановление после одного отказа	Приведенная производительность прикладной задачи	Мощность потребления типовой структуры БК
1-канальный АКВИ	1/1	1,0/1,0/1,0	Аппаратно-программный	1—4	—	0,9	1
2-канальный АКВИ	2/2	<b>2,7 /2,6 /2,8</b>	Аппаратно-программный	<b>1—4</b>	<b>&gt;100 (&gt;8000*)</b>	0,9	<b>2,3 (1,3*)</b>
3-канальный 1-процессорный АМКВИ	3/3	3,0/3,0/3,0	Программный	1—3	9—24	<b>0,5</b>	3
4-канальный 2-процессорный АМКВИ	4/8	<b>10,8/11,2/11</b>	Программный	1—2	4—24	0,8	<b>10</b>
2-канальный Delta-4	2/4	3,6 /3,5 /3,7	Аппаратно-программный	0—2	2—8	0,7	5
2-канальный QPR-БК	2/4	4,2 /4,1 /4,3	Аппаратно-программный	1—2	2—8	0,7	5
3-канальный SIFT-CPU-NIFT-I/O	3/6	6,8 /7,0 /7,5	Программно-аппаратный	1—3	2—6	0,85	7
3-канальный ML-NIFT	3/3	3,4 /3,3 /3,5	Аппаратный	<b>0—1</b>	<b>0—3</b>	<b>1,0</b>	3,3

\* Показатель для холодного резерва.

Сравнительные характеристики приведенных показателей БК

Структура типовой каналности	Эффективность использования потребляемой мощности типовой структуры БК	Эффективность использования потребляемой мощности БК, приведенная на один канал	Приведенные на канал масса/габариты	Приведенная на канал потребляемая мощность	Приведенная стоимость одного канала
2-канальный АКВИ	<b>0,39 (0,69*)</b>	<b>1,95 (3,45*)</b>	1,4/1,3	1,15 (0,65*)	1,4
3-канальный 1-процессорный АМКВИ	0,13	0,43	<b>1,0/1,0</b>	1,33	<b>1,0</b>
4-канальный 2-процессорный АМКВИ	<b>0,08</b>	<b>0,2</b>	<b>2,7/2,8</b>	2,5	<b>2,7</b>
2-канальный Delta-4	0,14	0,7	1,8/1,7	2,5	1,8
2-канальный QPR-БК	0,14	0,7	2,1/2,0	2,5	2,2
3-канальный SIFT-CPU- NIFT-I/O	0,12	0,4	2,2/2,3	2,33	2,5
3-канальный ML-NIFT	0,3	1	1,1/1,1	1,1	1,2

\* Показатель для холодного резерва.

ратуре БК [28] для случая истинности работы оборудования аппарата контроля и восстановления информации. Показатель производительности прикладной задачи учитывает время, отводимое только для выполнения системной задачи управления.

Анализ полученных результатов показывает явную, на первый взгляд, невыгодность многоканальных структур БК с четырьмя и более каналами, особенно по стоимости, мощности потребления, массе и габаритам.

Видимое преимущество однопроцессорных БК дублированной структуры (особенно с холодным резервом) по показателям мощности потребления, массы, габаритов и стоимости, сочетается с очевидным отставанием по показателю времени восстановления работоспособности, особенно при отказе, что накладывает серьезные ограничения на применение структур такого типа в СУ с требованием поддержания непрерывности процесса управления. Условию мак-

симальной скорости парирования сбоев и отказов и поддержания непрерывности процесса управления наиболее всего удовлетворяют БК с полностью аппаратным способом поддержания отказоустойчивости, особенно ML-NIFT-структуры. Последняя также имеет максимальный показатель по производительности для прикладной задачи СУ.

Для большего удобства анализа введем следующие показатели через усреднение накладных расходов для БК:

— отношение производительности БК к мощности энергопотребления типовой структуры как показатель эффективности использования потребляемой мощности;

— приведенные к одному каналу основные показатели габаритов, массы, стоимости и т. п.

Полученные характеристики структур БК по этим показателям представлены в табл. 3.

Характеристики БК по допустимым отказам

Структура типовой каналности	Допустимые отказы в аппаратуре каналов БК	Максимально допустимые отказы в аппаратуре обеспечения отказоустойчивости
2-канальный АКВИ	<b>1 отказ: процессора, или памяти, или канала ввода-вывода основного процессора</b>	<b>Не допустим никакой отказ</b>
3-канальный 1-процессорный АМКВИ	2 отказа: процессор в одном канале и какой-либо из блоков в другом	Отказ в межканальной связи с одним из каналов
4-канальный 2-процессорный АМКВИ	4 отказа: отказ любого блока на прикладном уровне в 3 каналах и отказ любого блока на жизненном уровне в одном канале	Отказы в межканальной связи с двумя каналами или любого блока жизненного уровня в двух из четырех каналов
2-канальный Delta-4	2 отказа: отказ любого блока по одному на каждый канал из пары подканалов	Отказ общего оборудования пары подканалов или отказ в межканальной связи
2-канальный QPR-БК	2 отказа: процессор в одном канале и какой-либо из блоков в другом	Отказ в перекрестных связях
3-канальный SIFT-CPU-NIFT-I/O	2 отказа: один в оборудовании процессоров или в памяти одного из каналов, второй — в оборудовании ввода-вывода	Отказ в межканальной связи с одним из каналов или любого блока жизненного уровня, один отказ на канал в мажоритарном элементе канала
3-канальный ML-NIFT (без реконфигурации)	$N$ отказов: по одному из отказов на канал в каждом из $N$ ярусов мажоритирования	По одному отказу на канал в каждом из $N$ мажоритаров каждого канала
3-канальный ML-NIFT (с реконфигурацией)	<b><math>2N</math> отказов: по два отказа в каждом из <math>N</math> ярусов в трех каналах</b>	<b>По одному отказу на канал в каждом из <math>N</math> мажоритаров каждого канала</b>

Лучший показатель эффективности использования потребляемой мощности наблюдается в двухканальной АКВИ-структуре, особенно с холодным резервированием, что отмечается как в характеристике для канала, так и для всей структуры. БК с такого типа структурой применимы в СУ, где требование минимальности энергопотребления является одним из основных, при этом не предъявляется жестких требований к регламенту обеспечения управления в реальном времени. При необходимости создания запаса избыточности в необслуживаемых СУ, таких как КА, многоканальная структура АКВИ с холодным резервированием может быть принята к рассмотрению перспективы использования.

Достаточно высокий показатель эффективности имеет также ML-NIFT-структура, а повышение требования к жесткости регламента реального времени и необходимости парирования сбоя или отказа «на лету» делает ML-NIFT-структуру лидером среди структур БК с горячим резервированием для необслуживаемых СУ с задачами навигационного типа.

Низкие показатели эффективности 3-канальных и более БК скрывают запас резервирования, который создает возможность более длительного истощения избыточности [22], что желательно при использовании COTS- и IOTS-компонентов. Кроме этого, в обслуживаемых СУ такой подход позволяет производить замену канала БК с наличием отказов на исправный в более мягком режиме [9, 30] без приостановки процесса управления и с меньшей вероятностью возникновения программно-аппаратного сбоя в СУ.

Следует заметить, что рассмотренные структуры при использовании однотипных компонентов имеют различный расчетный показатель надежности, который может либо ограничить возможность применения этой структуры БК, либо впоследствии потребовать внести изменения в проект БК, что неизбежно увеличит накладные расходы как в технической, так и в финансовой части последующего образца БК.

Необходимо дополнительно отметить, что общий показатель надежности структуры БК сильно зависит от местоположения дефекта. Так, сбой или отказ в аппаратуре БКУР двухканальной структуры может сначала выключить основной, а затем и резервный каналы — даже без объективной информации об отказах или сбоях в каком-либо канале. Для 3-канальных и более структур с межканальными связями сбой или отказ в аппаратуре межканального обмена одного из каналов парируется за счет сопоставления данных разных каналов. Как следует из анализа данных, приведенных в табл. 4, наибольшее количество допустимых полных отказов блоков в любой части оборудования позволяет парировать структура ML-NIFT, реализующая возможность накопления отказов и адаптации путем перестройки ярусов в одноканальную конфигурацию.

### Выводы

IOTS-подход, основанный на использовании электронных компонентов Industry при реализации компьютерных систем для критических и бизнес-критических приложений, является частью более общего COTS-подхода. Анализ характеристик, достигаемых технически по надежности (отказоустойчивости), показывает возможность и экономическую целесообразность использования IOTS-компонентов в бортовых компьютерах, функционирующих в тяжелых условиях агрессивной внешней среды и повышенной радиации.

В рамках IOTS-подхода применение элементов с негарантированным уровнем радиационной стойкости обязывает вводить надежность компенсацию за счет глубоко резервированных структур. Применение NIFT-структур бортовых комплексов позволяет сочетать щадящий режим работы элементов [14] и обеспечивать высокий показатель надежности многоярусной мажоритарной структуры с адаптацией, что

компенсирует потери безотказности аппаратной подержкой функций АМКВИ.

Анализ показателей множества рассмотренных отказоустойчивых структур БК позволяет найти оптимальный вариант на этом множестве с учетом желаемого запаса по различным показателям надежности и стойкости и минимума стоимости при использовании электронных компонентов Industry.

Проекты отказоустойчивых БК космического назначения являются хорошей иллюстрацией взаимной «миграции» и интеграции аппаратных, программных средств и технологий, разрабатываемых для коммерческих и критических приложений в рамках подходов IOTS (COTS) и CrOTS (Critical-Off-The-Shelf) [36].

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Стассинопулос Э. Г., Реймонд Дж. П. Радиационные условия работы электроники в космическом пространстве // ТИИЭР.— 1988.— Т. 76, № 11.— С. 23—43.
2. Сраур Дж. Р., Макгэррити Дж. М. Воздействие излучения на микроэлектронные устройства в космосе // Там же.— С. 44—74.
3. Кернс Ш. Э., Шейфер Б. Д. Разработка радиационно стойких ИС космического назначения: обзор подходов // Там же.— С. 75—125.
4. Расмуссен Р. Д. Разработка радиационно стойкого оборудования космических летательных аппаратов // Там же.— С. 146—159.
5. Савария И., Румин Н. С., Хейес Дж. Ф., Агарвал В. К. Фильтрация случайных сбоев: решение проблем обеспечения надежной работы будущих цифровых СБИС // ТИИЭР.— 1986.— Т. 74, № 5.— С. 58—75.
6. Уэйкерли Дж. Ф. Повышение надежности микро-ЭВМ путем тройного резервирования модулей // ТИИЭР.— 1976.— Т. 64, № 6.— С. 65—78.
7. David Ph., Guidal Cl. Development of fault tolerant computer system for the hermes space shuttle // Fault-Tolerant Computing. 1993. FTCS-23. Digest of Papers. The Twenty-Third International Symposium on, Aug. 1993.— P. 641—646.
8. Nakamikawa T., Morita Yu., Yamaguchi Sh. et al. High performance fault tolerant computer and its fault recovery // Fault-Tolerant Systems, 1997. Proceedings., Pacific Rim International Symposium on, 1997.— P. 2—6.
9. Roques R., Corregge A., Boleat C. Fault-tolerant computer for the automated transfer vehicle // Fault-Tolerant Computing, 1998. Digest of Papers. Twenty-Eighth Annual International Symposium on, 1998.— P. 414—419.
10. Prager K., Vahey M., Farwell W. et al. A fault tolerant signal processing computer // Dependable Systems and Networks, 2000. DSN 2000. Proceedings International Conference on, 2000.— P. 169—174.
11. Caldwell D. W., Rennels D. A. FTSM: a fault-tolerant spaceborne microcontroller // Department of Computer Science, 4731 Boelter Hall University of California, Los Angeles, CA 90024, <http://www.chillarege.com/fastabstracts/ftcs98/382.html>.
12. Байда Н. К., Кривоносов А. И., Лысенко И. В. и др. Эволюция отказоустойчивых БЦВК и направления их развития на однокристалльных микро-ЭВМ // Системи обробки інформації (Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ).— 2001.— Вип. 4.— С. 217—225.
13. Кривоносов А. И., Байда Н. К., Кулаков А. А. и др. Структурно-алгоритмическая организация и модели надежности мажоритарно-резервированных систем // Космічна наука і технологія.— 1995.— № 1.— С. 69—77.
14. Харченко В. С., Юрченко Ю. Б., Байда Н. К. Реализация проектов отказоустойчивых бортовых компьютеров космических аппаратов с использованием электронных компонент INDUSTRY // Технология приборостроения.— 2002.— № 1.— С. 74—80.

15. Caldwell D. W., Rennels D. A. FTSM: a fault-tolerant spaceborne microcontroller // Department of Computer Science.— Los Angeles, CA.— <http://www.chillarege.com/fastabstracts/ftcs98/382.html>.
16. LaBel K. A., Gates M. M., Moran A. K. et al. Commercial microelectronics technologies for applications in the satellite radiation environment / <http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/aspens.htm>.
17. Howard J., Webb E., LaBel K. et al. Synopsys V1.3 proton dose and single event effects testing of the Intel Pentium III (P3) and AMD K7 microprocessors / <http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/i062100.pdf>.
18. Тяпченко Ю., Безроднов В. ПЭВМ на борту пилотируемого космического аппарата // СТА.— 1997.— № 1.— С. 34—37.
19. Гобчанский О. Применение MicroPC в вычислительных комплексах специального назначения // СТА.— 1997.— № 1.— С. 38—41.
20. Гобчанский О. Проблемы создания бортовых вычислительных комплексов малых космических аппаратов // СТА.— 2001.— № 4.— С. 28—35.
21. Гобчанский О., Попов В., Николаев Ю. Повышение радиационной стойкости промышленных средств автоматики в составе бортовой аппаратуры // СТА.— 2001.— № 4.— С. 36—40.
22. Powell D., Arlat J., Beus-Dukic L. et al. GUARDS: a generic upgradable architecture for real-time dependable systems // Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on.— 1999.— Vol. 10, issue 6.— P. 580—599.
23. LaBel K. A., Johnston A. H., Barth J. L. et al. Emerging radiation assurance (RHA) issues: a NASA approach for space flight programs / <http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/RHA98.pdf>.
24. O'Bryan M. V., LaBel K. A., Reed R. A. et al. Recent radiation damage and single event effect results for microelectronics / <http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/NSREC99.pdf>.
25. O'Bryan M. V., LaBel K. A., Reed R. A. et al. Radiation damage and single event effect results for candidate spacecraft electronics / [http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/nsrec00\\_W21.pdf](http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/nsrec00_W21.pdf).
26. O'Bryan M. V., LaBel K. A., Reed R. A. et al. Ibid / [http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/nsrec01\\_W15.pdf](http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/nsrec01_W15.pdf).
27. Scott J. A., Preckshot G. G., Gallagher J. M. Using Commercial-Off-The-Shelf (COTS) software in high-consequence safety systems // Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-122246, 1995.
28. Kim H., Shin K. G. Evaluation of fault tolerance latency from real-time application's perspectives // IEEE Transactions on computers.— 2000.— Vol. 49, N 1.— P. 55—64.
29. Melliar-Smith P. M., Schwartz R. L. Formal specification and mechanical verification of SIFT// A Fault-Tolerant Flight Control System. IEEE Trans. Computers.— 1982.— Vol. 31, N 7.— P. 616—630.
30. Kieckhafer R. M., Walter C. J., Finn A. M., Thambidurai P. M. The MAFT architecture for distributed fault tolerance // IEEE Trans. Computers.— 1988.— Vol. 37, N 4.— P. 398—405.
31. Harper R. E., Lala J. H. Fault-tolerant parallel processor // Guidance, Control and Dynamics.— 1990.— Vol. 14, N 3.— P. 554—563.
32. Powell D. Distributed fault-tolerance—lessons from Delta-4 // IEEE Micro.— 1994.— Vol. 14, N 1.— P. 36—47.
33. Афонин В. В., Лисейкин В. А., Милютин В. В. и др. Синхронизация каналов троированных каналов ПЛИК жесткого РВ // Промышленные АСУ и контроллеры.— 2001.— № 6.— С. 58—60.
34. Бурцев В. Возможности использования зарубежной элементной базы в системах военного применения // Живая электроника России.— 2002.— С. 33—36.
35. <http://www.cpm.ru/product/stratus>
36. Харченко В. С., Харченко К. В. COTS- и CrOTS-подходы к повышению эффективности критических и коммерческих ИТ-проектов // Системи обробки інформації (Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ).— 2002.— Вип. 2.— С. 252—258.