Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Субмикрон»

На правах рукописи

m ГРИШИН Вячеслав Юрьевич

Повышение эффективности систем цифровой обработки радиосигналов в аппаратуре космических средств

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Научный руководитель д.т.н. профессор О.Р.Никитин

Москва 2016

Содержание

Введение	<u>,</u>	5	
Глава 1	Проблемы создания высокоэффективных цифровых систем обработки радиосигналов и управляющих комплексов космических аппаратов		
	1.1 Типовые задачи, решаемые системами цифровой обработки сигналов и комплексами управления космического базирования	1	
	 1.2 Обобщенная структура цифровой системы обработки сигналов и управления КА 	1	
	 1.3 Тактическое использование КА с бортовой обработкой 1.4 Особенности цифровой обработки оптических изображений. 1.5 Особенности цифрового формирования и обработки 	1 2	
	радиофизических изображений 1.6 Особенности решения задач управления КА	2: 2:	
	1.7 Проблемы разработки и применения радиационностоиких бортовых систем ЦОС космического базирования	2	
	комплексов управления	3	
	сигналов и управления КА 1.10 Выводы по главе 1	3 3	
Глава 2	Методы повышения точностных характеристик и быстродействия систем ЦОС и управления космических аппаратов		
	2.1 Повышение точности нелинейных преобразований радиофизических изображений и калибровки измерительных латчиков	3	
	2.2 Повышение точностных характеристик при реализации полиномиальных методов воспроизведения функций в цифровых	-	
	системах	4	
	 2.4 Совершенствование алгоритмов деления чисел в системах ЦОС 2.5 Выволы по главе 2 	4	

Глава 3	Совершенствование методов повышения надежности бортовых систем цифровой обработки сигналов и вычислительных комплексов управления КА с длительными САС в условиях радиационных воздействий			58	
	3.1	Обща	ая характеристика радиационных эффектов в системах	50	
	цос 3.2 рабо	иуии Иссл	едование влияния дозовых и тиристорных эффектов на обность бортовых систем нифровой обработки	30	
	сигна	алов		59	
	3.3	Инте	нсивность сбоев СБИС в экстремальных радиационных		
	усло	условиях			
	3.4	Анал	из и синтез структур отказо- и сбоеустойчивых		
	бортовых компьютеров с различными архитектурами				
	резер	виров	ания	66	
		3.4.1	Особенности системы ЦОС и вычислительных		
			комплексов управления	66	
		3.4.2	Резервирование системы ЦОС замещением	67	
		3.4.3	Постоянное резервирование в вычислительных		
			комплексах управления	71	
	3.6	Вывс	оды по главе 3	75	

Глава 4	Повышение эффективности многопроцессорных систем ЦОС и управляющих комплексов методами диагностирования		
	4.1 Функциональное диагностирование и распределённое системное диагностирование многопроцессорных систем ЦОС и управления	78	
	4.2 Алгоритм взаимного информационного согласования в многопроцессорных вычислительных системах с обнаружением и илентификацией кратных враждебных неисправностей	8/1	
	4.3 Алгоритм взаимного информационного согласования с обнаружением и идентификацией проявлений кратных	-0	
	неисправностей	89	
	вычислительных системах 4.5 Модель многопроцессорной вычислительной системы, обеспечивающая илентификацию вражлебных неисправностей	90	
	МОС с максимально возможной точностью 4.6 Выводы по главе 4	96 99	

Глава 5	Разработка высокопроизводительных сбое- и отказоустойчивых систем ЦОС и управляющих комплексов КА на основе отечественного элементно-электронного базиса	101
	5.1 Основные требования к бортовым системам ЦОС в	
	аппаратуре космических средств	101
	5.2 Синтез унифицированной структуры бортовой	
	вычислительной системы космического аппарата на основе	
	отечественной элементной компонентной базы 5.3 Развитие концепции создания бортовых вычислительных	104
	комплексов управления с резервируемой функциональностью	108
	5.4 Оценка надежности структуры системы цифровой	
	обработки сигналов и формирования изображений на борту КА	112
	5.5 Выводы по главе 5	120
Заключе	ние	122
Список с	окращений	126
Список л	итературы	129
Список р	абот автора по теме диссертации	143
Приложе	ние А Характеристики точности систем ЦОС при реализации	140
Придома	нелинеиных преооразовании	140
приложе	ние в у точнение методики достоверной оценки показателей належности при наличии ралиационных эффектов	158
Приложе	ние В Алгоритмы взаимного информационного согласования	170
Приложе	ние Г Акты внедрения	187

Введение

Космические информационные системы – одна из важнейших составляющих технической базы информационной инфраструктуры страны. Такие системы являются основой в процессе глобального экологического мониторинга Земли. С их помощью обеспечиваются добывание и транспортировка знаний о погоде и состояниях поверхности Земли и Океана, подверженных антропогенным воздействиям. На основании этих знаний изучаются явления и процессы, протекающие в Мировом океане и Земле.

Космические информационные системы в значительной мере инварианты и могут иметь двойное применение в гражданской и военной областях. Такими примерами являются их использование для контроля воздушного пространства и поверхности Земли, построение систем связи, получение разнообразной разведывательной информации [1-6].

Интеллектуальным ядром космических аппаратов являются высоконадежные вычислительные системы обработки сигналов и управляющие комплексы, которые реализуются на основе микропроцессорной техники. Космические аппараты (КА) в качестве обязательного элемента содержат бортовую ЦВМ, что обусловлено многообразием режимов работы, необходимостью обработки больших массивов информации и формирования большого числа команд управления. Режим обработки данных в КА должен производиться в темпе, соизмеримом со скоростью протекания внешних регистрируемых процессов, то есть в режиме реального времени. Это накладывает высокие требования на быстродействие ЦВМ [7-12]. К настоящему времени накоплен большой опыт создания и эксплуатации вычислительных комплексов управления КА. Следует отметить, что большой вклад в развитие космических бортовых ЭВМ для управления внесли ученые: В.А.Котельников, К.Шеннон, В.М.Глушков, В.С.Пугачев, К.А.Валиев, Ю.В.Гуляев, В.Н.Бранец, Е.А.Микрин, В.Г.Сиренко, А.В.Лобанов, Й.Эйкхофф, Р.С.Мур, Д.Томаяко и другие.

В то же время возрастающий объем задач, которые должны решать КА, требует дальнейшего совершенствования как систем цифровой обработки сигналов (ЦОС), так и вычислительных комплексов управления. При разработке методов и принципов построения высоконадежных вычислительных систем и управляющих комплексов необходим системный подход, обусловленный спецификой их разработки в условиях космоса, свойства которого еще до конца не изучены. Например, эффективность защиты элементной базы от воздействия радиации может отличаться в сотни раз и зависит от параметров орбиты, на которой используются КА (высоко эллиптическая, околокруговая или геостационарная орбита с высотами от 100...1700 км до 30000...40000 км) [13-16]. Разработано большое число методов и систем диагностики, обеспечивающих локализацию неисправностей. Но в данном случае задача построения высоконадежной аппаратуры КА должна решаться не только с точки зрения обнаружения дефектных модулей и их резервирования, но и как задача выявления самих причин появления дефектов. Поэтому для эффективного решения задач повышения надежности вычислительных комплексов и их диагностики следует использовать систему анализа и формирования причинно-следственных связей наступления отказов при накоплении эффекта действия радиации [14].

Для космических аппаратов важнейшей особенностью является разработка таких вычислительных платформ, где обеспечена оптимальная сбалансированность выбранных ресурсов между требуемой точностью вычислений и производительностью цифровых систем. Это позволяет устранить неоправданную избыточность при проектировании космического аппарата, снизить массу и энергопотребление системы ЦОС и вычислительного комплекса управления.

На современном этапе при создании КА с длительными сроками активного существования (САС) – 10 лет и более, возрастают требования к вычислительным системам и комплексам, к основным параметрам периферийных информационновычислительных систем, которые встраиваются в бортовую аппаратуру в части

-6-

обеспечения заданных параметров функционирования в течение всего времени эксплуатации. Требуется обеспечение бессбойности, отказоустойчивости, радиационной устойчивости элементной базы при ограниченной потребляемой мощности и массогабаритных характеристиках. В связи с этим повышение эффективности систем цифровых систем обработки радиосигналов и формирования радиофизических и оптических изображений на борту КА, совершенствование используемых при обработке алгоритмов, создание высоконадежных вычислительных структур является актуальной на сегодняшний день задачей.

Цель и задачи исследования

Целью работы являются разработка принципов и методов построения высокоэффективных систем цифровой обработки радиосигналов и вычислительных комплексов управления космического базирования, что обеспечивает повышение точности вычислительных процессов, надежности функционирования космических аппаратов с длительными сроками активного существования.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1. Анализ требований к современным и перспективным бортовым системам ЦОС и формирования изображений, а также особенностей реализации связанных с ними вычислительных процессов.

2. Совершенствование базовых операций ЦОС с управляемой точностью вычислений и разрядностью представления данных.

3. Анализ свойств специализированного элементно-электронного базиса систем ЦОС в условиях повышенной радиации.

4. Анализ методов обеспечения надежности систем ЦОС и вычислительных комплексов управления путем резервирования и повышения радиационной стойкости электронно-компонентной базы.

5. Разработка методов повышения надежности и реализации бортовых цифровых устройств ЦОС с гибкой ресурсосберегающей архитектурой и элементной базой ограниченной радиационной стойкости.

6. Создание высоконадежных вычислительных модулей и резервированных синхронных мультиплексных каналов информационного обмена для систем ЦОС и управляющих комплексов.

-7-

7. Совершенствование известных и создание новых методов диагностики в необслуживаемых многопроцессорных вычислительных системах ЦОС и управления.

8. Развитие методики создания высокоэффективных бортовых вычислительных комплексов с резервируемой функциональностью.

9. Реализация специализированного элементно-электронного базиса для создания стратегически значимых высоконадежных систем ЦОС с повышенной радиационной стойкостью.

10. Анализ результатов летных испытаний различных технических решений, реализованных на космических аппаратах.

Предмет и объект исследования

Объектом исследования являются техническая база, бортовые системы ЦОС и вычислительные комплексы управления космическими аппаратами. Предметом исследования являются методы и алгоритмы повышения точности цифровой обработки сигналов, надежности, сбое- и отказоустойчивости, а также радиационной стойкости многопроцессорных систем цифровой обработки сигналов в аппаратуре космических средств.

Методы исследования

В работе использовались методы теории цифровой обработки сигналов, теории надежности, теории проектирования процессорных устройств с мажоритарным принципом принятия решений, теории диагностики сложных систем, теории статистического моделирования.

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые дается систематизированное решение крупной научной задачи, связанной с созданием математических И методологических основ создания высокоэффективных И ЦОС высоконадежных вычислительных систем И управляющих комплексов космических аппаратов с длительными сроками активного существования. Научная новизна полученных в работе результатов заключается в том, что:

1. Разработаны методы управления вычислительной сложностью алгоритмов расчета ряда библиотечных функций (вычисления амплитуды комплексного радиосигнала, нормировки сигналов и других функций) в системах ЦОС при контроле точности вычислений.

-8-

2. Предложены новые методы реализации высоконадежных структур ЦОС с аппаратным мажоритированием, с управляемой деградацией надежности, с сетевой архитектурой и возможностью реконфигурации для работы в условиях высокой радиационной стойкостью.

3. Разработаны новые алгоритмы взаимного информационного согласования с обнаружением и идентификацией неисправностей в необслуживаемых многопроцессорных структурах ЦОС.

4. Разработаны методологические основы разработки высоконадежных синхронных мультиплексных каналов информационного обмена для вычислительных систем обработки сигналов и управляющих комплексов космических аппаратов.

Основные научные результаты и положения, выносимые на защиту

1. Результаты анализа радиационной стойкости электронной компонентной базы для аппаратуры космического базирования, которые обеспечивают повышение достоверности оценки показателей надежности с уточненными методиками их оценки, проведение экономически обоснованных испытаний блоков бортовой аппаратуры КА, корректировку положений и требований действующих нормативных документов по оценке стойкости по дозовым эффектам, использование экономически обоснованных технологий.

2. Методы распределенного системного самодиагностирования на базе алгоритма взаимного информационного согласования, позволяющие необслуживаемой системе обнаруживать и идентифицировать место возникновения (ОЗУ процессорного ядра, ПЗУ, синхронный мультиплексный канал информационного обмена, передающий/принимающий узел) и вид (сбой, программный сбой и отказ) проявления неисправностей.

3. Архитектура, структура И методы построения бортовых высокопроизводительных резервированных устройств ЦОС и управляющих систем КА отечественной электронной компонентной базе, обеспечивающие на гибкое масштабирование и реконфигурацию вычислительных ресурсов и обладающие высокой надежностью.

Достоверность результатов

Достоверность результатов подтверждается использованием апробированного математического аппарата, логической обоснованностью разработанных положений,

-9-

результатами натурных экспериментов и многолетней эксплуатацией аппаратуры на борту действующих космических аппаратов.

Практическая ценность

1. На основе разработанных принципов, методов, алгоритмов и структур создано семейство высоконадежных бортовых ЦВМ для цифровой обработки сигналов и управления КА, разработаны модули обмена информацией.

2. Разработаны высоконадежные вычислительные структуры КА с длительными сроками активного существования с аппаратным мажоритированием и программноаппаратным резервированием, позволяющем в 3...90 раз увеличить среднее время безотказной работы.

3. По результатам исследований определены основные направления и концепции развития отечественной электронной промышленности по производству элементной базы аэрокосмического сектора, повышения радиационной стойкости изделий.

4. Использование разработанных методов диагностирования модулей ЦОС многопроцессорных гетерогенных вычислительных машин обеспечивает бесперебойное функционирование аппаратуры на КА с длительным временем активного существования.

Разработанная с использованием результатов диссертации аппаратура установлена и успешно эксплуатируется на КА «Аркон», «Аракс», «Союз-ТМА», «Глонасс-М», «Прогресс-М», «Экспресс-А» и др. Разработанные методы унификации построения модулей обмена и ввода-вывода информации позволяют на 60 % сократить затраты на выполнение ОКР, сократить трудоемкость и сроки выполнения государственного оборонного заказа.

Личный вклад автора

Основные идеи и технические решения предложены лично автором и явились результатом исследований, в которых автор принимал непосредственное участие в течение последних 15 лет в качестве исполнителя, ответственного исполнителя, научного руководителя работ.

Реализация и внедрение

Результаты исследований использовались при выполнения ряда НИР и ОКР («Плеск», «Аракс-Р», «Метеор-ЗМ», «Оракул-П» и др.). Результаты диссертационной работы в виде аппаратуры модулей обмена, бортовой аппаратуры обработки сигналов,

бортовых управляющих ЦВМ и программного обеспечения внедрены в ОАО «Корпорация «Комета» и ОАО «РКК «Энергия», что подтверждается соответствующими актами, приведенными в приложении.

Апробация работы

Результаты исследований, составляющие основное содержание диссертации, докладывались на 12 международных, 4 всероссийских и 4 ведомственных конференциях, симпозиумах и семинарах: на VIII международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос» (Звездный городок, 2010); XXVIII -XXX, XXXII и XXXIII международных конференциях «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации, бизнесе» - IT+SE (Украина, Крым, Ялта-Гурзуф, 2001, 2002, 2003, 2005, 2006); 2-ой международной конференции по проблемам управления (Москва, 2003); 7-й международной конференции «Системный анализ и управление аэрокосмическими комплексами» (Украина, Крым, Евпатория, 2002); 6-ом международном научно-техническом симпозиуме «Авиационные технологии XXI века. Новые рубежи авиационной науки» (Жуковский, 2001); международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» (Москва, 2001); Международном семинаре «Супервычисления и математическое моделирование» (Саратов, 2001); 4-й Международной конференции «Автоматизация проектирования дискретных систем» (Минск, 2001); IV Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» (Москва, 2009); 4-ой всероссийской конференции «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур» (Томск, 2002); ХХІІ науч.-техн. конференции ФГУП "ЦНИИ "Комета" «Космические информационнонаблюдения» (Москва, 2008); III научно-технической управляющие системы конференции «Перспективы использования новых технологий и научно-технических ракетно-космической техники разработки решений В изделиях ГКНПЦ ИМ. М.В.Хруничева» (Москва, 2003); ІХ научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли» (Геленджик, 2012); II научно-практической конференции Всероссийской «Космическая радиолокация» (Муром, 2013); 1 Всероссийской научно-практической конференции «Расплетинские чтения» (Москва, 2014); 11-ой международной научно - технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (Владимир, 2015), а

- 11 -

также на ежегодных пленумах, проводимых ГК «Роскосмос» (Москва, 2005-2015) по проблемам космической техники и радиационно стойкой элементной базе.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 29 основных работ: 12 статей, в том числе 9 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК (включая 4 в БД Scopus), 12 материалов и тезисов докладов на международных, всероссийских и ведомственных конференциях, симпозиумах и семинарах. Основные технические решения, разработанные в диссертации, защищены 5 патентами РФ.

Структура диссертации, взаимосвязь отдельных глав и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 4-х приложений. Общий объем работы составляет 190 страниц, в том числе 145 страниц основного текста, 38 рисунков, 12 таблиц. Список литературы содержит 238 наименований и 29 работ автора. Приложения содержат сводные результаты по исследованию точности (Приложение А), уточнение методики учета радиационных воздействий (Приложение Б). летальное описание алгоритмов взаимного информационного согласования (Приложение В), копии документов о внедрении результатов диссертационной работы (Приложение Г) и размещены на 45 страницах.

Во *введении* обоснованы актуальность и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, приведены достигнутые новые научные результаты и основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* дан анализ типовых задач, решаемых космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Основное внимание уделено рассмотрению проблем ЦОС и формирования изображений (радиофизических и оптических) на борту КА. Определены требования к современным и перспективным системам обработки сигналов по производительности, объемам памяти, составу библиотечных функций. Рассмотрены возможные пути реализации аппаратно-программных методов повышения надежности бортовых систем ЦОС и структур отказоустойчивой радиационностойкой вычислительной среды. Поставлены задачи по совершенствованию известных и разработке новых методов самодиагностирования многопроцессорных вычислительных систем.

Вторая глава посвящена совершенствованию базовых алгоритмов ЦОС, которые многократно используются при обработке сигналов и предназначаются для реализации

на процессорах и программируемой логике. Рассмотрены методы управления точностью вычислений в зависимости от разрядности всех используемых в вычислительном процессе данных.

В третьей главе рассмотрены радиационные эффекты в сверхбольших интегральных схемах и элементах памяти, проведено исследование влияния интенсивности дозовых и тиристорных эффектов, разработаны предложения по совершенствование нормативной базы для оценки и обеспечения стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к радиационным воздействиям. Проведен анализ СБИС и компонентов аппаратуры ЦОС к ионизационным и структурным эффектам. Проведен анализ надежности многопроцессорной системы ЦОС с различными архитектурами резервирования, синтезирована высоконадежная трехканальная резервированная система с мажоритарными устройствами.

В четвертой главе разработаны методы функционального и распределённого системного диагностирования многопроцессорных вычислительных систем, применение которых позволяет алгоритмическим путем решить задачу повышения сбое- и отказоустойчивости и обеспечить диагностирование враждебных неисправностей. Разработаны новые алгоритмы взаимного информационного согласования повышенной точностью идентификации проявлений неисправностей, с обнаружением и идентификацией проявлений кратных неисправностей. Предложена модель многопроцессорной системы ЦОС, обеспечивающая идентификацию враждебных неисправностей ЦВМ, включая дуплексные межмашинные каналы связи, с максимально возможной точностью.

Пятая глава посвящена высокопроизводительным сбое- и отказоустойчивым бортовым вычислительным комплексам обработки сигналов и управления на основе отечественного элементно-электронного базиса. Проведена разработка унифицированной структуры бортовой аппаратуры обработки сигналов KA, рассмотрены системы с резервируемой функциональностью для обработки сигнальной информации, содержащие коммутационную среду, центральный бортовой компьютер, устройства ввода-вывода данных. Показано, что для построения распределенных гетерогенных бортовых аэрокосмического назначения целесообразно систем использовать технологию SpaceWire. Эта технология является критически важной для будущего бортовой радиоэлектроники космических аппаратов, поскольку с ее помощью

-13-

реализуется новая концепция архитектуры бортовых информационно-управляющих систем космических аппаратов. Применение технологии SpaceWire придает бортовой аппаратуре высокую функциональность и надежность.

В заключении сформулированы основные выводы на основании разработанных в диссертационной работе принципов и методов построения аппаратуры высоконадежных систем ЦОС и вычислительных управляющих комплексов космических аппаратов и полученных в процессе их реализации результатов.

Следует отметить, что диссертационная работа охватывает широкий круг проблем создания вычислительных систем и комплексов для цифровой обработки сигналов на борту КА с длительными сроками активного существования и имеет межотраслевой характер. В частности, материал третьей главы в значительной степени может использоваться самостоятельно при определении стратегии развития электронной компонентной базы аппаратуры, работающей в условиях воздействия радиации. Важность рассмотренных вопросов связана с тем, что развитие отечественной радиационно стойкой микроэлектроники для обеспечения компонентами стратегически значимых систем является основой национальной безопасности государства. Материалы четвертой главы носят принципиальный характер и определяют возможные пути создания сбое- и отказоустойчивых систем ЦОС в виде многопроцессорных кластеров.

Публикации автора по теме диссертации представлены отдельным списком. Ссылки в тексте диссертации на данные работы даны в квадратных скобках и снабжены дополнительной буквой «А», например [1А].

Глава 1

Проблемы создания высокоэффективных цифровых систем обработки радиосигналов и управляющих комплексов космических аппаратов

1.1 Типовые задачи, решаемые системами цифровой обработки сигналов и комплексами управления космического базирования

Одной из наиболее востребованных на современном этапе областей применения спутниковых технологий является сфера дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с помощью космических аппаратов (КА), работающих на низких круговых орбитах (НКО) или высокоэллиптических орбитах (ВЭО). Для обеспечения необходимой географии покрытия в состав орбитальных группировок (ОГ) включается от 4 до 20 КА и [5, 6, 18А]. Экономически приемлемые уровни затрат на формирование ОГ и её поддержание в планируемый период эксплуатации определяют для перспективных КА необходимость обеспечения сроков активного существования (САС) 7...10 и более лет и разработку преимущественно КА с малой массой (МКА). Это требование на 2...5 лет превышает аналогичные характеристики большинства существующих и проектируемых КА.

В настоящее время нашли два варианта цифровой обработки сигналов (ЦОС) и изображений: наземная и бортовая. Наземная обработка является самой распространенной, поскольку принципиальных трудностей ее реализация не вызывает. В наземных условиях для ЦОС можно обеспечить высокую производительность цифровых вычислительных машин (ЦВМ) при большом, условно лимитированном потреблении мощности от источников промышленной сети. Бортовая ЦОС применяется в случаях, когда оперативная информация об объекте необходима широкому кругу потребителей, причем в режиме реального времени. К таким ситуациям относятся

задачи мониторинга ледовой обстановки для проводки кораблей, регионов с чрезвычайной обстановкой, обнаружения техногенных и природных катастроф и т.п. Немаловажными задачами являются наблюдение за перемещением сил противника, за местами дислокации кораблей и воздушных судов, за театром боевых действий и решения других разведывательных задач. В рамках данной работы рассматривается вариант построения системы дистанционного зондирования Земли с бортовой цифровой обработкой сигналов. Примером такой обработки может служить радиодатчик «Траверс», установленный на модуле «Природа» космической станции «Мир» [3, 5], прекративший свое существование вместе со станцией «Мир» в 2001 г. Действующие КА с бортовой обработкой в настоящее время отсутствуют.

Проблемы, возникающие при проектировании систем цифровой обработки сигналов и управления (ЦОСиУ) МКА, заключаются в обеспечении заданной производительности и надёжности выполнения функций по управлению средствами МКА при длительных САС и жёстких ограничениях энергомассового бюджета. Вследствие общего снижения объёмов и массы МКА, в частности, элементов защиты аппаратуры ЦОСиУ возрастают локальные радиационные воздействия непосредственно на элементную базу, что снижает надежность целевой и служебной аппаратуры (ЦСА). Рассмотрим структуру системы ЦОСиУ и типовые задачи, решение которых на нее возложено.

1.2 Обобщенная структура цифровой системы обработки сигналов и управления КА

С учётом обобщения тенденций проектирования систем ЦОСиУ в отечественных И зарубежных проектах может быть синтезирована обобщённая структура унифицированной системы ЦОСиУ как для низких орбит, так и для «тяжёлых» орбит, например, для геостационарной орбиты (ГСО) [8-10]. Система ЦОСиУ представляет собой распределённую вычислительную систему, которая включает системный цифровой обработки контроллер (СК), аппаратура сигналов (ЦОС), высокопроизводительную ЭВМ управления и специализированные локальные контроллеры (ЛК), обслуживающие несколько систем (рисунок 1.1). Системный контроллер является ядром ЦОСиУ и контроллером сети, а во время сеанса связи с наземным комплексом – удалённым терминалом радиолинии Земля – МКА.

- 16 -



Рисунок 1.1 – Обобщенная структура системы цифровой обработки сигналов и управления малого КА

(КИС – командно-измерительная система, АД – астродатчик, АСН – аппаратура спутниковой навигации, ССИ – система сбора измерений, РК – разовые команды, НКУ – наземный комплекс управления)

Системный контроллер выполняет следующие функции: двусторонний обмен по радиальным связям с приёмником и передатчиком бортовой командно-измерительной системы (КИС), аппаратурой систем сбора измерений (ССИ), аппаратурой спутниковой навигации (ACH), астродатчиком (АД); двусторонний обмен с ЭBM; низкоинформационный обмен с локальными контроллерами (ЛК); верификация команд и командно-программной информации, поступающей по радиолинии с НКУ, передача их в ЭВМ и ЛК или хранение в отказоустойчивом ОЗУ в форме временных программ; выдача разовых команд в соответствии с информацией, полученной от НКУ, ЭВМ или при отработке временной программы; отработка режимов ЛК и другой БА с выдачей соответствующих разовых команд; диагностика состояния и реконфигурация ЭВМ, КИС, ССИ, АСН, АД, ЛК и магистрали; формирование бортовой шкалы времени и синхронизация её со шкалой времени НКУ и таймерами ЛК; отказоустойчивое хранение системной информации; поддержка устойчивости вычислений ЭВМ; обеспечение прямой передачи командно-программной информации с НКУ через сеть в ЛК (например, при отказе ЭВМ).

Локальные контроллеры являются оконченными устройствами сети для систем платформы и полезной нагрузки и выполняют следующие функции: диагностика состояния и реконфигурация аппаратуры обслуживаемых систем; выполнение автономных программ управления; хранение и отработка временных программ для обслуживаемых систем; декодирование и выдача локальных релейных команд, передаваемых кодом по сети с НКУ или от ЭВМ. Системный контроллер и локальные контроллеры компонуются из единой номенклатуры модулей, обеспечивающей обмен дискретными и аналоговыми сигналами с системами и обмен между собой (по сети). ЭВМ выполняет вычисления, не требующие жесткой привязки к реальному времени, но использующие значительные ресурсы: обработка полётного задания; формирование планов целевой работы; проведение навигационных вычислений по информации АСН и АД; подготовка отчётов для НКУ; подготовка временных программ для СК и ЛК, выполняемых в процессе целевой работы.

Данная структурная схема принята за основу для дальнейшего совершенствования, увеличения надежности и повышения качества работы.

1.3 Тактическое использование КА с бортовой обработкой

В [1] требуется полное удовлетворение на мировом уровне растущих потребностей социально-экономической сферы, науки, обороны и безопасности страны в решении задач с использованием отечественных космических средств. В [2] ставится задача обеспечения эффективного использования КА двойного применения для решения социально-экономических задач дистанционного зондирования Земли. В перспективных КА должны быть реализованы высокие технические характеристики, которые позволяют решать ряд природопользовательских и народнохозяйственных задач ДЗЗ с высокой детализацией. При этом они обеспечивают всепогодность съемки, высокую разрешающую способность, многообразие режимов функционирования, высокую информативность, оперативность и производительность, а также получение ряда новых данных о рельефе, смещениях, техносфере, биомассе и физико-химических характеристиках земной поверхности [3, 4, 18].

В составе орбитальной группировки системы ДЗЗ одновременно могут функционировать несколько КА с радиоаппаратурой и оптической аппаратурой. В таблице 1.1 представлены требования различных потребителей по количеству задач, решение которых востребовано соответствующей отраслью [19].

Как видно из таблицы 1.1, основным поставщиком информации являются КА с оптико-электронными средствами. Анализ информационной составляющих

представленных задач показывает, что некоторые задачи различных потребителей пересекаются, поэтому в [20] выделяются приоритетные направления развития ДЗЗ:

- получение в глобальном масштабе космических данных ДЗЗ, в том числе о состоянии атмосферы, гидросферы и поверхности Земли;

- оперативное наблюдение территорий и океана в целях мониторинга чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и военно-политического характера.

Таблица 1.1 – Требования к видам съемки (заявки министерств 2012 г.)

		Количество задач по типам съемки		
№ пп	Потребители	Оптические и ИК системы ДЗЗ	Радиосистемы ДЗЗ	
1	Росреестр	4	3	
2	Минприроды	13	4	
3	МЧС	44	14	
4	Росгидромет	8	3	
5	Росрыболовство	6	2	
6	Минсельхоз	9	-	
7	Минэнерго	13	2	
8	Рослесхоз	31	3	
9	Минрегион	10	-	
	Число задач	138	31	

Система цифровой обработки сигналов и формирования изображений в критических ситуациях должна обеспечивать потребителей информацией в реальном времени. Это позволяет обеспечить:

• высокую оперативность и надежность доставки готовой к использованию информации большинству потребителей на подвижных объектах при решении оперативных задач в чрезвычайных ситуациях;

максимальную информационную производительность КА ДЗЗ;

• упрощение наземной аппаратуры потребителя, повышение на этой основе надёжности её эксплуатации, снижение требований к квалификации персонала;

• интерактивность решения задач за счет оперативного изменения заданий на съемку интересующих заказчика регионов;

• низкую удельную стоимость добываемых данных, снижение затрат на эксплуатацию КА ДЗЗ.

Приведенный анализ практического использования КА с бортовой обработкой показывает актуальность решения задачи организации цифровой обработки сигналов и изображений на борту КА и передачи потребителю сформированного изображения.

Необходимость решения данной задачи еще более возрастает, если учесть, что в настоящее время подобные космические системы отсутствуют.

1.4 Особенности цифровой обработки оптических изображений

При осуществлении оптической съёмки используются панхроматические (ПХ), мультиспектральные (МС) или гиперспектральные (ГС) сканирующие датчики. Функция обработки получаемых изображений передаётся бортовым средствам МКА в составе бортовой аппаратуры ЦОСиУ. Обобщенная структурная схема обработки сигналов и изображений представлена на рисунке 1.2. Сигналы с оптико-электронных приборов (ОЭП) ПХ и МС каналов поступают на аппаратуру ЦОС, передаются в двухстраничное бортовое запоминающее устройство (БЗУ) и после сжатия информации – в высокоскоростную радиорелейную линию (ВРЛ) для передачи потребителям. Время начала и окончания определяется по заданным координатам объекта, прогнозу движения КА (от ЦВМ управления) и информации об угловом положении КА (прогноз – от ЦВМ управления, текущее положение – от аппаратуры спутниковой навигации АСН, звездного датчика ЗД). Также определяются номера необходимых каналов обработки информации в ПХ и МС-каналах.



Рисунок 1.2 – Структурная схема взаимодействия вычислительного модуля ЦОС с бортовым оборудованием

С целью снижения вычислительных затрат из поступающего массива информации производится выделение участков изображения местности не закрытых облачностью. По результатам обработки, осуществляемой на проходе, участки изображения, не занятые облачностью, записываются в БЗУ для последующей передачи в ВРЛ. Бракованные кадры блокируются, на обработку и в БЗУ не передаются. При наземной обработке оставшиеся кадры подвергаются глубокой цифровой переработке, при этом

осуществляется ортотрансформирование отдельных кадров с учетом цифровой модели рельефа (ЦМР). Если производится стереосъемка, то ЦМР формируется на основе обработки стереопар; применяется радиометрическая коррекция с последующим объединением кадров; устраняется смещение между кадрами; формируется цветосинтезированное изображение; формируется комплексированное изображение в естественных цветах и т.д. При обработке на борту КА требуется автоматизация всех процессов обработки, а в силу ограниченности вычислительных ресурсов аппаратуры ЦОС обработки пропускаются, остается наиболее некоторые этапы только существенная часть технологии.

Последовательность обработки сигналов ПХ и МС каналов представлена на рисунке 1.3. Для координатной привязки к местности массива информации, поступающего по ПХ и МС каналам, используется бортовая шкала времени съёмки; исходные данные планировщика задач; прогноз движения КА на маршруте съёмки; программная модель траектории по углам и угловой скорости; данные о пространственном положении и параметрах движения КА. Координатная привязка к местности осуществляется «на проходе», что существенно усложняет реализацию аппаратуры ЦОС. Сжатие информации, как правило, осуществляется аппаратно.

Спектральная селекция объектов применяется при поисках полезных ископаемых, при определении химического состава объектов ДЗЗ и производится из поступающего массива мультиспектральной (гиперспектральной) информации. При решении ряда тематических задач используются $N_{ref} = 10...20$ эталонов, а для принятия решений – метод максимального (наибольшего) правдоподобия, метод минимального расстояния, метод «спектрального фракционирования», метод спектрального угла, метод параллелепипедов, бинарное кодирование, метод дистанции Махаланобиса, ISODATA, метод *k*-средних. Анализ вычислительной сложности алгоритмов спектральной селекции показал, что наиболее затратным является метод спектрального угла, который основан на вычислении

$$\alpha_i = \arccos \frac{\sum X_i Y}{\sqrt{\sum X_i^2 \sum Y^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{ref},$$

где X_i – эталонный спектр *i*-го заданного набора спектральных линий, Y – исследуемый спектр, составленный на основе данных MC или ГС каналов.

В качестве решения по выбору эталона используется эталон с номером $I_{ref} = \arg\min_{i} \alpha_{i}$, соответствующий минимальному спектральному углу α_{i} . Нетрудно заметить, что при расчете спектрального угла вычисляется корреляционная сумма $\sum X_{i}Y$, которая используется и в других критериях классификации.



Рисунок 1.3 – Структурная схема ЦОС МС и ПХ каналов (ДО – детектор облачности, БВПС – блок выбора параметров съемки, СдИ – блок сдвига изображений, ФМК – блок фотометрической коррекции, КО – блок вычисления коэффициентов отражения, СС – блок спектральной селекции, КПр – блок координатной привязки)

На основании приведенных структур можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее насыщенным с функциональной точки зрения является ЦОС МС канала, который требует разнообразия алгоритмов обработки.

2. ПХ и МС каналы работают в большинстве режимов независимо. Поэтому можно привлечь независимо работающие вычислительные ресурсы.

3. Целесообразно отвести раздельную структурированную память для хранения ПХ изображения и МС изображения.

Анализ лучших образцов ОЭП [21] показал, что для получения разрешения на местности 1 м при полосе съемки 38 км в ПХ канале требуется 96 фотоприемников, каждый из которых имеет производительность 79 Мбит/с. Суммарная скорость потока ОЭП-ПХ составляет 96 79 7584 Мбит/с, т.е. примерно 7.6 Гбит/с. \times = Мультиспектральный канал в 5-ти узких спектральных диапазонах дает разрешающую способность 3...4 м и имеет суммарную скорость потока ОЭП-МС 7488 Мбит/с, т.е. примерно 7,5 Гбит/с. Гиперспектральное наблюдение с использованием 96 спектральных интервалов обеспечивает разрешение (проекцию пикселя) в надире примерно 25...30 м, но тоже требует работы с потоком данных, выдаваемых со скоростью 7680 Мбит/с.

Как видно из приведенных данных, одной из основных проблем обработки данных ОЭП является высокая скорость потока информации. В связи с этим целесообразно распараллеливание потока информации от ОЭП. Структурная схема преобразования потока сигналов от ОЭП представлена на рисунке 1.4. Данная структура является универсальной и пригодна в различных вариантах обработки сигналов ПХ, МС или ГС каналов. Основу цифровой обработки составляют модули обработки сигналов (МОС), которые содержат многопроцессорную вычислительную систему.



Рисунок 1.4 – Структурная схема приема и обработки сигналов оптико-электронных приборов (МОС – модуль обработки сигналов, $K_{\phi nc}$, L_M , N_{MOC} – число фото приёмных систем, мультиплексоров и модулей обработки сигналов соответственно)

Оценим объем памяти для хранения данных съемки. В панхроматическом канале память необходима для хранения данных на время анализа изображений и выявления облачности. Обработка в ПХ-канале не сжимает данных, поэтому ПЗУ при 2-х страничной организации буферной памяти на 10 минут съемки потребуется память объемом 906 Гбайт.

Еще большие объемы памяти требуются для организации работы MC канала. Как показывают расчеты, для записи результатов 10-ти минутной съемки требуется память общим объемом 3,66 Тбайт. Реализация бортового запоминающего устройства (БЗУ) с такими параметрами представляет собой серьезную научно-техническую задачу. Кроме наращивания объемов памяти в ограниченных габаритах КА, нужно обеспечить энергонезависимое хранение и воспроизведение цифровой информации, высокую скорость доступа к памяти, с вероятностью появления ошибки на бит принятой информации не более 10⁻⁸, устойчивость к воздействию вредных факторов космического пространства и эффективное стирание накопленной информации.

1.5 Особенности цифрового формирования и обработки радиофизических изображений

Бортовая аппаратура ЦОС при формировании радиофизических изображений (РФИ) реализует вычисления по заданным алгоритмам цифровой обработки сигналов и передает результаты обработки в ВРЛ. Основой для формирования РФИ служит представляет собой радиоголограмма, которая поток комплексных отсчетов радиосигнала. Методы радиоэлектронного зондирования отличаются от оптикобольшим разнообразием [18]. Выберем электронных для оценки И анализа информационных потоков маршрутный режим съемки [3].

При раздельной обработке поступающих сигналов, которая положена в основу большинства алгоритмов формирования РФИ [3], на первом этапе производится сжатие сложного радиосигнала методом быстрой свертки по строкам кадра

$$y[n,m] = F_n^{-1}(H_n * F_n\{x[n,m]\}), n = 0, 1, ..., N_R - 1;$$

где y[n,m] – выходная последовательность; F_n , F_n^{-1} – прямое и обратное дискретное преобразование Фурье; x[n,m] – входная последовательность; N_R – размерность ДПФ по дальности; m – номер строки по дальности (столбца по азимуту); H_n – весовая функция (спектр комплексно сопряженного опорного сигнала); A*B – скалярное (поэлементное) произведение.

В современных действующих КА (TerraSAR-X, TecSAR и др.), а также проектах новых КА (TerraSAR-NG, Meteop-3M №3, Экола, Смотр-Р и др.) используются радиосигналы с полосой 200...300 МГц. Это приводит к тому, что после дискретизации с минимальной частотой получаем $N_R = (2...4) \cdot 10^4$ комплексных отсчетов.

На втором этапе обработки сжатие по азимуту может производиться прямым способом, способом быстрой свертки или методом гармонического анализа. При высокой разрешающей способности и маршрутном режиме используется алгоритм быстрой свертки, который при сжатии по азимуту (столбцам) принимает вид

$$Y[n,m] = F_m^{-1}(H_m F_m\{y[n,m]\}), m = 0, 1, ..., N_{Az} - 1;$$

где N_{Az} – размер азимутальной строки; H_m – весовая (опорная) функция по азимутальной координате.

При съемке на витке в течение 10 минут размер азимутальной строки достигает $N_{Az} = (3, 6...4, 0) \cdot 10^6$ комплексных отсчетов, размерность опорной функции по азимуту в системах с высоким разрешением составляет $(1, 6...2, 0) \cdot 10^4$, поэтому для реализации ДПФ можно использовать алгоритм перекрытия с суммированием или алгоритм перекрытия с накоплением. Базовая структурная схема системы ЦОС при формировании РФИ представлена на рисунке 1.5. Кроме последовательности

выполнения операций, на рисунке стрелками в соответствующих сечениях обозначены финальные стадии основных этапов цифровой обработки сигналов.



Рисунок 1.5 – Последовательность бортовой ЦОС в маршрутном режиме (КП – комплексный перемножитель, ВК-Д, ВК-А – весовые коэффициенты по дальности и азимуту)

К вспомогательным операциям ЦОС относятся вычисление модуля РФИ $\bar{y}_{n,m} = |Y[n,m]| = \sqrt{(\text{Re}Y)^2 + (\text{Im}Y)^2}$, где ReY и ImY – действительная и мнимая составляющие изображения; некогерентное накопление (безвесовое накопление) $\tilde{y}_{l,k} = \sum_{n} \sum_{m} \bar{y}_{n,m}$, нормировка сформированного РФИ $y_{l,k} = \tilde{y}_{l,k}/y_0$ относительно выбранного значения y_0 . Эти операции выполняются в каждой точке изображения, размер которого ориентировочно можно оценить соотношением $N_{P\Phi H} = N_{Az} \times N_R$, $N_{P\Phi H} = (6...16) \cdot 10^{11}$. Это говорит о большом числе и, соответственно, о больших вычислительных затратах на производство нелинейных (кроме накопления) операций над сформированным радиофизическим изображением.

Отсюда видно, что для низкоорбитальных КА, осуществляющих ДЗЗ с высоким разрешением, информация от бортового радиодатчика поступает со скоростью до 640...960 Мбит/с (при расчете принято: разрядность квантования данных – 4 бит; число квадратурных составляющих – 2; тактовая частота АЦП – 200...300 МГц; частота повторения зондирующих сигналов – 4 кГц). При типичной работе на одном витке в течение 10 минут потребный объем памяти для записи радиофизического изображения, представленного 8-ми битными отсчетами, составит 48...72 Гбайт.

В перспективных проектах планируется увеличить тактовую частоту АЦП до максимально возможной для *X*-диапазона 600 МГц, а оцифровку данных и представление РФИ вести с разрядностью 12...14 бит. Поэтому ожидаемая скорость передачи данных в ЦОС оценивается величиной 13,5 Гбит/с, а объем памяти для хранения РФИ после 10 минут съемки – 384...576 Гбайт. При поляризационном режиме съемки эти ключевые параметры возрастают в 1,5...2 раза. Реальная

производительность ЦОСиУ при выполнении целевой задачи должна обеспечивать выполнение необходимых алгоритмов ЦОС в режиме реального времени, в этом случае необходимо достичь пиковой производительности не менее 10¹² операций/с.

1.6 Особенности решения задач управления КА

Бортовая аппаратура ЦОС должна решать большой комплекс задач по управлению КА и его системами. Жесткие требования по точности навигационновременного обеспечения (по координатам и по времени) обуславливает использование информации от аппаратуры спутниковой навигации (АСН), работающей по сигналам глобальных радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS. В космических аппаратах двойного применения задаётся требование автономного функционирования МКА до 30...60 суток без связи с наземным комплексом управления (НКУ). Обработанная информация, необходимая для управления, выдаётся в форме временных программ, которые реализуются через системный и локальные контроллеры одновременно с программами, хранящимися в ПЗУ. Обычно в ЦОСиУ предусматриваются три режима управления, выбор которых зависит от состояния аппаратно-программных средств, наличия незапланированных ситуаций, от оставшегося ресурса аппаратуры или при отработке новых режимов:

Режим координатно-временного управления в автономном полёте согласно полётному заданию или по актуальным результатам наблюдений.

Программно-временной режим, при котором вычисления выполняются на Земле, а в сеансе связи производится загрузка обновленных программ.

Аварийный режим, в котором не предусматривает выполнения целевой функции, а все управление служит для сохранения оставшихся ресурсов МКА.

К числу важнейших задач, которые решает система ЦОСиУ в масштабе реального времени на борту КА, относятся сбор служебной информации с датчиков, измеряющих определенные параметры среды (температура, давление, ускорение и т.д.), прием и обработка информационных потоков от специальной нагрузки (многозональные камеры, радиотехнические комплексы) и управление исполнительными механизмами [11]. Для решения информационно-измерительных задач (телеметрия, формирование и ввод информации бортовым потребителям) аппаратура ЦОСиУ подключается к нескольким типам шин [20А], основными из которых являются: шина управления для передачи команд; шина для передачи телеметрической информации; шина для обмена данными между МОС; шины для потоков данных целевой аппаратуры; шины временной синхронизации; шины сигналов прерываний для управления в жестком реальном времени. Скорость потока при обмене данными достигает 20 Гбит/с, а в моменты пиковой нагрузки – до 30 Гбит/с.

Из этого далеко не полного перечня состава контура управления можно сделать вывод, что в КА проблемой является обеспечение приема, коммутации и обработки информации от сотен и тысяч датчиков, организация их опроса, коммутация множества информационных потоков при обмене информации между системами. Существующие интерфейсы, использующие ГОСТ Р 52070-2003, ограничены по скорости передачи в 1 Мбит/с, имеют невысокие возможности шинной архитектуры, поэтому не могут выполнять в перспективных разработках все возлагаемые на систему ЦОСиУ функции.

Другой проблемой аппаратуры контура управления является преобразование аналоговых сигналов, поступающих от датчиков с нелинейной характеристикой, в цифровой код с высокой скоростью опроса и точностью. При решении информационноизмерительных задач диапазон относительных значений погрешностей измерений варьируется в широких пределах $\delta \in [5; 0,001\%]$, что соответствует представлению разрядности АЦП и ЦАП в 6...18 бит. Для обеспечения высоких точностных характеристик измерительных систем необходимо осуществлять калибровку, масштабирование, коррекцию нелинейности датчиков, измерительных каналов и т.д. Решение подобных задач приводит к необходимости разработки эффективных процедур расчета нелинейных функций, которые имеют минимальные вычислительные затраты.

Системы ЦОСиУ являются основой и других важнейших технических систем КА, контроля и диагностики, где высокая надежность работы является критически важным параметром, поэтому подход к созданию МОС должен быть интегрированным и комплексным [7,11,17]. Для независимой реализуемости проводимых проектов создания ЦОСиУ необходимо обеспечить возможность их разработки на основе отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ) и, прежде всего, систем на кристалле.

1.7 Проблемы разработки и применения радиационностойких бортовых систем ЦОС космического базирования

Основополагающим фактором разработки бортовых систем ЦОСиУ является электронная компонентная база (ЭКБ), которая представляет собой отдельный класс

-27-

элементной базы со своими специфическими требованиями и специализирована для применения В естественных условиях космического пространства (КП). Многочисленные отказы (более 40%) приборов на борту КА происходят по причине выхода из строя некачественных ЭРИ. Правильный выбор отечественной элементной импортозамещение – решающий компонентной базы, ee фактор успешного независимого развития космического приборостроения в РФ [15,16,4A,10A,11A]. На рисунке 1.8 представлены основные особенности эксплуатации и производства ЭКБ для базирования [15,16]. Полное радиоаппаратуры космического отсутствие В необслуживаемых КА возможности ремонта при сверхжестких требованиях по надежности приводит к необходимости комплексного использования специальных методов повышения надежности, из которых можно выделить организационное и структурно-техническое направления.

Государственные и отраслевые стандарты не всегда являются совершенными и отражают условия космического пространства, большинство методик испытаний и сертификации ЭКБ на радиационную стойкость соответствуют воздействиям, присущим ядерному взрыву. Однако космическое пространство обладает иной спецификой, которая приводит к тому, что для ЭКБ космического базирования нужно учитывать два основных фактора: стойкость к накопленной дозе и защищенность от тиристорного эффекта. Более того, требования к ЭКБ и РЭА по радиационной стойкости отличаются для разных типов орбит КА [10А].



Рисунок 1.8 – Особенности ЭКБ для бортовой аппаратуры КА

Параметрический и функциональный отказ ЭКБ наступает при достижении предельной накопленной дозы (ПНД), определяющей её радиационную стойкость. Значение ПНД определяется при постоянно включённом питании на у-установках до возникновения отказа при интенсивностях 1...10 рад/с, что на 3-4 порядка выше, чем интенсивность облучения на орбите. Для ЭКБ И устройств, специально предназначенных для использования на КА, ПНД является одним из гарантируемых классификационных параметров. Значение ПНД даётся для активного (включённого) состояния и находится в пределах 100...500 крад. Значение ПНД критических (наименее радиационно-стойких) ИМС определяет предельный срок активного существования (САС_{пр}) всего прибора:

$$CAC_{np} = \Pi H \mathcal{A}_{\kappa p} / ((\mathcal{A}_B + \mathcal{A}_{\Gamma}) \cdot k), \qquad (1.1)$$

Здесь $\Pi H \square_{\kappa p}$ – значение ПНД критического элемента, \square_B – доза, накопленная на участке выведения, \square_{Γ} – годовая накопленная доза на заданной орбите, k – коэффициент запаса, обеспечивающий требуемую вероятность безотказной работы при радиационном воздействии.

Для КА на низких орбитах со сроком активного существования до 5 лет достаточно интегральной стойкости к накопленной дозе на уровне 100 крад. Тиристорный эффект наиболее ярко проявляется при проектных нормах ниже 0,5...0,35 мкм, поэтому микросхемы космического применения должны обладать порогом устойчивости на уровне 60 МэВ·см²/мг и выше [15,16].

Требованиям 100 крад накопленной дозы и порогу тиристорного эффекта 60 МэВ·см²/мг может соответствовать ЭКБ, произведенная по уже существующим в России технологиям, с аттестованными технологическими процессами. Такими технологиями обладают НПК "Технологический центр" МИЭТ, ОАО "Ангстрем", ОАО "НИИМЭ и завод "Микрон", НИИ СИ РАН и ряд других производителей [10А]. Никаких дополнительных мероприятий для ее применения на борту КА не требуются. Очевидно, что для достижения необходимых требований по надежности и стойкости часто приходится жертвовать функциональностью и другими тактико-техническими параметрами РЭА. Чтобы не сдерживать развитие отечественной микроэлектроники, должна быть сформированы перспективные ряды ИМС и методики их испытаний, скорректированы положения отечественных стандартов по оценке и обеспечению стойкости бортовой аппаратуры КА к радиационным воздействиям [7А]. Структурно-технические методы повышения надежности требуют разработки новых схемотехнических вариантов построения системы ЦОС, организации внутренних и внешних связей. Разрабатываемая элементная база должна обеспечивать возможность реализации отказоустойчивых гетерогенных вычислительных структур, адекватно перестраиваемых под конкретные задачи обработки информации в КА. В связи с вышеизложенной проблемой передачи и приема высокоскоростных данных особый интерес представляют эффективные технологии для построения бортовых систем – SpaceWire [12, 22-24] и Ethernet (10G Ethernet, 40GbE, 100GbE) [12]. В России технология стандарта SpaceWire развивается весьма активно [22], в частности, компания НПЦ «ЭЛВИС» разрабатывает и производит в рамках семейства «Мультикор» специализированные СБИС, оснащенные встроенными контроллерами SpaceWire.

Однако в текущем состоянии технологии SpaceWire присущ ряд ограничений, прежде всего связанных с ограниченной скоростью передаваемых потоков и обеспечением гальванической развязки.

1.8 Проблемы повышения надежности за счет распределенного системного самодиагностирования систем ЦОС и вычислительных комплексов управления

Современные системы ЦОСиУ реализуются в виде многопроцессорных вычислительных систем (MBC) или МОС, которые объединяются в кластеры [25, 26]. Возрастающая сложность таких структур, невозможность обслуживания, значительные сроки активного существования выдвигают на первый план проблему повышения их надежности [27, 28]. Однако распространенные модели неисправностей [29] мало пригодны для анализа систем ЦОС, необходимо использовать более общие модели неисправностей [30–36], в том числе модели враждебных неисправностей, модели сбоя и отказа [37-44], причем частота сбоев или программных сбоев элемента может превышать частоту его отказов на несколько порядков [45].

Требуемая надежность системы может достигаться за счет введения избыточности (резервирование и автоматическое управление резервом, алгоритмическая избыточность) с целью обеспечения сбое- и отказоустойчивости системы при возникновении неисправностей ее элементов [46, 47]. Отказоустойчивость достигается двумя взаимодополняющими способами: во-первых, за счет репликации в МОС аппаратурных средств, и, во-вторых, решением одной и той же задачи на нескольких однопроцессорных МОС (репликация задач) с последующим обменом результатами и

выбором из них правильного [48]. Резервирование на уровне МОС и использование программных мажоритарных механизмов требует определенной периодической синхронности в действиях различных каналов МОС [36, 49–71] или наличия специальных аппаратно-программных механизмов, существенно облегчающих задачу синхронизации [72, 73]. Недостатки статической избыточности [74] в ЦОСиУ устраняются использованием тестового (системного) и функционального диагностирования [29, 75–81], при котором с помощью исправных МОС комплекса или системы обнаруживаются проявлений неисправностей [82–87].

Известны методы решения задачи согласованного обнаружения для одиночных враждебных неисправностей однокомплексных [35, 37, 43, 88–94] и многокомплексных [95, 96] MBC. В методах [35,37,72,89] взаимопересылка копий результатов осуществляется при помощи алгоритма взаимного информационного согласования [34, 97, 98]. Недостатком известного метода является существенная неполнота обнаружения проявлений неисправностей, что способствует повышению вероятности возникновения случаев присутствия в системе неидентифицированных отказавших МОС и может привести к отказу всей системы даже при наличии в ней исправного запаса. Методы идентификации проявлений неисправностей в дискретных устройствах [99–114] сводятся к идентификации константных неисправностей по месту возникновения.

Главная сложность в идентификации враждебных неисправностей аналогична сложности задачи их обнаружения: идентификация как по месту возникновения, так и по типу (сбой, программный сбой или отказ) должна быть согласованной между всеми исправными МОС комплекса, т.е. результаты идентификации во всех исправных МОС комплекса должны быть одинаковыми в момент принятия комплексом решения по этим Наиболее точные методы идентификации проявлений одиночных результатам. враждебных неисправностей, как по месту возникновения, так и по виду (сбой, [43,90,91,93,94,99]. сбой предложены В программный ИЛИ отказ) Методы функционального и тестового диагностирования враждебных неисправностей в МВС рассмотрены в [115–121].

Организация самодиагностирования системы по принципу сосредоточенного ядра рассматривалась в [122–124]. Реализация ядра в целях диагностирования системы внешними (по отношению к системе) средствами в ряде случаев приемлема, но не всегда оправдана из-за снижения производительности системы и необходимости

обеспечения надежной работы этих средств [125]. Поэтому в настоящей работе отдается предпочтение распределенному самодиагностированию системы ЦОСиУ.

Важным элементом исследований является используемая модель системы. Базовой моделью является графовая модель, предложенная Препаратом, Метцем, Ченом (ПМЧ-модель) [75]. Модификацией модели ПМЧ является модель Барзи, Грандони и Маэстрини (модель-БГМ) [126]. При требовании высокой надежности системы ПМЧмодель дает более точные результаты [127], поэтому в данной работе применяется именно такая модель.

В работах [128–132] рассматриваются алгоритмы распределенного системного самодиагностирования для условий полного теста и устойчивой неисправности. В [133] предложен аналитический подход к дешифрации результатов диагностирования. В [134] представлен распределенный метод дешифрации синдрома с помощью исправных модулей системы. Однако, в большинстве методов все же требуется участие обслуживающего персонала, что неприемлемо для необслуживаемых систем. В [135–137] представлены методы системного самодиагностирования, основанные на более ограниченной, чем модель ПМЧ, модели неисправности МОС, однако они не всегда позволяют выявить неисправный МОС.

В основе разработки сбое и отказоустойчивых систем цифровой обработки сигналов и вычислительных комплексов управления лежат два базовых механизма: синхронизация и согласование [139]. Согласованное принятие решения в ЦОСиУ при наличии враждебных неисправностей может обеспечиваться только при помощи алгоритмов взаимного информационного согласования (ВИС) [97, 98]. Задача ВИС известна как «проблема византийских генералов» [34], впервые сформулированная при разработке системы *SIFT*, а ее решение для наиболее общего случая полносвязной MBC было представлено в [98].

Основной проблемой организации распределенного вычислительного процесса в условиях децентрализованного управления работой отдельных МОС является отсутствие возможности у каждой из МОС иметь полную информацию о глобальном состоянии системы в целом [140, 141]. В настоящее время разработано значительное число алгоритмов ВИС, различающихся по постановкам задачи и критериям эффективности [152 – 161]. Существуют различные алгоритмы ВИС с обнаружением и идентификацией проявлений неисправностей [94, 162–168]. Они различаются

применяемыми моделями MBC, моделями неисправностей отдельных элементов, ограничениями на множество элементов системы, подвергающихся воздействию неисправностей, кратностью допустимых неисправностей и обладают различными возможностями по обнаружению и идентификации (по обработке) случившихся допустимых проявлений неисправностей. Так, в [94, 162, 167] рассматриваются MBC, в которых каждая пара MOC связана отдельным межмашинным каналом связи. Неисправность MOC в [94, 167] проявляется в виде ее произвольного поведения, в том числе и подобного "злонамеренному", а в методе взаимного удостоверительного согласования из [162] неисправность MOC не может только приводить к искажениям передаваемого ею сообщения. В [164, 168] анализируются MBC с каналами связи шинной архитектуры и широковещательным способом передачи межмашинных сообщений, однако представленные алгоритмы работают в ограниченных условиях. В лучшем случае они позволяют различить неисправность MOC и неисправность его передающего УС, если это возможно, но только для одиночных неисправностей.

Приведенный анализ показывает, что

1. Для систем ЦОС и вычислительных комплексов управления требуется построение новых моделей проявлений неисправностей в виде сбоев и отказов.

2. Отсутствует методика идентификации по месту возникновения и по типу проявлений кратных враждебных неисправностей в системах ЦОСиУ, пригодная для комплексного использования в системном самодиагностировании.

3. Отсутствуют методы *s*-сбоеустойчивого взаимного информационного согласования в ЦОСиУ, обеспечивающие как парирование проявлений враждебных неисправностей, так и их обнаружение и идентификацию с высокой точностью.

4. Отсутствуют методы защиты систем ЦОСиУ от «латентных» неисправностей в условиях возможности возникновения в МВС кратных враждебных неисправностей.

На основании проведенного анализа ставится задача разработки алгоритмов сбоеи отказоустойчивых систем ЦОСиУ, основанных на парировании враждебных неисправностей за счет репликации целевых задач и использовании динамической избыточности, применении тестового системного самодиагностирования. Алгоритмы ВИС разрабатываются для систем ЦОСиУ с межмашинными каналами связи шинной архитектуры и широковещательным способом передачи межмашинных сообщений.

1.9 Основные задачи исследования систем цифровой обработки сигналов и управления КА

Выделим следующие ключевые задачи, решаемые в данной работе:

- ✓ разработка принципов построения высоконадежных сбое- и отказоустойчивых систем цифровой обработки сигналов и управления;
- ✓ исследование влияния факторов космического пространства на основные компоненты систем ЦОС (процессоры, контроллеры, элементы памяти);
- ✓ решение частных задач по разработке и совершенствованию алгоритмов обработки для повышения эффективности вычислительных процессов.

Реализация вышеуказанных мероприятий является также и межотраслевой проблемой. Ее решение обеспечит прогресс не только в аэрокосмической отрасли, но и в энергетике, на радиотехнических предприятиях военно-промышленного комплекса, поскольку все современные радиотехнические системы содержат в том или ином виде цифровую обработку информации или цифровые каналы управления.

Одним из целевых ориентиров систем ДЗЗ является повышение разрешающей способности. Предельным значением разрешающей способности по наклонной дальности для РФИ является значение 0,25 м при работе датчика в X диапазоне. Это обусловлено ограничением полосы сигнала Регламентом радиосвязи, которая составляет 600 МГц [3]. При увеличении длины волны возможности получения РФИ с высоким разрешением существенно снижаются, например, в *L* диапазоне разрешенная полоса сигнала равна 85 МГц, а разрешение – 1,8 м. На рисунке 1.6 представлены расчетные зависимости скорости потока данных от разрешающей способности радиодатчика (сплошная линия – существующие КА, пунктир – перспективные). Для удобства перерасчета на другие параметры принято: разрядность АЦП – N_{AUII} = 10, длительность окна приемника – 200 мкс, частота повторения радиоимпульсов – 4 кГц. Точками показана предельная скорость информационного потока указанного диапазона частот при дискретизации по В.А.Котельникову. Следует также иметь в виду, что для улучшения радиометрического разрешения часто применяется некогерентное накопление радиосигналов, которое приводит к снижению разрешающей способности. Скорость выходного потока данных также уменьшается, однако скорость первичного информационного потока на входе ЦОСиУ остается прежней.

изображений Для систем получения оптических тенденции развития аналогичные: повышение пространственного разрешения до предельного уровня 0,2...0,25 м, ограниченного свойствами атмосферы; увеличение разрядности АЦП до 14...16 бит; расширение зоны захвата съемки до 40...100 км. На рисунке 1.7 приведена зависимость информационной производительности оптико-электронного датчика от способности системы. Значения графика разрешающей рассчитаны ДЛЯ панхроматического канала низкоорбитального КА с полосой захвата порядка 40 км, разрядность АЦП составляет 10 бит. Нетрудно заметить, что для перспективных систем оптико-электронного наблюдения в системе ЦОС надо обеспечить прием и обработку скоростью до 60 Гбит/с. В случае потоков данных co использования мультиспектральных или гиперспектральных ОЭП скорость информационного потока еще более возрастает, хотя разрешающая способность падает в несколько раз.



Рисунок 1.6 – Зависимость скорости потока данных от предельной разрешающей способности радиодатчика

Рисунок 1.7 – Зависимость скорости потока данных от разрешающей способности оптико-электронного датчика

Реализация высоких скоростей передачи, приема и обработки потоков данных со скоростями выше 1...10 Гбит/с представляет собой сложную научно-техническую проблему. Для сравнения можно отметить, что большинство отечественных радиационно-стойких ПЦОС имеют скорость ввода порядка 40 Мбайт/с, т.е. 320 Мбит/с, что явно недостаточно. Отсюда следует актуальная научно-техническая проблема создания высокоскоростных линий передачи, интерфейсов и процессоров ЦОС с высокими тактовыми частотами.

В алгоритмах ЦОС и управления присутствует много нелинейных операций, которые выполняются многократно. Например, при формировании РФИ размером 10×10 км² потребуется вычислить за 1 с модуль вектора до 10¹⁰ раз. Если воспользоваться библиотечными функциями, то для вычислений потребуется более 1000 процессоров ЦОС (тактовая частота 100 МГц, 10 тактов на операцию), что невозможно обеспечить в бортовой аппаратуре ЦОСиУ. Поэтому возникает проблема совершенствования известных алгоритмов вычисления нелинейных функций или разработки новых алгоритмов, обеспечивающих заданную точность вычислений, но адаптированных к работе в реальном времени и имеющих минимальные вычислительные затраты. К таким функциям относятся наиболее часто используемые в алгоритмах ЦОС и упомянутые выше функции:

- вычисление модуля комплексного сигнала $y = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}$,

- вычисление обратной функции (нормировка сигнала) y = 1/x, $y = 1/\sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}$;

- вычисление тригонометрических функций $y = \sin x$, $y = \cos x$.

Исходя из решаемых КА конкретных задач, выделим основные задачи, возникающие при создании ЦОСиУ для перспективных космических систем и КА:

- ✓ разработка комплекса мероприятий по повышению надежности ЦОСиУ и, как следствие, сроков активного существования КА;
- ✓ совершенствование методики разработки, испытаний и сертификации радиационно-стойкой аппаратуры ЦОСиУ космического базирования;
- ✓ разработка методов самодиагностирования и резервирования бортовых систем и модулей цифровой обработки как средств повышения надежности;
- ✓ создание сетевой архитектуры с высокоскоростной коммутацией для передачи потоков данных и команд в гетерогенных системах ЦОСиУ.

В соответствии с поставленными задачами их решение более подробно рассмотрим в следующих разделах.

1.10 Выводы по главе 1

В соответствии с поставленными проблемами повышения производительности систем цифровой обработки сигналов и комплексов управления космического базирования, обеспечения отказо- и сбоеустойчивости их работы, радиационной стойкости актуальными являются следующие задачи исследования:
1. Совершенствование известных алгоритмов вычисления нелинейных функций, обеспечивающих заданную точность вычислений, адаптированных к работе в реальном времени в гетерогенных системах цифровой обработки радиосигналов.

2. Анализ, обобщение и реализация специализированного элементнокомпонентного базиса для создания высоконадёжных систем цифровой обработки сигналов с повышенной радиационной стойкостью.

3. Разработка методологии обеспечения высокой надёжности систем цифровой обработки сигналов путём повышения радиационной стойкости электронно-компонентной базы; определение номенклатуры ЭКБ для реализации критически важных функциональных узлов.

4. Совершенствование методики испытаний и применения радиационно-стойкой аппаратуры бортовых систем цифровой обработки сигналов и управления космического базирования двойного назначения.

5. Разработка принципов построения высоконадежных отказоустойчивых и сбоеустойчивых систем цифровой обработки сигналов и управления.

6. Разработка новых и совершенствование известных алгоритмов взаимного информационного согласования как эффективного средства определения места и вида проявления неисправностей.

7. Разработка методов самодиагностирования и резервирования бортовых систем и модулей цифровой обработки как средств повышения надежности с самореконфигурацией и самоуправляемой деградацией.

8. Разработка методики повышения надёжности и реализации структур цифровой обработки сигналов и комплексов управления с гибкой ресурсосберегающей архитектурой и элементной базой ограниченной радиационной стойкости.

9. Разработка принципов построения систем цифровой обработки сигналов и управления космических аппаратов с программируемой коммуникационной средой.

10. Создание высоконадежных модулей обработки сигналов и резервированных, синхронных мультиплексных каналов информационного обмена для систем цифровой обработки сигналов и управляющих комплексов.

Материалы данной главы опубликованы в работах [4-7А, 10А, 13А, 22А].

Глава 2

Методы повышения точностных характеристик и быстродействия систем ЦОС и управления космических аппаратов

2.1 Повышение точности нелинейных преобразований радиофизических изображений и калибровки измерительных датчиков

Обработанные на борту космического аппарата (КА) радиофизические изображения могут поставляться в пункты приема в различных формах, поэтому в бортовой системе ЦОС должна быть предусмотрена возможность преобразования РФИ к виду, удобному для потребителя. Для последующей интерферометрической обработки (составление цифровой модели рельефа местности, определение сдвига поверхности, выявление просадок, деформации сооружений и т.п.) требуется комплексное изображение, поэтому после азимутальной обработки сигнала (рис.1.5) на высокоскоростную радиорелейную линию **(ВРЛ)** передаются квадратурные составляющие в упакованном виде. В оперативных системах радиомониторинга используются амплитудные РФИ (изображение представлено в виде отсчетов амплитуды); энергетические РФИ (отсчеты мощности); логарифмические РФИ (отсчеты удельной эффективной поверхности рассеивания, в децибелах), причем для регистрации обычно применяются целые форматы беззнаковых чисел (однобайтовый – uint8, двухбайтовый – uint16).

Формирование и отображение РФИ, сбор телеметрической информации, контроль состояния и управление КА связано с нелинейными преобразованиями радиосигнала (см. Приложение А, п. А.1). Аппаратура ЦОС воспроизводит нелинейные функции приближенно, по какому-либо критерию аппроксимируя заданную аналитически функцию. Например, при калибровке средств измерений на борту КА требуется

воспроизведение функции преобразования (градуировочной характеристики). По функции преобразования y = f(x) рассчитываются значения входной величины x

$$x = f^{-1}(y). (2.1)$$

Структура измерительной системы с калибровкой методом эталонных мер приведена на рисунке 2.1. Для расчёта функции преобразования в процессе калибровки, например, для измерения постоянных напряжений на входы измерительной системы подаются заранее известные эталонные значения измеряемых величин, в частности напряжений $U_{2m1},...,U_{2mn}$. Эти значения через интерфейс последовательно вводятся в память ЦВМ. Соответствующие выбираемые номера входов измерительной системы задаются через интерфейс с ЦВМ на адресный коммутатор. Например, при калибровке после выбора соответствующего номера входного канала измерительной системы с эталонным значением напряжений $U_{2mi}(x_{2mi})$ осуществляется запуск АЦП, и цифровой кодовый эквивалент этого напряжения заносится в память ЦВМ. Большой набор 2.1) формировать эталонных значений (см. рисунок можно с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП), управляемого соответствующим цифровым кодом, который через интерфейс задаётся с ЦВМ. Таким образом, по эталонным аналоговым значениям входных сигналов и соответствующим им цифровым кодовым эквивалентам с помощью ЦВМ в соответствии с (2.1) с определённой погрешностью аппроксимируется градуировочная характеристика $U_{RK} = f(N)$, по которой в дальнейшем автоматически с помощью ЦВМ измеряются напряжения.



Рисунок 2.1 – Измерительная система с калибровкой методом образцовых мер

Воспроизведение функции преобразования (градуировочной характеристики измерительной системы) по значениям эталонных сигналов осуществляется путём интерполяции и экстраполяции значений входного измеряемого сигнала многочленом

степени *n* как функции наилучшего равномерного приближения. При этом обеспечивается в соответствии с опорными эталонными значениями и с обобщенной теоремой Чебышева в общем случае на интервале измерений, по крайней мере, n+1 или n+2 точки $x \in [x_0; x_{n+1}]$, в которых погрешности результата измерений принимают поочередно с учётом неустранимых погрешностей равные максимальные значения [170].

В общем случае для определения f(x) используется полином наилучшего приближения степени $n \, c \, n+1$ членами ряда и константами a_i

$$L_n(x) = a_0 \cdot x^0 + a_1 x^1 + a_2 x^2 \dots + a_i x^i + \dots + a_n x^n, \qquad (2.2)$$

при заданной максимальной погрешностью метода воспроизведения полинома [8А]

$$\delta_{M\Pi} = f(x) - L_n(x).$$

Основными источниками погрешности результата на выходе устройства δ_{PM} являются погрешности метода аппроксимации δ_M , погрешности дискретизации задания операндов аргумента δ_{d} , констант a_i с дискретным квантованным представлением информации из-за ограниченных разрядных сеток δ_K и отбрасыванием разрядов, выходящих за пределы представляемых форматов данных в процессе вычислений $\delta_{\Pi P}$, и погрешности округления $\delta_{o \kappa p}$.

Устранение избыточной точности результата, ограничение числа операций при воспроизведении f(x) на интервале $x \in [a; b]$ достигается путем уменьшения числа членов в (2.2) с наибольшими степенями ряда исходя из оценки верхнего значения погрешности δ_{MII}

$$\delta_{M\Pi} = f(x) - L_n(x) \le \frac{f^{[n+1]}(x)(b-a)^{n+1}}{(n+1)!2^{2n+1}},$$
(2.3)

где $f^{[n+1]}(x)$ – производная (n+1)-го порядка.

При этом в соответствии с теоремой Чебышева для определения преобразовательной характеристики используются все члены $a_i x^i$ и константы a_i ряда [170]. Число вычислительных операций N_{op} для реализации (2.2) равно 2n, а в общем случае с учетом извлечения из памяти n+1 констант 3n+1.

Недостатки известных способов состоят в том, что а) не обеспечены предельные оптимальные соотношения по точностным характеристикам, числу вычислительных количеству обращений к памяти, быстродействию, операций, программнозатратам для диапазона максимальных значений погрешностей аппаратурным результата $\delta_p \in [50\%; 10^{-11}\%];$ б) трудно устранить избыточную точность результата, поскольку при $f^{[n+1]}(x) \neq const$ исключено точное определение узлов интерполяции Чебышева (физических эталонов измеряемых величин для калибровки); в) нельзя даже если приближенно определять узлы аппроксимации, исключать отдельные неэффективные члены $a_i x_i^i$; г) затруднительно определить константы a_i , слабо влияющие по сравнению с другими членами полинома на погрешность результата.

Обеспечить решение задачи контролируемого повышения точности расчетов, скорости ЦОС, снижения программно-аппаратных затрат, ограничения разрядных сеток операндов можно за счет исключения неэффективных членов ряда $a_i x^i$ полинома $L_n(x)$ в соответствии со стратегией максимальной идентичности функций f(x) с полиномом $L_n(x)$.

Таким образом, в зависимости от назначения системы ЦОС к алгоритмам предъявляются разнообразные требования по погрешностям и скорости проведения вычислений. Поэтому при проведении ЦОС с целью оптимизации систем по вычислительным ресурсам необходимо контролировать погрешность и выбирать соответствующий алгоритм, который обеспечивает устранение избыточной точности представления результата и заданное быстродействие.

2.2 Повышение точностных характеристик при реализации полиномиальных методов воспроизведения функций в цифровых системах

Рассмотрим методы уменьшения перечисленных выше погрешностей устройств цифровой обработки сигналов и информации. В частности, реализуем возможность уменьшения погрешностей результата путём взаимной компенсации погрешностей численного метода решения задачи, погрешностей квантования констант полинома в устройстве ЦОС, а также симметрирования составляющих погрешностей дискретизации и округления при одновременном сокращении аппаратурных затрат при хранении констант.

При реализации расчета в системах ЦОС максимальное значение погрешности результата δ_{PM} определения заданного параметра можно представить в виде

$$\delta_{PM} = \delta_{\mathcal{A}} + \delta_{MM} + \delta_{K} + \delta_{\Pi P} + \delta_{A \mathcal{U} \Pi} + \delta_{o \kappa p}, \qquad (2.4)$$

где $\delta_{\mathcal{A}}$ – погрешности дискретизации, обусловленные дискретным представлением аргумента *x* функции f(x) с конечным числом разрядов; δ_{MM} – максимальная погрешность метода; δ_{K} – погрешность квантования; $\delta_{\Pi P}$ – погрешности, обусловленные конечным числом разрядных сеток операндов при проведении вычислений, например, при округлении избыточных разрядов произведения двух сомножителей; $\delta_{A \amalg \Pi}$ – погрешность АЦП.

Рассмотрим способы уменьшения погрешности обработки информации за счёт соразмерного учёта, симметричного округления, взаимной компенсации составляющих погрешностей технических систем в соответствии с (2.4).

При воспроизведении функциональных зависимостей f(x) в системах ЦОС широкое применение нашёл полиномиальный метод аппроксимации, поскольку полином легко вычислять [8А]. Наиболее эффективными являются полиномы Чебышева P(x). В этом случае по значениям функции f(x) в узлах интерполяции x_i путём интерполяции и (или) экстраполяции её многочленом степени n наилучшего приближения, обеспечивается на интервале воспроизведения $x \in [a; b]$ по крайней мере n+1 или n+2 точек, в которых погрешности аппроксимации δ_M принимают поочерёдно с учётом неустранимых погрешностей равные по абсолютной величине максимальные значения δ_{MM} .

Определим в общем случае текущее значение погрешности метода аппроксимации δ_M функции f(x) выражением:

$$\delta_M = f(x) - P(x) = f(x) - (a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_n \cdot x^n).$$
(2.5)

Кроме погрешности метода δ_M в соответствии с (2.4) при воспроизведении функций в системах цифровой обработки информации возникают погрешности задания констант, в частности констант полинома a_i , поскольку их значения задаются в двоичной системе счисления с конечным числом разрядов. При квантовании констант полинома a_i производится урезание разрядных сеток, например, с 12 десятичных цифр

после запятой до 6 цифр. Таким образом, в реальных условиях обработки информации, проведения вычислений, аппроксимация функции f(x) полином $P_p(x)$ приобретает вид

$$P_p(x) = a_{0p} + a_{1p} \cdot x + a_{2p} \cdot x^2 + \dots + a_{np} \cdot x^n, \qquad (2.6)$$

где a_{0p} , a_{1p} , a_{2p} , a_{np} – коэффициенты реального полинома с ограниченными разрядными сетками. В этом случае при вычислении полинома возникает дополнительная погрешность воспроизведения функции δ_k , обусловленная урезанием разрядных сеток операндов:

$$\delta_k = \Delta a_{0p} + \Delta a_{1p} \cdot x + \Delta a_{2p} \cdot x^2 + \dots + \Delta a_{np} \cdot x^n.$$
(2.7)

Погрешность результата δ_{PM} , определяемая в выражении (2.) составляющими δ_{MM} и δ_k , в этом случае увеличится. Рассмотрим возможность и способ уменьшения погрешности результата, исходя из того, что эти составляющие погрешностей δ_{MM} и δ_k в соответствии с выражениями (2.5) – (2.7) коррелированны, и в определённых случаях можно произвести их взаимную компенсацию.

В качестве примера повышения точности с использованием предложенной методики рассмотрено воспроизведение функции sin(x) (Приложение А, п. А.2). Получен полином (А.6) наилучшего приближения седьмой степени [8А], графики текущего значения погрешности δ_M для 3-х комбинаций коэффициентов полинома приведёны на рисунке А.2 (Приложение А), результаты расчетов максимальной погрешности δ сведены в таблицу А.2 (Приложение А).

По сравнению с обычным полиномом Чебышева в полиноме (А.6) исключены неэффективные члены ряда и ограничена разрядность представления коэффициентов, что позволяет сократить вычислительные затраты. При оптимизации значений коэффициентов полинома *a_i* последовательно осуществляется взаимная компенсация по составляющим погрешностей, которая позволила в 12,3 раз снизить суммарную погрешность.

Данные исследования позволили выработать следующие рекомендации. Для уменьшения погрешностей дискретизации $\delta_{\mathcal{A}}$ при преобразовании аналогового сигнала в цифровой интервал дискретизации N_t следует выбирать так, чтобы аналоговые значения функции f(t) при таком приращении аргумента изменялись не более, чем на g-ю часть от погрешности δ_{PM} . В этом случае необходимо выполнение условия

$$N_t = \frac{g \cdot \delta_{PM}}{f'(t)_{\max}}$$
(2.8)

Погрешность дискретизации аргумента для детерминированных процессов можно уменьшить примерно в два раза путём симметрирования со сдвигом на полдискрета значения аргумента. Аппроксимирующий полином необходимо реализовать так, чтобы значения функции при его воспроизведении были сдвинутым на 0,5 единицы младшего разряда интервала дискретизации N_t действительными значениями аргумента t.

_ 44 _

Значение погрешности результата также можно уменьшить при преобразовании аналоговых сигналов за счет проведения вычислительных операций с дополнительными разрядами *r* и последующего отбрасывания этих разрядов на завершающем этапе. В этом случае в соответствии с (2.4) значение погрешности результата определяется следующим образом:

$$\delta'_{PM} = 2^{-r} \cdot \delta_{PM} + \delta_{o\kappa p} \,, \tag{2.9}$$

где δ_{okp} – погрешность округления при отбрасывании дополнительных разрядов r, которые используются после этапа промежуточных вычислений. Погрешность δ_{okp} определяется суммой отбрасываемых разрядов r. При симметричном округлении значения результата путём добавления константы 2^{-m-1} значение погрешности уменьшается и определяется выражением

$$\delta_{o\kappa p} = \sum_{i=m}^{m+r} b_i \cdot 2^{-i} - 2^{-m-1} , \qquad (2.10)$$

где *m* – окончательное число разрядов представления результата; b_i – разрядные цифры, принимающие значения 0 или 1, например при r = 2 имеем $\delta'_{PM} = 2^{-2} \cdot \delta_{PM} + 0,25 \cdot 2^{-m}$, где 2^{-m} – нормативное значение цены деления младшего разряда результата.

Таким образом, реализована возможность уменьшения погрешностей результата измерений путём взаимной компенсации погрешностей численного метода решения задачи, погрешностей квантования констант полинома в цифровом вычислительном устройстве, а также симметрирования составляющих погрешностей дискретизации и округления. Особенно важно, что обеспечивается уменьшение объёма памяти за счёт исключения неэффективных констант полинома, урезания разрядных сеток операндов, количества физических эталонов при калибровке без увеличения погрешности измерений [8А].

2.3 Быстродействующие методы вычисления амплитуды радиосигнала по ортогональным составляющим

В радиотехнических системах (РТС) с цифровой обработкой сигналов (ЦОС) широко используется комплексное представление радиосигналов (Приложение А, п.А.1). Демодуляция радиосигналов, формирование радиофизических изображений (РФИ), переход к некогерентной обработке связаны с вычислением амплитуды в соответствии с соотношением (А.4).

В процессорах ЦОС используются алгоритмы приближенного вычисления амплитуды комплексного сигнала [171-175, 176-179]. Модульные алгоритмы вычисления амплитуды [172] комплексного сигнала на основе модулей квадратурных составляющих $|x_i|$ и $|y_i|$ представлены соотношением (А.7) Приложения А

$$A_{i} = \max_{j=1,2...,m} \{\{c_{j}\}\},$$
(2.11)

где последовательность $c_j = a_j |x_i| + b_j |y_i|$, *m* – четное целое число.

Большая группа алгоритмов для вычисления модуля комплексного сигнала использует предварительную сортировку на максимальное $\max_{i} = \max(|x_i|, |y_i|)$ и минимальное $\min_{i} = \min(|x_i|, |y_i|)$ значения из модулей квадратурных составляющих. В обобщенном виде эти алгоритмы записываются следующим образом [171]

$$A_i = a \cdot \max_i + b \cdot \min_i, \qquad (2.12)$$

где а и b заранее определенные константы (алгоритм (А.9) Приложения А).

Использование предложенных в п.2.2 методик оптимизации полиномиального представления функций, а также коэффициентов *a* и *b*, кратных степени 2 позволили получить семейство высокоэффективных алгоритмов (Приложение A, п.A.3). В таблице А.3 представлены основные характеристики алгоритмов семейства (2.12). Значение относительной погрешности аппроксимации определялось по соотношению

$$\delta_M = |M1/M2 - 1| \cdot 100\%$$

где M1 – значение, рассчитанное по приближенному алгоритму; M2 – эталонное значение $\sqrt{x_i^2 + y_i^2}$.

На рисунках 2.2 и 2.3 представлены графики, показывающие изменение ошибки от уровня квадратурной составляющей *y_i* при фиксированном значении другой

составляющей $x_i = 100$; 2000; 4000. Графики показывают, что при положительных погрешностях ошибки минимальны при $x_i \cong y_i$, а при отрицательных – в промежутках между значением квадратуры и граничными значениями диапазона.







Дальнейшее увеличение точности вычисления амплитуды радиосигнала возможно за счет их усложнения. Алгоритмы семейства (2.11) при m = 2 эквивалентны (2.12), поэтому рассмотрим алгоритмы при m = 4; 6 и 8.

Ошибка вычислений по алгоритму (А.8) Приложения А не превышает 3% во всем диапазоне значений амплитуд сигналов (№1 в таблице А.4, Приложение А). Уровень вычислительных затрат можно оценить в 11 действий: 3 сравнения, извлечение из памяти 2-х констант, 4 умножения и 2 сложения. Использование ненулевых коэффициентов, их оптимизация и соответствующее увеличение на 10 числа действий (дополнительно 2 сравнения, извлечение из памяти 2-х констант, 4 умножения и 2 сложения. Использование ненулевых коэффициентов, их оптимизация и соответствующее увеличение на 10 числа действий (дополнительно 2 сравнения, извлечение из памяти 2-х констант, 4 умножения и 2 сложения) позволяет увеличить точность в 2,3 раза. Дальнейшее увеличение вычислительных затрат дает снижение максимальной ошибки, например, при m = 8 и общем числе действий 39 до 0,32 %. Таким образом, предложенная методика последовательного уточнения алгоритмов позволяет найти компромисс между

достигаемой точностью и вычислительными затратами. Конечно, приведенные оценки вычислительных затрат являются ориентировочными и должны уточняться по мере выбора аппаратной части устройства ЦОС.

Проведем исследование точности на влияния качественные показатели радиосистемы на примере решения задачи обнаружения радиосигнала с неизвестной случайной фазой, т.е. на системные характеристики радиотехнических систем обнаружения. На рисунке 2.4 представлена упрощенная структурная схема обработки сложного радиосигнала, которая использовалась при моделировании. Сигнал с выхода усилителя промежуточной частоты (УПЧ) поступает на устройство формирования квадратурных составляющих, использующее когерентный гетеродин (KΓ), фазовращатель на 90°, перемножители (П). Далее в устройстве формирования доплеровских каналов (УФДК) в сигнале компенсируется доплеровское смещение, что позволяет снизить потери при обработке. Сжатие сложного сигнала производится в устройстве когерентной обработки, состоящем из комплексного перемножителя (КП), генератора комплексного опорного сигнала (ГКОС) и двух канальных накопителей.



Рисунок 2.4 – Структурная схема обработки радиосигнала

В этой части схемы реализуется корреляционная обработка сигналов, составляющая основу большинства оптимальных приемников. После перехода к к амплитуде комплексного сигнала следует в общем случае некогерентно-весовая обработка. В результате накопления формируется величина Z, которая подается на пороговое устройство, где и принимается решение d_j по обнаружению сигналов. В рамках данной работы рассматривался наиболее распространенный критерий Неймана-

Пирсона [176]. С целью выяснения влияния погрешностей приближенного вычисления огибающей сигнала был проведен статистический эксперимент по обнаружению сигнала со случайной начальной фазой. Число импульсов в пачке – 12, вероятность ложной тревоги – 10⁻⁴, 10⁻⁶ и 10⁻⁸. Полученные характеристики обнаружения представлены на рисунке 2.5 [24A].



Сравнение графиков показывает, что потери в пороговом отношении сигнал-шум растут при уменьшении вероятности ложной тревоги. Использование алгоритма №1 (таблица А.3), который среди приведенных алгоритмов обладает наихудшей точностью (11,8%), дает потери не более 0,1...0,2 дБ при $F = 10^{-8}$. В случае применения других алгоритмов потери в пороговом отношении сигнал-шум еще меньше.

Проведенные эксперименты позволяют рекомендовать для реализации обнаружителей сигналов любой алгоритм таблицы А.3 (Приложение А), которые обладают простотой в вычислительном плане и имеющие максимальную ошибку вычислений 4...12%. Однако в случае формирования радиофизического изображения с высоким радиометрическим разрешением 0,5...0,75 дБ [1] такой точности вычисления недостаточно, поскольку ошибка составляет 0,34...0,97 дБ. В этом случае необходимо применять высокоточные алгоритмы, обеспечивающие ошибки не более 0,05 дБ, но более затратные с вычислительной точки зрения. Аналогичные требования возникают в многоканальных радиотехнических системах [177], при корректировке сигналов по частотному смещению [178], при решении разнообразных измерительных задач.

2.4 Совершенствование алгоритмов деления чисел в системах ЦОС

При цифровых изображений, определении нормировке комплексного коэффициента передачи системы, адаптивной фильтрации, синтезе речевых сигналов и ряде других приложений возникает необходимость выполнения операции деления в реальном времени. Операция деления является одной из наиболее востребованных, но в то же время высоко затратных в вычислительном плане операций ЦОС. Особую важность эффективная реализация данной операции приобретает в системах ЦОС на ПЛИС или гетерогенных структурах (комбинация ПЛИС и сигнальных процессоров) Обеспечение предельно оптимальных соотношений показателей точности, быстродействия и программно-аппаратных затрат реализации вычислительных процессов повышает эффективность вычислительных структур ЦОС. Задача деления двух чисел A/B обычно разбивается на два этапа: нахождения числа r, обратного делителю B (r = 1/B), и последующего перемножения r и A [180,181]. В отличие от известных работ в данном разделе быстродействующие методы и алгоритмы деления А/В при более общих представлениях операнда делителя В для нормированного интервала делителя $B_{\mu} \in [1; 2]$. В соответствии с вышеизложенным задача состоит в получении обратного значения знаменателя r = 1/B [180].

Комбинированные полиномиальные методы вычисления 1/В

Если представить формат числа в виде B = 0, xxxxxx, то возникает проблема проведения вычислений при значениях знаменателя в окрестности нуля. Когда $B \to 0$ функция 1/*B* стремится к бесконечности, то аппроксимация затруднена. Приращению аргумента ΔB соответствует приращение функции f(B)=1/B, определяемое выражением $\Delta f(B) = \frac{1}{B^2} \Delta B_{\mu}$, где ΔB_{μ} – минимальный дискрет задания делителя на рабочем интервале. Таким образом, при $B \to 0$ суммарное значение погрешности результата будет в значительной степени определяться минимальным значением *B* и дискретом ΔB_{μ} задания делителя. Поэтому предварительно ограничим нижнее значение интервала некоторым минимальным значением *B*_{мин}, которое будет определять диапазон изменения выходной величины.

В качестве примера рассмотрен случай начального значения $B_{\text{мин}} = 2^{-7}$. В таблице А.5 (Приложение А) для этого случая представлены полиномы наилучшего

приближения 1...3-й степеней и их основные характеристики. Значения относительных δ% определены приведенных погрешностей как отношения максимальных погрешностей метода аппроксимации к максимальным значениям обратной величины делителя или результата 1/0,0078125=128. Для полинома первой степени максимальное значение относительной приведенной погрешности по отношению к значению $1/B = 2^7$ соответствует 75,75/128=0,5918. Анализ таблицы А.5 показывает, что, например, уменьшение погрешности результата для полинома 3-й степени в 2 раза относительно степени достигается при использовании 6-ти полинома 1-й дополнительно арифметических операций. Это означает, что метод вычислений с использованием только одного полинома для аппроксимации даже на небольшом интервале $B \in [2^{-7}; 1]$ не эффективен, поскольку не обеспечивает высокой точности. Чтобы значения относительных приведенных погрешностей результата вычислений были не более 0,25...2%, проведем уменьшение интервалов аппроксимации для полиномов и разделим весь диапазон изменения В на несколько неравных подинтервалов. Пример трех различных интервала аппроксимации $B \in [0,0136;1], B \in [2^{-7};1], B \in [2^{-8};1]$ рассмотрен в п.А.4. Алгоритмы и результаты их исследования представлены в таблице А.6 (Приложение А). Приведенные в таблице А.6 относительные значения приведенных погрешностей 8% рассчитываются исходя из максимальных значений результата вычислений на рабочих интервалах аппроксимации. Для схем аппроксимации 1L₂, 2L₂ с учетом решения неравенства $B < B_{\text{мин}}$ необходимо реализовать проверку двух условий, выполнить четыре алгебраические операции, извлечь из памяти одновременно 5 констант. Пример структурной схемы алгоритма 1L₂ деления и организации вычислительного процесса приведен на рисунке А.3 (Приложение А).

Соответственно для интервалов $B \in [0,0136;1]$, $B \in [2^{-7};1]$ получены значения приведенных относительных значений погрешностей результата 1,39% и 2,07% при общем числе операций равном 11. Для интервала аппроксимации $B \in [2^{-8};1]$ с общим числом операций реализации алгоритма по схеме **2L**₄ равной 17 приведенная относительная погрешность составляет 0,29%. Рассмотренные алгоритмы целесообразно использовать в специализированных вычислителях измерительных приборов с классами точности порядка 2...0,5. В тоже время при увеличении числа арифметических операций в схеме $2L_4$ по отношению к схеме $2L_2$ на 6 значение погрешности уменьшается только в 1,39/0,29=6,62<2³ раз. Таким образом, в интервале относительных значений погрешностей порядка 0,2%...2% для увеличения на единицу числа значащих двоичных цифр результата необходимо дополнительно затрачивать примерно две операции. Поэтому дальнейшее повышение точности вычислений только за счет простого увеличения числа подинтервалов аппроксимации приведет к дополнительным программно-аппаратурным затратам и снижению быстродействия.

Полиномиальный метод аппроксимации с нормализацией аргумента

Для повышения эффективности вычислений предлагается перевод значений аргумента в один нормированный интервал, например $B_{\mu} \in [2^{-1}; 1]$, одновременно соответствующий интервалу представления мантиссы числа в формате с плавающей запятой. При значениях аргумента, не входящих в указанный нормированный интервал, производится операция сдвига делителя так, чтобы его нормированное значение оказалось в требуемой области B_{μ} . После вычисления нормированного значения функции производится обратная операция сдвига, чтобы вернуться к исходному рабочему интервалу и получить действительное значение 1/B. В таблице А.7 (Приложение А) приведены полиномы наилучшего приближения для нормированных интервалов $B_{\mu} \in [2^{-4}; 1], [2^{-3}; 1], [2^{-2}; 1], [2^{-1}; 1] и их характеристики точности.$

На структурной схеме (рисунок 2.6) представлена реализация полиномиального метода аппроксимации с нормализацией аргумента в интервал $B_{\mu} \in [2^{-4};1]$, где вычисления нормированных значений производятся полиномом 1-й степени. Используя алгоритм (рисунок 2.6), рассчитаем с помощью полинома 1-й степени (таблица А.7, Приложение А) значение обратной величины делителя 1/0,0039215. Поскольку 0,0039215 = $2^{-4} \cdot 0,062744 = 0,501952 \cdot 2^{-7}$, то в соответствии с неравенством $2^{-8} \le B < 2^{-4}$, преобразуем делитель к нормированному интервалу аппроксимации $B_{\mu} \in [2^{-4};1]$ путем умножения его на коэффициент 2^{4} . Значение $B_{\mu} = 0,062744$ используем для приближенного вычисления нормированной обратной величины делителя 1/0,062744 = 15,9378. Полученное приближенное значение $1/B_{\mu} \approx 11,4837$ с абсолютным значением погрешности нормированного интервала 15,9378 – 11,4837 = 4,4541 для получения действительного значения необходимо умножить на коэффициент $2^{k} = 2^{4}$. В данном

случае значение k определяется из значения делителя, соответствующего нижней границе нормированного интервала аппроксимации $B_{\mu} = 2^{-k} = 2^{-4}$, откуда k = 4. Различие между действительным значением 1/0,0039215 = 255 и полученным приближенным 11,4837·2⁴ = 183,7392 определяют абсолютную 255 – 189,7392 = 71,2608 и приведенную относительную 71,2608 /256= 0,278 погрешности результата.



Рисунок 2.6 – Структурная схема алгоритма вычисления значений функции f(B) = 1/B при значениях аргумента $B \in [0; 1]$, рабочем интервале $B \in [2^{-8}; 1]$ и нормированном интервале аппроксимации $B_{\mu} \in [2^{-4}; 1]$

Для более точного вычисления с помощью полинома 1-й степени (таблица А.7, Приложение А) нормированной обратной величины делителя следует использовать нормированные интервалы $B_{\mu} \in [2^{-2};1]$ (рисунок 2.7) или $B_{\mu} \in [2^{-1};1]$. Тогда для нормированного интервала $B_{\mu} \in [2^{-1};1]$ получим при значении делителя 0,0039215=0,501952 $\cdot 2^{-7}$ $B_{\mu} = 0,501952$ ($1/B_{\mu} = 1,99222$) и приближенное значение $1/B_{\mu} \approx 1,9102$. Для приближенного значения результата 1,9102 $\cdot 2^{7} = 244,50$ абсолютное значение погрешности будет равно 255 – 244,50=10,5. Ему соответствует значение относительной приведенной погрешности результата $\frac{10,5}{256} \cdot 100\% = 4,1\%$.

При реализации алгоритма с рабочим интервалом $B \in [2^{-8}; 1]$, нормированным интервалом $B_{\mu} \in [2^{-4}; 1]$ и использовании полинома 1-й степени обеспечивается значение приведенной относительной погрешности не более 28,2%. При этом

необходимо обеспечить выполнение двух условий, операций нормирования и перенормирования, извлечение из памяти 3 констант, кроме того при реализации полинома 1-й степени необходимо реализовать еще 4 операции. Всего необходимо выполнить 11 операций. Для нормированного интервала $B_{\mu} \in [2^{-1};1]$ при использовании 1-й степени обеспечивается значение приведенной относительной полинома погрешности не более 4,3%. При этом по аналогии со схемой рисунка 2.7 необходимо обеспечить выполнение четырех условий, операций нормирования и перенормирования, извлечение из памяти 5 констант, кроме того при реализации полинома 1-й степени необходимо реализовать еще 4 операции. Всего необходимо выполнить 15 операций. Применение полинома 2-й степени с общим числом операций 18 обеспечивает уменьшение погрешности в 4,3/0,74 =5,8 раз. Рассмотренные примеры и анализ таблицы А.7 (Приложение А) показывают, что приближение многочленами на оптимальном интервале $B_{\mu} \in [2^{-1}; 1]$ характеризуется фактически линейной сходимостью, и при увеличении степени интерполирующего многочлена на 1 число верных значащих двоичных разрядов результата увеличивается примерно на 2,5.



Рисунок 2.7 – Структурная схема алгоритма вычисления значений функции f(B) = 1/B при значениях аргумента $B \in [0;1]$, рабочем интервале $B \in [2^{-8};1]$ и нормированном интервале интерполяции B_{μ} [2⁻²;1]

В интервале значений погрешностей порядка 0,1%...0,01% и менее для увеличения на единицу числа значащих двоичных цифр результата необходимо дополнительно затрачивать примерно одну операцию. Таким образом, при значениях приведенной относительной погрешности порядка 0,15%...0,1% метод с нормализацией интервала становится более эффективным, чем комбинированный метод. В то же время дальнейшее повышение точности вычислений только за счет увеличения степени полинома приведет к дополнительным программно-аппаратурным затратам и снижению быстродействия.

Итерационные и гибридные методы вычислений

Итерационная формула вычисления значения величины обратной делителю производится в соответствии с формулой Ньютона:

$$r_{i+1} = r_i \times \left(2 - B \times r_i\right),\tag{2.13}$$

где r_i – приближение к величине 1/B на итерации *i*.

При реализации одной итерационной процедуры необходимо выполнить 3 операции и извлечь из памяти 2 константы. Из (2.13) получим зависимость, связывающую абсолютную погрешность очередного приближения $\Delta r_i = 1/B - r_i$, число итераций *i*, значение делителя *B* и погрешность начального приближения

$$\Delta r_i = f(r_0, i, B) = B^{-1} \times (B \times \Delta r_0)^{2^i}.$$
(2.14)

Независимо от знака Δr_0 , $\Delta r_i > 0$ при $i \ge 1$. Значения Δr_i в (2.14) будут убывать при увеличении *i*, если $|B \times \Delta r_0| < 1$, откуда $0 < r_0 < 2/B$. В соответствии с (2.14) число верных значащих цифр на каждой итерации возрастает примерно вдвое. В тоже время выполнение условий неравенства $|B \times \Delta r_0| < 1$ существенно ограничивает диапазон представления делителя *B*. В связи с этим рассмотрим использование итерационного метода только на нормированном интервале $B_{\mu} \in [2^{-1}; 1]$ и сравним эффективность его применения по сравнению с другими методами. Например, если задать начальное приближение как среднее значение по отношению к границам нормированного интервала $B_{\mu} \in [2^{-1}; 1]$, то $r_0 = (2+1)/2 = 1,5$. В этом случае при B = 1, $\Delta r_0 = B^{-1} - r_0 = 0,5$ после одной и двух итераций в соответствии с (2.13), (2.14) получим $r_1 = 0,75$, $\Delta r_1 = 0,25$ и $\Delta r_2 = 0,0625$. Приведенная относительная погрешность при B = 1 для нормированного интервала $B_{\mu} \in [2^{-1}; 1]$ составит $\frac{0,0625}{2} \times 100\% = 3,12\%$. В данном случае при двух итерациях, реализуемых за десять операций, итерационный метод значительно уступает комбинированному полиноминальному методу при $B_{\mu} \in [2^{-1}; 1]$, поскольку при использовании полинома второй степени (таблица А.7) с 7 операциями обеспечивается меньшее значение приведенной относительной погрешности в 0,74%. В тоже время в связи с удвоением числа двоичных цифр результата после каждой итерации итерационный метод при хорошем начальном приближении за каждые пять операций обеспечивает удвоение числа двоичных цифр результата. Например, если использовать в качестве начального приближения (таблица А.7) полином первой степени с максимальной относительной погрешностью $\delta_{\rm M} = 1,37 \times 2^{-4}$, то при B = 1, $\Delta r_0 = 0,0858592$ и уже после первой итерации получим $\Delta r_1 = 0,0073719$.

Проведем сравнение комбинированного полиномиального и гибридного методов вычислений на примерах. Схемы $2L_2$, $2L_4$ обеспечивают соответственно при 11 и 17 операциях относительные приведенные погрешности 2,07% и 0,29%. Для гибридного метода при использовании в качестве начального приближения полинома первой степени с 4-мя значащими двоичными цифрами имеем после одной итерации порядка восьми значащих цифр с погрешностью 0,4%. Таким образом, только при вычислении нормированного значения при $B_{\mu} \in [2^{-1};1]$ необходимо затратить 9 операций. Для перехода к рабочему интервалу $B_{\mu} \in [2^{-8};1]$ общее число операций будет равно 20. Поэтому при значениях приведенных погрешностей порядка 2%...0,2% эффективными являются комбинированные полиномиальные методы аппроксимации, например, по схемам $2L_2$, $2L_4$. При значениях приведенной относительной погрешности порядка 0,2%...0,1% метод вычислений с нормализацией интервала становится более эффективным, чем комбинированный метод.

При числе значащих цифр результата порядка 14...16 и более целесообразным будет применение гибридного метода. В качестве эффективного стартового начального приближения следует использовать полиномы первой или второй степени с 4 или 7 значащими разрядами. В этом случае за одну итерацию с пятью операциями

обеспечивается приращение на 4 или 7 значащих разрядов результата, а в последующих итерациях увеличение числа значащих цифр идет в геометрической прогрессии.

2.5 Выводы по главе 2

1. Для решения широкого класса прикладных задач ЦОС с диапазоном приведённых погрешностей выходных данных 20%...0,001% разработаны оптимальные численные методы и оригинальные адекватно перестраиваемые высокоэффективные вычислительные структуры. Обеспечено повышение быстродействия по сравнению с известными вычислительными схемами на 20...300%. Предложены эффективные вычислительные алгоритмы решения типовых задач с устранением избыточной точности путем обеспечения дискретного приращения 3...20 и более значащих двоичных цифр результата при фиксированном возрастании сложности алгоритма не более чем на 1...6 операций в диапазоне представления выходных данных 4...64 двоичными разрядами. Предлагаемые методы воспроизведения функциональных зависимостей реализованы, в частности, в системах формирования РФИ, при создании библиотечных программ процессоров семейства «Мультикор».

2 Разработан способ уменьшения погрешностей результата путём взаимной компенсации погрешностей численного метода решения задачи, погрешностей квантования констант аппроксимирующего полинома в цифровом вычислительном устройстве, а также симметрирования составляющих погрешностей дискретизации и округления. В соответствии со стратегией максимальной идентичности графиков воспроизводимых функциональных зависимостей на основе набора эталонных значений, получены аппроксимации, градуировочные характеристики для калибровки измерительных систем в виде полиномов наилучшего равномерного приближения степени n С ограниченным числом членов m < n+1интерполирующие И экстраполирующие значения эталонных сигналов.

3. Проведен сравнительный анализ и улучшение быстродействующих алгоритмов ЦОС для вычисления амплитуды комплексного радиосигнала, воспроизведения нелинейных функций, деления чисел с позиций получения предельных оптимальных соотношений по точностным характеристикам и программно-аппаратным затратам. Для систем ЦОС обеспечено формирование от 4 до 24-х и более значащих

двоичных разрядов результата в форматах представления операндов с фиксированной или плавающей запятой.

4. Проведено исследование множества допустимых альтернатив реализации операции деления чисел в системах ЦОС в соответствии с заданной целевой функцией оптимизации критериев вычислительного процесса: точностных характеристик и программно-аппаратных затрат. Предложены эффективные вычислительные алгоритмы с устранением избыточной точности путем последовательного приращения не менее 1...3 значащих двоичных цифр результата при последовательном дискретном возрастании сложности вычислительного алгоритма не более чем на 1...4 вычислительных операции в диапазоне представления результата вычислений 4...24 и более двоичными разрядами.

5. Проведенное статистическое моделирование показало, что для систем обнаружения радиосигналов со случайной начальной фазой для вычисления амплитуды комплексного радиосигнала достаточно иметь погрешность алгоритма 10..12%, при этом в широком диапазоне вероятностей ложной тревоги потери в пороговом отношении сигнал-шум не превысят 0,1...0,2 дБ.

6. Разработанные алгоритмы вычисления амплитуды комплексного радиосигнала, воспроизведения нелинейных функций, деления чисел целесообразно использовать как на уровне аппаратной реализации специализированных вычислительных устройств цифровой обработки сигналов на ПЛИС, так и на уровне макрорасширений команд сигнального процессора.

Материалы главы опубликованы в работах [8А, 9А, 23А, 24А].

Глава 3

Совершенствование методов повышения надежности бортовых систем цифровой обработки сигналов и вычислительных комплексов управления КА с длительными САС в условиях радиационных воздействий

3.1 Влияние радиационных эффектов на системы ЦОС и их компоненты

Уровень требований к ресурсам производительности и памяти бортовых систем цифровой обработки сигналов и вычислительных комплексов управления (ЦОСиУ) КА в сочетании с ограничениями энергомассового бюджета определили необходимость применения при их разработке высокоинтегрированной элементной базы [7-11, 10А]. Сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) индустриального диапазона применения характеризуются ограниченной стойкостью к поглощенной дозе от электронов и Земли (PП3), протонов естественных радиационных полей повышенной чувствительностью к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) – ядер галактических космических лучей (ГКЛ) и ионов солнечных космических лучей (СКЛ) – с последствиями в виде катастрофических (необратимых) отказов, а также к воздействию ТЗЧ СКЛ и высокоэнегетических протонов (ВЭП) СКЛ и РПЗ с последствиями в виде сбоев (обратимых отказов) [182]. В технических требованиях на бортовые вычислительные системы и комплексы, как правило, задаются минимально допустимое значение коэффициента запаса К₃ по дозе [183] (в качестве критерия стойкости) и вероятность безотказной работы Р_{ЦОСиУ} [184]. Для ряда КА вообще игнорируются требования по устойчивости к воздействию ТЗЧ и ВЭП.

Вместе с тем, как справедливо отмечается в [185], методология раздельной оценки стойкости и надежности, оправданная в применении для РЭА КА со сроками активного существования (САС) до 3...5 лет, становится неприемлемой при проектировании ЦОСиУ КА с САС 7...10 и более лет. Необходимо уже учитывать совместное действие радиационных и нерадиационных факторов. Задача достижения требуемой надежности является комплексной и решается в нескольких направлениях: 1) комплектующих использование высоконадежных элементов, компонентов И конструкционных материалов; 2) введение структурной и аппаратной избыточности (резервирования); 3) использование информационной избыточности (кодирования или, например, взаимного информационного согласования, рассмотренного в разд. 4); 4) применение временной избыточности (тестирования, диагностирования и т.д.).

Общая характеристика радиацонно-стимулированные радиационных эффектов в системах ЦОС и их компонентах, основанная на работах автора [6A,13A,14A,20A] с привлечением критического анализа работ [186–208], приведена в Приложении Б, п.Б.1.

В данном разделе рассматривается влияние радиационных факторов на СБИС и резервированные ЦОСиУ, которые предназначены для поддержки различных функций ЦОС в составе КА с длительным сроком активного существования, а также методы аппаратного повышения их надежности [4А-7А, 12А-14А, 19А, 25А–29А].

3.2 Исследование влияния дозовых и тиристорных эффектов на работоспособность бортовых систем ЦОС

Влияние эффектов Э1 – Э5 на показатели надежности определяется их интенсивностью в СБИС, зависящей от параметров чувствительности СБИС, степени ее защиты и уровня радиационных воздействий. Далее рассматриваются оценки влияния на компоненты систем ЦОСиУ наиболее значимых эффектов, при этом для предварительных оценок используется модель изотропного воздействия частиц космического пространства, проходящих через пассивную сферическую защиту с массовой толщиной $\delta = 1$ г/см², которая соответствует нижней границе суммарной защиты в КА при использовании из-за ограничений по массе конструктивного размещения БК на стенках негерметизированных сотовых панелей [4A, 14A].

Оценки поглощенных доз от электронов Д_е, протонов Д_р и их суммы Д на орбитах применения приведены в сводной таблице 3.1. Оценки проведены для внешних потоков частиц на орбитах ВЭО и ГСО с САС 7 и 10 лет, соответственно, для которых имеют

место наиболее жесткие радиационные условия эксплуатации, особенно по плотности потоков ТЗЧ и ВЭП. Следует заметить, что оценки доз в таблице 3.1, соответствующие моделям прохождения изотропных потоков частиц через эквивалентную сферическую защиту, являются завышенными. Так, например, при уточненной оценке локальных доз СБИС ЦОС в малых КА на ВЭО с САС 7 лет с учетом их размещения в конкретной конструкции КА получены следующие значения диапазонов суммарных доз Д: 14,7...18,1 крад – по 4 СБИС МП; 30,8...48,5 крад – по 20 СБИС СОЗУ-4М; 45,4...47,2 крад – по 8 СБИС СОЗУ-1М и 35,5...40,8 крад – по 16 СБИС ПЗУ-FLASH-4М.

Таблица 3.1 – Поглощенные дозы и тиристорные отказы процессорных СБИС в системе ЦОС

Орбита	САС, лет	Поглощенные дозы, крад			Количество тиристорных отказов процессорных СБИС в системе ЦОС, макс./мин., 1/САС		
		Д _е	Д _р	Д	Процессор мажорирован- ного бортового компьютера	Сигнальный контроллер бортового компьютера	Контроллер локального бортового компьютера
ВЭО	7	31,6	55,1	86,7	37,6/4,65	50,0/6,2	12,5/1,55
ГСО	10	81,0	5,0	86,0	53,4/6,6	71,2/8,8	17,8/2,2

При этих расчетах использовалось до 2500 секторов (элементарных телесных углов) на каждой плоскости относительно координат размещения СБИС. При использовании более адекватной модели поглощения с учетом экранирования системы ЦОСиУ окружающей аппаратурой можно прогнозировать дальнейшее снижение доз, в основном за счет электронной компоненты Д_е. Однако уровень этого снижения будет достаточно ограниченным в условиях сотовой (плоскостной) компоновки, что определяет критичность применения индустриальных СБИС со стойкостью, не превышающей 25 крад без дополнительных мероприятий по увеличению их защиты.

Кроме того, для тех применений, когда в системах ЦОСиУ требуется корректировка программного обеспечения (ПО) на всем периоде штатной эксплуатации, наиболее критичными по дозе становятся СБИС ПЗУ-FLASH из-за низкой стойкости по функции «стирание-запись», отмеченной в п. Б.1 по эффектам Э1. При этом ошибки ПО могут быть обнаружены и скорректированы на начальном, ограниченном по длительности периоде эксплуатации. Работоспособность этой функции можно ограничить дозой, набранной на указанном периоде.

Для подтверждения критичности эффектов по Э2 достаточно ограничиться оценками интенсивности тиристорных отказов (ТО) базовых (процессорных) СБИС процессоров мажорированного бортового компьютера, сигнального и управляющего контроллеров локальных компьютеров – от воздействия ТЗЧ ГКЛ и СКЛ. При расчете количеств ТО на САС этих СБИС (таблица 3.1) использовалась методика верхних оценок частоты эффектов [182], основанная на применении параметров ступенчатой аппроксимации зависимости сечений эффектов от энергии частиц – порога L_т, и сечения насыщения от. Оценка возможных границ диапазонов ТО (максимальной и минимальной) проводилась на двух наборах параметров чувствительности, в которых принималось одинаковое значение $\sigma_{\rm T} = 0,001~{\rm cm}^2/{\rm CEUC}$ и два разных значения $L_{\rm T}$ (пониженное $L_{\rm T} = 10$ МэВ·см²/мг и повышенное $L_{\rm T} = 20$ МэВ·см²/мг), достаточно характерные (как показано в п. Б.1-Э2) для индустриальных процессорных СБИС. В качестве исходных данных при расчете частот ТО использовались два значения суммы средних плотностей потоков ядер ГКЛ F_я, и ионов СКЛ F_и из интегральных спектров [182] с энергиями $L \ge 10$ МэВ·см²/мг и $L \ge 20$ МэВ·см²/мг. При этом в расчете учитывалось количество реально функционирующих СБИС и время их нахождения во включенном состоянии при эксплуатации.

Результаты оценок границ диапазонов ТО отображены в таблице 3.1 в следующем виде: значения слева от косой черты соответствуют верхним границам (при $L_{\rm T} = 10$ МэВ·см²/мг), а значения справа от черты – нижним границам (при $L_{\rm T} = 20$ МэВ·см²/мг). Приведенные оценки диапазонов можно было бы признать консервативными, если не принимать во внимание следующие дополнительные факторы. Во-первых, используемые параметры $L_{\rm T}$ и $\sigma_{\rm T}$, соответствуют значениям, полученным при ортогональном воздействии частиц испытательной установки на чувствительные объемы структур СБИС. В то же время, при преимущественной геометрии ЧО в виде «тонкой лепешки» и косых падениях ТЗЧ возможно увеличение частоты эффектов на порядок [209, 210]. Во-вторых, порог L_т, определяемый при испытаниях обычно при нормальной температуре в условиях отсутствия ионизационных зарядов от накопленной дозы, может снижаться при реальной повышенной температуре СБИС (до 65°С) и накопленной дозе по Э1. В третьих, при расчете локальных потоков F_я и F_и на СБИС в реальных компоновках не следует ожидать их значительного снижения: по F_и из-за особенностей сотовой компоновки, а по F_я – вследствие слабого поглощения ядер ГКЛ

окружающими средами [182,192]. С учетом рассмотренных трех факторов оценки ТО в таблице 3.1 следует рассматривать как достаточно близкие к реальным.

В рамках обеспечения указанных требований к P_{IIOCHY} и обоснования соответствующих требований к параметрам чувствительности к ТЭ разрабатываемых стойких исполнений процессорных СБИС практический интерес представляет обратная задача – оценка минимально необходимого уровня чувствительности, при котором влиянием тиристорных отказов на $P_{\rm 5K}$ можно пренебречь. Применительно к процессорным СБИС и при допущении, что сечения $\sigma_{\rm T}$ не превысят уровень 0,001 см²/СБИС, для снижения нижних границ количества ТО на САС в таблице 3.1 (при $L_{\rm T} = 20 \text{ МэВ·см}^2/\text{мг}$) на два порядка минимально необходимый уровень порога $L_{\rm T}^{\rm min}$ должен быть не менее 31,6 МэВ·см²/мг. Более точная оценка общего по всей номенклатуре применяемых СБИС возможна только при наличии конкретных данных по их сечениям $\sigma_{\rm T}$.

Общие требования к дозам отказов СБИС должны определяться с учетом размещения СБИС, компоновки приборов ЦОСиУ, радиационной геометрической модели и назначаемого эксплуатационного коэффициента запаса по дозе К³₃.

3.3 Интенсивность сбоев СБИС в экстремальных радиационных условиях

Учитывая анализ чувствительности к сбоям СБИС, проведенный в разделе 3.2 по ЭЗ, при оценке их интенсивности можно ограничиться расчетами частот сбоев в структурах оперативной памяти БК, а, именно, в накопителях статической (динамической) памяти и во встроенной памяти (ВП) СБИС МП и СМК. При этом практический интерес представляют оценки частот сбоев при максимальной плотности потоков частиц в экстремальных радиационных условиях – от ТЗЧ и ВЭП СКЛ при солнечных вспышках на обеих орбитах (ВЭО и ГСО) и от ВЭП РПЗ на участках ВЭО при пересечении протонного пояса Земли в зоне ± 30° широты от геомагнитного экватора [192]. Оценки частот сбоев в таблице 3.2 приведены для элементов памяти вычислительных устройств, входящих в резервированные системы различной архитектуры.

	Памя	ть БК	Диапазоны частот сбоев, макс./мин., 1/с			
Тип БК	Тип памяти	Объем, Мбит	от ТЗЧ солнечных космических лучей	от ВЭП солнечных космических лучей	от ВЭП радиационного поля Земли	
МБК (ГБК)	ВП МП СОЗУ	0,6 48	3,1/0,0021 328/2,24	0,064/0,0005 5,08/0,04	0,018/0,0006 1,44/0,048	
СБК	ВП СМК СОЗУ ДОЗУ	8 192 1024	41/0,28 985/6,82 59700/35	0,846/0,007 20,3/0,016 1085/3,37	0,24/0,008 5,85/0,032 307/1,83	
ЛБК	СОЗУ	2	10,3/0,07	0,212/0,017	0,06/0,002	

Таблица 3.2 – Интенсивность одиночных сбоев в памяти бортовых компьютеров

МБК – мажорированный бортовой компьютер

СБК – бортовой компьютер сигнальной обработки

ЛБК – локальный бортовой компьютер

ВП МП – встроенная память микропроцессора

ВП СМК – встроенная память сигнального микроконтроллера

СОЗУ – сверхоперативное запоминающее устройство

ДОЗУ – динамическое оперативное запоминающее устройство

В таблице 3.3 приведены максимальные и минимальные оценки частот сбоев, которые определялись по методике ступенчатой аппроксимации [182] с использованием указанных в таблице 3.2 параметров максимальной и минимальной чувствительности к сбоям ТЗЧ и ВЭП. По плотностям потоков ионов СКЛ (F_и) и ВЭП (F_p) СКЛ и РПЗ использовались значения интегральных спектров максимальной плотности потоков частиц [182] по диапазонов порогов L_c и E_p из таблицы 3.3, а именно: F_u^{max} (F_u^{min}) СКЛ по L_{c}^{min} (L_{c}^{max}) и F_{p}^{max} (F_{p}^{min}) СКЛ по E_{p}^{min} (E_{p}^{max}) – из общих спектров на ВЭО и ГСО, а $F_{p}^{\text{max}}(F_{p}^{\text{min}})$ РПЗ по $E_{p}^{\text{min}}(E_{p}^{\text{max}})$ – из спектров ВЭО.

Вид памяти	Чувствителы	ность к ТЗЧ,	Чувствительность к ВЭП,	
	макс./	′мин.	макс./мин.	
	$L_{\rm c}, {\rm M} ightarrow {\rm B} \cdot {\rm cm}^2 / {\rm mr}$	σ _c , см ² /бит	<i>Е</i> р, МэВ	σ _р , см ² /бит
СОЗУ(ВП)	2/5	0,25·10 ⁻⁶ /10 ⁻⁸	20/100	$\frac{10^{-13}/10^{-14}}{10^{-12}/10^{-14}}$
ДОЗУ	1/3	10 ⁻⁵ /10 ⁻⁷	20/50	

Таблица 3.3 – Диапазон параметров чувствительности ОЗУ к одиночным сбоям

Если принять, что поток сбоев в памяти является случайным процессом, близким к распределению Пуассона [208], то каждое из значений частот, полученных по максимальным и минимальным значениям соответствующих пар *F*_и/σ_c и *F*_p/σ_p, является средней частотой, гарантируемой только на больших временных периодах наблюдения за потоком сбоев. Поэтому в наихудшем случае для ограниченных периодов действия экстремальных потоков частиц солнечной вспышки (от нескольких часов до суток) и ВЭП с энергией до 400 МэВ при прохождении на ВЭО экваториального протонного пояса (с длительностью до 15 мин) следует допускать возможность повышения частоты.

Результаты расчета диапазонов частот одиночных сбоев по указанной методике для экстремальных условий воздействия ТЗЧ и ВЭП СКЛ при солнечной вспышке и ВЭП РПЗ на ВЭО, представленные в таблице 3.2, дифференцированы по типам памяти ЦОСиУ в виде значений максимальных и минимальных частот. Из этих данных следует, что максимальная интенсивность сбоев достигается от воздействия ТЗЧ в фазе солнечной вспышки, а минимальная – от воздействия ВЭП РПЗ на ВЭО. Однако в интересах последующего анализа критичности сбоев на ВЭО следует отметить, что за САС 7 лет количество солнечных вспышек средней мощности не превышает 35, а количество периодов воздействия ВЭП РПЗ составляет 10220 при периоде витка 12 часов с четырьмя пересечениями протонного пояса в сутки.

Оценку диапазонов частот двойных сбоев (ДС) рассчитать затруднительно из-за отсутствия соответствующих данных по диапазонам параметров чувствительности СБИС. Однако на основе данных для частного случая (СОЗУ 1637РУ1 с нормами 0,35 мкм) при плотности потока ТЗЧ с энергией L > 17,5 МэВ·см²/мг расчетное номинальное количество ДС составляет: в ВП МП – 176, а в ВП СМК – 586. Причем, если для ВП МП полученная оценка может быть завышенной вследствие используемых в МП топологических норм 0,5 мкм, то для ВП СМК оценка может оказаться заниженной, учитывая применение норм 0,25 мкм.

Дополнительно оценим интенсивность «длительных» сбоев вследствие МДэффекта от воздействия ТЗЧ на ДОЗУ. В условиях ограниченности данных по параметрам чувствительности ДОЗУ по МД-эффекту возможна только точечная оценка по фиксированным значениям $L_{\rm M}$ и $\sigma_{\rm M}$, приведенным для Э4 для СБИС ДОЗУ с емкостью 64 М. При использовании 16 СБИС для организации ДОЗУ емкостью 128 Мб в системе ЦОС предельное количество «залипших» битов при солнечной вспышке составит 31,2 битов за сутки. Это значение несопоставимо с интенсивностью одиночных сбоев в ДОЗУ от ТЗЧ СКЛ в таблице 3.2, однако при применении конкретных СБИС с более высокой информационной емкостью можно ожидать повышения чувствительности по Э4 из-за снижения топологических норм. При этом оценка последствий эффекта должна предусматривать не только оценку частоты по конкретным параметрам чувствительности СБИС, но и накопление «залипших» битов на реальных периодах релаксации локальных микродоз.

По результатам экспериментальных исследований для большинства ЭРИ этого класса получены пороговые значения линейных потерь энергии менее 15 МэВ·см²/мг [4A, 6A].

На основе проведенных исследований радиационной стойкости СБИС и элементов памяти была разработана уточненная методика достоверной оценки показателей надежности, которая приведена в Приложении Б, п.Б.2. Использование разработанных рекомендаций, уточнений и ограничений применения нормативных требований при расчётной поэлементной и экспериментальной оценках стойкости блоков по дозовым эффектам позволит:

 повысить достоверность оценки и избежать наиболее опасных последствий в виде преждевременных отказов блоков ЦОСиУ при штатной эксплуатации на орбите изза пропуска нестойких ЭРИ;

• обоснованно подтвердить в ряде случаев допустимость применения при указанном диапазоне локальных доз ЭРИ индустриального уровня стойкости из реально доступной номенклатуры ограниченной стоимости;

• исключить ложные заключения по признанию стойких ЭРИ нестойкими;

• гарантированно обосновать необходимость замены ЭРИ на более стойкие исполнения в случае невозможности обеспечения стойкости с помощью локальной защиты;

• определить целесообразность проведения испытаний блоков с использованием гамма- и нейтронного излучений с учетом возможности получения достоверных результатов.

Дополнительные испытания «критичных» ЭРИ по стойкости к дозовым и тиристорным эффектам от тяжелых заряженных частиц требуют соответствующих затрат, однако, общий объем этих затрат несопоставимо меньше цены отказа бортовой аппаратуры КА на этапе натурной эксплуатации. Кроме того, следует учитывать, что при допущении в [4A,6A] о зависимости снижения безотказности ЭРИ преимущественно от процессов поверхностной ионизации обосновано применение, два

вида испытаний (для двух интенсивностей и циклических процедур поэтапного «облучения-отжига») могут быть совмещены при соответствующей экономии затрат.

3.4 Анализ и синтез структур отказо- и сбоеустойчивых бортовых компьютеров с различными архитектурами резервирования

3.4.1 Особенности системы ЦОС и вычислительных комплексов управления

Проведенные в п. 3.3 оценки интенсивности сбоев (таблица 3.2) обуславливают необходимость анализа влияния этих потоков сбоев на работоспособность системы ЦОСиУ по устойчивости к сбоям, зависящей от критичности последствий и эффективности парирования сбоев в элементах памяти в конкретных резервированных средах как с помощью аппаратных средств защиты, так и программных механизмов, требующих временных ресурсов. В соответствии с ГОСТ [212,213] система ЦОСиУ с точки зрения сбоеустойчивости относится к необслуживаемым восстанавливаемым изделиям с возможностью отказов сбойного характера из-за наличия ограничений на допустимую продолжительность программного восстановления после сбоя. Кроме того, система ЦОСиУ относится к изделиям вида II по классификации [212, 213], так как на интервале времени от момента сбоя до его обнаружения механизмами контроля (задержка обнаружения T_3) и в течение последующего интервала восстановления $T_{\rm B}$ система может находиться в неработоспособном состоянии. На суммарном интервале времени $T_{c} = T_{3} + T_{B}$ возможна выдача ложных сигналов в подчиненные средства ЦОСиУ и имеет место перерыв в штатном процессе вычислительной обработки и управления. Поэтому на уровне ЦОСиУ должен осуществляться анализ критичности ложных сигналов и допустимых значений перерывов в работе (T_{II}).

В процессе разработки КА был синтезирован ряд бортовых компьютеров с принципами разными архитектурами резервирования, обеспечения отказо-И сбоеустойчивости и эффективностью аппаратной и программной защиты от сбоев [4А,14А,18А,20А,22А]. Для обеспечения требований по быстродействию система ЦОС выполняется в виде многопроцессорной системы, состоящей из нескольких кластеров – модулей обработки сигналов (МОС). Совокупность кластеров можно рассматривать как вычислительную машину со своей программной (ПЗУ) и оперативной (ОЗУ) памятью. В данном разделе проводится анализ надежности разработанных модификаций бортовых компьютеров (БК), прошедших летные испытания в составе различных КА. При рассмотрении вариантов базовых структур учитывались ограничения по энергоснабжению КА и следующие различия систем ЦОС и вычислительных комплексов управления: 1) комплекс управления является наиболее ответственным элементом, от корректности работы которого зависит существование всего КА, поэтому к ним предъявляются повышенные требования по надежности; 2) вычислительные средства комплекса управления имеют меньшую загрузку и быстродействие по сравнению с аппаратурой ЦОС, поэтому потребляют значительно меньше мощности; 3) вычислительные средства комплекса управления являются рассредоточенными и состоят из центрального и нескольких локальных бортовых компьютеров; 4) система ЦОС выполняет свои задачи при максимальном потреблении мощности и, как правило, одновременно с работой целевой аппаратуры.

Эти особенности обуславливают возможность применения в системе ЦОС только холодного резерва, а в вычислительных комплексах управления использования как горячего (теплого) резервирования, так и холодного резерва.

3.4.2 Резервирование системы ЦОС замещением

Пусть система ЦОС состоит из нескольких вычислительных кластеров, которые работают параллельно. Структурная схема для расчета надежности одного кластера приведена на рисунке 3.1. Модуль обработки сигналов (МОС) состоит из нескольких процессоров цифровой обработки сигналов (ПЦОС), на которые поступают входные данные через первую часть модуля ввода-вывода MBB¹ и коммутатора Ком¹. Сбор результатов обработки сигналов и вывод потребителю осуществляется второй частью коммутатора Ком¹¹ и модуля ввода-вывода MBB¹¹.



Рисунок 3.1 – Кластер цифровой обработки сигналов

С точки зрения надёжности отказ процессора ЦОС, коммутатора или MBB является внезапным, так как приводит к скачкообразному изменению характеристик кластера в целом. Следует отметить, что степень деградации качества работы от выхода из строя MBB (коммутатора) и процессора MOC различна, что связано с особенностями обработки сигналов [21А]. Например, в режиме ScanSAR отказ одного ПЦОС приведет

к потере изображения одного парциального кадра, а при выходе из строя MBB теряется информация обо всем кадре съемки. В связи с этим под отказом кластера ЦОС будем понимать потерю одного парциального кадра.

Рассмотрим вероятность безотказной работы $P_1(t)$ цепочки «МВВ-Ком-МОС». При известных интенсивностях отказа λ_{MBB} , λ_{Kom} и λ_{MOC} для периода нормальной эксплуатации и для среднего времени безотказной работы получаем

$$P_1(t) = \exp\{-\left(\lambda_{MBB} + \lambda_{KOM} + \lambda_{MOC}\right)t\}, \quad T_{CP}^{(1)} = 1/\left(\lambda_{MBB} + \lambda_{KOM} + \lambda_{MOC}\right).$$
(3.1)

Поскольку процессоры в МОС выполняют независимые задачи, а выход из строя одного из них приводит к эквивалентному выходу из строя цепочки «MBB-Kom-MOC», то с точки зрения надёжности их соединение является последовательным. Поэтому получаем

$$\lambda_{MOC} = \sum_{i=1}^{K} \lambda_{\Pi \downarrow OC_i} = K \lambda_{\Pi \downarrow OC},$$

где $\lambda_{\Pi IIOC}$ – интенсивность отказов одного процессора ЦОС.

Вероятность и среднее время безотказной работы основной системы ЦОС из *N* работающих кластеров можно оценить по соотношениям

$$P_N(t) = \exp\{-N \cdot (\lambda_{MBB} + \lambda_{KOM} + K \cdot \lambda_{\Pi \downarrow OC}) \cdot t\}, \quad T_{CP}^{(N)} = \frac{1}{N(\lambda_{MBB} + \lambda_{KOM} + K \cdot \lambda_{\Pi \downarrow OC})}$$

В силу конструктивных особенностей и ограничений по ЭКБ количество ПЦОС в кластере устанавливается K = 1 для решения задач управления и K = 2 или 4 для аппаратуры ЦОС. На рисунке 3.2 представлены зависимости $P_1(t)$ от нормированного времени $t \cdot \lambda_{\Pi \downarrow OC}$: 1 – для процессора, 2 – для однопроцессорного кластера, 3 – для двухпроцессорного кластера, 4 – для четырехпроцессорного кластера. Как и следовало ожидать, увеличение сложности РЭА приводит к снижению показателей надежности. На рисунке 3.3 – аналогичные характеристики с учетом радиационных воздействий (при дозах 10 крад).



Сравнение графиков по вероятности безотказной работы показывает существенную деградацию эффективности функционирования аппаратуры КА в условиях космического пространства. В данном разделе для обеспечения надежности применяется скользящее резервирование. Пусть резерв состоит из *M* аналогичных кластеров, которые подключаются с помощью переключателя. В основном и резервном устройствах используются идентичные блоки MBB, Ком и MOC, поэтому любой блок из состава резерва может заменить любой вышедший из строя основной блок. В общем случае вероятность безотказной работы такой системы определяется соотношением [214]

$$P_{MN}^{(1)}(t) = \sum_{i=N}^{N+M} \sum_{k=i-N}^{M} \binom{N}{i-k} \binom{M}{k} P_1^{i-k}(t) [1-P_1(t)]^{N-i+k} [P_{\Pi K}(t)P_1(t)]^k [1-P_{\Pi K}(t)P_1(t)]^{M-k} , \quad (3.2)$$

где $P_{\Pi K}(t)$ – вероятность безотказной работы переключателя, $\binom{M}{k}$ – число сочетаний из M по k.

Рассмотрим характеристики надёжности для частных случаев построения системы ЦОС. Пусть переключатель является безотказным устройством и $P_{\Pi K}(t) = 1$, общее количество кластеров, выполняющих целевую задачу, N = 2, K = 4. По этим исходным данным составим три рабочих конфигурации (РК): РКО – M = 0 (резервирование отсутствует, кратность резервирования 0/2); РК1 – M = 1 (один резервный кластер и 2 резервируемых – кратность резервирования 1/2); РК2 – M = 2,

кратность резервирования 2/2. Для этих РК соотношение полной вероятности из (3.2) принимает вид:

$$P_{12}^{(1)}(t) = 1 - [1 - P_1(t)]^2 \cdot [1 + 2P_1(t)], \ P_{22}^{(1)}(t) = 1 - [1 - P_1(t)]^3 \cdot [1 + 3P_1(t)].$$
(3.3)

На рисунке 3.4 представлены эти зависимости от нормированного времени, которые показывают, что увеличение скользящего резерва дает заметный рост вероятности безотказной работы.



В реальных условиях надежность переключателя каналов является конечной величиной, что приводит к снижению общей надежности резервированной системы ЦОС. Поскольку переключатель выполняется на СБИС в виде высокоскоростного коммутатора потока данных, то можно полагать $\lambda_{\Pi K} \cong \lambda_{\Pi LOC}$. Полученные при этом условии результаты расчетов представлены на рисунке 3.5, которые свидетельствуют о том, что при одинаковой вероятности безотказной работы среднее время снижается на 6% и более. Другим, менее очевидным эффектом, который выявляют графики на рисунках 3.4 и 3.5, является неоднозначное поведение вероятности безотказной работы нерезервированной системы $P_2(t)$: при большом времени эксплуатации эта вероятность начинает превышать аналогичный показатель для резервированной системы. Таким образом, резервированные системы имеют преимущества по показателю вероятности безотказной работы на начальных стадиях эксплуатации. Отметим также, что в рассматриваемом случае общее резервирование системы ЦОС (кратность

резервирования 1/1) дает такой же эффект по показателям надежности, как скользящее резервирование с помощью одного кластера, однако материальные затраты на создание резерва в два раза выше.

3.4.3 Постоянное резервирование в вычислительных комплексах управления

К цифровым системам управления КА предъявляются повышенные требования, пропуски информации в моменты переключения резерва не допустимы, поэтому в структуре управляющей системы необходимо использовать постоянное горячее резервирование. Сохранить информацию и сделать вычислительную управляющую систему высоконадежной можно за счет применения мажоритарного резервирования устройств. Анализ известных технических решений показал, что такое резервирование не обеспечивает мажорирование двунаправленных линий и работу с мультиплексными каналами [215 – 217].

Для преодоления этих недостатков были разработаны высоконадежная вычислительная управляющая система и мажоритарное устройство, предназначенные для приема информации от абонентов, обработки принятой информации и выдачи результирующей информации абоненту [25A, 26A]. Разработанные структуры обеспечивают возможность мажорирования двунаправленных сигналов и введение диагностики с управлением при помощи входных сигналов на срабатывание при рассогласовании входного и выходного сигнала. Такой результат достигается за счет введения в управляющую систему мультиплексного канала обмена, обеспечивающего обмен информацией с внешними устройствами по дублированной линии передачи информации. В качестве примера рассмотрим троированную систему.

Предлагаемая система состоит из трех однотипных каналов А, В, С (рисунок 3.6), которые работают в нагруженном режиме и выполняют одну и ту же задачу, поэтому разделить их на основной и резервный нельзя. В системе используются следующие интерфейсные шины для обмена информацией между функциональными устройствами: шина вычислительного элемента (ВЭ) – Р-bus; локальная шина устройств ввода-вывода (УВВ) – L-bus; межмодульная шина – Q-bus. Все каналы системы работают строго синхронно. Для общности рассмотрения под ВЭ понимается процессор, кластер, модуль цифровой обработки сигналов (МОС), ЦВМ. Система обеспечивает взаимодействие с внешними абонентами по двум (основному и резервному) мультиплексным каналам информационного обмена (МКО) в соответствии с ГОСТ Р 52070-2003. Все три канала

-71-

соединены мажоритарными связями, причем в отличие от традиционной схемы резервирования здесь применяется несколько мажоритарных элементов (МЭ).



Рисунок 3.6 – Обобщенная структурная схема резервированной цифровой управляющей системы

Мажоритарный элемент МЭ-1 контролирует всю систему резервирования и обеспечивает работоспособность системы при отказах, возникающих в отдельных каналах, а мажоритарные устройства МЭ-2 – МЭ-5 подключены к интерфейсным шинам обмена информацией и обеспечивают исправление информации при сбоях передачиприема, в том числе в двунаправленной шине. Все мажоритарные устройства работают по принципу голосования «два из трех».

Проведем расчет и сравнительный анализ надежности цифровой управляющей системы. Дополнительно отметим, что применение традиционной для мажоритарных структур модели расчета показателя безотказности, гарантирующей сохранение работоспособности при отказе одного элемента в одной из резервных машин, некорректно в условиях совместного действия отказа и сбоев в других СБИС. Для сравнения проведем расчет вычислительной системы без мажоритарных элементов.

Вероятность безотказной работы каждого канала резервирования можно записать в виде

$$P_1(t) = \exp\{-\lambda_0 \cdot t\}, \ \lambda_0 = \lambda_{yBB} + \lambda_{3y} + \lambda_L + \lambda_P + \lambda_Q + \lambda_M + \lambda_{BO}, \qquad (3.4)$$

где $\lambda_{yBB}, \lambda_{3y}, \lambda_L, \lambda_P, \lambda_O, \lambda_M, \lambda_{BO}$ – интенсивности отказов соответствующих узлов.

При общем нагруженном резервировании из элементов А, В и С имеем

$$P_{21}(t) = 1 - [1 - P_1]^3 = \exp\{-3 \cdot \lambda_0 \cdot t\} - 3 \cdot \exp\{-2 \cdot \lambda_0 \cdot t\} + 3 \cdot \exp\{-\lambda_0 \cdot t\}.$$
 (3.5)
Применение дублированных интерфейсных линий увеличивает их надежность, вероятность безотказной работы интерфейсной линии становится равной $P_{U\!I\!I}(t) = 2 \cdot \exp\{-\lambda_{U\!I\!I} \cdot t\} - \exp\{-2 \cdot \lambda_{U\!I\!I} \cdot t\},$ а среднее время наработки до отказа увеличивается в 1,5 раза. Как следствие, увеличивается вероятность $P_{21I}(t)$ безотказной работы троированной вычислительной системы с дублированными связями. Это $P_1(t), P_{21}(t), P_{\mathcal{U}\mathcal{I}}(t), P_{21\mathcal{I}}(t)$ зависимости вероятностей подтверждают графики OT нормированного времени $t \cdot \lambda_{R2}$, представленные на рисунке 3.7. Организация вычислительного процесса в троированных и дублированных системах требует наличия переключающих устройств, которые снижают надежность всей системы. Кроме того, при отказе компонентов вычислительных каналов А, В или С теряются данные и команды, что не допустимо в цифровых системах управления.



Сохранить достоверность обрабатываемых и хранящихся в памяти данных и программ можно за счет применения мажоритарных устройств. Рассмотрим вероятностные характеристики надежности мажорированной на разных уровнях детализации структуры, приведенной на рисунке 3.6. Вероятность безотказной работы при подключении МЭ-10пределяется соотношением

$$P_{moon}^{(1)}(t) = P_{M\mathcal{P}}(t) \sum_{i=0}^{(n-1)/2} {n \choose i} P_1^{n-i}(t) [1 - P_1(t)]^i , \qquad (3.6)$$

где $P_{M\ni}(t)$ – вероятность безотказной работы мажоритарного элемента, n – число мажорируемых элементов, m – порог голосования.

Наиболее экономичной и наиболее известной является мажоритарная схема «2 из 3» (2003). В рассматриваемых условиях при экспоненциальном законе распределения отказов из (3.2) получаем

$$P_{2003}(t) = \exp\{-\lambda_{M\mathfrak{H}} \cdot t\} \cdot [3 \cdot \exp\{-2 \cdot \lambda_0 \cdot t\} - 2 \cdot \exp\{-3 \cdot \lambda_0 \cdot t\}], \qquad (3.7)$$

где $\lambda_{M\mathcal{P}}$ – интенсивность отказов мажоритарного элемента.

На рисунке 3.8 представлены расчетные зависимости $P_{2003}(t)$, которые показывают, что при малом времени эксплуатации мажорированная система имеет более высокую вероятность безотказной работы, чем троированная система (ср. с графиком для $P_{21}(t)$). Применение мажоритарных элементов для сохранения и исправления информации в элементах вычислительной системы (элементах памяти, интерфейсных устройствах) приводит к заметному снижению вероятности безотказной работы. На рисунке 3.8 график $P_{21m}(t)$ соответствует троированной системе с развитой мажоритарной структурой (схема рисунка 3.6 без МЭ-1), а график $P_{2003m}(t)$ – системе с полным мажоритированием (схема рисунка 3.6). Данные расчеты показывают, что введение в резервированную структуру мажоритарных элементов снижает вероятность безотказной работы даже при идеальном МЭ, конечная величина $\lambda_{MЭ}$ приводит к дальнейшему снижению эффективности резервирования.

Рассмотрим еще один вариант архитектуры системы управления, который используется в системах безопасности (МЭК 61508) и требует реконфигурации вычислительных средств и мажоритарного элемента МЭ-1. Исходное состояние и архитектура системы (схема рисунка 3.6) соответствует мажорированной резервированной системе 2003. Система диагностики производит постоянное наблюдение за состоянием каналов А, В и С. При выходе из строя одного из каналов система диагностики перестраивает логику работы МЭ-1 на работу по критерию «один из двух» (1002), поскольку информация вышедшего из строя канала бесполезна. С течением времени, когда выйдет из строя еще один канал, система переходит в одноканальный режим без голосования и без резервирования (1001). Вероятность безотказной работы при работе в режиме 1002 в общем случае определяется соотношением $P_{1002}(t) = \exp\{-\lambda_{M\Im} \cdot t\} \cdot [2 \cdot P_1(t) - P_1^2(t)]$, а при экспоненциальном законе $P_{1002}(t) = \exp\{-\lambda_{M\Im} \cdot t\} \cdot [2 \cdot \exp\{-\lambda_0 \cdot t\} - \exp\{-2 \cdot \lambda_0 \cdot t\}].$

3.9 Ha рисунка представлены характеристики надежности для последовательности этих режимов. Расчеты проводились для случая, когда все основные компоненты вычислительной аппаратуры имели мажоритарное резервирование. Графики показывают, что переход от режима 2003 к 1002 сопровождается некоторым увеличением вероятности безотказной работы. Однако после выхода из строя второго канала и перехода к режиму работы с одним каналом (1001) вероятность безотказной работы снижается. Вместе с тем следует заметить, что при достаточно большом времени (в рассмотренном случае $\lambda_{B\mathcal{P}} \cdot t > 0,12$) указанная вероятность превышает вероятность $P_{2003}(t)$ мажорированной системы «2 из 3».



Рассмотренные структуры мажоритарного общего И резервирования цифровых систем управляющих комплексов ЦОС И позволяют получить высокие характеристики надежности при работе в условиях космического пространства [25A-29A]. Отдельной темой И направлением применение является кодирования с исправлением ошибок в процессе передачи, приема и работы с памятью.

В комплексе с аппаратными средствами такие решения позволят без сбоев работать десятки лет и продлить срок активного существования КА до 15...20 лет.

3.6 Выводы по главе 3

1. На основе анализа специфики и интенсивности радиационностимулированных эффектов в КМОП СБИС (с субмикронными топологическими нормами), используемых в бортовых компьютерах (БК) космических аппаратов (КА), обоснована необходимая и достаточная номенклатура показателей надежности с уточненными методиками их оценки, учитывающих совместное действие на СБИС радиационных и нерадиационных факторов на длительных сроках активного существования, критичность нарушений функционирования аппаратуры ЦОС из-за отказов и сбоев по тяжести последствий для КА в зависимости от назначения, а, также ограничения аппаратной защиты от сбоев и возможности программной защиты, определяемыми архитектурой резервирования и условиями работы БК в реальном масштабе времени.

2. Использование рассмотренной методики достоверной оценки показателей надежности позволит повысить качество проектирования высоконадежной аппаратуры ЦОС и вычислительных комплексов управления с применением СБИС, что особенно актуально для КА с длительными САС, действующих в составе орбитальных группировок. Кроме того, так как методика учитывает радиационные факторы, эти показатели могут быть использованы в качестве количественных критериев радиационной стойкости БК в дополнение к традиционному показателю запаса по поглощенной дозе.

3. Рассмотренные дополнительные испытания «критичных» ЭРИ по стойкости к дозовым и тиристорным эффектам от тяжелых заряженных частиц требуют соответствующих затрат, однако, общий объем этих затрат несопоставимо меньше цены отказа бортовой аппаратуры КА на этапе натурной эксплуатации.

4. В процессе разработки КА был синтезирован ряд бортовых компьютеров с разными архитектурами резервирования, принципами обеспечения отказо- и сбоеустойчивости и эффективностью аппаратной и программной защиты от сбоев.

5. Проведен анализ различных вариантов резервированных систем ЦОС и управления. Проанализирована процедура управляемой деградации мажорированной системы с функциональной диагностики. Разработаны и запатентованы высоконадежная вычислительная управляющая система и мажоритарное устройство, предназначенные для приема информации от абонентов, обработки принятой информации и выдачи результирующей информации абоненту. Техническим результатом изобретения является обеспечение возможности мажорирования двунаправленных сигналов и введение диагностики с управлением при помощи входных сигналов на срабатывание при рассогласовании входного и выходного сигналов. Такой результат достигается за счет введения В управляющую систему мультиплексного канала обмена,

обеспечивающего обмен информацией с внешними устройствами по дублированной линии передачи информации.

6. Проведен анализ применимости положений и требований действующих нормативных документов по оценке стойкости бортовой аппаратуры КА по дозовым эффектам с рассмотрением их ограничений и обоснованием уточнений, необходимых для повышения достоверности этой оценки с учетом условий эксплуатации и используемых технологических исполнений электрорадиоизделий.

7. Использование рассмотренных уточнений и ограничений применения нормативных требований при расчётной поэлементной и экспериментальной оценках стойкости блоков по ДЭ позволит обеспечить выполнение требований по надежности аппаратуры ЦОСиУ в радиационных условиях штатной эксплуатации.

8. Предложены единые сертифицированные требования по стойкости, надежности и обеспечению качества к отечественной и импортной элементной базе, которые обеспечивают создание единого конкурентного пространства с предпочтительным независимым участием отечественных производителей электронных компонентов.

Материалы раздела изложены и опубликованы в [4А-7А, 12А-14А, 19А]. По результатам исследований получены патенты РФ № 2387000, 2395161, 2405196, 2455681, 2559767 [25А–29А].

Глава 4

Повышение эффективности многопроцессорных систем ЦОС и управляющих комплексов методами диагностирования

4.1 Функциональное диагностирование и распределённое системное диагностирование многопроцессорных систем ЦОС и управления

Обеспечение высокой производительности, точности и надёжности вычислений в КА производится с помощью МВС, комплексированных между собой и составляющих вместе с другими средствами многомашинный комплекс, мультипроцессорную вычислительную систему (MBC) или бортовую вычислительную сеть [8,17]. Такая сеть обеспечить надёжное функционирование КА должна на период активного существования 10...15 лет. Для повышения надёжности вычислительных средств широко используется, например, резервирование на уровне структуры из копий модулей [214,25А]. В этом случае хорошо зарекомендовала себя архитектура, когда три идентичные копии работают одновременно (рисунок 3.6, раздел 3.4). Такие принципы создания при участии автора MBC КА «Метеор-3М», «Космос-2392» и др. многократно проверены в эксплуатации.

В соответствии с поставленными в разделах 1.8 и 1.9 задачами проведем разработку методов, моделей и алгоритмов, обеспечивающих самодиагностику различных структур MBC. Использование информации о результатах самодиагностики позволяет обеспечить повышение надежности, достоверности обработки информации в таких системах и увеличить сроки активного существования КА.

Одним из путей решения проблемы обеспечения надежности работы и достоверности выходных результатов MBC является применение методов распределенного системного самодиагностирования (ССД) [78, 1A-3A,5A,14A,15A], состоящего в проверках одних модулей ЦОС (МОС) системы со стороны других МОС и последующей согласованной между всеми исправными МОС дешифрации результатов взаимопроверок с целью идентификации случившихся проявлений неисправностей как по месту их возникновения, так и по типу (сбой, программный сбой или отказ).

При исследовании методов диагностирования широко применяется графовая модель структуры MBC, в которой вершины отображают MOC, а дуги – двухточечные дуплексные межмашинные каналы связи, обеспечивающие межмашинное взаимодействие между MOC. В такой модели идентификация места возникновения неисправностей осуществляется с точностью до MOC (вершины графа) или дуплексного канала связи (дуги графа) [75, 137].

Поставим задачу разработки метода ССД для MBC с межмашинными каналами связи шинной архитектуры и широковещательным способом передачи межмашинных сообщений. Метод должен обеспечивать, во-первых, сбоеустойчивость ВИС и, вовторых, сквозное и непрерывное функциональное диагностирование как ВИС, так и всего процесса ССД. Использование межмашинных каналов связи шинной архитектуры и широковещательного способа передачи межмашинных сообщений уменьшает число необходимых в каждой МОС передающих и принимающих канальных устройств до величины *n*, а также способствует сокращению временных затрат за счет однократной передачи собственного сообщения при межмашинном обмене.

Известные алгоритмы ВИС с обнаружением и идентификацией случившихся проявлений неисправностей [162-168] имеют ограниченные возможности по выявлению неисправностей МОС и его передающего УС.

Для устранения отмеченных недостатков предлагается *s*-сбоеустойчивый алгоритм ВИС, применяемый в представляемом методе ССД, который позволяет обнаруживать и идентифицировать проявления неисправностей *m* из *n* МОС или передающих УС и различить неисправность МОС и передающего УС [1А-3А, 15А].

Рассмотрим MBC, состоящую из n MOC, соединенных между собой n каналами межмашинной связи шинной архитектуры. Каждая *i*-й MOC (обозначим ее через M_i) присоединена к *i*-му каналу связи передающим устройством сопряжения O_i и к каждому

-79-

другому каналу – отдельным принимающим устройством сопряжения. Сообщение, переданное *i*-м МОС, поступает во все другие МОС, которые самостоятельно определяют необходимость и способ использования полученного сообщения. Эта модель MBC совпадает с моделью из [164, 168].

Предполагается, что 1) всем МОС известен состав и формат локального синдрома проверки (ЛСП) каждым проверяющим МОС; 2) работа всех исправных МОС осуществляется с необходимой степенью синхронности, обеспечивающей правильность выполняемых межмашинных взаимодействий; 3) МОС-получатель межмашинного сообщения может определить его отправителя; 4) для любой пары МОС возможно только по одной их взаимопроверке.

Системное самодиагностирование может быть представлено в виде повторения пронумерованных циклов, каждый из которых состоит из фаз: 1) выполнение проверяемыми МОС всех предписанных им проверок и формирование их результатов; 2) передача этих результатов в проверяющие МОС; 3) анализ и оценка полученных результатов в проверяющих МОС и формирование в каждом из них собственного ЛСП; 4) взаимообмен собственными ЛСП между всеми МОС системы при помощи некоторого алгоритма взаимного информационного согласования (ВИС) [97]; 5) формирование во всех исправных МОС из полученных согласованных ЛСП (СЛСП) одинаковых глобальных синдромов проверки (ГСП) и дешифрация ГСП в каждом исправном МОС.

Каждый МОС и каждое передающее устройство сопряжения являются отдельным элементом системы, подвергающимся неисправности. Предполагается наличие в системе не более *m* неисправных элементов при числе МОС $n \ge 3m + 1$.

Под сбоем *O_i* понимается неисправность МОС, действующая в течение передачи одного сообщения или одного раунда обмена в процессе ВИС. Программный сбой МОС фиксируется при проявлении заранее оговоренной совокупности сбоев этой МОС (критерий программного сбоя). Отказ МОС объявляется при идентификации заранее оговоренной последовательности программных сбоев этой МОС (критерий отказа МОС). При отказе необходима реконфигурация системы, состоящая в изоляции отказавшего элемента, включении вместо него запасного элемента, если он имеется, и восстановлении вычислительного процесса во включенном элементе.

Определение приведенных видов неисправностей требует организации сквозного и непрерывного функционального диагностирования, охватывающего обнаружение и идентификацию проявлений неисправностей сразу в нескольких смежных циклах ССД. В качестве элементарного контролируемого действия (ЭКД) могут быть приняты как отдельные фазы или их объединения из приведенного выше состава цикла ССД, так и отдельные составные части некоторых фаз. Сбоеустойчивость в ВИС достигается введением информационной и временной избыточности.

Существенное отличие проявлений неисправности *i*-й МОС от проявлений неисправности O_i заключается в том, что неисправная МОС передает искаженную ею информацию одинаковой во все другие МОС. «Враждебная» неисправность O_i проявляется в воздействии на проходящее через него сообщение таким образом, что в l $(n-1 > l \ge 0)$ МОС сообщение может поступить без всяких искажений, а в остальные МОС – с произвольными, возможно неодинаковыми, искажениями.

В качестве отдельных ЭКД, входящих в состав представляемого метода ССД, в предлагаемом алгоритме ВИС рассматриваются первые 2*s* + 1 раунды взаимообмена информацией в процессе ВИС.

Ниже все обозначения сбоев, отказов, согласованных значений и др., заключенные в круглые скобки с верхним индексом r, отображают соответствующие объекты, относящиеся к r-му циклу ССД. Так, через (ВИС)^r обозначается процесс ВИС, выполняемый в r-м цикле ССД, через (M_i^k)^r – сбой МОС M_i , проявившийся в искажении информации, переданной ею в k-м раунде (ВИС)^r, через (O_j^k)^r – сбой передающего УС O_i в k-м раунде (ВИС)^r, через (M_i)^r – программный сбой МОС M_i , а через (O_i)^r – отказ передающего УС, идентифицированные в r-м цикле ССД. В качестве критерия программного сбоя M_i (отказа O_i) примем проявление более чем 5 сбоев в двух смежных циклах ССД.

Сбоеустойчивый алгоритм ВИС, предназначенный для использования в r-м (r = 1, ...) цикле алгоритма ССД-3, описан в Приложении В (п. В.1). В предложенном алгоритме А6 используется алгоритм А2 ВИС [164]. Алгоритм А6 по термам (L)^r дает возможность определить сочетание возможных проявлений неисправностей (не более чем m неисправностей). Алгоритм системного самодиагностирования ССД-3 подробно описан в Приложении В (п. В.2).

Одинаковость результатов дешифрации во всех исправных МОС обеспечивается использованием алгоритма ВИС, гарантирующего одинаковые значения ГСП во всех исправных МОС, и применением одинакового алгоритма дешифрации. Целью ССД может быть однозначная идентификация хотя бы одного программного сбоя МОС или отказа O_i без указания, какой именно из состава подозреваемых. Тогда критерием окончания алгоритма ССД будет наличие в каждом терме выражения подозреваемой области неисправностей некоторой совокупности сбоев, соответствующей принятому критерию программного сбоя МОС или отказу O_i . Другими целями ССД могут быть, например, такие, как однозначная идентификация хотя бы одного программного сбоя МОС или отказов O_i . В первом случае критерием окончания алгоритма ССД будет наличие совокупности сбоев, соответствующих программного сбоя МОС и отказов O_i . В первом случае критерием окончания алгоритма ССД будет наличие совокупности сбоев, соответствующих программного сбоя МОС и отказов O_i . В первом случае критерием окончания алгоритма ССД будет наличие совокупности сбоев, соответствующих программных сбоев МОС и отказов O_i . В первом случае критерием окончания алгоритма ССД будет наличие совокупности сбоев, соответствующих программных сбоев МОС и и того же МОС либо соответствующих отказу одного и того же O_i . Во втором случае каждый из термов должен отображать программные сбои и отказы одного и того же состава МОС и O_i .

Рассмотри следующий пример диагностирования. Пусть граф проверок полносвязной MBC, отображенный в ГСП, построенном в *r*-м цикле ССД, имеет вид, представленный на рисунок 4.1, где через М обозначены модули обработки сигналов. Предположим, что при m = 2, s = 1 в процессе выполнения ВИС в этом цикле при помощи алгоритма А6 было обнаружено неравенство NIL $\neq (C_{6,4}^1)^r \neq (C_{6,4,2}^1)^r \neq$ NIL и построено выражение $(L)^r = (O_4^5)^r V (M_2^6)^r V (O_2^6)^r$. На пятом шаге ССД-3 *r*-го цикла преобразованная конъюнкция выражений подозреваемой области неисправностей, построенных для единичных значений ГСП, и выражения $(L)^T$ имеет вид: $R = (M_1^1)^r$ $(M_1^3)^r (O_4^5)^r (O_4)^r V (O_2^2)^r (O_4)^r (O_4)^r V (M_2^6)^r (O_7)^r (M_7^6)^r V (M_2^6)^r (O_7^2)^r$ $(O_7)^r V (O_{22}^2)^r (O_{22}^6)^r (M_7^1)^r (M_7^3)^r V (O_{22}^2)^r (O_{22}^6)^r (O_7^2)^r (O_7^2)^r$.

В графе проверок седьмая вершина имеет две входящие дуги со значениями 0 и 1. Для нулевой дуги выражение подозреваемой области неисправностей условий компенсации для неисправности $(M^1{}_7)^r$ имеет вид $(O^2{}_7)^r \vee (M^3{}_6)^r \vee (O_6)^r$. Конъюнкция этого выражения с термами выражения *R*, содержащими обозначение сбоя $(M^1{}_7)^r$, после преобразований приводит к исключению этих термов из выражения *R*. В результате образуется выражение $(K)^r = (M^1{}_1)^r (M^3{}_1)^r (O^5{}_4)^r (O{}_4)^r \vee (O^2{}_1)^r (O{}_1)^r (O^5{}_4)^r (O{}_4)^r \vee (M^1{}_2)^r$ $(M^6{}_2)^r (O^2{}_7)^r (O{}_7)^r \vee (O^2{}_2)^r (O^2{}_2)^r (O{}_7)^r (O{}_7)^r, которое после упрощений принимает вид <math>(K)^r$ = $(M_1)^r (O_4)^r \vee (O_1)^r (O_4)^r \vee (M_2)^r (O_7)^r \vee (O_2)^r (O_7)^r$ и подтверждает наличие в системе программных сбоев и отказов одной из указанных пар элементов.

Если, например, в (r + 1)-м цикле ССД только в процессе ВИС было обнаружено неравенство NIL $\neq (C_4^2)^{r+1} \neq (C_{4,6}^2)^{r+1} \neq$ NIL и других проявлений неисправностей обнаружено не было, то на шестом шаге (r + 1)-го цикла ССД будет построено выражение $(K)^r (K)^{r+1} = (M_1)^r (O_4)^{r+1} \vee (O_1)^r (O_4)^{r+1}$, однозначно указывающее на имеющийся отказ элемента O_4 и программный сбой МОС M_1 или отказ O_1 .



Разработанный алгоритм ССД-3 обеспечивает непрерывное и сквозное функциональное диагностирование всех действий, выполняемых при ССД. Алгоритм ССД-3 способен обрабатывать произвольный граф взаимопроверок МОС, но предназначен для полносвязных MBC таких, что между любой парой МОС возможна непосредственная передача сообщений при помощи межмашинных каналов связи шинной архитектуры и широковещательного способа передачи сообщений. Это ограничение вызвано используемым алгоритмом А6 ВИС, предназначенным для обеспечения согласованности результатов диагностирования во всех исправных МОС системы. Другим ограничением алгоритма А6 ВИС является отсутствие обнаружения и идентификации всех проявлений неисправностей, случившихся в заключительных раундах 2s + 2, ... ВИС, и части проявлений неисправностей, случившихся в раунде 2s+1. Поэтому направлениями дальнейших исследований является разработка алгоритмов ВИС, обеспечивающих обнаружение и идентификацию проявлений неисправностей в неполносвязных MBC, а также методов ССД, обнаруживающих и идентифицирующих все случившиеся проявления неисправностей.

4.2 Алгоритм взаимного информационного согласования в многопроцессорных вычислительных системах с обнаружением и идентификацией кратных враждебных неисправностей

Взаимное информационное согласование (ВИС) в условиях возникновения враждебных неисправностей [97] является центральной проблемой при организации сбое- и отказоустойчивых вычислений в многопроцессорных вычислительных системах. Применение динамической или статической избыточности обеспечивает как парирование (маскирование) проявлений неисправностей, так и их обнаружение и идентификацию по месту возникновения и по виду (сбой, программный сбой или отказ) [43, 94].

Существуют различные алгоритмы ВИС с обнаружением и идентификацией проявлений неисправностей [94, 162, 167, 227, 228, 1А]. Они различаются применяемыми моделями МВС, моделями неисправностей отдельных элементов, ограничениями на множество элементов системы, подвергающихся воздействию неисправностей, кратностью *т* допустимых неисправностей и обладают различными возможностями по обнаружению и идентификации (по обработке) случившихся допустимых проявлений неисправностей. Так, в [94, 162, 167] рассматриваются МВС, в которых каждая пара МОС связана отдельным межмашинным каналом связи. Неисправность МОС в [94, 67] проявляется в виде ее произвольного поведения, в том числе и подобного «злонамеренному», а в методе взаимного удостоверительного согласования из [162] неисправность МОС не приводит к искажениям передаваемого ею сообщения и прилагаемых к нему удостоверителей таким, что они вновь соответствуют друг другу. В [227, 228] анализируются МВС с межмашинными каналами связи шинной архитектуры и широковещательным способом передачи межмашинных сообщений. Причем каждый МОС *M_i* имеет собственный *i*-й канал межмашинной связи, к которому он присоединен через передающее устройство сопряжения (УС) О_i, а другие МОС присоединены к этому каналу своими принимающими устройствами сопряжения.

В *s*-сбоеустойчивом алгоритме A1 [227] обрабатываются проявления неисправностей, случившиеся только в первых 2s + 1 из всех 2s + 1 + m раундов взаимообмена информацией в процессе ВИС, и невозможно различение неисправности МОС и неисправности его передающего УС. Алгоритм A4 ВИС [228] позволяет различить неисправность МОС и неисправность его передающего УС, если это возможно, но только для одиночных неисправностей (m = 1) и по их проявлениям в

первых 2s + 1 из всех 2s + 1 + m раундов. Алгоритм АЛ1 ВИС [228] обнаруживает все проявления не более чем *m* неисправностей, но только передающих УС, в предположении об исправности всех МОС. Алгоритм АЛ2 ВИС [228] обрабатывает все проявления неисправностей МОС или передающих УС, позволяет различить неисправность МОС и неисправность ее передающего УС, но только для одиночных неисправностей. Алгоритм А6 ВИС [1А] обнаруживает и идентифицирует кратные неисправности МОС и передающих УС, различает неисправности МОС и неисправности передающих УС, если это возможно, но только по проявлениям неисправностей, случившимся в первых 2s + 1 раундах.

Как видно из приведенного анализа, известные алгоритмы обладают рядом недостатков, которые существенно ограничивают область их применения. В следующем разделе предлагается дальнейшее развитие *s*-сбоеустойчивого алгоритма ВИС для МВС с межмашинными каналами связи шинной архитектуры и широковещательным способом передачи межмашинных сообщений, обеспечивающего как обнаружение проявлений неисправностей не более чем *m* МОС и передающих УС во всех раундах взаимообмена, так и их идентификацию с повышенной точностью [2A,5A,15A–17A].

В отличие от алгоритмов ВИС [227, 229, 1А] предлагаемый алгоритм А7 ВИС основан на том, что исправным МОС, принимающим сообщение с согласуемыми значениями в любом раунде ВИС, известен правильный формат этого сообщения.

Введем следующие обозначения: (ВИС)^{*r*} – ВИС с номером *r* в последовательности пронумерованных ВИС, выполняемых системой в процессе ее работы; (O^{k}_{i})^{*r*} – сбой O_{i} в *k*-м элементарном контролируемом действии (ЭКД) (например, в передаче информации в *k*-м раунде (ВИС)^{*r*}); (M_{i}^{k})^{*r*} – сбой *i*-го МОС в *k*-м ЭКД (например, искажение некоторого сообщения, поступившего в *k*-м раунде (ВИС)^{*r*}, или искажение сообщения, передаваемого в *k*-*м* раунде (ВИС)^{*r*} через O_{i}); (O_{i})^{*r*} и (M_{i})^{*r*} – соответственно отказ передающего УС O_{i} и программный сбой *i*-го МОС, идентифицированные в (ВИС)^{*r*}; (3_{i})^{*r*} – собственное значение согласуемой информации *i*-й МОС, предназначенной для согласования в (ВИС)^{*r*}; (3^{k}_{i})^{*r*} – значение (3_{i})^{*r*}, переданное *i*-й МОС в *k*-м раунде (ВИС)^{*r*}; ($Z^{k}_{i,j}$)^{*r*} – значение (3_{i})^{*r*} – значение (3^{k}_{i})^{*r*}, которое, будучи выданным в *k*-м раунде из *i*-й МОС; ($Z^{k}_{i,j,l,...,p}$)^{*r*} – значение, соответствующее переданном *i*- му МОС значению $(3^{k}_{i})^{r}$ и вычисленное при помощи алгоритма А2 ВИС [164] по всем поступившим значениям $(Z^{k}_{i,...})^{r}$; $(C^{k}_{i,j})^{r}$ – согласованное значение, соответствующее переданному *j*-му МОС в (k + 1)-м раунде значению $(Z^{k}_{i,j})^{r}$ и вычисленное по всем полученным значениям $(Z^{k}_{i,j,...})^{r}$; $(C^{k}_{i,j,...,p})^{r}$ – согласованное значение, соответствующее переданному *p*-му МОС значению $(Z^{k}_{i,j,...,p})^{r}$ (многоточия в значениях $(C^{k}_{i,j,...,p})^{r}$ и $(Z^{k}_{i,j,...,p})^{r}$ определяют одинаковую последовательность индексов).

Пусть принимающий МОС M_i анализирует в первом раунде s-сбоеустойчивого $(ВИС)^r$ приход ожидаемого сообщения с согласуемым значением от МОС M_i и при его получении добавляет к согласуемому значению двузначный признак получения $(A_{i,i}^{1})^{r}$ = 0 (такой признак называется текущим). Это составное согласуемое значение используется в M_i для формирования сообщения, передаваемого из M_i в следующем раунде $(BИС)^r$. Если сообщение не получено, то M_i вместо него формирует фиктивное составное согласуемое значение, содержащее заранее обусловленное согласуемое значение $(Z_{i,j}^{1})^{r} = P$ и признак получения $(A_{i,j}^{1})^{r} = 1$, и использует это составное значение в сообщении, передаваемом во втором раунде $(BHC)^{r}$. Во втором и следующих раундах данного (ВИС)^{*r*} приписанный признак будет являться вторым согласуемым значением этого составного значения. Аналогично, принимающий МОС М_i, анализирует приход сообщения от МОС M_i в t-м (t = 2,..., 2s + 1) раунде s-сбоеустойчивого $(BИС)^r$ и при его получении формирует текущий признак $(A^t_{i,i})^r = 0$ и добавляет его к каждому из составных согласуемых значений, содержащихся в данном сообщении. Если некоторое составное согласуемое значение в полученном сообщении отсутствует, M_i подставляет вместо него фиктивное составное согласуемое значение, в которое вместо согласуемого значения МОС заносит заранее обусловленное значение *P*, а в качестве значений приписанных ранее признаков получения ставит значения 1 (неполучение сообщения) этих признаков. Кроме того, к этому составному согласованному значению добавляется текущий признак получения $(A_{i,i}^{t})^{r} = 0$. Если сообщение отсутствует, то M_{i} формирует фиктивное сообщение такого же формата, что и ожидаемое, в каждое составное согласуемое значение которого в качестве согласуемого значения МОС заносит значение Р, в каждый приписанный ранее признак получения сообщения – значение 1 и добавляет к этому составному значению текущий признак получения $(A_{i,i}^{t})^{r} = 1$. Напомним, что для любого согласуемого значения, передаваемого в *t*-м раунде (t = 2, ..., 2s + 1) *s*-сбоеустойчивого ВИС, вычисляется соответствующее согласованное значение.

Текущий признак $(A_{i,j}^{t})^{r}$, приписанный в t-м (t = 1, ..., 2s + 1) раунде, при его поступлении в (t + 1)-м раунде в МОС M_{l} $(l = 1, ..., n; l \neq j)$ становится непосредственным последователем текущего признака $(A_{i,j}^{t})^{r}$ и обозначается через $(A_{i,j,l}^{t})^{r}$, а при его прохождении через некоторую последовательность МОС и поступлении в МОС M_{p} остается последователем текущего признака $(A_{i,j}^{t})^{r}$ и обозначается через $(A_{i,j,...,p}^{t})^{r}$, где многоточие отображает последовательность номеров МОС, через которые проходил этот признак после его выдачи во втором раунде из МОС M_{j} и до поступления его в M_{p} . Аналогично, признак $(A_{i,j,...,p,q}^{t})^{r}$ является непосредственным последователем признака $(A_{i,j,...,p}^{t})^{r}$ (многоточия в обоих обозначениях отображают одинаковую последовательность индексов), а все признаки $(A_{i,j,...,p,...}^{t})^{r}$, имеющие последовательность индексов i, j, ..., p такую же, как у признака $(A_{i,j,...,p}^{t})^{r}$, являются последователями этого признака $(A_{i,j,...,p}^{t})^{r}$.

После завершения взаимообменов в раундах 1,..., 2s + 1 + m каждый МОС при помощи алгоритма A2 ВИС [164] вычисляет согласованные составные значения, выданные каждым МОС в каждом из 1,..., 2s + 1 раундов. Так, согласованное значение $(C_i^k)^r$ (i = 1,...,n; k=1,...,2s+1) вычисляется по всем согласуемым значениям $(Z_{i,...}^k)^r$, полученным в раундах k,...,k+m, согласованное значение $(C_{i,j}^k)^r$ $(j = 1,...,n; i\neq j)$ – по всем согласуемым значениям $(Z_{i,...}^k)^r$, полученным в раундах k,...,k+m, согласованное значение $(C_{i,j}^k)^r$ $(j = 1,...,n; i\neq j)$ – по всем согласуемым значениям $(Z_{i,...}^k)^r$, полученным в раундах k+1,...,k+m+1 и т.д. Аналогичным образом вычисляются согласованные значения $(V_i^k)^r, (V_{i,j}^k)^r, ...$ признаков выдачи, входящих в составные значения. Так, значение $(V_{i,j}^k)^r$ вычисляется в МОС M_j по признаку $(A_{i,j}^k)^r$ и последователям всех признаков $(A_{i,l}^k)^r$ (l = 1,...,n), полученным в раундах k+1,...,k+m, значение $(V_{i,j}^k)^r$ — по всем последователям $(A_{i,l,...}^k)^r$ признака $(A_{i,l}^k)^r$, полученным в раундах k+1,...,k+m+1, и т.д.

Можно утверждать, что, если в *t*-м (t = 1, ..., 2s + 1) раунде ВИС не было выдачи из M_i сообщения, содержащего согласуемое значение МОС $(Z^k_{...,i})^r$, то соответствующее согласованное значение $(C^k_{...,i})^r$ будет равно *P*, а согласованный текущий признак $(V_i^t)^r$ равен 1.

Доказательство утверждения следует из того, что при отсутствии выдачи данного сообщения каждый исправный МОС M_l (l = 1,...,n), число которых (n - m) > [(n + m)/2], сформирует $(Z^k_{...,i})^r = P$ и $(V^t_i)^r = 1$, что в соответствии с

критериями алгоритмов ВИС [164, 230] приведет к равенствам $(C^{k}_{\dots,i})^{r} = P$ и $(V^{t}_{i})^{r} = 1$ на первом их шаге.

Результирующее согласованное значение $(C_i)^r$ (i = 1, ..., n), соответствующее M_i , находится следующим образом. Если среди вычисленных значений $(C_i^k)^r$ (i = 1, ..., n;k=1,...,2s+1) имеется более чем *s* одинаковых значений, то это значение приписывается результирующему согласованному значению $(C_i)^r$. В противном случае значение $(C_i)^r$ считается неопределенным.

Проявления неисправностей МОС и передающих УС в процессе ВИС могут быть пяти видов:

1) невыдача согласуемых значений или их искажение в процессе выдачи в раундах $1, \ldots, 2s + 1;$

2) невыдача согласуемых значений или их искажение в процессе выдачи в раундах 2s+2,..., 2s+1+m;

3) ошибки МОС при обработке информации, полученной ею в процессе взаимообменов;

4) отсутствие приема или искажение принимаемых согласуемых значений в раундах 1,..., 2*s*;

5) отсутствие приема или искажение принимаемых согласуемых значений в раундах 2s + 1, ..., 2s + 1 + m.

Случаи (4) и (5) по своим проявлениям являются эквивалентными соответственно случаям (1) и (2) и поэтому их можно не рассматривать.

Обработка проявлений неисправностей первого вида проводится в каждом МОС на основании согласованных составных значений, вычисленных для согласуемых значений, переданных каждым МОС в течение первых 2s + 1 раундов взаимообменов. Использование алгоритма A2 [164] для вычисления этих согласованных значений обеспечивает одинаковость получаемых результатов обработки во всех исправных МОС системы.

Разработанный алгоритм А7 ВИС и пример его использования рассмотрены в Приложении В (п. В.3). Алгоритм А7 позволяет определить элементы с проявлениями программного сбоя или отказа.

4.3 Алгоритм взаимного информационного согласования с обнаружением и идентификацией проявлений кратных неисправностей

В предлагаемом алгоритме АЛЗ используется метод построения и анализа глобального синдрома, применявшийся также в алгоритмах АЛ1 и АЛ2 [168]. Отказом передающего УС и программным сбоем МОС будем считать проявление не менее *s* + 1 их сбоев в двух смежных ВИС. Описание алгоритма АЛЗ дано в Приложении В (п. В.4).

Условием правильности результатов обнаружения и идентификации случившихся проявлений неисправностей является правильность выражений подозреваемых областей неисправностей для обнаруженных проявлений, основанная на полном переборе всевозможных вариантов. Условием одинаковости этих результатов во всех исправных МОС является обеспечение одинаковости исходных данных в этих МОС и применение одинаковых алгоритмов их обработки.

Целью окончания процесса идентификации, упомянутой в описании алгоритма АЛЗ, может быть, например, однозначная идентификация факта программного сбоя хотя бы одного МОС или отказа хотя бы одного передающего УС, после которой можно переходить к тестовому диагностированию. Такая цель формулируется в виде наличия хотя бы одного обнаружения программного сбоя МОС или отказа передающего УС в каждом терме логического выражения подозреваемой области неисправностей, приведенного к виду ∑П. Другой целью может быть однозначная идентификация программного сбоя хотя бы одного МОС или отказа хотя бы одного передающего УС, после чего возможно выполнение реконфигурации системы. Такой цели соответствует выражение подозреваемой области неисправностей, преобразованное к виду ∑П, в каждом терме которого имеется обозначение программного сбоя одной и той же МОС либо обозначение отказа одного и того же передающего УС. Возможно также определение других простых и составных целей процесса идентификации.

Рассмотрим пример предыдущего раздела. Предположим, что выполнение алгоритма А7 этого примера осуществлялось в рамках выполнения (ВИС)^{*r*} алгоритмом АЛЗ, на восьмом шаге которого также было обнаружено неравенство согласуемого значения приписанного признака получения $(A^{3}_{6,4,7})^{r}$ и соответствующего ему согласованного значения $(V^{3}_{6})^{r}$, и признак этого неравенства был занесен в локальный синдром (Б₇)^{*r*}. На шестом шаге алгоритма АЛЗ в (ВИС)^{*r*+1} в каждом исправном МОС на основании анализа глобального синдрома (Г)^{*r*} фиксируется равенство ($A^{3}_{6,4}$)^{*r*} = (V^{3}_{6})^{*r*} и

неравенство $(A^{3}_{6,4,7})^{r} \neq (V^{3}_{6})^{r}$ и строится логическое выражение подозреваемой области неисправностей $(P)^{r} = (O^{5}_{4})^{r} \vee (M^{5}_{7})^{r} \vee (M^{6}_{7})^{r} \vee (M_{7})^{r+1} \vee (O_{7})^{r+1}$, а затем логическое выражение $(O)^{r} = (L)^{r}(P)^{r} = [(M^{1}_{4})^{r} (O^{2}_{3})^{r} \vee (O^{1}_{4})^{r} (O^{2}_{3})^{r}](P)^{r}$, которое после преобразования к виду $\Sigma \Pi$ и исключения термов, включающих обозначения неисправности более двух элементов системы, будет содержать только один терм $(O^{2}_{3})^{r}$ $(O_{4})^{r}$, однозначно определяющий сбой O_{3} , проявившийся и обнаруженный в $(BUC)^{r}$, но согласованно идентифицированный в $(BUC)^{r+1}$.

В отличие от известных методов предлагаемый метод обеспечивает обнаружение и идентификацию проявлений, во-первых, кратных допустимых неисправностей, вовторых, во всех раундах ВИС и, в-третьих, для полносвязных МВС. Первые два из отмеченных моментов являются положительными, поэтому необходимо провести дальнейшее исследование в этих областях со снижением используемой временной и информационной избыточности. Область алгоритмов ВИС с обнаружением и идентификацией проявлений неисправностей для MBC общего вида, включающего неполносвязные MBC, остается открытой и является предметом исследования в следующем разделе.

4.4 Распределённое системное диагностирование враждебных неисправностей в неполносвязанных многопроцессорных вычислительных системах

Системное диагностирование многопроцессорных вычислительных систем состоит в проверках одних МОС системы со стороны других МОС этой же системы, формировании синдрома из результатов проверок и дешифрации этого синдрома [78]. Анализ полученного синдрома проверок может выполняться или сосредоточенным способом дешифрации с помощью внешних исправных средств, или распределенным методом, осуществляемым самой же проверяемой системой. В большинстве работ по системному диагностированию многомашинных вычислительных систем рассматриваются сосредоточенные способы дешифрации [78]. В [5А] представлены распределенные методы системного диагностирования враждебных неисправностей МОС, но в полносвязных системах. Область распределенных методов системного диагностировании враждебных неисправностей МОС в неполносвязных системах, как системах наиболее общего вида, остается открытой, и к этой области относится метод, предлагаемый в настоящем параграфе [15А – 17А].

Распределенное системное диагностирование (РСД) на протяжении срока активного существования системы можно представить в виде пронумерованных, начиная с единицы, повторяющихся циклов, каждый из которых состоит из следующих фаз: 1) выполнение проверяемыми МОС предписанных им проверок, формирование результатом и их передача в проверяющие МОС; 2) анализ полученных результатов в проверяющих МОС и формирование в каждом из них собственного локального синдрома проверок (ЛСП); 3) пересылка каждого проверяющего МОС собственного ЛСП во все другие МОС системы и формирование в каждом МОС глобального синдрома проверок на основании всех полученных ЛСП; 4) дешифрация глобального синдрома проверок в каждом МОС.

Один из вариантов построения алгоритма распределенного системного диагностирования РСД-1 изложен в Приложении В (п. В.5). В качестве примера рассмотрим графовую модель D системы, которая приведена на рисунке 4.2 и содержит подграф F, гомеоморфный полносвязному графу с числом вершин n = 3m+1 = 7 для m = 2. Основными вершинами в графе D являются вершины $M_1 - M_7$, неосновными $- M_8 - M_{11}$, разделительными $- M_8 - M_{10}$. Предположим, что неисправны МОС M_2 и M_{11} . Проверяющими для МОС M_2 являются основные МОС M_1 , M_3 , M_4 , M_6 , M_7 , а для МОС $M_{11} -$ основные МОС M_1 (через M_{10}), M_4 , M_5 (через M_9), M_6 , M_7 (через M_8).



Рисунок 4.2 – Граф *D* системы

Первый шаг алгоритма РСД-1 включает с 1-го по 3-й кванты передачи. Процесс взаимопересылок в (ВИС)^{*r*} на 3-м шаге алгоритма начинается с 4-го кванта и

продолжается по 9-й квант включительно. Посылка сообщений (*P_i*)^{*r*} на 9-м шаге осуществляется в 10-м, 11-м квантах.

Предположим, что критерием программного сбоя МОС является возникновение двух и более сбоев одной или нескольких частей этого МОС в течение трех смежных циклов РСД. Критерием окончания процесса идентификации примем идентификацию программных сбоев m = 2 МОС системы.

Пусть в процессе выполнении алгоритма РСД-1 при выполнении циклов (РСД)¹ – (РСД)⁵ возникли следующие пять проявлений неисправностей:

1) при выполнении цикла (РСД)³ из-за сбоя части $M_{11/6}$ при приеме сообщения $(P_{6,11}^9)^3$ на 9-м шаге алгоритма произошло искажение содержащегося в нем выражения $(O_6^9)^3$;

2) в 1-м кванте (РСД)⁴ из МОС M_2 было передано неправильное контрольное сообщение в МОС M_8 ;

3) в 2-м кванте (РСД)⁴ из МОС M_2 был передан неправильный результат своей самопроверки в МОС M_3 , во все остальные проверяющие основные МОС из МОС M_2 поступил правильный результат;

4) в 4-м кванте (РСД)⁴, являющемся начальным квантом взаимопересылок первого раунда (ВИС)⁴, из МОС M_2 было передано в другие основные МОС в качестве своего собственного значения $(3_2)^4$ такое сочетание этих значений, что исправными основными МОС M_1 , $M_3 - M_7$ на 3-м шаге (РСД)⁴ вычислено согласованное значение $(C_2)^4 = \text{NIL}$;

5) на 11-м шаге (РСД)⁴ в МОС M_{11} при анализе равенства значения $(P^{9,11}_{4,11})^3$ и значения $(VP_{11})^4$ вместо признака равенства неправильно сформирован признак неравенства и помещен в значение $(RT_{11})^4$.

Работа алгоритма РСД-1 по обнаружению и идентификации проявлений неисправностей осуществляется следующим образом. После 1-го проявления неисправности на 11-м шаге (РСД)³ МОС M_{11} формирует собственное значение $(RT_{11})^3$, содержащее признак неравенства только для сообщения $(P^9_{6,11})^3$. На 1-м шаге (РСД)⁴ это значение поступает в проверяющие основные МОС и после (ВИС)⁴ на 5-м шаге (РСД)⁴ этот признак неравенства появляется в значении (*VCRT*₁₁)³ и на 7-м шаге (РСД)⁴ приводит к формированию во всех основных МОС выражения подозреваемых неисправностей $(M^{10}_{6/11})^4 V (M^{10}_{11/6})^4 V (M^{2}_{11})^4$. Второе проявление неисправности на 1-м шаге $(PCД)^4$ вызывает в МОС M_8 формирование вектора $(N_8)^r$ со значением неравенства для сравнения с эталоном контрольного сообщения, принятого от МОС M_8 . На 6-м шаге $(PCД)^4$ каждый исправный основной МОС по признаку этого неравенства строит выражение подозреваемых неисправностей $(M_{2/8}^1)^4 V (M_{8/2}^2)^4 V (M_8^2)^4$.

Третье проявление неисправности (сбой МОС M_2) приводит к тому, что на 2-м шаге (РСД)⁴ МОС M_3 сравнивает полученный ошибочный результат с эталоном, формирует значение неравенства для признака $(SR^2_{2,3})^4$ и помещает этот признак в $(ЛСП_3)^4$. Это значение неравенства принимает также согласованное значение $(CSR^2_{2,3})^4$, вычисленное в результате (ВИС)⁴ на 3-м шаге (РСД)⁴ во всех основных МОС. На 8-м шаге (РСД)⁴ каждый основной МОС системы сравнивает результат ($VCSR_2$)⁴ мажорирования согласованных значений ($CSR^2_{2,1}$)⁴, ($CSR^2_{2,3}$)⁴, ($CSR^2_{2,4}$)⁴, ($CSR^2_{2,6}$)⁴, ($CSR^2_{2,7}$)⁴ (все из которых, кроме ($CSR^2_{2,3}$)⁴, являются значениями равенства) с каждым из этих согласованных значений и для неравенства значений ($VCSR_2$)⁴ V (M^4_3)⁴, в котором последний терм отображает сбой МОС M_3 в 4-м кванте (РСД)⁴, являющемся начальным квантом первого раунда (ВИС)⁴.

Четвертое проявление неисправности (сбой МОС M_2 в 4-м кванте (РСД)⁴) приводит к тому, что на 4-м шаге (РСД)⁴ все основные МОС системы строят для значения $(C_2)^4$ = NIL выражение подозреваемых неисправностей из одного обозначения сбоя $(M_2^4)^4$.

На 9-м шаге (РСД)⁴ все основные МОС системы в соответствии с критерием программного сбоя МОС формируют конъюнкцию выражений подозреваемых неисправностей, построенных в циклах (РСД)² – (РСД)⁴. В (РСД)² и (РСД)³ таких выражений не было. Конъюнкция выражений, построенных в (РСД)⁴, имеет вид

$$[(M^{10}{}_{6/11})^4 \text{ V} (M^{10}{}_{11/6})^4 \text{ V} (M^{2}{}_{11})^4] [(M^{1}{}_{2/8})^4 \text{ V} (M^{1}{}_{8/2})^4 \text{ V} (M^{2}{}_{8})^4] \times \\ \times [(M^{2}{}_{2/3})^4 \text{ V} (M^{2}{}_{3/2})^4 \text{ V} (M^{4}{}_{3})^4] (M^{4}{}_{2})^4.$$

После приведения к виду дизъюнкции конъюнкций и исключения термов, не соответствующих допустимому числу m = 2 неисправных МОС, это выражение принимает вид

$$(M^{10}_{6/11})^3 (M^{1}_{2/8})^4 (M^{2}_{2/3})^4 (M^{4}_{2})^4 V (M^{10}_{11/6})^3 (M^{1}_{2/8})^4 (M^{2}_{2/3})^4 (M^{4}_{2})^4 V (M^{2}_{11})^4 (M^{1}_{2/8}) (M^{2}_{2/3})^4 (M^{4}_{2})^4,$$

а после применения критерия программного сбоя будет:

$$(M^{10}_{6/11})^3 (M_2)^4 \operatorname{V} (M^{10}_{11/6})^3 (M_2)^4 \operatorname{V} (M^{2}_{11})^4 (M_2)^4.$$

Если бы критерием окончания процесса идентификации было условие идентификации программного сбоя хотя бы одного МОС, то по последнему выражению, удовлетворяющему этому условию, система должна была бы перейти к восстановлению вычислительного процесса в МОС M_2 . Однако принятый критерий окончания процесса идентификации состоит в идентификации программного сбоя m = 2 МОС. Поэтому в данном примере процесс идентификации продолжается.

По 5-му проявлению неисправностей неправильный признак неравенства в значении $(RT_{11})^4$ приводит к появлению этого признака неравенства в одинаковом во всех исправных основных МОС значении $(VCRT_{11})^4$ и на 7-м шаге $(PCД)^5$ вызывает формирование во всех основных МОС системы выражения подозреваемых неисправностей $(M^{10}_{4/11})^4$ V $(M^{10}_{11/4})$ V $(M^{2}_{11})^5$.

На 9-м шаге (РСД)⁵ все основные МОС в соответствии с принятым критерием программного сбоя формируют конъюнкцию выражений подозреваемых неисправностей, построенных в циклах (РСД)³ – (РСД)⁵. В цикле (РСД)³ такие выражения не строились. Конъюнкция выражений, построенных в циклах (РСД)⁴ и (РСД)⁵, имеет вид

$$[(M^{10}_{6/11})^3 (M_2)^4 V (M^{10}_{11/6})^3 (M_2)^4 V (M^{2}_{11})^3 (M_2)^4] \times \\ \times [(M^{10}_{4/11})^4 V (M^{10}_{11/4}) V (M^{2}_{11})^5].$$

После преобразования к виду дизъюнкции конъюнкций, исключения термов, неудовлетворяющих значению *m* = 2, и применения критерия программного сбоя МОС это соотношение принимает вид

$$(M_2)^4 (M_{11})^4 V(M_2)^4 (M_{11})^5$$
,

каждый терм которого отображает программные сбои МОС M_2 и M_{11} и удовлетворяет критерию окончания процесса идентификации. Как видим, результат распределенного диагностирования совпал с исходными данными поставленной задачи.

Таким образом, приведенный пример иллюстрирует идентификацию неисправностей и места их возникновения, что подтверждает работоспособность предложенного алгоритма распределенного системного диагностирования РСД-1.

Согласованность и правильность всех действий исправных МОС системы основывается на одинаковости обрабатываемых и анализируемых данных во всех

исправных МОС и применения к этим данным во всех исправных МОС одинакового алгоритма.

Критерий окончания процесса идентификации может состоять в точной идентификации программных сбоев $l \le m$ МОС. Структурные свойства системы, принятые в данной работе, и алгоритм РСД-1 гарантируют, что все исправные МОС системы одновременно (на одном и том же шаге одного и того же цикла алгоритма РСД) идентифицируют новые программные сбои МОС.

Предложенный алгоритм обеспечивает полное обнаружение проявлений неисправностей на этапах выполнения проверок проверяемыми МОС, пересылок их результатов в основные МОС и пересылок сообщений с результатами идентификации из основных МОС в неосновные. Частичное обнаружение проявлений неисправностей осуществляется на этапе (ВИС)^{*r*}. Обнаруженные проявления неисправностей используются для идентификации имеющихся враждебных неисправностей в соответствии с принятыми критериями программного сбоя и отказа МОС. Имеющиеся допустимые по кратности (числу одновременно неисправных МОС) устойчивые неисправности (программные сбои и отказы) будут обнаружены и идентифицированы с точностью до возможной подозреваемой области на первых же циклах алгоритма РСД-1, следующих за возникновением этих неисправностей. Количество циклов зависит от применяемого критерия программного сбоя или отказа. Неустойчивые неисправности, допустимые по кратности, могут быть идентифицированы с точностью до возможной подозреваемой области только тогда, когда их проявления удовлетворят используемому критерию программного сбоя или отказа. Идентификация исправного состояния МОС при критерии программного сбоя MOC, состоящего в обнаружении не менее *s* сбоев этого MOC в t > s смежных циклах РСД, может быть завершена на данном цикле РСД, если проявления неисправности этого МОС на последних t циклах, включая данный, таковы, что счетчик сбоев, определяющий значение *s*, должен быть обнулен после данного цикла перед следующим циклом. Например, пусть критерий программного сбоя состоит в обнаружении не менее двух сбоев в трех смежных циклах РСД. Предположим, что для некоторого MOC в двух последних ((t-1)-м и *t*-м) циклах не идентифицированы его сбои и данный МОС не имеется в области подозреваемых неисправностей, определенных для двух последних циклов. Тогда перед следующим (t + 1)-м циклом в счетчик сбоев данного МОС должен быть занесен нуль, и данный МОС может быть зафиксирован в конце *t*-го цикла как исправный.

Наличие в системе известных неисправных МОС не мешает работе алгоритма РСД-1, если суммарное количество неисправных МОС (известных и неизвестных) не превышает допустимого. Для уменьшения вероятности появления ситуаций, когда количество известных и неизвестных неисправных МОС будет превышать допустимую кратность, необходима своевременная реконфигурация системы, состоящая в изоляции известных неисправных МОС, включении и втягивании в совместную работу запасных МОС, а при их отсутствии – в возможном переходе системы к условию допустимости неисправностей меньшей кратности.

4.5 Модель многопроцессорной вычислительной системы, обеспечивающая идентификацию враждебных неисправностей МОС с максимально возможной точностью

В модели МВС в виде графа идентификация места возникновения неисправностей осуществляется с точностью до МОС (вершины графа) или дуплексного канала связи (дуги графа) [137, 231]. В работах [232, 5А] используется модель, предполагающая, что МОС состоит из частей, каждая из которых обеспечивает обмен данной МОС по одному из двухточечных дуплексных каналов межмашинной связи. Предлагаемые в [232, 5А] методы идентификации неисправностей в такой модели при обнаружении искажения информации в канале связи между M_i и M_i формируют подозреваемую область неисправности, включающую части $M_{i/i}$ и/или $M_{i/i}$ и отображаемую логическим выражением $M_{i/i}$ V $M_{i/i}$. Недостатком этой модели является то, что она не учитывает возможное существование в дуплексном канале совокупности двух виртуальных разнонаправленных симплексных каналов, работающих, возможно, с разделением времени. Эта совокупность имеет аппаратурное подтверждение в наличии в каждой из частей $M_{i/i}$ и $M_{i/i}$ передающего и принимающего устройств, каждое из которых может независимо подвергнуться неисправности при сохранении работоспособности другой части. В таком случае неисправным становится только один из двух виртуальных симплексных каналов, реализуемых в данном дуплексном канале. Однако выражение *M_{i/i}* V *M_{i/i}* объявляет неисправным этот дуплексный канал полностью и при проведении реконфигурации системы, основанной на результатах такой идентификации места неисправности, этот дуплексный канал должен быть исключен из рабочей конфигурации системы.

В данном разделе поставим задачу построения модели системы, в которой между МОС обмен информацией осуществляется по дуплексным каналам связи, содержащим два виртуальных разнонаправленных симплексных канала, и возможна идентификация неисправности с точностью до передающего или принимающего устройства, реализуемого в виртуальном симплексном канале [17А]. Ниже под дуплексным каналом связи будет подразумеваться именно такой канал связи.

В модели враждебной неисправности МОС поведение неисправного МОС допускается полностью произвольным, в том числе и подобным «злонамеренному», включая его неодинаковость по отношению к другим элементам системы [229]. Враждебная неисправность МОС в системе с двухточечными дуплексными или симплексными каналами связи может быть стабильной (стабильная враждебная неисправность), когда этот МОС может искажать произвольным в информационном и временном планах образом. Такая неисправность эквивалентна по своим проявлениям совокупности неисправностей тех присоединенных каналов, в которых появляется искаженная информация, и данный неисправный МОС без ущерба для достоверности посылаемой им информации может участвовать в работе системы своими каналами, по которым информация не искажается. При нестабильной враждебной неисправности МОС поведение такого МОС полностью произвольно и подобно поведению исправного МОС при условии возникновения всевозможных сочетаний произвольных сбоев постоянной или переменной интенсивности во всех каналах связи, соединенных с данным МОС [233]. Такой МОС должен исключаться из рабочей конфигурации системы как можно ранее.

В случае стабильной неисправности МОС из рабочей конфигурации системы могут быть исключены только неисправные симплексные или виртуальные симплексные каналы этой МОС, по которым передается искаженная информация, а сама МОС с оставшимися дуплексными, симплексными или виртуальными симплексными рабочей функционирование каналами связи может продолжать успешное В конфигурации. Такая возможность удлиняет траектории возможной деградации необслуживаемой системы, а, значит, и срок ее активного существования. Поэтому высока актуальность поставленной задачи.

- 97 -

Некоторая гипотетическая неисправность по возможности наличия в системе, определяемой по результатам функционального или тестового диагностирования, может быть подозреваемой или неподозреваемой. Подозреваемой неисправность будет в том случае, если она является допустимой, и ее наличие в системе не будет противоречить поведению системы и результатам ее диагностирования. В противном случае неисправность является неподозреваемой.

Обозначим через $M_{i\to j}$ и через $M_{i\leftarrow j}$ соответственно передающее и принимающее устройство части $M_{i/j}$ дуплексного канала МОС M_i . При обнаружении искажения информации в сообщении, принятом в M_j из M_i по дуплексному каналу связи между ними, выражение подозреваемых неисправностей будет иметь вид $M_{i\to j}$ V $M_{i\leftarrow j}$ (т.е. подозреваются передающее устройство $M_{i\to j}$ в МОС M_i и/или принимающее устройство $M_{j\leftarrow i}$ в МОС M_j), а при обнаружении искажения в сообщении, принятом в M_i из M_j по этому же дуплексному каналу связи, – выражение $M_{j\to i} \vee M_{j\leftarrow i}$.

Рассмотрим пример из раздела 4.4 системного диагностирования системы, структура которой представлена на рисунок 4.2 (вершины – МОС, дуги – дуплексные каналы связи). Пусть при условии допустимых неисправностей не более двух МОС при действительно неисправных МОС M_2 и M_{11} в процессе выполнения 3–5-го циклов алгоритма РСД-1 из [5А] произошли следующие проявления неисправностей: 1) на 9-м шаге (РСД)³ из-за сбоя части $M_{11\leftarrow 6}$ при приеме сообщения ($P^{9}_{6,11}$)³ произошло искажение содержащегося в нем выражения (O^{9}_{6})³; 2) из-за сбоя части $M_{2\rightarrow 3}$ в 1-м кванте (РСД)⁴ в M_3 из M_2 поступило ошибочное контрольное сообщение; 3) из-за сбоя части $M_{2\rightarrow 1}$ во 2-м кванте (РСД)⁴ только в M_1 поступил отрицательный результат самопроверки M_2 ; 4) из-за сбоя части $M_{11\rightarrow 4}$ ко 2-м кванте (РСД)⁵ только в M_4 поступил отрицательный результат самопроверки M_{11} .

С учетом приведенных обозначений частей МОС и их устройств выражения подозреваемых неисправностей, строящиеся во всех исправных основных МОС, для каждого из проявлений соответственно имеют вид:

1)
$$(M^{10}_{6\to 11})^3 V (M^{10}_{11\leftarrow 6})^3 V (M^{2}_{11})^4;$$

2) $(M^{1}_{2\to 3})^4 V (M^{1}_{3\leftarrow 2})^4 V (M^{2}_{3})^4;$
3) $(M^{1}_{2\to 1})^3 V (M^{1}_{1\leftarrow 2})^4 V (M^{4}_{1})^4;$
4) $(M^{2}_{11\to 4})^4 V (M^{2}_{4\leftarrow 11})^4 V (M^{4}_{4})^4.$

Конъюнкция всех этих выражений после приведения к виду дизъюнкции конъюнкций и исключения каждого терма, не удовлетворяющего условию допустимой кратности неисправностей (не более двух неисправных МОС), будет иметь два терма, каждый из которых представляет допустимую совокупность сбоев передающих и принимающих устройств в частях МОС, при которой возможно имеющее место поведение системы:

$$(M^{2}_{11\to4})^{4} (M^{10}_{11\leftarrow6})^{3} (M^{1}_{2\to3})^{4} (M^{2}_{2\to1})^{4} V (M^{2}_{11\to4})^{4} (M^{2}_{11})^{4} (M^{1}_{2\to3})^{4} (M^{1}_{2\to1})^{4}.$$

Как видно из выражения, идентификация места неисправности в предлагаемом подходе возможна с точностью до передающего или принимающего устройства в части МОС, участвующей в обмене по дуплексному каналу.

4.6 Выводы по главе 4

1. Впервые предложен метод распределенного системного самодиагностирования, позволяющий полносвязной кластерной вычислительной системе при произвольной структуре графа взаимопроверок МОС обнаруживать и идентифицировать с возможной точностью по месту возникновения и по виду (сбой, программный сбой и отказ) как проявления неисправностей МОС, случившихся в проверяемых MOC при выполнении тестовых проверок, так и проявления «враждебных» неисправностей, произошедших в процессах взаимообмена между МОС локальными синдромами проверок. Предлагаемый метод включает s-сбоеустойчивый алгоритм взаимного информационного согласования (ВИС), который обеспечивает обнаружение и идентификацию проявлений неисправностей в процессе ВИС. Все используемые механизмы обнаружения и идентификации проявлений неисправностей образуют непрерывный и сквозной процесс функционального диагностирования.

2. Впервые представлен метод взаимного информационного согласования в многомашинных системах обработки сигналов с межмашинными каналами связи шинной архитектуры и широковещательным способом передачи сообщений. Метод позволяет обнаруживать и идентифицировать как по месту возникновения, так и по виду (сбой, программный сбой или отказ) проявления кратных неисправностей МОС и передающих устройств сопряжения с каналами связи. Кроме того, метод позволяет различить, во-первых, неисправности МОС и неисправности передающих устройств

сопряжения и, во-вторых, ситуацию невыдачи сообщения в начальных раундах и ситуацию выдачи этого сообщения с искажениями.

3. Впервые предложен метод распределенного системного диагностировании неисправностей наиболее общего вида, именуемых враждебными и состоящих в произвольном, подобном «злонамеренному» поведении неисправной МОС. В отличие от известных метод применим для неполносвязаных многомашинных вычислительных систем, имеющих определенные структурные свойства, и позволяет системе самостоятельно, без содействия извне обнаруживать и идентифицировать случившиеся проявления неисправностей.

Показано, что наличие в системе известных неисправных МОС не мешает работе алгоритма РСД-1, если суммарное количество неисправных МОС (известных и неизвестных) не превышает допустимого. Для уменьшения вероятности появления ситуаций, когда количество известных и неизвестных неисправных МОС будет превышать допустимую кратность, необходима своевременная реконфигурация системы, состоящая в изоляции известных неисправных МОС, включении и втягивании в совместную работу запасных МОС, а при их отсутствии – в возможном переходе системы к условию допустимости неисправностей меньшей кратности.

4. Разработана новая модель поиска неисправностей для многомашинной вычислительной системы, обеспечивающая идентификацию враждебных неисправностей с точностью до передающего или принимающего устройства в части МОС, участвующей в обмене по дуплексному каналу.

5. Применение предложенных моделей, методов и алгоритмов в необслуживаемых цифровых системах обработки сигналов и управляющих комплексах космических аппаратов повышает достоверность выходной информации таких систем, удлиняет их траектории управляемой деградации и увеличивает сроки активного существования КА.

Материалы данной главы опубликованы в работах [1А-3А, 5А, 15А-17А].

-100 -

Глава 5

Разработка высокопроизводительных сбое- и отказоустойчивых систем ЦОС и управляющих комплексов КА на основе отечественного элементноэлектронного базиса

5.1 Основные требования к бортовым системам ЦОС в аппаратуре космических средств с длительными сроками активного существования

Разработка космических аппаратов, как правило, строится по принципу декомпозиции целевой задачи на отдельные функции. Каждая функция реализуется в виде конструктивно законченного набора блоков (блока), желательно с гальванически развязанными внешними связями, и с набором телеметрических параметров, характеризующих его работоспособность [7, 8, 11, 4A, 20A-22A]. Одна из важнейших задач на борту КА – это сбор служебной информации с датчиков, прием и обработка информационных потоков от специальной нагрузки (многозональные камеры, радиотехнические комплексы) и управление исполнительными механизмами, которую реализует бортовой информационно-вычислительный и управляющий комплекс.

Все перечисленные функции приводят к тому, что бортовые вычислительные комплексы ЦОС и управления реализуются как неоднородная, гетерогенная вычислительная структура. При этом ЦОСиУ представляется в виде трех разнородных функциональных узлов, выполняющих общую задачу, оптимизированную с точки зрения распределения функций между ними. Каждый функциональный узел определяется набором выполняемых функций, под который выбирается процессорный элемент и соответствующие им интерфейсы.

В состав ЦОСиУ входят:

1. Блок сигнальной обработки (БСО).

2. Центральный бортовой компьютер (ЦБК).

3. Локальный контроллер абонента (ЛКА).

Процесс проектирования систем ЦОСиУ можно разделить на несколько этапов:

1. Постановка задачи.

2. Деление задачи на набор функций.

3. Группировка в функциональные узлы с выбором процессора и набора интерфейсов для их реализации.

4. Разработка архитектуры аппаратных средств под требования функциональной группы.

5. Выбор/заказ или (и) разработка необходимых ЭРИ под определенные модели реализации КА.

6. Создание необходимых сред программирования.

7. Отработка технологии программирования задач пользователя.

8. Создание инструментальных средств отладки ПО, проведения приемосдаточных испытаний и технологического контроля их ПО в целом.

Многолетний опыт проектирования систем ЦОСиУ показывает, что для разных модификаций КА:

1) требования к ЦБК – относительно постоянны;

2) требования к БСО – переменны в части входных интерфейсов;

3) требования к ЛКА – переменны в части набора функциональных модулей.

Это позволило определить основные направления унификации проектов:

1. унификация конструкции (блоков, модулей и узлов ЦОСиУ);

2. унификация интерфейсов;

3. унификация программного обеспечения ЦОСиУ;

4. унификация применяемой электронной компонентной базы (процессоры, память, базовые матричные кристаллы, микросборки и функциональные узлы);

5. повышение сложности функциональной нагрузки за счет решения многих целевых задач непосредственно на борту КА (обработка сигналов от радио и оптических датчиков, решение навигационных задач, ретрансляция сигналов, обеспечение связи и т.д.).

Реализация данных направлений позволяет решить задачи создания высоконадежных систем ЦОСиУ в короткие сроки с минимальными финансовыми затратами. Кроме того, данная концепция разработки цифровой аппаратуры обеспечивает [21A, 22A]:

1. модульность – представление (декомпозиция) аппаратуры КА в виде отдельных стандартизированных составных частей с унифицированными интерфейсами (тепловыми, электрическими, информационными и т.д.);

2. унификацию – приведение различных видов продукции и средств её производства к рациональному минимуму типоразмеров, марок, форм, свойств и т.п.;

модернизируемость – прогнозируемое перспективное техническое изменение облика системы, коррелирующее с организационно-техническими межведомственными мероприятиями;

4. масштабируемость – способность увеличивать производительность пропорционально используемым ресурсам;

5. многофункциональность – возможность адаптации одной и той же базовой системы ЦОС и управления для разного типа КА;

6. конфигурируемость – возможность конфигурирования системы, как под разные технические задачи, так и конфигурирование в разные ценовые категории.

Следует отметить, что предлагаемые принципы создания многофункциональных систем и вычислительных платформ для решения задач ЦОС и управления соответствуют мировому уровню развития компьютерной техники, которая используется в объектах стратегического назначения [233–237].

Унификация проектов предполагает и обеспечивает:

о сокращение сроков создания и стоимости проектов разработки новых систем;

- работу в рамках ограничительного перечня модулей и ЭКБ, удовлетворяющих усовершенствованной нормативной базе по обеспечению радиационной стойкости в соответствии с рекомендациями главы 3 и [236];
- о получение гарантированного положительного результата;
- о возможность использования результатов международной кооперации;
- управление надежностью КА (резервирование, программная коррекция функционирования, управление временной деградацией борта и т.д.);

 возможность программной модернизации КА в полете (изменение алгоритмов, изменение функциональности, исправление скрытых ошибок и т.д.).

На основе сформированных требований предлагается архитектура обобщенной бортовой вычислительной системы, синтез которой приведен в разделе 5.2.

5.2 Синтез унифицированной структуры бортовой вычислительной системы космического аппарата на основе отечественной элементной компонентной базы

В соответствии с предлагаемой концепцией синтезирована унифицированная структура бортовой вычислительной системы КА, которую можно представить тремя типами подсистем (рисунок 5.1). Подсистема сигнальной обработки работает с большими потоками информации на уровне гигабод (рисунок 5.2). Центральный бортовой компьютер решает задачу сбое- и отказоустойчивых вычислений и поддерживает выполнение алгоритмов управления КА (рисунок 5.3). Аппаратура вводавывода информации обеспечивает сбор информации от датчиков и выдачу управляющих воздействий на исполнительные механизмы (рисунок 5.4).

Для каждой из этих подсистем выделим ключевые компоненты элементной базы и сформулируем к ним требования. Так, каждая из подсистем строится на основе процессоров, элементов памяти и функциональных логических элементов. В отдельный класс можно выделить такие функциональные элементы, как интерфейсные модули [10A].

Проведенная оценка обрабатываемых потоков данных в каждой из подсистем, а также существующего в России задела в сфере разработки процессорной техники показывает, что в рамках подсистемы ввода-вывода удобно использовать 16-разрядный процессор 1874ВЕЗ6 (прототип – Intel 196), созданный в НИИЭТ (Воронеж). В процессе отладки опытных образцов аппаратуры ЦОСиУ и ее программного обеспечения (ПО) разработаны технические предложения, по которым НИИЭТ произвел доработку СБИС в радиационностойком исполнении и создал процессор 1874ВЕ05Т. Этот процессор производится по технологии КнИ 0,5 мкм. На базе процессора с участием соискателя создана методология построения унифицированной аппаратуры ввода-вывода информации. Для образцов аппаратуры с процессором 1874ВЕ05Т проведены летноконструкторские испытания на КА «ГЛОНАСС-М» №33.



Рисунок 5.1 – Бортовая вычислительная система

Требованиям к процессору центрального бортового компьютера соответствует процессор 1890ВМ1Т с MIPS32-совместимой архитектурой, разработанный на объемном кремнии НИИ СИ РАН. Совместными усилиями процессор под новым обозначением 1900ВМ1Т доработан и переводится на технологию КНИ 0,35 мкм для применения в условиях космического пространства.



Рисунок 5.2 – Блок сигнальной обработки с модульной конструкцией и наращиваемой масштабируемой производительностью

Разработан опытный образец центрального бортового компьютера на макетных образцах процессора 1900ВМ1Т, причем общее и специальное программное обеспечение отлажено на его прототипе – процессоре 1890ВМ1Т.



Рисунок 5.3 – Центральный бортовой компьютер

Наиболее требовательной, как показано в разделе 1, по вычислительной мощности является система сигнальной обработки. Для нее был выбран процессор семейства «Мультикор» 1892ВМ8Ф компании НПЦ «ЭЛВИС». В его составе – DSP-ядро с SIMD-архитектурой и управляющее ядро, совместимое с архитектурой MIPS32. Процессор оснащен быстродействующими каналами SpaceWire и LINK-портами. Совместная с НПЦ «ЭЛВИС» работа позволила оптимизировать как структуру системы сигнальной обработки, так и архитектуру самой СБИС СнК – 1892ВМ8Ф.



Датчики, исполнительные механизмы Рисунок 5.4 – Устройства ввода-вывода информации

В процессе разработок дополнительно получено три патента: на коммутатор Linkпортов, отказоустойчивую вычислительную систему с аппаратно-программной реализацией функций отказоустойчивости и динамической реконфигурации, на способ обеспечения сбое- и отказоустойчивости вычислительной системы, основанный на репликации задач, возможности самореконфигурации и самоуправлении деградацией [27А-29А].

Таким образом, для КА путем формирования процессорной группы создана стратегически важная техническая база средств для создания аппаратуры ЦОС и систем управления [236, 25А-29А]. Эта группа обеспечивает длительную работу бортовых вычислительных систем в специальных условиях космического пространства. Ключевую роль в представленных схемах играет коммуникационная среда и высокоскоростные интерфейсы SpaceWire, которые получили дальнейшее совершенствование и развитие в технологиях SpaceWire-RT и SpaceFibre.

Вместе с тем приходится учитывать, что для унификации работ по созданию аппаратуры бортовых вычислительных систем часто используется шина MIL STD 1553В. В процессе работы использован большой опыт адаптации применения в КА помехозащищенного стандарта с шиной MIL STD-1553B («Манчестер-2»). Приоритет автора при проведении этой работы, в частности, подтверждается докладом в 1991 г. на международной конференции в США [30А]. Применение шины MIL STD-1553В («Манчестер-2») в предлагаемых структурах ЦОСиУ позволяет увязывать в единую систему уже существующие решения. Перспективным подходом является построение всех бортовых систем КА на основе однородной коммутируемой среды, к которой могут быть подключены различные ресурсы. Именно такую задачу позволяет решить интерфейсная шина SpaceWire, модификации которой SpaceWire-RT и SpaceFibre обеспечивают скорость передачи до 10 Гбит/с и более. По этим каналам принимаются высокоскоростные потоки от полезной нагрузки КА, т.е. в рамках единой технологии SpaceWire решается актуальная задача передачи высокоскоростных информационных потоков. Одним из отличий SpaceWire от технологии SpaceFiber является отсутствие гальванической развязки, которая обеспечивает высокие характеристики надежности системы ЦОС и вычислительного комплекса управления в случае аварии или короткого замыкания в одном из ее блоков. Все интерфейсные модули на борту КА реализованы в виде специальных микросборок, спроектированных в АО «НИИ «Субмикрон», или специальных СБИС, разработанных совместно с компанией НПЦ «ЭЛВИС».

Еще один ключевой момент в плане построения аппаратуры – реализация функциональных устройств на основе базовых матричных кристаллов (БМК). Их

использование обеспечивает то, что все функциональные узлы вычислительной системы КА производятся в России. На БМК построена подсистема ввода-вывода, а также все функциональные узлы, помимо процессора, в центральном бортовом компьютере. Для решения задач сигнальной обработки в НПК «Технологический центр» создан БМК с 1 млн. вентилей.

Главное в таком способе построения систем – оперирование очень ограниченной номенклатурой элементов общего назначения, а вся специализированная логика реализуется на БМК. Обычно разработчики аппаратуры не очень охотно идут на разработку специализированных микросхем на БМК. Причина очевидна – если потребуется доработка микросхемы и ее повторное изготовление, велики риски удлинения сроков разработки. Разработаны специальные программные и аппаратные средства, которые полностью решают эту проблему [10А].

Спроектированная с помощью специализированной САПР «Ковчег» микросхема вначале зашивается в имитатор БМК, реализованный на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Разработчик аппаратуры может собрать на этих имитаторах макет всего устройства, отработать систему в целом и только после этого заказать изготовление БМК. Такой подход гарантирует, что созданный БМК будет соответствовать модели разработчика. Не менее важно, что пока производится БМК – а полный цикл с испытаниями занимает до четырех месяцев, – разработчик не простаивает. Имея макет аппаратуры на имитаторах, он продолжает нарабатывать программное обеспечение системы, отрабатывать взаимодействие с внешними устройствами. Этот подход впервые применен в БМК серии 5503 и в будущем будет распространен на все серии БМК, производимые в НПК «Технологический центр» МИЭТ.

5.3 Развитие концепции создания бортовых вычислительных комплексов управления с резервируемой функциональностью

В связи с увеличением числа решаемых на борту КА задач непрерывно увеличиваются объемы перерабатываемой информации. Это ведет к разработке более эффективных алгоритмов функционирования бортовых систем. Возрастают также требования по надежности и живучести. В связи с вышеизложенным даже вновь разработанные и рассмотренные в разделах 5.1, 5.2 структуры бортовых
вычислительных систем не в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к перспективным космическим аппаратам [11,12,10А].

Узкими местами остаются:

– способ организации бортовой сети, связанный с раздельной передачей потоков команд и данных на борту КА;

 способ обеспечения резервирования блоков и модулей, связанный с использованием нескольких идентичных копий резервируемого узла, синхронизацией их работы;

комплекс мер по сокращению срока готовности к эксплуатации, связанный
 с устранением зависимости от поставщиков ЭКБ и комплексной модернизацией «систем на плате» [12].

В процессе решения задачи выработки концепций построения систем обработки информации по ряду ОКР, опираясь на задел, полученный в программе «Интеграция-CBT», с учетом состояния и тенденций передовых разработок ведущих дизайн-центров, реорганизации ряда отечественных предприятий-производителей ЭКБ синтезирована структура унифицированного бортового комплекса КА. Эта структура внедряется в различные изделия с перспективой до 2020 года (рисунок 5.5). Её принципиальным отличием является использование сетей SpaceWire с коммутацией высокоскоростных информационных потоков и резервированием функциональности.



Рисунок 5.5 – Структура вычислительной среды КА с резервируемой функциональностью и коммутационной средой

Особенно важно, что предлагаемая структура однородной распределенной коммутационной среды с передачей команд и данных в КА обеспечивает

преемственность с ранее рассмотренными в разделах 5.1, 5.2 бортовыми вычислительными системами (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6 – Структура передачи команд и данных в вычислительной среде КА

Устройства Bridge осуществляют сопряжение (переход) от коммутационной среды к внешним устройствам в виде датчиков и исполнительных механизмов, к вычислительным ресурсам, запоминающему устройству и каналам ввода/вывода информации. В этом заключается главная «архитектурная идея» предлагаемого варианта реализации системы обработки информации КА - из унифицированных процессорных модулей цифровой обработки сигналов (ПМ ЦОС) строится однородная распределенная коммутационная среда, к которой подключаются вычислительные ресурсы и каналы ввода/вывода информации.

На рисунке 5.7 приведен вариант упрощенной структурной схемы предлагаемой вычислительной системы. Система обработки информации, конструктивно, представляет собой стандартный крейт на 16 позиций, выполненных по ГОСТ 28601-90 и МЭК 60297-3-101, типоразмер модулей - 6U, совместимая со стандартом compact PCI.

Коммутационная среда строится на базе высокоскоростного информационного канала serial rapid input/output (sRIO), обеспечивающая одновременную передачу информации до 15 ГБод в конструктивном формате 6U compact PCI и до 60 ГБод в формате 8U (стандарт Advanced TCA).



Рисунок 5.7 – Структурная схема вычислительной системы обработки сигнальной информации

Архитектуру системы определяет СнК из семейства «Мультикор» – 1892ВМ7Я. Это многоядерный процессор с универсальным ядром RISCorE32, разработанный на базе архитектуры MIPS32, развиваемой по программе «Интеграция-CBT», и оригинальные DSP ядра на основе программируемого ядра цифрового сигнального процессора с плавающей точкой Elcore-24 с архитектурой 2SIMD, с минимальной длиной кода при решении таких основных задач сигнальной обработки, как БПФ-1024, комплексное (основание 4) с бит-реверсивной перестановкой, свертка (MAC – умножение с накоплением), нерекурсивный фильтр, рекурсивный фильтр, матричное умножение, деление (у/х), обратная величина квадратному корню и т.д.

Планируемая производительность процессорного модуля ЦОС на процессоре 1892ВМ7Я составит 36 GFlops (на 32 бита в стандарте IEEE 754), а с учетом 2-х модулей ускорения на мезонине XMC – 54 GFlops. Таким образом, производительность крейтовой конструкции на 16 модулей ЦОС составит 864 GFlops.

Концептуальные решения по архитектуре модуля ЦОС отработаны в следующих практических приложениях:

– модуль ЦОС (заводской номер ЮШКР.466535.028) на базе процессора 1892ВМ5Я с дополнительными технологическими интерфейсами RS485 и LPT порта использованы в различных многофункциональных гидроакустических комплексах и гидроакустических системах в интересах ВМФ; – архитектурные решения модуля ЦОС на базе радиационно-стойких процессора (МС24РТ2) и коммутатора обеспечивают возможность реализации в системах ЦОСиУ, устойчивых к факторам космического пространства. Модуль МОС (заводской номер ЮШКР.467444.095) широко внедряется во многие вычислительные комплексы в новых космических аппаратах с бортовой обработкой сигнальной информации.

Разработанные варианты вычислительных систем функционируют под оригинального программного обеспечения. управлением Ведутся работы по портированию операционных систем MC BC и QNX на процессорную платформу «Мультикор». Пользовательское программное обеспечение (ПО) разрабатывается на языке высокого уровня «С». Разработка и отладка ПО проводится на персональном компьютере, на моделях вычислительного комплекса в специализированной среде, где обеспечивается подключение моделей внешней среды в псевдореальном масштабе времени. При необходимости НИИ «Субмикрон» проводит разработку и поставку отладочных комплексов с эмуляторами внешней среды, позволяющих проводить отладку ПО в реальном масштабе времени с динамическим сценарием поведения внешней среды.

Таким образом, предложены отработанные унифицированные концептуальные решения для построения высокопроизводительных систем обработки информации в различных объектах реального времени на отечественной электронной компонентной базе. Предложенные решения обеспечивают гибкое масштабирование вычислительных систем и их последующую модернизируемость.

5.4 Оценка надежности структуры системы цифровой обработки сигналов и формирования изображений на борту КА

Обеспечение требуемой надежности функционирования бортовой аппаратуры космического аппарата (КА) является комплексной многоплановой задачей. На начальном этапе проектирования важную роль играет оценка надежности структуры устройства и заложенных в него схемотехнических решений. В данном разделе проводится сравнительный анализ с точки зрения показателей надёжности типовой структуры бортовой аппаратуры обработки сигналов [10] и изображений и структуры, основанной на сетевой организации вычислительных средств [21А, 22А].

-112 -

Типичную структуру одного канала ЦОС, которая реализуется в современных системах обработки данных, можно свести к последовательному соединению модуля ввода-вывода (MBB) и модуля обработки сигналов (MOC). В целом система ЦОС состоит из *N* параллельно работающих каналов, как показано на рисунке 5.8. Для увеличения надёжности каждый канал резервируется горячим или холодным резервом, который подключается к обработке траекторного сигнала в случае отказа какой-либо цепочки MBB-MOC. Работоспособность системы ЦОС определяется по результатам функционально-диагностического контроля, который проводится как при включении аппаратуры, так и по окончании сеанса съемки. Управление основным и резервным каналом, а также диагностика и переключения выполняются по командам бортового комплекса управления (БКУ). Результаты обработки радиолокационных сигналов и изображений поступают через коммутатор КОМ в радиолинию РЛ.





Отказавшие элементы в условиях космического пространства восстановлению и замене не подлежат, то есть при эксплуатации на борту КА система ЦОС является не Анализ варианта построения аппаратуры ЦОС ремонтируемым изделием. с процессоров был проведен В разделе 3. Здесь коммутаторами рассмотрим широковещательную адресацию данных и кодовое распределение информации. С точки зрения надёжности отказ процессора или МВВ является внезапным, так как приводит к скачкообразному изменению характеристик аппаратуры ЦОС в целом. Следует отметить, что степень деградации качества работы от выхода из строя МВВ и процессора МОС различна, что связано с особенностями обработки траекторного сигнала в режиме ScanSAR [238]. Пусть МОС содержит К процессоров, и, в соответствии с ранее выбранной технологией обработки, каждый процессор МОС ,

осуществляет обработку одной парциальной полосы. Тогда выход из строя одного процессора приводит к потере информации обо всей парциальной полосе в кадре. Последствием отказа MBB является прекращение поступления данных в соответствующий MOC, и соответственное прекращение работы всех K процессоров в его составе. Таким образом, при выходе из строя MBB теряется информация о K парциальных полосах из их общего числа $N \times K$. В дальнейшем для корректности сравнения структур под отказом будем понимать потерю информации хотя бы одного парциального кадра.

Рассмотрим вероятность безотказной работы $P_1(t)$ цепочки «МВВ-МОС». При известных интенсивностях отказа λ_{MBB} и λ_{MOC} для периода нормальной эксплуатации получаем $P_1(t) = \exp\{-(\lambda_{MBB} + \lambda_{MOC})t\}$, а для среднего времени безотказной работы – $T_{CP} = 1/(\lambda_{MBB} + \lambda_{MOC})$.

Поскольку процессоры в МОС выполняют независимые задачи, а выход из строя одного из них приводит к эквивалентному выходу из строя цепочки «MBB-MOC», то с точки зрения надёжности их соединение является последовательным.

Рассматривая в МОС ненадёжными только процессоры, а остальные элементы считая безотказными, получаем

$$\lambda_{MOC} = \sum_{i=1}^{K} \lambda_{\Pi \downarrow OC_i} = K \lambda_{\Pi \downarrow OC} ,$$

где $\lambda_{\Pi \amalg OC}$ – интенсивность отказов одного процессора ЦОС.

Вероятность и среднее время безотказной работы основного блока ЦОС можно оценить по соотношениям

$$P_N(t) = \exp\left\{-\left(\lambda_{MBB} + K \cdot \lambda_{\Pi \downarrow OC}\right)t\right\}, \quad T_{CP}^{(1)} = \frac{1}{N\left(\lambda_{MBB} + K \cdot \lambda_{\Pi \downarrow OC}\right)}.$$

В основном и резервном устройствах используются идентичные блоки MBB и MOC, поэтому любой блок из состава резерва может заменить любой вышедший из строя основной блок. Такое резервирование является скользящим. В общем случае вероятность безотказной работы такой системы можно найти по формуле полной вероятности [214]

$$P_{MN}^{(1)}(t) = \sum_{i=N}^{N+M} \sum_{k=i-N}^{M} \binom{N}{i-k} \binom{M}{k} P_{1}^{i-k}(t) [1-P_{1}(t)]^{N-i+k} [P_{\Pi K}(t)P_{1}(t)]^{k} [1-P_{\Pi K}(t)P_{1}(t)]^{M-k} , (5.1)$$

где $P_{\Pi K}(t)$ – вероятность безотказной работы переключателя, $\binom{M}{k}$ – число сочетаний из M по k.

Рассмотрим характеристики надёжности для частного случая БАОСИ КА «Метеор-3М». В аппаратуре обработки сигналов используется два основных блока «MBB-MOC» и два аналогичных резервных блока. В каждом МОС содержится по 4 процессора ЦОС типа MC-24R2. Таким образом, M = 2, N = 4, K = 4. Пусть переключатель является безотказным устройством и $P_{\Pi K}(t) = 1$. Для этого случая соотношение полной вероятности принимает вид:

 $P_{24}^{(1)}(t) = 1 - [1 - P_1(t)]^3 [1 + 3P_1(t)].$

Рассмотрим теперь характеристики надёжности предлагаемой в [22A] организации БАОСИ, которая в упрощённом виде показана на рисунке 5.9.



исунок 5.9 – у прощенная схема обртовой аппаратуры ЦОС, созданно по сетевой технологии

Сначала рассмотрим случай использования в данной схеме одного модуля вводавывода, который организует логическую шинную архитектуру вычислительного ядра, состоящего из $N_{\Pi P}$ процессоров ЦОС основного блока и $M_{\Pi P}$ резервных ПЦОС. Вероятность безотказной работы основного канала определяется соотношением

$$P_{OK}(t) = P_{\Pi \Pi P}^{N_{\Pi P}}(t) = \exp\{-N_{\Pi P}\lambda_{\Pi I \downarrow OC}t\}.$$

Если резервный канал не используется или отсутствует, то вероятность и среднее время безотказной работы равны

$$P_{BP}(t) = P_{MBB}(t)P_{OK}(t) = \exp\left\{-\left(\lambda_{MBB} + N_{\Pi P}\lambda_{\Pi UOC}\right)t\right\},$$
$$T_{CP}^{(2)} = \frac{1}{\left(\lambda_{MBB} + N_{\Pi P}\lambda_{\Pi UOC}\right)}.$$

Сравним полученные характеристики по среднему времени безотказной работы при условии использования одинакового количества процессоров ($N \cdot K = N_{\Pi P}$) и одинаковых по надёжности MBB. Введём коэффициент $\gamma = T_{CP}^{(2)} / T_{CP}^{(1)}$. Тогда

$$\gamma = \frac{N\lambda_{MBB} + N_{\Pi P}\lambda_{\Pi UOC}}{\lambda_{MBB} + N_{\Pi P}\lambda_{\Pi UOC}} = 1 + \frac{N-1}{1 + N_{\Pi P}\lambda_{\Pi UOC}/\lambda_{MBB}}$$

На рисунке 5.10 представлена зависимость γ от числа цепочек «MBB-MOC» при числе процессоров в МОС равным 4. Кривая 1 соответствует случаю, когда MBB и процессор обладают одинаковой интенсивностью отказов ($\lambda_{MBB} = \lambda_{\Pi \downarrow OC}$); кривая 2 – MBB является менее надёжным устройством по сравнению с ПЦОС ($\lambda_{MBB} = 2 \cdot \lambda_{\Pi \downarrow OC}$).



Рисунок 5.10 – Выигрыш в среднем времени безотказной работы

Графики показывают, что предлагаемая архитектура БАОСИ позволяет увеличить среднее время безотказной работы на 11-30%. Для систем космического базирования такой существенным. прирост T_{CP} является Сравнение графиков 1 и 2 также показывает, что надёжности МВВ во второй структуре необходимо уделять серьёзное внимание, поскольку увеличение интенсивности отказов в 2 раза приводит к увеличению λ_{MBR} среднего времени безотказной работы лишь на 10-12%.

Теперь рассмотрим систему с резервированием. Предлагаемый вариант построения БАОСИ позволяет подключать резервные процессоры к логической общей шине, что приводит к существенному возрастанию надёжности вычислителя. Поскольку вычислительные блоки состоят из одинаковых элементов, и реализуется скользящее резервирование, то для вероятности безотказной работы предлагаемой архитектуры вычислительного ядра БАОСИ можно записать соотношение, аналогичное (1)

$$P_{B\mathcal{A}}^{(2)}(t) = \sum_{i=N_{\Pi P}}^{N_{\Pi P}+M_{\Pi P}} \sum_{k=i-N_{\Pi P}}^{M_{\Pi P}} {N_{\Pi P} \choose i-k} {M_{\Pi P} \choose k} P_{\Pi P}^{i-k}(t) [1 - P_{\Pi P}(t)]^{N_{\Pi P}-i+k} \times [P_{\Pi K}(t)P_{\Pi P}(t)]^{k} [1 - P_{\Pi K}(t)P_{\Pi P}(t)]^{M_{\Pi P}-k}.$$
(5.2)

Переключение процессоров в данной структуре производится программным способом, поэтому можно принять $P_{\Pi K}(t) = 1$. Для этого случая соотношение приобретает более компактный вид

$$P_{B\mathcal{A}}^{(2)}(t) = 1 - \sum_{i=0}^{N_{\Pi P}-1} {\binom{N_{\Pi P}+M_{\Pi P}}{i}} P_{1\Pi P}^{i}(t) [1 - P_{1\Pi P}(t)]^{M_{\Pi P}+N_{\Pi P}-i}$$

Для оценки надёжности аппаратуры ЦОС в целом необходимо учесть надёжность MBB, который также включается последовательно с процессором. Тогда вероятность безотказной работы предлагаемой архитектуры БАОСИ со скользящим резервированием равна

$$P_{MN}^{(2)}(t) = P_{MBB}(t)P_{B\mathcal{A}}^{(2)}(t).$$
(5.3)

В отличие от типовой резервированной структуры (рисунок 5.8) в предлагаемом варианте организации БАОСИ при резервировании вычислительного ядра не требуется дополнительных переключателей. Среднее время безотказной работы вычислителя по схеме рисунка 5.9 в 10...100 раз больше, чем в схеме резервированных цепочек «МВВ-МОС», содержащей такое же количество основных и резервных процессоров. Однако общая надёжность БЦВМ оказалась низкой, поскольку среднее время наработки на отказ, как показал анализ, в 2...100 раз меньше чем у исходной системы (рисунок 5.8). Основной причиной такой низкой надёжности является МВВ, который будучи ключевым элементом БЦВМ остался не резервированным. Это видно из соотношения (3), в котором при $P_{BA}^{(2)}(t) \rightarrow 1$ предел вероятности безотказной работы БЦВМ равен $P_{MN}^{(2)}(t) \rightarrow P_{MBB}(t)$.

Таким образом, повышение надёжности аппаратной части БАОСИ неразрывно связано с увеличением времени безотказной работы модуля ввода-вывода. Реализация MBB в виде специализированной радиационно-стойкой ИМС по аналогичной технологии с ПЦОС позволит довести интенсивность отказов до уровня СБИС процессора. Дальнейшее повышение общей надёжности БАОСИ связано с резервированием MBB. Один из возможных вариантов резервирования MBB представлен на рисунок 5.9, где введены дополнительные резервные MBB.

Поскольку все MBB_{*i*} (i = 1, 2, ..., m) имеют одинаковую структуру, то для резервированной структуры вероятность безотказной работы

$$P_{MBBpe3}(t) = 1 - [1 - P_{MBB}(t)]^m$$

-118 -

Интенсивность отказов резервированной системы МВВ равна

$$\lambda_{MBBpe3} = \frac{mP_{MBB}(t)[1 - P_{MBB}(t)]^{m-1}}{1 - [1 - P_{MBB}(t)]^m} \lambda_{MBB}$$

Проведём сравнение характеристик надёжности двух рассматриваемых структур построения резервированных каналов ЦОС, соответствующих рисункам 5.8 и 5.9 (с резервными MBB), при использовании в обеих схемах одинаковых MBB и ПЦОС. Для простоты в примере также предполагается, что в МОС содержится 4 ПЦОС. Интенсивность отказов MBB при расчётах взята в 2 раза выше, чем интенсивность отказов процессоров $\lambda_{MBB} = 2 \cdot \lambda_{\Pi \downarrow OC}$. Исходные данные и результаты расчётов для двух вариантов схем БЦВМ сведены в таблицу 5.1. В варианте 1 использованы 2 MBB и 8 процессоров ЦОС, в варианте 2 учитывается 16 процессоров ЦОС, а максимальное число MBB достигает 4.

Параметры схемы	Схема ЦВМ (Вариант 1)		Схема ЦВМ (Вариант 2)	
	Рис.5.8	Рис.5.9	Рис.5.8	Рис.5.9
Число основных (резервных) структур MBB-MOC	1(1)	_	2(2)	_
Число основных (резервных) ПЦОС	4(4)	4(4)	8(8)	8(8)
Общее число основных (резервных) МВВ	-	2/1	-	4/3/2
Вероятность безотказной работы	0,99	0,9988 0,9655	0,9963	0,99999 0,99996 0,99880
Выигрыш в среднем времени безотказной работы γ	8,4 / 0,29 2,4·10 ³ / 90 / 3,1		0/3,11	

Таблица 5.1 – Исходные данные и результаты расчёта характеристик надёжности

Полученные данные подтверждают, что использование резервирования вычислительного ядра, то есть процессоров ЦОС, с одним MBB (Вариант 1) не приводит к существенному повышению надёжности. Вероятность безотказной работы с 0,9 повышается до 0,9655, но при этом наблюдается проигрыш однократно резервированной структуре БАОСИ по схеме «MBB-MOC» – среднее время безотказной работы в 3,4 раза меньше ($\gamma = 0,29$). Однократное резервирование MBB даёт положительный эффект и позволяет увеличить вероятность безотказной работы до уровня 0,9988, а среднее время безотказной работы – в 8,4 раза.

Ещё более ощутимый эффект достигается при увеличении структур MBB-MOC, то есть при наращивании вычислительной мощности БЦВМ. При использовании двух основных и двух резервных MBB-MOC (Вариант 2) достигается вероятность безотказной работы 0,9963. При том же количестве MBB и ПЦОС логическая шинная организация аппаратуры ЦОС даёт увеличение среднего времени безотказной работы в 2,4 тысячи раз. Такое резервирование MBB может оказаться избыточным, поэтому число MBB можно сократить. В таблице 5.1 представлены результаты расчёты для случая использования 3-х и 2-х MBB вместо 4-х. Расчётные данные свидетельствуют о том, что надёжность будет снижаться, однако в любом случае она остаётся выше, чем у соответствующей резервированной структуры аппаратуры ЦОС по схеме MBB-MOC. По оценке среднего времени безотказной работы выигрыш составляет 90 и 3,1 раза соответственно.

Отсюда следует, что построение аппаратуры ЦОС в виде распределённой вычислительной сети с реализацией контура управления на технологии SpaceWire позволит не только унифицировать интерфейсы, тем самым приводя в основном к конструктивным улучшениям, но и значительно повысить надёжность устройства, а также существенно расширить возможности БАОСИ с точки зрения всех иных определённых выше принципов.

Опыт практического применения предлагаемых решений для построения модуля МОС и коммутационной среды показывает, что выбранные решения хорошо адаптируются к возможностям реализации в ЭКБ, устойчивой к факторам космического пространства. В соответствии с разработанной структурой был изготовлен прототип МОС на базе радиационно-стойкого процессора 1892ВМ8Я и коммутатора LINK. Все исследования, связанные с измерением реальных значений производительности при выполнении задач ЦОС и пропускной способности интерфейсов, были выполнены на этом прототипе.

Таким образом, предложенные унифицированные решения для построения бортовой вычислительной среды КА [22А] позволяют заметно повысить характеристики надежности бортовой аппаратуры ЦОС. Как показали полученные оценки, сетевая организация структуры вычислительного комплекса может быть оптимизирована за счет регулирования состава основных и резервных блоков. При этом возможность реконфигурирования вычислительных средств размывает границы между основными и

- 119 -

резервными процессорами ЦОС, поскольку один и тот же ПЦОС может быть резервным или основным в зависимости от вычислительной загрузки, определяемой характером решаемой задачи по обработке сигналов.

5.5 Выводы по главе 5

1. Разработаны концепции построения многофункциональных бортовых вычислительных систем ЦОС и комплексов управления космическими аппаратами с длительными сроками активного существования и определены основные направления унификации проектов их реализации, которые обеспечивают сокращение сроков и Концепция разработки аппаратуры многофункциональных стоимости проектов. бортовых вычислительных систем предполагает модульность построения, унификацию всех компонент, модернизируемость в процессе эксплуатации, масштабируемость для увеличения производительности, многофункциональность, конфигурируемость под разные технические задачи. Концепция разработки архитектуры многофункциональных бортовых вычислительных систем и комплексов управления включает в себя создание резервированных вычислительных модулей, высоконадежной бортовой сети и коммутационной среды, через которую осуществляется обмен потоками команд и данных на борту КА.

2. Проведено исследование проблемы коммутации информационных потоков на борту КА. Рассмотрены существующие виды межсоединений бортовой аппаратуры и существующие современные варианты их реализации. Показана необходимость разработки отраслевого стандарта на перспективный универсальный интерфейс. С учётом решаемых задач сформулированы требования к перспективному Проведён универсальному интерфейсу. анализ существующих протоколов высокоскоростной передачи данных, на его основании в качестве перспективного универсального интерфейса был выбран комплект будущих отраслевых стандартов SpaceWire/SpaceFibre.

3. Разработаны принципы и методы построения унифицированных систем обработки сигнальной информации и управления для стратегически важных объектов реального времени на отечественной электронной компонентной базе, обеспечивающие гибкое масштабирование вычислительных систем и их возможность последующей модернизации. С использованием предложенных методов разработаны структурные

схемы резервированных систем обработки сигнальной информации и управления, которые реализованы в действующих космических аппаратах.

4. Показано, что построение БАОСИ в виде распределённой вычислительной сети позволяет значительно повысить показатели надёжности. При использовании предлагаемой структуры с дополнительным резервированием 2-х или 3-х МВВ время безотказной работы увеличивается в 3,1 и 90 раз соответственно по сравнению с традиционной схемой резервирования цепочек «МВВ-МОС» БАОСИ.

5. В соответствии с предложенными научными подходами разработан с участием автора первый отечественный SpaceWire-комплект микросхем «Мультиборт» для аэрокосмических применений, соответствующий уровню лучших зарубежных реализаций в данном направлении и превосходящий их по ряду параметров.

6. Внедрение разработанного эффективного унифицированного БВКУ в различные изделия с перспективой до 2020 г. в значительной степени удовлетворит текущие потребности страны в комплектации группировки высоконадежных КА, обеспечивающих национальную безопасность России.

Материал главы опубликован в работах [4А, 10А, 11А, 20А-22А, 25А-30А].

Заключение

1. Проведен анализ вариантов использования целевой нагрузки КА с бортовой обработкой. Рассмотрены особенности алгоритмов и перспективы цифрового формирования и обработки радиофизических и оптических изображений. Показано, что должны обеспечиваться: реальная производительность аппаратуры – не менее 10¹² операций/с; пропускная способность интерфейсных устройств – до 10 Гбит/с при формировании радиофизических изображений и до 60 Гбит/с при получении оптических снимков; объем памяти для хранения данных съемки – 0,9...3,7 Тбайт.

2. Для решения информационно-измерительных задач (телеметрия, формирование и ввод информации бортовым потребителям) вычислительный комплекс управления должен обеспечивать скорость потока при обмене данными не менее 20 Гбит/с, а в моменты пиковой нагрузки – до 30 Гбит/с.

3. Для широкого класса прикладных задач ЦОС разработаны высокоэффективные вычислительные алгоритмы вычисления амплитуды комплексного радиосигнала, деления чисел, воспроизведения функциональных зависимостей с погрешностью 20%...0,001%. Разработан метод компенсации для уменьшения ошибок расчетов. Для систем обнаружения радиосигналов со случайной начальной фазой для вычисления амплитуды комплексного радиосигнала достаточно иметь погрешность алгоритма 10..12%, при этом в широком диапазоне вероятностей ложной тревоги потери в пороговом отношении сигнал-шум не превышают 0,1...0,2 дБ.

4. Проведен анализ радиационно-стимулированных эффектов в КМОП СБИС (с субмикронными топологическими нормами), обоснована необходимая и достаточная номенклатура показателей надежности с уточненными методиками их оценки; рассмотрены ограничения аппаратной защиты от сбоев и возможности программной

защиты, определяемые архитектурой резервирования и условиями работы в реальном времени.

Использование рассмотренных уточнений и ограничений применения нормативных требований при расчётной поэлементной и экспериментальной оценках стойкости блоков по ДЭ позволит:

• повысить достоверность оценки и избежать наиболее опасных последствий в виде преждевременных отказов блоков ЦПС при штатной эксплуатации на орбите изза пропуска нестойких ЭРИ;

• обоснованно подтвердить в ряде случаев допустимость применения при указанном диапазоне локальных доз ЭРИ индустриального уровня стойкости из реально доступной номенклатуры ограниченной стоимости;

• исключить ложные заключения по признанию стойких ЭРИ нестойкими;

• гарантированно обосновать необходимость замены ЭРИ на более стойкие исполнения в случае невозможности обеспечения стойкости с помощью локальной защиты;

• определить целесообразность проведения испытаний блоков с использованием гамма- и нейтронного излучений с учетом возможности получения достоверных результатов.

Для повышения достоверности оценок предложено проведение дополнительных испытаний «критичных» ЭРИ по стойкости к дозовым и тиристорным эффектам и эффектам случайных сбоев.

5. Разработаны предложения по введению единых сертифицированных требований по стойкости, надежности и обеспечению качества к отечественной и импортной элементной базе, которые обеспечивают дальнейшее развитие отечественной радиационно стойкой микроэлектроники для комплектации стратегически значимых систем двойного назначения, являющихся основой национальной безопасности государства.

6. Разработаны высоконадежные архитектуры и структурные схемы бортовых высокопроизводительных бортовых систем обработки сигналов и управления КА. Запатентованы высоконадежная вычислительная управляющая система и мажоритарное устройство (патенты РФ № 2387000, 2395161), коммутатор каналов (№ 2405196). Обеспечены возможности мажорирования двунаправленных сигналов и введение

диагностики с управлением. Технический результат достигается за счет введения в управляющую систему мультиплексного канала обмена, обеспечивающего обмен информацией с внешними устройствами по дублированной линии передачи информации.

7. Разработан метод взаимного информационного согласования в многокластерных вычислительных системах с межмашинными каналами связи шинной архитектуры и широковещательным способом передачи сообщений, обеспечивающий обнаружение и идентификацию как по месту возникновения (процессорное ядро, ОЗУ, ПЗУ, информационного синхронный мультиплексный канал обмена, передающее/ принимающее устройство), так и по виду (сбой, программный сбой или отказ) проявления кратных неисправностей МОС и передающих устройств сопряжения с каналами связи, случившиеся BO всех раундах взаимообмена. Раздельно диагностируются, во-первых, неисправности МОС и неисправности передающих устройств сопряжения, и, во-вторых, ситуация невыдачи сообщения в начальных раундах и ситуация выдачи этого сообщения с искажениями.

8 Разработан метод распределенного системного диагностировании неисправностей наиболее общего вида, который позволяет необслуживаемой системе обнаруживать и идентифицировать проявления неисправностей. Для уменьшения вероятности появления ситуаций, когда количество известных и неизвестных неисправных МОС превышает допустимую кратность, предусмотрена реконфигурация системы, состоящая в изоляции известных неисправных МОС, включении в совместную работу запасных МОС, а при их отсутствии – в возможном переходе системы к условию допустимости неисправностей меньшей кратности. Предложена модель многопроцессорной вычислительной системы, обеспечивающая идентификацию враждебных неисправностей с точностью до передающего или принимающего устройства в части ЦВМ, участвующей в обмене по дуплексному каналу. Обеспечено информации с повышение достоверности выходной удлинением траектории управляемой деградации и увеличением сроков активного существования космических аппаратов.

9. Разработаны принципы и методы построения унифицированных систем обработки информации в КА различного назначения, обеспечивающие гибкое масштабирование систем ЦОС и возможность их последующей модернизации при

-124 -

увеличении времени безотказной работы в 3...90 раз. С участием автора создан первый отечественный SpaceWire-комплект микросхем «Мультиборт» для аэрокосмических применений, соответствующий уровню лучших зарубежных реализаций в данном направлении и превосходящий их по ряду параметров. На основе перспективной электронно-компонентной базы разработаны методы построения унифицированных систем обработки информации в различных объектах, обеспечивающие гибкое масштабирование вычислительных систем, модульное построение, реконфигурирование и их последующую модернизируемость.

Таким образом, в работе решена важная научная проблема, имеющая большое значение для обороноспособности страны и народного хозяйства в области разработки принципов и методов создания высоконадежных вычислительных систем ЦОС и управляющих комплексов космических аппаратов. Внедрение разработанной высокоэффективной унифицированной аппаратуры ЦОС в различные изделия с перспективой до 2020 г. в значительной степени удовлетворит текущие потребности страны в комплектации группировки высоконадёжных КА, обеспечивающих национальную безопасность России.

Список сокращений

АД	Астродатчик
АК	Абонентский последовательный канал информационного обмена
АМК	Адаптер мультиплексного канала
ACH	Аппаратура спутниковой навигации
АШП	Аналого-цифровой преобразователь
1	
БА	Бортовая аппаратура
БВКУ	Бортовой вычислительный комплекс управления
БК	Бортовой компьютер
БКСОИ	Бортовой компьютер сигнальной обработки изображений
БМВС	Бортовая многомашинная вычислительная система
БМК	Базовый матричный кристалл
БОЗУ	Буферное оперативное запоминающее устройство
БП	Биполярное исполнение
БСО	Блок сигнальной обработки
БТ	Биполярные транзисторы
	r t t t t t
ВИС	Взаимное информационное согласование
BO	Вероятность отказов
BT	Встроенные тесты
ВЭО	Высокоэллиптическая орбита
ВЭП	Высокоэнергетические протоны
ГБК	Гибкое скользящее резервирование
ГКЛ	Галактические космические лучи
ГСО	Геостационарная орбита
ГСП	Глобальный синдром проверки
ДЛ З	Дополнительная локальная защита
ДУ	Датчики углов
ДЭ	Дозовый эффект
. ,	··· **
ИМС	Интегральная микросхема
ИП	Иностранное производство
ЮЭ	Эффект поверхностной ионизации

КА	Космический аппарат
КИС	Бортовая командно-измерительная система
КнИ	Кремний на изоляторе
КнС	Кремний на сапфире
КО	Канал обмена
КП	Космическое пространство
КПЗ	Контроллер памяти с защитой
КЧ	Критерий чувствительности
ЛБК	Локальный бортовой компьютер
ЛВР	Локальные радиационные воздействия
ЛК	Локальный контроллер
ЛКА	Локальный контроллер абонента
ЛКИ	Лётно-конструкторские испытания
ЛС	Локальные средства
ЛСП	Локальный синдром проверки
МБК	Мажоритарный бортовой компьютер
MBC	Многомашинная (многопроцессорная) вычислительная система
МК	Мультиплексный канал
МКА	Космический аппарат с малой массой
МКО	Мультиплексный канал обмена
MMC	Магистраль межмашинного согласования
MOC	Модуль обработки сигналов
МЭ	Можоритарный элемент
НИ	Низкая интенсивность
НИИ	Низкая эксплуатационная интенсивность излучения
НКО	Низколежащая круговая орбита
НКУ	Наземный комплекс управления
HP	Нагруженный режим
ОГ	Орбитальная группировка
ОЗУ	Оперативное запоминающее устройство
OHA	Ориентация остронаправленной антенны
ОП	Отечественное производство
ОУ	Операционные усилители
ПЗУ	Программное запоминающее устройство
ПК	Периферийный контроллер
ПКом	Периферийный компьютер
ПКГ	Параметрические и функциональные критерии годности
ПЛИС	Программируемая логическая интегральная схема
ПМ ЦОС	Процессорный модуль цифровой обработки сигналов
ПМЧ	Модель Препарата, Метца и Чена
ПНД	Предельная накопленная доза
TTTO	

ПНС Пропуск нестойких ЭРИ

ПО	Программное обеспечение
ШІЗУ	Перепрограммируемое запоминающее устройство
	Принудительное переключение резерва
IICH	Признание стойких ЭРИ нестойкими
ПЦОС	Процессор цифровой обработки сигналов
ПЯ	Процессорная ячейка
РК	Рабочая конфигурация
РПЗ	Радиационное поле Земли
РСД	Распределенное системное диагностирование
РФИ	Радиофизическое изображение
CAC	Срок активного существования
СБИС	Сверхбольшая интегральная микросхема
СК	Системный контроллер
СКЛ	Солнечные космические лучи
СЛСП	Согласованный локальный синдром проверки
СМ	Соотношение высокой и низкой испытательных мощностей
СнК	Система на кристалле
СОИ	Система обработки сигнальной информации
СОП	Средства сопряжения
СР	Сеансовый режим
ССД	Системное самодиагностирование
ССИ	Система сбора информации
СΦ	Статические и линамические фазы работы
CЭ	Структурный эффект
ТЗЧ	Тяжелые заряженные частицы
ТО	Тиристорный отказ
TЭ	Тиристорный эффект
УС	Устройство сопряжения
ΦΠΟ	Функциональное программное обеспечение
ЦБК	Центральный бортовой компьютер
ЦОС	Цифровая обработка сигналов
ЦОСиУ	Цифровая обработка сигналов и управление
ЦСА	Целевая и служебная аппаратура
ЭДК	Элементарное контролируемое действие
ЭКБ	Электронная компонентная база
ЭРИ	Электро- и радио изделия
ЭРИ ИП	Электро- и радио изделия иностранного производства
ЭРИ ОП	Электро- и радио изделия отечественного производства

Список литературы

- 1. Стратегии развития космической деятельности России до 2030 года и на дальнейшую перспективу.— М.: Роскосмос, 2012. 54 с.
- 2. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. М.: Федеральное космическое агентство, 2006. 72 с.
- 3. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С.Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
- 4. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы зондирования Земли. Учебное пособие для ВУЗов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
- 5. Баскаков А.И. Локационные методы исследования объектов и сред / А.И. Баскаков, Т.С. Жутяева, Ю.И. Лукашенко; под ред. А.И. Баскакова. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 384 с.
- 6. *Камнев Е.Ф., Аболиц А.И., Акимов А.А.* и др. Системы спутниковой связи с эллиптическими орбитами, разнесением ветвей и адаптивной обработкой. М.: Глобстатком, 2009. 724 с.
- 7. *Козлов Д.И., Аншаков Г.П., Агарков В.Ф.* и др. Конструирование автоматических космических аппаратов. / Под ред. Козлова Д.И. М.: Машиностроение, 1996. 448 с.
- 8. *Микрин Е.А.* Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 336 с.; *Микрин Е.А.* Бортовые комплексы управления космических аппаратов: учебное пособие. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 246 с.
- 9. *Щагин А.В., Дьяков Ю.Н.* Особенности проектирования систем сбора и преобразования информации бортовых вычислительных систем // Микроэлектроника и информатика / Тезисы второй международной научно-технической конференции. М.: 1995.
- 10. Гобчанский О. Проблемы создания бортовых вычислительных комплексов малых космических аппаратов // Современные технологии автоматизации. 2001. №4. С.28-34.
- 11. Кириллин А.Н., Аншаков Г.П., Ахметов Р.Н., Сторож А.Д. Космическое приборостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» / Под ред. А.Н.Кириллина. Самара: Издательский дом «АГНИ», 2011. 280 с.
- 12. *Косткин М., Поздняков П., Попович А*. Концепция информационно-управляющей системы космического аппарата // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2008. №4. С.86-90.
- 13. *Мамаева Т.* Maxwell: Электронные компоненты для аэрокосмической промышленности // Компоненты и технологии. 2011. №5. С.120-121.
- 14. Гобчанский О., Попов В., Николаев Ю. Повышение радиационной стойкости индустриальных средств автоматики в составе бортовой аппаратуры // Современные

технологии автоматизации. – 2001. №4. С.36-40.

- 15. Стешенко А. Проблемы обеспечения аппаратуры ракетно-космической техники качественной и надежной ЭКБ // ЕХРО ELEKTRONICA. М.: 2010. С.10-11.
- 16. Урличич Ю. Обеспечение аппаратуры ракетно-космической техники электронной компонентной базой / Ю.Урличич, В.Субботин, В.Стешенко // Аэрокосмический курьер. 2011. № 5(77); Т-Сотт Телекоммуникации и Транспорт. 2011. № 6. С.10-13.
- 17. *Эйкхофф Й*. Бортовые компьютеры, программное обеспечение и полетные операции. Введение. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. 336 с.
- 18. *Карпов О.А., Толстов Е.Ф.* Виды обзора земной поверхности в РСА авиационного и космического базирования // Радиотехника. 2009. №3. С.46–51.
- 19. Стратилатов Н.Р., Крошин В.М., Нечаев А.А. Возможный облик, характеристики и эффективность перспективного КА ДЗЗ с высокодетальным, мультиспектральным и ИК-каналом наблюдения // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы IX научно-технической конференции М.:МНТОРЭС им. А.С.Попова, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС» НПП «ОПТЕКС», 2012. С.79–82.
- Любченко Ф.Н., Карелин А.В. Стратегия развития космического сегмента дистанционного зондирования Земли в России // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы IX научно-технической конференции – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС» - НПП «ОПТЕКС», 2012. С.89–95.
- 21. *Манаев* Э.Ф. Дистанционное зондирование Земли серией космических аппаратов «Ресурс-П». Перспективы проекта // Science Time. 2015. № 4 (16). С.466-471.
- 22. Шейнин Ю.Е., Солохина Т.В., Петричкович Я.Я. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределенных комплексов. Часть 1 // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2006. №5. С.64-75.
- 23. Солохина Т.В., Петричкович Я.Я., Шейнин Ю.Е. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределенных комплексов. Часть 2 // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. №1. С.38-49.
- 24. ECSS-E-50-12A. SpaceWire Links, nodes, routers and networks. European Cooperation for Space Standartization (ECSS), 2003.
- 25. *Kuhl J.G., Reddy S.M.* Fault-tolerance considerations in large, multiple-processors systems // Computer. 1986. V.19. N3, P.56-67.
- 26. Генинсон Б.А., Панкова Л.А., Трахтенгерц Э.А. Отказоустойчивые методы обеспечения взаимной информационной согласованности в распределенных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 1989. № 10. С.5-25.
- 27. *Авиженис А.* Отказоустойчивость свойство, обеспечивающее постоянную работоспособность цифровых систем // ТИИЭР. 1978. Т.66. №10. С.5-25.
- 28. *Rennels D.* Fault-tolerant computing concepts and examples // IEEE Tr. Comput. 1984. V. C-33. N12. P.1116-1129.
- 29. Карибский В.В., Пархоменко П.П., Согомонян Е.С., Халчев В.Ф. Основы технической диагностики. Кн.1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза. М.: Энергия, 1976. 464 с.
- 30. *Barborak M., Malek M.* The consensus problem in fault-tolerant computing. // ACM Computing Surveys. 1993. V. 25. № 2, P. 171-220.

- 31. Schlichting R., Schneider F. Fail-stop processors: An approach to designing fault-tolerant computing systems. // ACM Trans. Comp. Sys. 1983. V. 1. № 3 (Aug.). P. 222-238.
- 32. *Cristian F. et al.* Atomic broadcast: from simple message diffusion to Byzantine agreement. // IBM Tech. Rep. RJ 5244 (54244). 1986.
- 33. *Laranjera L. et al.* On tolerating faults in naturally redundant algorithms. // In 10th Symposium on reliable distributed systems (Piza, Italy, Sept.). IEEE Computer Society, Los Alamitos, Calif. 1991. P. 118-127.
- 34. *Lamport L., Shostak R., Pease M.* The byzantine generals problem // ACM Trans. Programming Languages Systems. 1982. V.4. N3. P.382-401.
- 35. *Lala J.H. et al.* A fault-tolerant processor architecture to meet rigorous failure requirements. // Proc. Seventh AIAA-IEEE Digital Avionics Systems Conf., IEEE Press, Pircataway, N.J., CSDL-P-2705, Oct.1986, P.555-562.
- 36. *Vasanthavada N., Marinos P.N.* Synchronization of fault-tolerant clocks in the presence of malicious failures // IEEE Trans. on Comput. 1988. V.37. No.4. Pp.440-448.
- 37. *Мамедли Э.М., Самедов Р.Я., Соболев Н.А.* Метод локализации "дружественных" и "враждебных" неисправностей // Автоматика и телемеханика. 1992. №5. С.126-138.
- 38. *Авиженис А., Лапри Ж.-К.* Гарантоспособные вычисления: от идей до реализации // ТИИЭР. 1986. Т.74. №5. С.8-21.
- 39. *Мамедли Э.М., Соболев Н.А.* Концепция обеспечения отказоустойчивости системы управления и безопасности экипажа МТКК (Часть 1) // Зарубежная радиоэлектроника. 1986. №8. С.3-38.
- 40. Каган Б.М., Мкртумян И.Б. Основы эксплуатации ЭВМ. М.: Энергоатомиздат. 1988.
- 41. Каравай М.Ф., Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Структурная организация отказоустойчивых многопроцессорных вычислительных систем. // В кн.: Принципы обеспечения отказоустойчивости многопроцессорных вычислительных систем. М., Институт проблем управления. 1987. С. 8-18.
- 42. *Lala J.H., Harper R.E., Alger L.S.* A design approach for ultrareliable realime systems // Computer. May 1991. P.12-22.
- 43. Лобанов А.В. Обнаружение и идентификация неисправностей в распределенных управляющих вычислительных системах с программно-управляемой сбое- и отказоустойчивостью // Автоматика и телемеханика. 1998. № 1. С.155-164.
- 44. Лобанов А.В. Организация сбое- и отказоустойчивых вычислений в многомашинных вычислительных системах. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. 1999.
- 45. *Rennels D.A.* Recovery in fault-tolerant distributed microcontrollers. // Proceedings of the 2001 International Conf. on Dependable Systems and Networks. Pp. 475-480.
- 46. Пархоменко П.П. О классификации понятий в области избыточности. // В кн.: Принципы обеспечения отказоустойчивости многопроцессорных вычислительных систем. М.: Институт проблем управления, 1987. С.5-7.
- 47. *Максимов В.И.* Интеграция видов избыточности в отказоустойчивых системах управления. // В кн.: Принципы обеспечения отказоустойчивости многопроцессорных вычислительных систем. М.: Институт проблем управления. 1987. С.74-80.
- 48. *Мамедли Э.М., Соболев Н.А.* Механизмы операционных систем, обеспечивающие отказоустойчивость в управляющих многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 1995. №8. С.3-63.

- 49. *Kieckhafer R.M., Walter C.J., Finn A.M., Thambidural P.M.* The MAFT architecture for distributed fault tolerance // IEEE Trans. Comput. 1988. V.37. N 4. P.398-405.
- 50. Cristian F., Aghilu H., Strong R. Clock synchronization in the presence of omission and performance faults, and processor joins. // Proc. FTCS-16, Vienna, Austria, July 1986, Pp.218-233.
- 51. Dolev D., Lyncha A., Pinter S.S. et. al. Reaching approximate agreement in the presence of faults. // Proc. Third Symp. Reliability Distrib. Software Database Syst., Oct. 1983, Pp.145-154.
- 52. *Lamport L*. Time, clocks and the ordering of events in a distributed system // Commun. ACM. July 1978. V.21. Pp.558-565.
- 53. Lamport L., Melliar Smith P.M. Synchronizing clocks in the presence of faults // J.ACM, Jan.1985. V.32. Pp.52-78.
- 54. *Lundelius J., Lynch N.* A new fault-tolerant algorithm for clock synchronizing. // Proc. Third ACM SIGACT-SIGOPS Symp. Princip. Distribut. Comput., Vancouver, Canada, Aug. 1984. Pp.75-88.
- 55. *Machaney S.R., Schneider F.B.* Inexact agreement: Accuracy, precision and graceful degradation // Proc. Fourth ACM SIGACT-SIGOPS Simp. Princip. Distribut. Comput. Minaki, Ont., Canada, Aug. 1985. Pp.237-249.
- 56. *Schneider F.B.* A paradigm for reliable clock synchronization. // Proc. Advanced Seminar Real Time Local Area Network. Apr.1986. Pp.85-104.
- 57. *Kopetz H., Ochsenreiter W.* Clock synchronization in distributed real-time systems // IEEE Tr. Comp. 1987. V.C-36. N8. Pp.933-939.
- 58. *Krishna C.M., Shin K.G., Butler R.W.* Ensuring fault tolerance of phase-loced clocks // IEEE Trans. Comp. Aug. 1985. Vol.C-34. Pp.752-756.
- 59. *Kessels J.L.W.* Two designs of a fault-tolerant clocking system // IEEE Trans. Comput. Oct.1984. Vol. C-33.
- 60. *Krishna C.M., Shing K.G., Butler R.W.* Synchronization and fault- masking in redundant real time systems // Dig.Papers, FTCS-14, 1984. Pp.152-157.
- 61. Smith T.B. Fault-tolerant clocking system. // Dig. Papers. FTCS-11.1981. Pp.262-264.
- 62. *Vasanthavada N., Marinos P.N., Mersten G.S.* Design and performance evaluation of mutually synchronized fault-tolerant clock systems // Dig. 16th Int. Symp. Fault-Tolerant Comput., July 1986. Pp.206-211.
- 63. Vasanthavada N., Marinos P.N., Mersten G.S. A study of fault-tolerant clock systems in the presence of malicious multiple-module faults. // Dig. Int. Conf. Comput. Design. Oct. 1986. Pp.516-521.
- 64. *Arvind K.* A new probabilistic algorithm for clock synchronization. // Proc. Real-Time Syst.Symp. 1989. Pp.330-339.
- 65. Cristian F. Probabilistic clock synchronization // Distrib. Computing. 1989. V.3. Pp.146-155.
- 66. *Halpern J.Y., Simens B., Strong R., Dolev D.* Fault-tolerant clock synchronization. // Proc. 3rd Symp. Princip. Distrib. Comp. 1984. Pp.89-102.
- 67. *Lundelius-Welch J., Lynch N.* A new fault-tolerant algorithm for clock synchronization // Inform. Computation. 1988. V.77. Pp.1-36.
- 68. *Rangarajan S., Tripathi S.K.* Efficient synchronization of clocks in a distributed systems. // Proc. Real-Time Syst. Symp. 1991. Pp.22-31.
- 69. Srikanth T.K., Toueg S. Optimal clock synchronization // J.ACM. Apr. 1988. V.37. Pp.440-448.

- 70. *Olson A., Shin K.G.* Fault-tolerant clock synchronization in large multicomputer systems // IEEE Trans. on parall. and distrib. systems. 1994. V.5 No.9. Pp.912-922.
- 71. Dolev D., Halpern J., Strong R. On the possibility and impossibility of achieving clock synchronization // J.Computer System Sci. Apr.1986, V.22(2). Pp.230-250.
- 72. Мамедли Э.М., Кузьмишкин С.С. Использование избыточности для повышения надежности электронного оборудования орбитальной ступени космического самолета // Новая транспортная космическая система США (обзор). Часть 1. – М.: Институт проблем управления, 1978. – С.5-143.
- 73. Лобанов А.В. Протокол отказоустойчивого обмена // Приборы и системы управления. 1993. № 7. С.8-11.
- 74. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики: оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства. М.: Энергия, 1981.
- 75. *Preparata F.P., Metze G., Chien R.T.* On the connection assignment problem of diagnosable systems // IEEE Trans. on Electron. Comput. 1976. V. EC-16. Pp.848-854.
- Fridman A.D., Simoncini L. System-level fault diagnosis // Computer. 1980. V. 13. N 3. Pp.47-53.
- 77. Kreutzer S.E., Hakimi S.L. System-level fault diagnosis: a survey // Microprocessing and microprogramming. 1987. V. 20. No. 4,5. Pp. 323-331.
- 78. *Микеладзе М.А.* Развитие основных моделей самодиагностирования сложных технических систем // Автоматика и телемеханика. 1995. №5. С.3-18.
- 79. Лобанов А.В., Нахаев С.А. Принципы построения постоянного тестового программного обеспечения микрокомпьютерной системы // В сб. "Электронная техника". Сер.3. Вып.3. 1986.
- Лобанов А.В., Нахаев С.А. Тестовое программное обеспечение трехмашинной отказоустойчивой вычислительной системы // Сб. "Вопросы технической диагностики". Ростов Н/Д: РИСИ, 1986. С.98-102.
- 81. Лобанов А.В., Нахаев С.А. Резидентное тестовое обеспечение программируемого модуля обмена // Сб. "Ракетная и космическая техника". Сер. 12. Вып.2. 1989.
- 82. *Arabjan A.M., Naumann E.A., Swihart D.E.* AFTI/F-16 digital flight control computer design // Proc. NAECON-83. Dayton, 1983. Pp.1426-1432.
- 83. *Lala J.H.* Fault detection, isolation and reconfiguration in FTMP: methods and experimental results // Proc.5th Digital Avionics Systems Conf., 1983, Pp.21.3.1-21.3.9.
- 84. *Pradhan D.K., Hanquan Z., Schlumberger M.L.* Fault-tolerant multibus architecture for multiprocessors // Proc. FTCS-14, 1984. Pp.400-408.
- 85. Уэнсли Дж.Х., Лэмпорт Л., Голдберг Дж. и др. SIFT: Проектирование и анализ отказоустойчивой вычислительной системы для управления полетом летательного аппарата // ТИИЭР. 1978. Е.66. №10. С.166-185.
- 86. *Weinstok C.B., Green M.W.* Reconfiguration strategies for the SIFT fault-tolerant computer // Proc. CJMPSAC-78, 1978. Pp.645-650.
- 87. *Hitt E.F., Eldredge D.* Fault detection, isolation and recovery techniques for fault tolerant digital avionics // Proc. 5th Digital Avionics Systems Conf., 1983. Pp.16.1.1-16.1.8.
- 88. *Alger L.S., Lala J.H.* A real time operating system for a nuclear plant computer // Proc. Real Time Systems Symp., 1986. Pp.144-248.

- 89. *Lala J.H.* A byzantine resilient fault-tolerant computer for nuclear plant applications // Proc. FTCS-16, 1986. Pp.338-343.
- 90. Лобанов А.В. Распределенное мажорирование информации с идентификацией неисправностей // Сб. "Электронная техника". Сер.3. Микроэлектроника. М.: ЦНИИ "Электроника", 1996.- Вып.1. 1996. С.57-59.
- 91. Лобанов А.В. Распределенное мажорирование информации с обнаружением и идентификацией неисправностей // Автоматика и телемеханика. 1997. № 1. С.145-149.
- Лобанов А.В. Проблемы распределенного мажорирования информации // «Международная академия информатизации. Труды. Отделение микроэлектроники и информатики». Вып. 2. 1997. М.: Зеленоград, С.137-146.
- 93. Лобанов А.В. Метод распределенного мажорирования информации с обнаружением и идентификацией проявлений неисправностей // Зарубежная радиоэлектроника. 1997. № 6. С.32-39.
- 94. Лобанов А.В. Распределенное мажорирование информации с обнаружением и идентификацией неисправностей в системах с радиальными межмашинными каналами связи // Электронная техника. Сер.3, Микроэлектроника. - М.: ЦНИИ "Электроника", 1999. Вып. 1 (153). С. 56-58.
- 95. Лобанов А.В. Организация сбое- и отказоустойчивой работы двухкомплексной многомашинной вычислительной системы // Автоматика и телемеханика. 1998. №2. С. 160-169.
- 96. Лобанов А.В. Динамическое распределение ЦВМ в многокомплексных вычислительных системах с программно-управляемой сбое- и отказоустойчивостью // Электронная техника. Сер.3, Микроэлектроника. М.: ЦНИИ "Электроника", 1998 Вып. 1.
- 97. Генинсон Б.А., Панкова Л.А., Трантенгерц Э.А. Отказоустойчивые методы обеспечения взаимной информационной согласованности в распределенных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 1989. №5. С.3-18.
- 98. *Pease M., Shostak R., Lamport L.* Reaching agreement in the presence of faults // J.ACM. 1980. V.27. N2. Pp.228-237.
- 99. *Poage J.F.* Derivation of optimum tests to detect faults in combinational circuits // Symposium on Mathematical Theory of Automata, Polytechnic Institute of Brooklyn, April 24, 25, 26, 1962.
- Roth J.P., Bouricius W.G., Schneider P.R. Programmed algorithms to compute tests to detect and distinguish between failures in logic circuits // IEEE Trans. on Electron. Comp. 1967. V. EC16. N 5. Pp.567-580.
- 101. *Ермилов В.А.* Метод отбора существенных неисправностей для диагностики цифровых схем. Общие выражения для неисправностей, возможных при эксперименте // Автоматика и телемеханика. 1971. № 1. С.159-167.
- 102. *Ермилов В.А.* Метод отбора существенных неисправностей для диагностики цифровых схем. Выражения для одиночных кратковременных неисправностей, возможных при эксперименте // Автоматика и телемеханика. 1971. № 3. С.107-113.
- 103. *Пархоменко П.П.* Диагноз технического состояния дискретных устройств методом выделения подозреваемых неисправностей. Комбинационные устройства. Устойчивые неисправности // Автоматика и телемеханика. 1971. № 6. С.126-137.
- 104. Гольдман Р.С., Чипулис В.П. О диагностике неисправностей комбинационных схем // Автоматика и телемеханика. 1971. № 3. С.114-119.

- 105. *Лобанов А.В.* Константные неисправности и кратные состязания в комбинационных схемах // Автоматика и телемеханика. 1974. № 2. С.134-143.
- 106. Лобанов А.В. Динамические состязания и константные неисправности в комбинационных схемах // Автоматика и телемеханика. 1976. № 6. С.141-146.
- 107. Лобанов А.В. Условия неопределенности и определенности в асинхронных устройствах с независимыми обратными связями // Автоматика и телемеханика. 1975. № 9. С.170-179.
- 108. Лобанов А.В. Условия неопределенности и определенности в асинхронных устройствах // Автоматика и телемеханика. 1975. № 10. С.135-143.
- 109. *Лобанов А.В.* Условия наличия и отсутствия критических состязаний в асинхронных устройствах с памятью // В сб.: 5 Всесоюзное совещание по проблемам управления. Рефераты докладов. М.: Наука, 1974. Т.2. С.242-245.
- 110. *Лобанов А.В.* Динамическая проверка асинхронных устройств с памятью // В сб.: 3 Всесоюзное совещание по технической диагностике. Рефераты докладов. М.: Наука, 1974, С.332-334.
- 111. Лобанов А.В. Об учете неопределенности в методе выделения подозреваемых неисправностей // Автоматика и телемеханика. 1976. № 10. С.175-178.
- 112. *Лобанов А.В.* Метод выделения подозреваемых неисправностей для асинхронных устройств с памятью // В сб.: Проблемы надежности при проектировании систем управления. 2 Всесоюзная конференция. Вып. 3. Секция 3. 1976. С.35-37.
- 113. Лобанов А.В. О методе выделения подозреваемых неисправностей для асинхронных устройств с памятью // Автоматика и телемеханика. 1977. № 4. С.124-131.
- 114. *Лобанов А.В.* Динамическая проверка и выделение подозреваемых неисправностей дискретных устройств. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ИПУ. 1978.
- 115. Лобанов А.В. Функциональное диагностирование в многомашинных вычислительных системах с программно-управляемой сбое- и отказоустойчивостью // Материалы междунар. конфер. "Новые информац. технологии в науке, образовании и бизнесе". Дополнит. выпуск. Украина, Крым, Ялта-Гурзуф. Май 1997.
- 116. Лобанов А.В., Ашарина И.В. Метод выделения подозреваемых кратных неисправностей в многомашинных вычислительных системах // "Автоматизация проектирования дискретных систем". Материалы второй международной конференции 12-14 ноября 1997 года, Минск, Том 3, Минск. 1997. С. 123-128.
- 117. Ашарина И.В., Лобанов А.В. Функциональное диагностирование кратных "враждебных" неисправностей в многомашинных вычислительных системах // "Электроника и информатика-97". Вторая Всеросс. научно-техн. конф. Зеленоград, 25-26 ноября 1997 г. Тезисы докладов. Часть 2. Москва 1997. С. 49-50.
- 118. Ашарина И.В., Лобанов А.В. Обнаружение и идентификация кратных "враждебных" неисправностей в многомашинных вычислительных системах // Электронная техника. Сер.3, Микроэлектроника. М.: ЦНИИ "Электроника", 1998 Вып. 1.
- 119. Лобанов А.В. Межмашинный обмен информацией с обнаружением и идентификацией "враждебных" неисправностей в многомашинных вычислительных системах // Электронная техника. Сер.3, Микроэлектроника. М.: ЦНИИ "Электроника", 1998 - Вып. 1.
- 120. Лобанов А.В. Обнаружение и идентификация "враждебных" неисправностей сочетанием функционального и тестового диагностирования в многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 1999. № 1. С. 159-165.

- 121. Лобанов А.В. Сочетание функционального и тестового диагностирования "враждебных" неисправностей в многомашинных вычислительных системах // Материалы междунар. конфер. "Новые информац. технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе, IT+SE`98". Украина, Крым, Ялта-Гурзуф. Май. 1998.
- 122. Ebihara Y., Ikeda K., Nakatsuka S., Ishizaka M. Fault diagnosis and automatic reconfiguration for a ring subsystem // Computer Networks and ISDN System. 1985. V. 10. № 2. Pp. 98-109.
- 123. Arge J. R. A message-based fault-diagnosis procedure. // Computer Communication Review. 1986. V. 16. № 3. Pp. 328-337.
- 124. Шестакова Т.В. Центры управления сетью. Организация управления и контроля в современных сетях ЭВМ // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. № 3. С.19-44.
- 125. *Коваленко А.Е., Гула В.В.* Отказоустойчивые микропроцессорные системы. Киев: Техника, 1986. 150 с.
- 126. Barsi F., Grandoni F., Maestrini P.A. A theory of diagnosability of digital systems // IEEE Trans. on Comput. 1976. V. C-25, № 6. Pp. 585-593.
- 127. Holt C.S., Smith J.E. Diagnosis of systems with asymmetric invalidation // IEEE Trans. on Comput. 1981. V. C-30. № 9. Pp. 679-690.
- 128. Smith J. Universal system diagnosis algorithms // IEEE Trans. Comput. 1979. C-28. № 5. Pp. 374-378.
- 129. *Ciompi P., Grandoni F., Simoncini L.* Distributed diagnosis in multiprocessor systems: MuTeam approach. // Proc. 11th International IEEE symp. on Fault-Tolerant Computing. 1981. IEEE, New York, Pp.25-29.
- 130. *Kuhl J., Reddy S.* Distributed fault-tolerance for large multiprocessor systems. 1980. // Proc. of the 7th Annual Symp. on Computer Architecture. Pp. 23-30.
- 131. *Kuhl J., Reddy S.* Fault-diagnosis in fully distributed systems. // Proc. 11th Int. IEEE symp. Fault-Tolerant Computing. 1981. IEEE, New York. Pp. 100-105.
- 132. *Hosseini S., Kuhl J., Reddy S.* A diagnosis algorithm for distributed computing systems with dynamic failure and repair. // IEEE Trans. Comput. 1984. C-33. № 3. Pp. 223-233.
- 133. Ведешенков В.А., Нестеров А.М. О двух методах дешифрации результатов диагностирования цифровых систем // Электронное моделирование. Киев. 1981. № 2. С. 53-58.
- 134. Ведешенков В.А. Об организации самодиагностируемости цифровых систем // Автоматика и телемеханика. 1983. № 7. С. 133-144.
- 135. Ведешенков В.А. О диагностировании отказавших модулей и связей в цифровых системах с использованием модели БГМ // Автоматика и телемеханика, 2002. №2. 13 с.
- 136. Ведешенков В.А. Организация самодиагностирования технического состояния цифровых систем // Автоматика и телемеханика. 2003. № 11. С.165-182.
- 137. Ведешенков В.А. Метод локального самодиагностирования отказавших компонентов цифровых систем // Автоматика и телемеханика. 2004. №5. С. 131-146.
- 138. *Cioffi G., Corsini P., Fronsini G., Lopriore L.* MuTEAM: Architectural insights of a distributed multiprocessor system // Proc. 1981 Int. Symp. on Fault-Tolerant Computing (FTCS-11), 1981. Pp. 17-19.
- 139. Dolev D., Dwork C., Stockmeyer L. On the minimal synchronics needed for distributed consensus//Proc. 24th Symp. on Foundationes of Computer Science. USA, 1983. Pp.393-402.

- 140. *Chandy K., Lamport L.* Distributed snapshots: determining global states of distributed systems // ACM Trans. Comp. Syst. 1985. V. 3. N1. Pp.63-75.
- 141. *Douglas J.* The honeywell experimental distributed processor an overview // Computer. 1978. V.11. N1. Pp.28-38.
- 142. Dolev D. The byzantine generals strike again // J. Apgor. 1982. V. 3. N 1. Pp.374-382.
- 143. *Garsia-Molina H., Pittelli F.* Applications of byzantine agreement in database systems // ACM Trans. Database Syst. 1986. V. 11. No. 1. Pp.27-47.
- 144. *Babaoglu O., Drummond R.* Streets of byzantium: networks architectures for fast reliable broadcasts // IEEE Trans. Softw. Eng. 1985. V.SE-11. No 6. Pp.546-554.
- 145. *Perry K., Toueg S.* Distributed agreement in the presence of processor and communication faults // IEEE Trans. Softw. Eng. 1986. V. SE-12. No 3. Pp.477-482.
- 146. Lamport L. The week byzantine generals problems // J. ACM. 1983. V. 30. No 3. Pp.668-678.
- 147. Dolev D., Lynch N., Printer Sh. Reaching approximate agreement in the presence of fault // J. ACM. 1986. V. 33. No 3. Pp.499-516.
- 148. Dolev D., Reishuk R., Strong H. Eventual is earlier than immediate // Proc. 23th Symp. on Foundations of Comput. Sci. USA, 1982. Pp.196-203.
- 149. *Fischer M., Lunch N., Paterson M.* Impossibility of distributed consensus with one faulty process // J. ACM. 1985. V.32. No 2. Pp.374-382.
- 150. Fischer M., Lynch N. A lower bound for the time to assure interactive consistency // Inform. Proc. Lett. 1982. V. 14. No 4. Pp.183-186.
- 151. Dolev D., Reischuk R. Bounds on information exchange for byzantine agreement // J. ACM. 1985. V. 32. N 1. P.191-204.
- 152. Dolev D., Fischer M., Fowler R. An efficient algorithm for byzantine agreement without authentication // Inform. and Control. 1982. V. 52. Pp.257-274.
- 153. *Reischuk R*. A new solution for the byzantine generals problem // Inform. and Control. 1985. V. 64. Pp.23-42.
- 154. *Rabin M.* Probabilistic algorithms // Algorithms and Complexity. N. Y.-London: Acad. Press, 1976. Pp.21-39.
- 155. *Rabin M.* Rondamized byzantine generals // Proc. 24th Symp. on Foundations of Computer Sci. USA, 1983. Pp.393-402.
- 156. *Dolev D., Strong H.R.* Authenticated algorithm for buzantine agreement // SIAM J. COMPUT. 1983. V.12. No. 4. Pp.656-666.
- 157. *Chor B., Coan B.* A simple and efficient randomized byzantine agreement algorithm // IEEE Trans. Softw. Eng. 1985. V. SE-11. No. 6. Pp.531-539.
- 158. *Turpin R., Coan B.* Extending binary byzantine agreement to multivalued byzantine agreement // Interm. Process. Lett. 1985. V. 18. No. 1. Pp.73-76.
- 159. Bracha G. An asynchronous concensus protocol // Proc. 3rd ACM Symp. on Principles of Distrib. Computing. Canada, 1984. Pp.154-162.
- 160. *Toueg S.* Randomized byzantine agreements // Proc. 3rd ACM Symp. on Principles of Distrib. Computing. Canada, 1984. Pp.163-174.
- 161. Генинсон Б.А., Панкова Л.А., Трахтенгерц Э.А. Рандомизированный алгоритм обеспечения взаимной информационной согласованности в распределенных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 1989. №2. С.185-190.

- 162. *Лобанов А.В.* Взаимное удостоверительное согласование информации с идентификацией неисправностей // Автоматика и вычислительная техника. 1991. № 6. С.59-62.
- 163. Лобанов А.В. Взаимное информационное согласование с идентификацией неисправностей в четырехмашинной вычислительной системе // Автоматика и телемеханика. 1992. № 2. С.171-180.
- 164. Лобанов А.В. Взаимное информационное согласование с идентификацией неисправностей в распределенных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 1992. № 4. С.137-146.
- 165. *Лобанов А.В.* Византийские генералы выявляют генералов-шпионов // 2 Международная научно-техн. конференция "Микроэлектроника и информатика". Тезисы докладов. 23-24 ноября 1995. Москва, Зеленоград, 1995. С.104-105.
- 166. Лобанов А.В. Информационное согласование параллельных процессов с обнаружением "враждебных" процессов // "Международная академия информатизации. Труды. Отделение микроэлектроники и информатики. Выпуск 2. 1997 год. Москва, Зеленоград". С.147-152.
- 167. Лобанов А.В. Организация сбое- и отказоустойчивых вычислений в полносвязных многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 2000. № 12. С.138-146.
- 168. *Лобанов А.В.* Взаимное информационное согласование с идентификацией неисправностей на основе глобального синдрома // Автоматика и телемеханика. 1996. №5. С.150-159.
- 169. *Щагин А.В., Гулько Н.И.* Специализированный комплекс технологических установок для космического материаловедения М.: XIX. Гагаринские чтения. 4-11 апреля 1984.
- 170. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. 624с.
- 171. *Лайонс, Р.* Цифровая обработка сигналов / *Лайонс Р.*// М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.
- 172. *Афоненко,* Г.П. Модульные методы оценки амплитуд отсчетов дискретного преобразования Фурье / *Афоненко* Г.П., *Бритин С.Н., Трофимов А.Т.*// Радиотехника. 1985. №9. С.66-70.
- 173. Применение цифровой обработки сигналов / Под ред. Э. Оппенгейма. М.: Мир, 1980. 552 с.
- 174. А.с. 1753472, СССР. Устройство для вычисления модуля комплексного числа / Дрозд А.В., Полин Е.Л., Сотова К.Г., Дрозд Ю.В. Кл. G 06 F 7/552. Опубл. 07.08.92. Бюл. № 29.
- 175. Патент № 2438160. Способ и устройство извлечения квадратного корня / Чекушкин В.В., Богатов А.Д., Аверьянов М.А. Кл. G 06 F 7/552. Опубл. 27.12.2011. Бюл. № 36.
- 176. *Перов, А.И.* Статистическая теория радиотехнических систем. / *Перов А.И.*// М.: Радиотехника, 2003. 400 с.
- 177. Орощук, И.М. Метод снижения погрешности выделения огибающей сигналов в цифровых пространственно-корреляционных трактах обработки / Орощук И.М., Сучков А.Н., Василенко А.М. // Цифровая обработка сигналов. 2014. №2. С.41-45.
- 178. Непомнящий, О.В. Методы и средства определения частотной ошибки сигнала спутниковой связи в режиме реального времени / Непомнящий О.В., Хабаров В.А., Рыженко И.Н., Комаров А.А. // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2014. Т.57. №3. С.35–39.

- 179. Аверьянов А.М., Пантелеев И.В., Чекушкин В.В. Методы повышения быстродействия и точностных характеристик преобразователей ортогональных составляющих сигнала в амплитуду // Измерительная техника. 2012. №8. С.9-14.
- 180. *Кнут Д.Э.* Искусство программирования. Т.2. Получисленные алгоритмы. М.: Издательский дом «Вильямс», 2000. 832 с.
- 181. Чекушкин В.В., Юрин О.В. Анализ быстродействующих алгоритмов деления чисел // Известия вузов. Приборостроение. 2003. №8. С.28-31.
- 182. РД 134-0139-2005. Нормативный документ по стандартизации РКТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам. М: ЦНИИ машиностроения, 2005. (с изм. 851.03 2008)
- 183. ОСТ 134-1034-2003. Отраслевой стандарт. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам. М.: ЦНИИ машиностроения, 2003. (с изм. 851.02 2008)
- 184. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. Минск: 1995.
- 185. Верхотуров В.И. Проблемы обеспечения радиационной стойкости элементов и аппаратуры современных спутников связи // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2005. Вып. 1-2. С.110-114.
- 186. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования. – М.: Госстандарт России, 2004.
- 187. Fiber Channel. Physical and Signaling Interface (FC-PH). X3.230-199x, X3T11/Project 755 D/Rev. 4.3, ANSI (Американский национальный институт стандартов).
- 188. IDT79R3081 RISController with FPA. Military and Commercial Temperature Ranges. DSC-9064/4, September 1995.
- 189. Солохина Т.В., Петричкович Я.Я., Александров Ю.Н. и др. Микросхемы базовых серий «МУЛЬТИКОР». Сигнальный микроконтроллер 1892ВМ2Т (МС-24) // Chip News. 2005. № 2. С.20-31.
- 190. Демидов А.А., Ильягуев В.Н., Калашников О.А. и др. Исследования радиационной стойкости субмикронных КМОП СБИС на КНИ-структурах // Радиационная стойкость электронных систем / Научно техн. сб. 2004. Вып. 7. С.77-78.
- 191. РД 11 1003-2000. Руководящий документ. Изделия полупроводниковой электроники. Метод прогнозирования надежности в условиях низкоинтенсивного ионизирующего облучения. – С.Пб: РНИИ «Электронстандарт», 2000.
- 192. Лукъященко В.И., Ужегов В.М., Яковлев М.В. и др. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительными сроками активного существования к воздействию ионизирующих излучений космического пространства // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2001. Вып. 3-4. С. 81-87.
- 193. Бутин В.И., Зинченко В.Ф. Методические вопросы моделирования функциональных отказов в изделиях электронной техники при воздействии ионизирующего излучения с различной дозой за импульс // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2002. Вып. 1-2. С.78-83.

- 194. РД В 319.03.39-2000. Изделия электронной техники. Контроль и прогнозирование безотказности в условиях длительного совместного воздействия низкоинтенсивных ионизирующих излучений и термотоковых нагрузок по результатам ускоренных испытаний. М. 2000.
- 195. *Морозов В.Ю., Попов В.Д.* Влияние радиационного воздействия на безотказность интегральных микросхем // Н.-техн. сб. «Радиационная стойкость электронных систем». 2005. Вып. 8. С.141-142.
- 196. Чулков И.В., Левин В.В., Ануфрейчик К.В. и др. Результаты радиационных исследований микросхем энергонезависимой памяти фирмы ATMEL // Н.-техн. сб. «Радиационная стойкость электронных систем». 2003. Вып. 6. С.79-80.
- 197. *Яненко Л.В., Киргизова А.В.* Особенности радиационного поведения БИС ПЗУ с электрическим стиранием // Н.-техн. сб. «Радиационная стойкость электронных систем». 2004. Вып. 7. С.89-90.
- 198. www.Radnet.jpl.nasa.gov/compend.htm.
- 199. www.Spacerad.gsfc.nasa.gov/radhome/papers.
- 200. Унвин М.Д., Олдфил М.К. и др. Использование коммерческих комплектующих в спутниковых приемниках GPS // Surrey Space Center. EKA/ESTEC, Нидерланды. 2000.
- 201. *Чумаков АМ., Гонтарь В.В. и др.* Расчетно-экспериментальное моделирование эффектов защелкивания в КМОП ИС // Сб. тез. докл. конф. «Влияние внешних воздействующих факторов на элементную базу аппаратуры авиационной и космической техники» (16-17 апреля 2003 г. ИПК, г. Королев).
- 202. *Кузнецов Н.В.* Тиристорный эффект в КМОП СБИС при воздействии протонов // Н.-техн. сб. «Радиационная стойкость электронных систем». 2005. Вып. 8. С.123-124.
- 203. www.3d-plus.com.
- 204. www.temic-semi.com/nt/ams/s_resu.htrn.
- 205. Усеинов Р.Г. Моделирование одиночных микродозовых эффектов от тяжелых заряженных частиц в ИС динамической и статической памяти большой емкости // Сб. тез. докл. конф. «Влияние внешних воздействующих факторов на элементную базу аппаратуры авиационной и космической техники» (16-17 апреля 2003 г. ИПК, г. Королев). С. 46-48.
- 206. Henson B.G., McDonald P.T., Stapor W.J. SDRAM Space Radiation Effects Measurements and Analysis // IEEE Radiation Effects Data Workshop. Norfolk, Virginia, 1999.
- 207. Edmonds L.D., Guertin S.M. et. al. Ion Induced Stuck Bits in 1T/1C SDRAM Cells // Trans. Nucl. Sci. 2001. Vol. 48. No. 6. Pp.1925-1930.
- 208. Лукьященко В.И., Ужегов ВЖ, Яковлев М.В. и др. Радиационные условия на борту космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2004. Вып. 1-2. С.3-16.
- 209. *Чумаков А.И.* Методы оценки частоты эффектов при воздействии отдельных ядерных частиц // Н.-техн. сб. «Радиационная стойкость электронных систем». 2005. Вып. 8. С.107-108.
- 210. *Гулько О.Е.* Механизмы отказов КМОП ИС при воздействии ионизирующих частиц космического излучения // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2005. Вып. 1-2. С.80-83.
- 211. Севастьянов Н.Н., Верхотуров В.И., Борисов Ю.А. и др. Методика оценки интенсивности одиночных сбоев в СБИС ОЗУ по результатам эксплуатации в составе космических

аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2005. Вып. 1-2. С.104-109.

- 212. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. М., 1991.
- 213. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и причин отказов. Основные положения. М. 1998.
- 214. *Левин Б.Р.* Теория надежности радиотехнических систем (математические основы). М.: Советское радио, 1978. 264 с.
- 215. *Журавин Ю*. На орбите «Аркон». К запуску «Космоса-2392» // Новости космонавтики. 2002. № 9 (236). С.24-27.
- 216. *Харченко В.С., Юрченко Ю.Б.* Анализ структур отказоустойчивых бортовых комплексов при использовании электронных компонентов INDUSTRY // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2003. № 2. С. 3-9.
- 217. Borona L., David J.P. An Attempt to Define Conservative Conditions for Total Dose Evaluation of Bipolar 1C s // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1997. Vol. 44, No. 6. Pp. 1974-1980.
- 218. *Peas R.L., Conn L.M., Fleetwood DM. et al.* A Proposed Hardness Assurance Test Methodology for Bipolar Linear Circuits and Devices in Space Ionizing Radiation Environment // Ibid. 1997. Vol. 44. No 6. Pp. 1981-1988.
- 219. Верхотуров В.И. Проблемы обеспечения радиационной стойкости элементов и аппаратуры современных спутников связи // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2005. Вып. 1-2. С.110-114.
- 220. Зебрев Г.И., Анашин В.С. Усиление деградации электронных компонентов при низкоинтенсивном излучении космического пространства как эффект мощности дозы // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2009. Вып. 2. С.15-22.
- 221. Carriere T., Ecoffet P., Polrot P. Evaluation of Accelerated Total Dose Testing of Linear Bipolar Circuits // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2000. Vol. 47, No. 6. Pp. 2350-2357.
- 222. Осипов В.А., Ладыгин Е.А., Коновалов М.П. и др. Показатели радиационной стойкости микросхем в режимах, приближенных к условиям их эксплуатации в радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2004. Вып. 3-4. С.32-38.
- 223. РД В 319.03.37-2000. Инженерные методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию низкоинтенсивного протонного и электронного излучений космического пространства. М.: 2000.
- 224. ОСТ 11 073.013-2008. Часть 10. Испытания на стойкость к воздействию специальных факторов и импульсную электрическую прочность. М.: 2008. (с изм. УКВД-2 от 08.10.09г.)
- 225. Зинченко В.Ф., Шиян В.Д., Артемов А.Д., Соболев С.А. Прогнозирование локальных дозовых нагрузок в критических узлах аппаратуры космических объектов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2009. Вып. 2. С.3-6.
- 226. Ватуев А.С., Гульбекян Г.Г., Емельянов В.В. и др. Отработка методики испытаний изделий полупроводниковой электроники на воздействие тяжелых заряженных частиц на циклотроне У-400 // Н.-тех. сб. «Радиационная стойкость электронных систем». 2009. Вып. 12. С.147-148.

- 227. Лобанов А.В. Взаимное удостоверительное согласование с идентификацией неисправностей в распределенных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 1992. №4. С.137-146.
- 228. Лобанов А.В. Взаимное удостоверительное согласование с идентификацией неисправностей на основе глобального синдрома // Автоматика и телемеханика. 1996. №5. С.150-159.
- 229. Pease M., Shostak R., Lamport L. Reaching agreement in the presence of faults // J. ACM. 1980. V. 27. №2. P. 228-234.
- 230. *Ашарина И.В., Лобанов А.В., Мищенко И.Г.* Взаимное информационное согласование в неполносвязных многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 2003. №5. С.190-199.
- 231. *Каравай М.Ф.* Инвариантно-групповой подход к исследованию k-отказоустойчивых структур // Автоматика и телемеханика. 2000. №1. С.143-149.
- 232. Лобанов А.В. Взаимное информационное согласование с обнаружением и идентификацией враждебных неисправностей в неполносвязных многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 2003. №6. С.175-185.
- 233. Сиренко В.Г. Функциональное диагностирование процессов посылок информации в вычислительных системах при неизвестном исходном значении информации // Автоматика и телемеханика. 2005. №11. С.135-154.
- 234. Григорьев С.Н. Принципы создания многофункциональной системы числового программного управления технологическим оборудованием на базе общего ядра с открытой модульной архитектурой // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. №5. С.1-11.
- 235. Алпатов Б.А., Блохин А.Н., Костяшкин Л.Н., Романов Ю.Н., Шапка С.В. Семейство многофункциональных систем обработки видеоизображений «Охотник» // Цифровая обработка сигналов. 2010. №4. С.44-51.
- 236. Комплект «Мультиборт» для аэрокосмических применений. Рекламные проспекты ГУП НПЦ «ЭЛВИС». 2010.
- 237. SpaceWire технология и стандарт высокоскоростных коммуникаций. Рекламные проспекты ГУП НПЦ «ЭЛВИС». 2010.
- 238. Гобчанский О. Унифицированные средства бортовых вычислительных комплексов космических аппаратов // Современные технологии автоматизации. 1998. №1. С.72-76.

Список работ автора по теме диссертации

- 1. *Гришин В.Ю.* Функциональное диагностирование в распределенном системном диагностировании многомашинных вычислительных систем / В.Ю.Гришин, А.В.Лобанов, В.Г.Сиренко // Автоматика и телемеханика. 2002. № 1. С.154-160.
- 2. Гришин В.Ю. Взаимное информационное согласование в многомашинных вычислительных системах с обнаружением и идентификацией кратных враждебных неисправностей / В.Ю.Гришин, А.В.Лобанов, В.Г.Сиренко // Автоматика и телемеханика. 2003. №4. С.123-132.
- 3. *Гришин В.Ю.* Взаимное информационное согласование с обнаружением и идентификацией враждебных неисправностей в неполносвязных многомашинных вычислительных системах / *В.Ю.Гришин, А.В.Лобанов* // Автоматика и телемеханика. № 6. 2003. С.175-186.
- 4. *Гришин В.Ю.* Бортовые резервированные компьютеры космических аппаратов зондирования с гибкой архитектурой и требования к номенклатуре радиационных характеристик их элементов / В.Ю. Гришин, Н.Н. Зубов, В.Г. Сиренко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2003. Вып.1-2. С.106-111.
- 5. *Гришин В.Ю.* Распределенное системное диагностирование враждебных неисправностей в неполносвязанных многомашинных вычислительных системах / В.Ю.Гришин, В.Г.Сиренко, А.В.Лобанов // Автоматика и телемеханика. 2005. №2. С.148-157.
- 6. Сиренко В.Г. Критерии оценки радиационной стойкости высокопроизводительных бортовых компьютеров малых космических аппаратов с длительными сроками активного существования / В.Г.Сиренко, В.Ю.Гришин, Н.Н.Зубов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2007. Вып.3-4. С.3-9.
- 7. Сиренко В.Г. Применение нормативной базы для оценки и обеспечения стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к радиационным воздействиям / В.Г.Сиренко, В.Ю.Гришин, Н.Н.Зубов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2010. Вып. 3. С.5-17.
- 8. *Чекушкин В.В.* Совершенствование полиномиальных методов воспроизведения функций в цифровых системах обработки информации / *В.В. Чекушкин, И.В.Пантелеев, В.Ю.Гришин, И.Р.Сарибжанов* // Радиопромышленность. 2012. № 2. С.63-68.
- 9. Чекушкин В.В. Совершенствование алгоритмов деления чисел в информационноизмерительных системах / В.В. Чекушкин, В.Ю.Гришин, В.В.Костров // Метрология. 2013. №11. С.3-14.
- 10. *Басаев А.С.* Космическое приборостроение: главное правильная концепция / А.С. Басаев, В.Ю. Гришин // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2009. №8. С.4-10.
- 11. Гришин В. Микросхемы приемопередатчиков для основных типов мультиплексных

каналов обмена / В. Гришин, П. Еремеев, Н. Зубов, С. Муратов, Н. Шелепин // Компоненты и технологии. – 2002. – №5. – С.68-74.

- 12. Сиренко В.Г. Требования к параметрам оценки радиационной стойкости элементов резервированных бортовых комплексов космических аппаратов / В.Г. Сиренко, В.Ю. Гришин, Н.Н.Зубов // Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2001»: Научно-технич. сб. 2001. Вып. 4. С.19-20.
- 13. *Николаев Ю.М.* К вопросу обеспечения радиационной стойкости РЭА / *Ю.М. Николаев, Г.П. Руднев, Ю.Н. Иванов, В.Ю. Гришин, Л.С. Павленко* // Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2002»: Научно-технич. сб. 2002. Вып. 5. С.21-22.
- 14. Сиренко В.Г. Обеспечение радиационной надежности высокопроизводительных бортовых резервированных компьютеров с гибкой архитектурой для космических аппаратов с длительными сроками активного существования / В.Г. Сиренко, В.Ю. Гришин, Н.Н.Зубов // Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2003»: Научно-технич. сб. 2003. Вып. 6. С.15-16.
- 15. Лобанов А.В. Взаимное информационное согласование с обнаружением и идентификацией кратных враждебных неисправностей в полносвязных многомашинных вычислительных системах / А.В. Лобанов, В.Г. Сиренко, В.Ю. Гришин // Супервычисления и математическое моделирование: Тезисы докладов международного семинара. 13-15 июня 2001 г. Саратов. С.20-21.
- 16. Лобанов А.В. Самопроверяемое распределенное системное самодиагностирование многомашинных вычислительных систем / А.В. Лобанов, В.Г. Сиренко, В.Ю. Гришин // Автоматизация проектирования дискретных систем: Материалы 4-й Международной конференции (14-16 ноября 2001 г., Минск). Том 3. Минск, 2001. С.45-52.
- 17. Лобанов А.В. Повышение точности идентификации кратных враждебных неисправностей во взаимном информационном согласовании / А.В.Лобанов, В.Г.Сиренко, В.Ю. Гришин // Информационные технологии в науке, образовании, бизнесе, IT+SE'2002: Труды XXIX международной конференции. Украина, Крым, Ялта-Гурзуф 20-30 мая 2002 г. С.134-137.
- 18. Сиренко В.Г. Проблемы и стратегия проектирования высокопроизводительных комплексов управления малыми космическими аппаратами с длительными сроками активного существования / В.Г.Сиренко, В.Ю. Гришин, П.М. Еремеев, Н.Н. Зубов // Перспективы использования новых технологий и научно-технических решений в ракетно-космической технике ГКНПЦ им. М.В. Хруничева: Сб. пленарных докладов III научно-технической конференции. М.: 2003. С.51-72.
- 19. Сиренко В.Г. Методические и организационные проблемы обеспечения полноты и достоверности оценки стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к естественным радиационным воздействиям космического пространства с учетом условий эксплуатации / В.Г. Сиренко, В.Ю. Гришин, Н.Н. Зубов // Элементная база космических систем: Сб. материалов НТК (25.09 01.10.2008 г., Москва). М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2008. С.62-72.
- 20. Гришин В.Ю. Унификация бортовых систем управления, обработки и накопления информации на основе технологии SpaceWire / В.Ю. Гришин, П.М. Еремеев, В.Г. Сиренко // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы IX научно-технической конференции (Геленджик, 17-21 сентября 2012 г.). М.: МНТО РЭС им. А.С.Попова, филиал «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»-НПП «Оптэкс», 2012. 407-408 с.
- 21. Гришин В.Ю. Оценка надежности структуры вычислительного комплекса для обработки сигналов и формирования изображений на борту КА / В.Ю.Гришин, А.В.Ракитин, В.В.Костров // Космическая радиолокация / Материалы II Всероссийской научно-
практической конференции (Муром, 25.06-27.06. 2013 г.) – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2013. – С.34-39.

- 22. Гришин В.Ю. Облик перспективного вычислительного комплекса космического базирования с гибкой архитектурой для обработки сигналов / В.Ю.Гришин, А.В.Ракитин, В.В.Костров // Космическая радиолокация / Материалы II Всероссийской научно-практической конференции (Муром, 25.06-27.06. 2013 г.) Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2013. С.52-57.
- 23. Чекушкин В.В. Совершенствование методов, математических моделей реализации вычислительных процессов в радиолокационных системах / В.В.Чекушкин, И.В.Пантелеев, В.Ю.Гришин // Вестник воздушно-космической обороны. 2014. №3. С.25-29.
- 24. *Гришин В.Ю.* Влияние точности вычисления амплитуды комплексного радиосигнала на системные характеристики радиотехнических систем / *В.Ю.Гришин* // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 11-ой международной научно-технической конференции. Владимир: ВлГУ, 2015. С.219-222.
- 25. Патент РФ № 2387000. Трехканальная резервированная управляющая система / Еремеев П.М., Беликов Ю.А., Гришин В.Ю., Куприянов В.В., Михалев И.В., Мелконян О.Е., Садовникова А.И., Сиренко В.Г., Тихонов С.Н., Трутце Ф.Ю., Беренов Н.К. / Класс G 06F 11/16. Опубл. 20.04.2010. Бюл. № 11.
- 26. Патент РФ № 2395161. Мажоритарное устройство / Еремеев П.М., Гришин В.Ю., Садовникова А.И., Фомин Ю.П. / Класс Н03К 19/23, G 06F 11/18. Опубл. 20.07.2010. Бюл. № 20.
- 27. Патент РФ № 2405196. Коммутатор LINK-портов / Еремеев П.М., Гришин В.Ю., Нестерова К.Ю., Садовникова А.И., Трапезина Е.Н. / Класс G 06F 15/173. Опубл. 27.11.2010. Бюл. № 33.
- Патент РФ № 2455681. Отказоустойчивая вычислительная система с аппаратнопрограммной реализацией функций отказоустойчивости и динамической реконфигурации / Еремеев П.М., Беликов Ю.А., Бирюков С.А., Бобров В.Ю., Быков Ю.Я., Гришин В.Ю., Жаркова Ф.И., Лобанов А.В., Мелконян О.Е., Николаев С.Р., Садовникова А.И., Селезнев И.П., Сиренко В.Г., Тихонов С.Н., Травин А.В./ Класс G 06F 11/20. Опубл. 10.07.2012. Бюл. № 19.
- 29. Патент РФ № 2559767. Способ обеспечения сбое- и отказоустойчивости вычислительной системы, основанный на репликации задач, возможности самореконфигурации и самоуправлении деградацией / Тихонов С.Н., Беликов Ю.А., Бобров В.Ю., Быков Ю.Я., Гришин В.Ю., Еремеев П.М., Мелконян О.Е., Садовникова А.И., Сиренко В.Г. / Класс G 06F 11/20. Опубл. 10.08.2015. Бюл. № 22.

Приложение А

Характеристики точности систем ЦОС при реализации нелинейных преобразований

А.1 Примеры нелинейных преобразований

Средства отображения РФИ имеют нелинейную характеристику, которая нормированной яркости изображения *B_n* хорошо аппроксимируется соотношением [3]

$$B_n = \frac{B}{B_{\max}} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max}} \cdot \left(\frac{A}{A_{\max}}\right)^{\gamma} + \frac{B_{\min}}{B_{\max}},$$

где B_{\min} , B_{\max} – минимальная и максимальная яркость устройства отображения РФИ; A/A_{\max} – относительная амплитуда входного сигнала; γ – коэффициент контрастности, B – текущее значение яркости.

В таблице А.1 приведены усредненные характеристики для трех наиболее часто используемых типов средств отображения РФИ: фотобумаги, обычной бумаги (80 г/м²) и дисплея (LCD). Шкала максимальной яркости ограничивается 255 единицами. На рисунке А.1 представлены аппроксимирующие зависимости нормированной яркости изображения B_n от относительной амплитуды входного отсчета.

Средство отображения	Обычная бумага	Фотобумага	Дисплей
Минимальная яркость B_{\min}	36,1	29,4	10,7
Максимальная яркость В _{тах}	226	245	255
Коэффициент контрастности ү	0,55	0,8	2,7

Таблица А.1 – Характеристики средств отображения РФИ [3]

Зависимости для типичных средств воспроизведения РФИ являются нелинейными, причем кривизна кривых получается разной. В ряде случаев желательной является линейная регистрация (зависимость 4), однако возможны и другие варианты преобразований. Для реализации применяются гамма-корректоры, основная цель которых заключается в трансформации данных в соответствии с соотношением $U_{6blx} = U_{6x}^{\gamma_p}$. Выбор коэффициента γ_p зависит от цели обработки и характеристики средства воспроизведения РФИ. Если желательно пропорциональное изменение полутонов по всему диапазону изменения яркости, то применяются корректоры,

дающие линейную сквозную характеристику $U_{gblx}^* = B(A) \cdot U_{gx}^{\gamma_p} \cong k \cdot A$, где k – коэффициент передачи.



Если стоит задача улучшения распознавания объектов с малой (большой) отражаемостью, то сквозная характеристика тракта должна иметь $\gamma < 1$ ($\gamma > 1$). Отметим, что в цифровых камерах часто используют $\gamma = 2,2$, а в цифровом телевидении $\gamma = 0,42...0,48$. В общем случае характеристика корректора описывается нелинейной функцией

$$y = f(x), \tag{A.1}$$

где у – выходной цифровой сигнал, х – входной цифровой сигнал.

Аналогичные задачи возникают в системах ЦОС и формирования сигналов управления и контроля на борту КА. К числу важнейших задач таких систем относится сбор, обработка служебной информации с датчиков, измеряющих, например, определённые параметры среды (температура, давление, ускорение и т.д.). В процессе работы возникает необходимость измерять, принимать, обрабатывать, коммутировать и контролировать одновременно сигналы от сотен и тысяч датчиков. Например, для контроля и управления в космической станции «Салют» необходимо осуществлять приём и обработку информации от 2100 датчиков с проведением в одну секунду 2560 измерений [11]. Таким образом, проблемой является измерение параметров с групп датчиков различного типа с коммутацией больших информационных потоков, усиление нормализация сигналов, автоматическая калибровка датчиков, измерение и контроль тысяч параметров в условиях непрерывной деградации аппаратуры под воздействием дестабилизирующих факторов.

В зависимости от назначения предъявляются разнообразные требования по погрешностям и скорости проведения измерений. Например, на борту КА только при измерениях температуры с десятков датчиков для задания тепловых режимов работы систем различного назначения, требования к значениям погрешностей измерений могут отличаться друг от друга во много раз [7А]. Примером прецизионных измерений является технологическая система «Корунд», где требуется обеспечение разрешающей способности устройства измерений 0,1°С диапазоне температур от 200° до 1300°С, что соответствует относительной погрешности б=0,00001 [169]. В этом случае минимальное число разрядов АЦП канала измерения параметра (температуры), без симметричного округления И с симметричным округлением значений параметра составит соответственно

$$n = 1 + ent \log_2 \frac{T_{\text{max}}}{\Delta T}$$
, $n_c = ent \log_2 \frac{T_{\text{max}}}{\Delta T}$. (A.2)

где T_{max} – максимальное значение измеряемого параметра; ΔT – дискрет изменения параметра; *ent* – выделение целой части логарифма числа.

В соответствии с (А.2) минимальное число разрядов АЦП $n = 1 + ent \log_2 13000 = 14$. Другой пример: погрешность ориентации телескопа спутника $\Delta\beta$ должна составлять не более 2,5 угловых секунд. Если в общем случае принять диапазон изменения угла $\beta \in [0^\circ; 360^\circ]$ [11], то число двоичных разрядов представления кода угла составит $n = 1 + ent \log_2 64800 = 20$. Задача получения точности ориентации в 2,5" решается при условии, что угловые скорости должны быть в пределах 1"/с.

Таким образом, в общем случае измерения должны проводиться системами или приборами с классами точности от 10 до 0,001 и выше. Эти значения соответствуют погрешностям в процентах $\delta_{np} \in [10\%; 0,001\%]$ или в относительных значениях $\delta \in [0,1; 0,00001]$ и выше. При проведении ЦОС с целью оптимизации систем необходимо контролировать погрешность и выбирать соответствующий метод измерений с устранением избыточной точности представления результата и обеспечением заданного быстродействия.

Для значительного уменьшения погрешностей измерительных систем используют различные методы их калибровки и компенсации дестабилизирующих факторов. Необходимость периодической калибровки обусловлена влиянием дестабилизирующих факторов, например, их влиянию особенно подвержены датчики, метрологические параметры измерительных каналов, АЦП. Дестабилизирующими факторами являются, например, резкое изменение температуры, воздействие накапливаемых доз радиационных излучений и т.д.

В радиотехнических системах (РТС) с цифровой обработкой сигналов (ЦОС) широко используется комплексное представление сигналов, когда наблюдаемый процесс Z_t в соответствии с принятой технологией дискретизации и формирования квадратурных составляющих приводится к виду

$$Z_i = \operatorname{Re} Z_i + j \operatorname{Im} Z_i, \qquad (A.3)$$

где $\operatorname{Re} Z_i$, $\operatorname{Im} Z_i$ – квадратурные составляющие радиосигнала; *i* – номер отсчета дискретного времени t_i .

Известны [171] преимущества такого преобразования: без нарушения теоремы В.А.Котельникова можно в два раза увеличить интервал дискретизации (уменьшить вдвое тактовую частоту), тем самым снизить требования к элементной базе устройства ЦОС по быстродействию. Снижение рабочей частоты благоприятно сказывается на многих аспектах проектирования, производства аппаратуры, облегчает решение вопросов электромагнитной совместимости и т.п. При аналоговом методе формирования квадратурных составляющих и переносе спектра сигнала в область нулевых частот также снижаются требования к канальным аналого-цифровым преобразователям (АЦП).

Результатом обработки сигнала в квадратурах является, как правило, комплексный сигнал. Демодуляция радиосигналов, формирование радиолокационных изображений (РЛИ), переход к некогерентной обработке связаны с вычислением амплитуды. Амплитуда комплексного сигнала на выходе устройства обработки рассчитывается в соответствии с соотношением

$$A_{i} = \sqrt{x_{i}^{2} + y_{i}^{2}} , \qquad (A.4)$$

где $x_i = \operatorname{Re} Z_{i \text{ out}}$, $y_i = \operatorname{Im} Z_{i \text{ out}}$ – квадратурные составляющие сигнала после обработки.

Такие вычисления производятся, как правило, многократно. Показателен пример формирования РЛИ высокого разрешения с помощью радиолокатора с синтезированием апертуры (PCA). При размере кадра 10 км × 10 км и разрешении 1 м вычисления по соотношению (A.4) необходимо произвести 100 миллионов раз. В РСА космического базирования время получения голограммы составляет порядка 1 с, что существенно затрудняет формирование РЛИ в реальном масштабе времени. Если учесть тенденцию повышения разрешающей способности до 0,25...0,3 м, то требования по объему вычислений возрастают более чем на порядок.

Сходные задачи возникают при синтезе сигналов, например в некоторых вокодерах восстановление переданного речевого сигнала осуществляется с помощью синтезирующего фильтра [171, 173], имеющего частотную характеристику, обратную текущему спектру сигнала $S_i(e^{j\omega T})$

$$K_i(\omega) = \frac{1}{\left|S_i(e^{j\omega T})\right|} = \frac{1}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}.$$
(A.5)

Здесь под x_i и y_i понимаются действительная и мнимая составляющие комплексной частотной характеристики: $x_i = \operatorname{Re}[S_i(e^{j\omega T})], \quad y_i = \operatorname{Im}[S_i(e^{j\omega T})]; \quad T$ – интервал дискретизации.

Перечень подобных приложений можно продолжать, но всем им присущи высокие требования к скорости вычислений и для ряда радиотехнических систем этот аспект является критическим. Следует отметить, что рассмотренные операции (A.4), (A.5) являются нелинейными, поэтому вычисления при реализации вычислительного процесса пользуются приближенными алгоритмами [171-175]. Как правило, чем проще приближенный алгоритм, тем выше его вычислительная эффективность, однако точность вычислений падает. Следовательно, любая операция по обработке радиосигнала, включающая вычисления по приближенным алгоритмам вычисления (А.4), (А.5), должна быть сбалансирована по быстродействию и точности вычислений. Отсюда возникает задача контроля точности приближений, которая используется при выборе того или иного способа вычисления.

A.2 Характеристики точности воспроизведения функции sin(x)

В качестве примера повышения точностных характеристик рассмотрим широко используемое в практических приложениях воспроизведение функции $\sin(x)$ на интервале аппроксимации $x \in [0; \pi/2]$ при значении относительной погрешности $\delta_p = 0,0001\%$.

В соответствии с разработанной программой поиска полинома наилучшего приближения был определён полином седьмой степени [8А]

$$P(x) = x \cdot (a_1 + (a_2 + (a_3 + a_4 \cdot x^2) \cdot x^2) \cdot x^2), \qquad (A.6)$$

константы *a_i* и максимальные значения погрешности метода, которого приведены в таблице А.2 под номером 1, график текущего значения погрешности δ_M приведён на рисунке А.2 сплошной линией.

В (А.6) по сравнению с обычным полиномом Чебышева исключены неэффективные члены ряда в соответствии со стратегией максимальной идентичности графика функции sin(x) и приближающего полинома. В данном случае отсутствуют члены ряда с чётными степенями слабо влияющие на значение погрешности по сравнению с членами ряда с нечётными степенями. В этом случае число констант *d* полинома определяется неравенством d < n+1, а число максимумов значения погрешности при d = 4 также равно четырём. Таким образом, по сравнению с применением обычного полинома Чебышева можно уменьшить и число физических эталонов при градуировке измерительной системы, это особенно важно для спутниковых систем.

После обычного естественного урезания разрядных сеток констант в десятичной системе счисления, например, до шести разрядов (таблица А.2, полином №2) максимальное значение погрешности результата $\delta_{PM} = \delta_{MM} + \delta_k$ увеличилось, а отношение значений погрешностей составляет $1,122 \times 10^{-5}/5,891 \times 10^{-7}=19,04$.

№ п/п		Погрешность					
	a_1	<i>a</i> ₂	a_3	a_4	метода б		
1	0,99999661573	- 0,166648283427	0,008306324986	- 0,000183636492	5,891·10 ⁻⁷		
2	0,999996	- 0,166648	0,008306	- 0,000183	$1,122 \cdot 10^{-5}$		
3	0,999996	- 0,166646	0,008304	- 0,000183	9,121·10 ⁻⁷		

Таблица А.2 – Погрешность полиномиального метода воспроизведения основной четверти функции sin(x)

Уменьшение погрешности результата в этом случае осуществляется путём варьирования в небольших пределах значений коэффициентов полинома a_i , когда осуществляется взаимная последовательно компенсация по составляющим погрешностей Δa_i . Путём последовательного моделирования поиска полинома наилучшего приближения в программной среде Builder C++ получен полином №3 из таблицы А.2, в котором значения погрешности $\delta_p = 9,121 \times 10^{-7}$. В этом случае погрешность суммарная двух составляющих δ_{MM} и δ_k уменьшена В $1,122 \times 10^{-5}/9,121 \times 10^{-7} = 12,3$ раза при одинаковом урезанном числе разрядных цифр констант $a_1, ..., a_4$. Таким образом, предложенная методика снижения разрядности коэффициентов полинома и взаимной компенсации составляющих погрешностей обладает высокой эффективностью.

А.3 Характеристики точности алгоритмов вычисления амплитуды комплексного радиосигнала

Рассмотрим алгоритмы приближенного вычисления амплитуды комплексного сигнала с различной вычислительной сложностью. Наиболее часто применяются модульные алгоритмы вычисления амплитуды комплексного сигнала на основе модулей квадратурных составляющих $|x_i|$ и $|y_i|$ [171-173]. В общем виде его можно записать в виде

$$A_{i} = \max_{j=1,2..,m} \{\{c_{j}\}\},\tag{A.7}$$

где последовательность $c_j = a_j |x_i| + b_j |y_i|$, *m* – четное целое число.

Одним из наиболее известных модульных алгоритмов является следующий алгоритм вычисления амплитуды [173] с набором коэффициентов $a_1 = b_2 = 0,875$; $a_2 = b_1 = 0,5$; $a_3 = b_4 = 1$; $a_4 = b_3 = 0$:

$$A_{i} = \max\left[\left(\frac{7}{8}|x_{i}| + \frac{1}{2}|y_{i}|\right), \quad \left(\frac{1}{2}|x_{i}| + \frac{7}{8}|y_{i}|\right), \quad \left(|x_{i}|\right), \quad \left(|y_{i}|\right)\right].$$
(A.8)

Алгоритм ориентирован на упрощение операции деления, которая в данном случае выполняется сдвигом разрядов операндов.

- 153 -

Большая группа алгоритмов для вычисления модуля комплексного сигнала использует предварительную сортировку на максимальное $\max_i = \max(|x_i|, |y_i|)$ и минимальное $\min_i = \min(|x_i|, |y_i|)$ значения из двух модулей квадратурных составляющих. В обобщенном виде эти алгоритмы записываются следующим образом [171]

$$A_i = a \cdot \max_i + b \cdot \min_i, \qquad (A.9)$$

где *a* и *b* заранее определенные константы. После оптимизации с целью получения минимума ошибок аппроксимации получены значения a = 0,9615 и b = 0,3971.

Наиболее простой алгоритм из этой группы имеет вид [174] $A_i = \max_i + 0.5 \min_i$. Упростить операцию умножения в алгоритме (А.9) за счет использования деления только на числа, кратные степени числа 2. Такой подход дает возможность получить [171] семейство алгоритмов: $A_i = \max_i + 0.25 \min_i$; $A_i = \max_i + 0.375 \min_i$; $A_i = 0.875(\max_i + 0.5 \min_i)$; $A_i = 0.9375(\max_i + 0.5 \min_i)$.

Дальнейшее усовершенствование алгоритмов может идти по пути увеличения степени числа 2 в знаменателе, тогда получаем, например, алгоритм

$$A_{i} = \max_{i} - \frac{\max_{i}}{32} - \frac{\max_{i}}{128} + \frac{\min_{i}}{4} + \frac{\min_{i}}{8} + \frac{\min_{i}}{32} = 0,9609375 \max_{i} + 0,40625 \min_{i},$$

который содержит операцию деления только на числа, кратные степени числа 2. Ошибка вычислений по данной формуле не превышает 4,33% во всем диапазоне значений амплитуд сигналов.

После оптимизации по критерию минимизации максимальной погрешности получены значения a = 0,9615 и b = 0,3971, которые обеспечивают точность вычислений 4,03%. Можно считать, что данное значение погрешности является предельным для алгоритмов семейства (А.9). Одним из основных достоинств этих алгоритмов является небольшой уровень вычислительных затрат, которые сводятся к шести операциям: сравнение, извлечение из памяти 2-х констант, 2 умножения и

сложение. В таблице А.3 представлены основные характеристики алгоритмов семейства (А.9), а в таблице А.4 – основные характеристики алгоритмов семейства (А.7). Для оценки точности всех алгоритмов использовались числа из диапазона ±4096, что соответствует числу двоичных разрядов канала 12.

N⁰	Алгоритм приближенных	Макс.	Макс.	Средняя	Средняя	Полная
	вычислении	ошиока, %	ошиока, дБ	ошиока, %	ошиока, дБ	шкала, %
1	$\max_i + 0.5 \min_i$	11,803	0,969	8,847	0,736	111,803
2	$\max_i + 0,25 \min_i$	-11,612	-1,072	-1,507	-0,132	103,078
3	$\max_i + 0,375 \min_i$	6,800	0,571	3,670	0,313	106,800
4	$0,875(\max_{i}+0,5\min_{i})$	-12,500	-1,160	-4,756	-0,423	97,828
5	$0,9375(\max_i + 0,5\min_i)$	-6,250	-0,561	2,046	0,176	104,816
6	$0,9609375 \max_{i} + 0,40625 \min_{i}$	4,328	0,368	1,522	0,131	104,328
7	$0,9615 \max_{i} + 0,3971 \min_{i}$	4,027	0,343	1,193	0,103	104,027

Таблица А.3 – Сравнение характеристик алгоритмов семейства (А.9)

Таблица А.4 – Сравнение характеристик алгоритмов семейства (А.7)

N⁰	Алгоритм приближенных	Макс.	Макс.	Средняя	Средняя	Полная
	вычислении	ошиока, %	ошиока, дБ	ошиока, %	ошиока, дБ	шкала, %
1	m = 4	-2,986	-0,263	-0,615	-0,054	100,778
	$a_1 = b_2 = 0,875; a_2 = b_1 = 0,5;$					
	$a_3 = b_4 = 1; a_4 = b_3 = 0$					
2	m = 4	-1,288	-0,113	-0,012	-0,001	100,645
	$a_1 = b_2 = 0,836836; a_2 = b_1 = 0,559156$					
	$a_3 = b_4 = 0,987116; a_4 = b_3 = 0,19635$					
3	m = 6	-0,572	-0,05	-0,002	-0,0002	100,286
	$a_1 = b_2 = 0,795624; a_2 = b_1 = 0,610503;$					
	$a_3 = b_4 = 0,926523; a_4 = b_3 = 0,383778;$					
	$a_5 = b_6 = 0,994282; a_6 = b_5 = 0,1309$					
4	m = 8	-0,321	-0,028	-0,001	-0,00007	100,161
	$a_1 = b_2 = 0,774254; a_2 = b_1 = 0,635414$					
	$a_3 = b_4 = 0,883340; a_4 = b_3 = 0,472155$					
	$a_5 = b_6 = 0.958479; a_6 = b_5 = 0.290752$					
	$a_7 = b_8 = 0,996785; a_8 = b_7 = 0,098175$					

А.4 Характеристики точности алгоритмов деления

Для диапазона $B \in [B_{\text{мин}}; 1]$ предварительно в качестве начального значения зададим $B_{\text{мин}} = 2^{-7}$, что соответствует интервалу (диапазону) представления выходной величины $1/B \in [1; 128]$. В таблице А.5 представлены полиномы наилучшего приближения 1...3-й степеней обратной величины, соответствующее число операций H(арифметических действий и обращения к памяти) нахождения 1/B, значения абсолютных максимальных значений погрешности аппроксимации $\delta_{\text{м10}}$ (для погрешности в десятичной системы счисления), $\delta_{\text{м2}}$ (для погрешности, приведенной к степени числа два) и относительной погрешности $\delta\%$ по отношению к максимальному значению результата (измеряемой величины) для указанного рабочего интервала $B \in [0,0078125; 1]$.

Таблица А.5 – Полиномы для аппроксимации 1/B на интервале $B \in [2^{-7}; 1]$

Степень полинома <i>П</i>	Полином наилучшего приближения	Н	$\delta_{_{\rm M}10}$	δ _{м2}	δ,%
1	75,75103–127,89308 · <i>B</i>	4	75,75	$1,18 \times 2^{6}$	59,18
2	$87,65261 + B \cdot (-476,01278 + 434,05202 \cdot B)$	7	44,97	$1,41 \times 2^5$	35,13
3	98,35993+ <i>B</i> · (-1010,02233+ <i>B</i> · (2334,11553- 1458,70706 · <i>B</i>))	10	37,39	1,17×2 ⁵	29,21

Для примера рассмотрены три различных интервала аппроксимации $B \in [0,0136;1], B \in [2^{-7};1], B \in [2^{-8};1],$ на которых построены три аппроксимирующих полинома наилучшего приближения, которые обеспечивают примерно равные





максимальные абсолютные погрешности метода аппроксимации δ_{M10} . Алгоритмы и результаты их исследования представлены в таблице А.6. Пример структурной схемы алгоритма деления $1L_2$ и организации вычислений приведен на рисунке А.3.

Таблица А.6 – Комбинированные полиномиальные методы аппроксимации на рабочих интервалах $B \in [0,0136;1], B \in [2^{-7};1], B \in [2^{-8};1]$

Схема аппрок- симации	Подинтервал аппрок- симации	Полином наилучшего приближения	δ _{м10}	δ _{м2}	δ%
		Интервал аппроксимации $B \in [0,0136;1]$			
	[0,11;1]	11,0682865+ <i>B</i> · (-29,5304579+ 20,4781382 · <i>B</i>)	- 1,023 1,023×2 ⁰		
1L ₂	[0,032;0,11]	53,8231443+ <i>B</i> · (-876,6896521+ 4356,1283356 · <i>B</i>)	1,0202	1,021×2 ⁰	1,39
	[0,0136;0,032]	147,8293404+ <i>B</i> · (-6959,8398633+ 104521,7985988 · <i>B</i>)	1,0215	1,022×2 ⁰	
		Интервал аппроксимации $B \in [2^{-7}; 1]$			
	[0,11;1]	$17,10339 + B \cdot (-99,05087 + B \cdot (245,02873 + B \cdot (-266,11109 + 104,28694 \cdot B)))$	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		
1L ₄	[0,025;0,11]	$100,60647+B \cdot (-$ $3771,00325+B \cdot (65912,07329+$ $B \cdot (-540303,56371+1674371,06078 \cdot B)))$	0,262	1,047×2 ⁻²	0,21
	[0,0082;0,025]	$\frac{44.71371 + B \cdot (-787.71024 + B \cdot (6834.59088 + B \cdot (-29214.59559 + 49240.27513 \cdot B)))}{B \cdot (-29214.59559 + 49240.27513 \cdot B)))}$	0,26	1,04×2 ⁻²	
		Интервал аппроксимации $B \in [2^{-8}; 1]$			
	[0,05;1]	$\begin{array}{c} 19,4338149 + B \cdot (-67,87622102 + \\ 53,24222094B) \end{array}$	3,835	5,835 1,917×2 ¹	
2L ₂	[0,011;0,05]	140,73588333+ <i>B</i> · (-5693,01433362+ 67416,25454252 · <i>B</i>)	4,6434 1,16×2 ²		2,07
	[2 ⁻⁸ ;0,011]	478,53397078+ <i>B</i> · (-71298,43848245+ 3321886,88874794 · <i>B</i>)	5,4	1,35×2 ²	
		Интервал аппроксимации $B \in [2^{-8}; 1]$			
2L ₄	[0,072;1]	$\begin{array}{c} 22,35289146 + B \cdot (-156,39443038 + \\ B \cdot (437,46488853 + B \cdot (-515,32269349 + \\ 213,60948117 \cdot B)))\end{array}$	0,716	1,433×2 ⁻¹	
	[0,0135;0,072]	$\frac{172,2601181+B \cdot (-10822,6158672+}{B \cdot (310737,62515622+B \cdot (-4116010,88129398+20355148,526707 \cdot B)))}$	0,738	1,477×2 ⁻¹	0,29
	[2 ⁻⁸ ;0,0135]	$715,7756275 + B \cdot (-195040,47120942 + B \cdot (25305459,5799794 + B \cdot (-1567787183,6558 + 37257419488,2546 \cdot B)))$	0,743	1,487×2 ⁻¹	

Приведенные в таблице А.6 относительные значения приведенных погрешностей б% рассчитываются исходя из максимальных значений результата вычислений на рабочих интервалах аппроксимации.

Таблица А.7 – Полиномы наилучшего приближения для нормированных интервалов $B_{_{\!H}} \in [2^{-4}; 1], [2^{-3}; 1], [2^{-2}; 1], [2^{-1}; 1]$

Степень полинома <i>п</i>	Полином наилучшего приближения		δ_{m2}	δ%				
$B_{\mu} \in [2^{-4}; 1]$								
1	$12,4863279 - 15,9800095 \cdot B$	4,51	$1,13 \times 2^2$	28,2				
2	$16,50072 + B \cdot (-53,7543356 + 40,9497454 \cdot B)$	2,7	1,35×2 ¹	16,9				
3	$\begin{array}{c} 20,5262114 + B \cdot (-109,8147766 + B \cdot (193,8059042 - \\ 105,1439998 \cdot B)) \end{array}$	1,627	1,63×2 ⁰	10,17				
4	$\begin{array}{c} 24,4935845 + B \cdot (-182,0662026 + B \cdot (528,2848524 + \\ B \cdot (-636,847879 + 268,1082354 \cdot B))) \end{array}$	0,973	1,95×2 ⁻¹	6,08				
5	$\begin{array}{c} 28,4788089 + B \cdot (-270,7308786 + B \cdot (1114,605718 + B \cdot (-2180,5763104 + B \cdot (1995,2399836 - 686,6001235 \cdot B)))) \end{array}$		1,18×2 ⁻¹	3,69				
	$B_{H} \in [2^{-3}; 1]$							
1	7,32821-7,99975 · <i>B</i>	1,672	$1,67 \times 2^{0}$	20,9				
2	$10,15205 + B \cdot (-25,80913 + 17,45496 \cdot B)$	0,801	1,61×2 ⁻¹	10,01				
3	$12,9921 + B \cdot (-52,11314 + B \cdot (77,92535 - 38,18651 \cdot B))$	0,382	1,53×2 ⁻²	4,78				
4	$15,8131 + B \cdot (-86,39202 + B \cdot (205,244 + B \cdot (-216,72592 + 83,2434 \cdot B)))$	0,184	1,48×2 ⁻³	2,3				
5	$18,63301 + B \cdot (-128,64353 + B \cdot (422,44963 + B \cdot (-704,56251 + B \cdot (574,42371 - 181,38671 \cdot B))))$		1,41×2 ⁻⁴	1,1				
	$B_{\mu} \in [2^{-2}; 1]$							
1	4,4997951-3,9997148 · B	0,5	1×2^{-1}	12,5				
2	$6,4985376 + B \cdot (-12,4397685 + 7,1075869 \cdot B)$	0,167	1,34×2 ⁻³	4,18				
3	$8,4991304 + B \cdot (-24,9347746 + B \cdot (30,0210506 - 12,6411297 \cdot B))$	5,6×10 ⁻²	1,79×2 ⁻⁵	1,44				
4	$\frac{10,4989885 + B \cdot (-41,4312504 + B \cdot (76,8908126 + B \cdot (-67,4095038 + 22,4694797 \cdot B)))}{B \cdot (-67,4095038 + 22,4694797 \cdot B)))}$	1,9×10 ⁻²	1,19×2 ⁻⁶	0,46				
5	$\frac{12,4992286+B\cdot(-61,929854+B\cdot(155,7521527+B\cdot(-210,1787156+B\cdot(144,7904856-39,9394214\cdot B))))}{210,1787156+B\cdot(144,7904856-39,9394214\cdot B)))}$	6,2×10 ⁻³	1,58×2 ⁻⁸	0,15				
	$B_{\mu} \in [2^{-1}; 1]$							
1	2,9140768-1,999936 · B	8,6×10 ⁻²	1,37×2 ⁻⁴	4,3				
2	$\overline{4,327911+B\cdot(-6,0575532+2,7443454\cdot B)}$	$1,5 \times 10^{-2}$	1,9×2 ⁻⁷	0,74				
3	$5,7424834 + B \cdot (-12,1189092 + B \cdot (11,1416477 - 3,7677489 \cdot B))$	2,6×10 ⁻³	1,3×2 ⁻⁹	0,13				
4	$7,1575713 + B \cdot (-20,1842536 + B \cdot (28,0331508 + B \cdot (-19,1805965 + 5,1745628 \cdot B)))$	4,4×10 ⁻⁴	1,8×2 ⁻¹²	0,02				
5	$8,5709778 + B \cdot (-30,2403627 + B \cdot (56,2196528 + B \cdot (-58,0916875 + B \cdot (31,6402945 - 7,0989488 \cdot B))))$	7,5×10 ⁻⁵	1,23×2 ⁻¹⁴	0,003				

Приложение Б

Уточнение методики достоверной оценки показателей надежности при наличии радиационных эффектов

Б.1 Общая характеристика радиационных эффектов в системах ЦОСиУ и их компонентах

Для рассматриваемой системы цифровой обработки сигналов доминирующие радиацонно-стимулированные эффекты [6А,13А,14А,20А] включают в себя дозовые эффекты (Э1), эффекты Э2–Э4 от воздействия ТЗЧ и ВЭП и эффекты Э5 от совместного действия Э1 и Э2–Э4.

Э1. Специфика дозовых эффектов обусловлена в первую очередь тем, что на длительных САС постоянные процессов старения БИС становятся соизмеримыми с временем набора доз отказа при низкой интенсивности излучений (НИИ) [191]. В этих условиях доза отказа может снижаться за счет ускорения деградации электропараметров активных структур из-за совместного действия процессов радиационной деградации и естественной деградации старения. Модель влияния облучения низкой интенсивности на параметры активных структур [192] базируется на механизме конкуренции процесса накопления объемного заряда в диэлектрике и процессов образования поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник. Отметим, что при снижении проектных топологических норм СБИС и, соответственно, напряжений питания (на нормах 0,25 мк используются напряжения 3,3 и 2,5 В) может усиливаться влияние поверхностных состояний на параметры активных структур. В то же время параллельно процессам образования ионизационных зарядов происходит ИХ релаксация (рассасывание), интенсивность которой возрастает при повышенной температуре в соответствии с моделью [191]. Релаксация ускоряется также в условиях переменных электрических полей при динамическом режиме работы БИС с эффектом увеличения дозы отказа (например, с 30 крад в статике до 80 крад в динамике [193]). В общем случае, в зависимости от особенностей технологического исполнения СБИС, влияющего на конечный итоговый результат, при НИИ облучения можно ожидать как снижения доз отказов (до 3 раз [192]), так и их увеличения (не менее чем в 5 раз) относительно доз

отказа, полученных при испытании с высокой интенсивностью Д_{ви} [191]. Поэтому использование Д_{ви} для расчетов К₃ может привести либо к пропуску СБИС с недостаточной дозовой стойкостью, либо к ложным выводам о заниженности ее уровня [183]. Для условий НИИ [191, 194] кроме прямых дозовых отказов (1-го рода), 2-го рода (пострадиационные эффекты), рассматриваются отказы вызванные накоплением распределенных по диэлектрику точечных зарядов в скрытых технологических дефектах. Таким образом, номенклатура количественных показателей стойкости к дозовым эффектам должна включать не только уровни доз отказов (для расчетов К₃), но и показатели безотказности (для расчетов отказоустойчивости ЦОСиУ), полученные по результатам ускоренных испытаний СБИС. Методика с испытаниями двух партий БИС на различных уровнях излучения позволяет оценить этот параметр, а представленная там же расчетная экстраполяционная модель обеспечивает возможность прогноза достоверных уровней доз отказов и вероятности отсутствия дозовых отказов P^{μ}_{CENC} в реальных радиационных условиях, т.е. при совместном действии радиационных и нерадиационных факторов. Количественно возрастание интенсивности отказов в БИС при наборе дозы базируется [195] на оценке изменения коэффициента радиационного повреждения $K_{\rm P} = \lambda_{\rm P}/\lambda_0$, где λ_0 – частота отказов БИС при отсутствии облучения, $\lambda_{\rm P}$ – при его наличии соответственно. При этом отмечается возрастание К_Р в 4,7 раза при наборе дозы 18 крад и в ~1500 раз при дозе 30 крад. Проведенные испытания с применением разработанных методик [6А,18А] показали, что диапазон доз отказов Д₀ для индустриальных исполнений СБИС на объемном кремнии составляет 10...25 крад. При этом нижняя граница диапазона соответствует отказу по параметрическому критерию, а верхняя – по функциональному. В части стойкости FLASH-ЗУ предельные дозы по функции «стирание-запись» в несколько раз ниже доз по функции «хранение-чтение». В испытаниях с интенсивностью 2...5 рад/с [196] зафиксирована доза отказа 2,7 крад для FLASH-3У емкостью 1 М, что объясняется снижением повышенного напряжения, вырабатываемого встроенным преобразователем при работе в этом режиме, вследствие ускорения деградации параметров высоковольтных транзисторов [197].

Э2. К необратимым последствиям в виде катастрофических отказов могут приводить эффекты радиационного защелкивания, вызванные включением паразитных тиристорных структур в комплементарных каскадах при попадании в чувствительные объемы (ЧО) тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) [182] с замыканием цепочек питания.

Параметрами чувствительности по тиристорному эффекту (ТЭ) являются: пороговая величина линейных потерь энергии (ЛПЭ) – L_т в размерности МэВ·см²/мг и сечение насыщения $\sigma_{\rm T}$ в размерности см²/БИС. Для индустриального исполнения СБИС параметры чувствительности к ТЭ по данным [198, 199] составляют: для микропроцессоров с топологическими нормами ~0,5мкм – L_т /σ_т = 10/0,001 (с соответствующими размерностями), а для СБИС ЗУ (ОЗУ, FLASH и ДОЗУ) с емкостями 1...64 М – $L_{\rm T}$ > 40 МэВ·см²/мг. В то же время при исследовании отдельных СБИС обнаружен более низкий уровень L_т до 14 МэВ·см²/мг для МП [200], а при испытаниях на установке «Калифорний-252» двух разных по технологическим исполнениям СБИС ОЗУ на нормах 0,25 мкм емкостью 4 М зафиксированы как повышенная чувствительность с $L_{\rm T}$ / $\sigma_{\rm T}$ = 9,1/0,00344, так и отсутствие ТЭ с гарантией нижней границы порога $L_{\rm T} > 15$ МэВ·см²/мг (в СБИС по технологии с «градированным карманом»). Необходимо учитывать также, что повышенная температура эксплуатации СБИС (t_2) может в 10 раз уменьшать уровень L_{τ} [201]. Влияние снижения топологических норм СБИС на параметры $L_{\rm T}/\sigma_{\rm T}$ неоднозначно, поэтому в общем случае чувствительность к ТЭ будет определяться комплексом факторов – не только топологией, но и особенностями технологического исполнения СБИС. Возможность ТЭ непосредственно от ВЭП в [182] мало вероятна, хотя в работе [202] для обобщенной модели рассматривается ТЭ от воздействия вторичных ионов кремния при $L_{\rm T} \leq 15$ МэВ·см²/мг. Учет ТЭ актуален для аппаратуры КА с длительными САС, на которых даже при малых уровнях средних плотностей потоков ТЗЧ ГКЛ и СКЛ с энергией $L > L_{\rm T}$ [182] интегральный поток ТЗЧ существенно влияет на показатель безотказности СБИС по ТЭ – вероятность P^{T}_{CEUC} .

ЭЗ. Основным доминирующим классом обратимых отказов являются сбои от воздействия ТЗЧ и ВЭП [182]. В ячейках накопителей СОЗУ и ДОЗУ последствия устраняются перезаписью, в КЭШ МП и в памяти RISC и DSP ядер сигнального микроконтроллера (СМК) [189] – перезапуском вычислительного процесса. По параметрам чувствительности к одиночным сбоям от ТЗЧ и ВЭП СБИС ЗУ для индустриальных исполнений следует отметить [182]:

• существенно более высокую, по сравнению с СОЗУ и ДОЗУ, устойчивость FLASH-ЗУ к ТЗЧ по пороговой энергии сбоя *L*_c и нечувствительность к ВЭП;

 повышенную чувствительность ДОЗУ по сравнению с СОЗУ как по параметрам чувствительности к ТЗЧ (порогам L_c и удельным (на бит) сечениям насыщения σ_c), так и по параметрам чувствительности к ВЭП (пороговой энергии сбоя от протонов E_p (МэВ) и сечению насыщения σ_p).

Параметры чувствительности СОЗУ и ДОЗУ по сбоям от ТЗЧ определены в [182] в следующих диапазонах: $L_c = 1...5 \text{ M} \Rightarrow \text{B} \cdot \text{сm}^2/\text{мr}$, $\sigma_c = 10^{-6}...10^{-8} \text{ cm}^2/\text{бит} - \text{по CO3Y}$; $L_c = 1...3 \text{ M} \Rightarrow \text{B} \cdot \text{сm}^2/\text{мr}$, $\sigma_c = 10^{-5}...10^{-7} \text{ cm}^2/\text{бит} - \text{по ДОЗУ}$. Практическе значения параметров чувствительности для СОЗУ с емкостями 1...4M на нормах 0,25...0,35 мкм, полученные при экспериментальных исследованиях, удовлетворяли условиям: $L_c \ge 2 \text{ M} \Rightarrow \text{B} \cdot \text{сm}^2/\text{мr}$ и $\sigma_c < 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{бит}$. Дополнительно необходимо отметить, что чувствительность к ТЗЧ по уровню нижней границы $L_c = 2 \text{ M} \Rightarrow \text{B} \cdot \text{сm}^2/\text{мr}$ сохраняется и для радиационно стойких исполнений СОЗУ и ДОЗУ [203] с \mathcal{A}_0 до 100 крад и высокими порогами тиристорного эффекта: $L_T = 68 \text{ M} \Rightarrow \text{B} \cdot \text{cm}^2/\text{мr}$ для СОЗУ и $L_T > 80 \text{ M} \Rightarrow \text{B} \cdot \text{cm}^2/\text{мr}$ для ДОЗУ.

Кроме одиночных сбоев, в ОЗУ с многоразрядной организацией возможны и кратные сбои из-за воздействия ионизационного заряда от ТЗЧ одновременно на близкие чувствительные объемы запоминающих ячеек накопителей. Этот факт экспериментально подтвердился при испытаниях СОЗУ 1637РУ1 (норма 0,35 мкм) на установке «Калифорний-252» [14А]. Кроме одиночных сбоев с параметрами $L_c / \sigma_c =$ $3.5/0.3 \cdot 10^{-6}$ были зафиксированы двойные и тройные сбои с параметрами $L_{\rm nc}/\sigma_{\rm nc} = 17,5/0,25 \cdot 10^{-6}$ и количеством до 35% от общего числа всех сбоев в СОЗУ. Эффекты двойных сбоев необходимо учитывать не только при разработке средств аппаратной защиты внешней памяти, но и еще на стадии проектирования стойких и сбоеустойчивых исполнений МП-КнИ и СМК с введением внутренних механизмов защиты. При снижении топологических норм реализации ОЗУ и ВП можно ожидать уменьшения критических зарядов чувствительных объемов запоминающих ячеек и топологического сближения ЧО соседних ячеек, что в совокупности может привести к падению L_c и L_{дc}, а также к росту σ_{dc} . На увеличение чувствительности к сбоям дополнительно может повлиять повышенная локальная температура кристаллов СБИС при эксплуатации (t_3) , в первую очередь, чувствительности к сбоям ВП, так как наиболее существенное повышение t_3 , (не менее 65°С) возможно в СБИС МП и СМК, функционирующих непрерывно в активном динамическом режиме с энерговыделением не менее 2 Вт в МП и не менее 3 Вт в СМК на рабочих частотах 24...160 МГц при ограничении теплоотвода от СБИС кондуктивным способом.

Э4. К последствиям в виде временных отказов ячеек СОЗУ и ДОЗУ большой емкости, не устраняемых перезаписью, могут приводить одиночные микродозовые (МД) эффекты [182, 205]. Такие эффекты связаны с выделением энергии в чувствительном объеме активной структуры ячейки при попадании ТЗЧ или ВЭП с последующим локальным «дозовым» отказом ячейки («залипанием бита») и восстановлением работоспособности после длительной выдержки в резерве (от нескольких часов до месяцев). МД-эффект характерен, преимущественно, для ячеек ДОЗУ [205-208]. При этом в [181] отмечается аналогичная эффектам Э2 и Э3 тенденция увеличения чувствительности при снижении топологических норм и рабочих напряжений питания. В [206] приведены параметры эффекта в СБИС ДОЗУ емкостью 64 М от ЛПЭ ТЗЧ: порог чувствительности – $L_{\rm M}$ составил 6 МэВ·см²/мг, сечение насыщения $\sigma_{\rm M}$ – 10⁻⁵ см²/СБИС. Для оценки последствий МД-эффектов не менее важно значение времени релаксации локального заряда, после которого восстанавливается работоспособность, так как даже при сравнительно малой интенсивности этих эффектов при указанном сечении их накопление при длительной релаксации может привести к потере работоспособности ДОЗУ. Возможности используемой аппаратной и/или алгоритмической защиты от сбоев должны обеспечивать превышение времени релаксации.

Э5. При натурной эксплуатации на ЦОСиУ одновременно воздействуют различные факторы космического пространства – потоки электронов и протонов, вызывающие дозовые эффекты Э1, и потоки ТЗЧ и ВЭП, инициирующие одиночные эффекты Э2 – Э4. При длительных САС, как отмечается в работе [185], необходимо учитывать совместное действие этих факторов, которое может приводить к синергетическим эффектам, не сводящимся к простому суммированию независимых эффектов и ускоряющим процессы деградации параметров чувствительных объемов элементарных структур СБИС. В качестве конкретного примера в [207] приведена зависимость интенсивности Э4 («залипания битов») от поглощенной дозы по Э1, подтверждаемая В исследовании [206] при воздействии ВЭП. Увеличение интенсивности отказов по Э4 по сравнению с дозой по Э1 связано, по-видимому, с воздействием локального ионизационного заряда на снижение порога L_м, вследствие

чего возрастает поток частиц, способных вызвать этот эффект. Аналогичные электрофизические механизмы могут иметь место и в части влияния дозы на снижение порогов $L_{\rm T}$ (по Э2) и $L_{\rm c}$ (по Э3) с последствиями в виде повышения интенсивности тиристорных отказов и частоты сбоев. Степень этого влияния, существенно зависящая от особенностей технологического исполнения СБИС, должна определяться при испытаниях СБИС на стойкость к одиночным эффектам с получением реальных порогов чувствительности по Э2 – Э4 с учетом Э1 для повышения достоверности оценок показателей отказо- и сбоеустойчивости.

Б.2 Уточнение методики достоверной оценки показателей надежности

Проведенный анализ надежности различных архитектур бортовых кластеров ЦОС по обобщенным показателям надежности не давал представления о степени важности отказов, насколько они катастрофичны для аппаратуры. Очевидно, что для описания обратимых и необратимых отказов необходимо воспользоваться вероятностными характеристиками. Расчет вероятности отсутствия необратимых отказов в бортовой системе ЦОСиУ P^{HO}_{EK} должен осуществляться с применением аналогичной вероятности для СБИС, вычисляемой по формуле $P^{HO}_{CEUC} = P^{T}_{CEUC} P^{T}_{CEUC}$, в которой P^{T}_{CEUC} и P^{T}_{CEUC} соответствуют вероятностям отсутствия отказов по дозовым эффектам Э1 и по тиристорным эффектам Э2. Влияние отказов сбойного характера на показатели надежности бортового компьютера (БК) следует рассматривать (с учетом ГОСТ [212]) для двух классов применения БК по последствиям отказов сбойного характера с учетом ответственности назначения в составе ЦОСиУ.

1. Классу критичных применений соответствует использование БК в подсистемах ЦОСиУ длительного действия, предназначенных для непрерывной поддержки функций жизнеобеспечения КА, выполнение которых из-за отказа сбойного характера может иметь катастрофические последствия для аппарата, вплоть до его потери. В этом классе показатель вероятности безотказной работы БК следует рассчитывать по формуле $P_{\rm 5K} = P_{\rm 5K}^{\rm HO} P_{\rm B}^{\rm CAC}$, в которой $P_{\rm B}^{\rm CAC}$ вычисляется с учетом значений $P_{\rm B}^{\rm 3y}$ на всех периодах действия экстремальных радиационных условий за САС, т.е. на ГСО и ВЭО – на всех солнечных вспышках, а на ВЭО – дополнительно на всех периодах действия ВЭП РПЗ.

2. К классу некритичных применений следует относить использование БК в подсистемах ЦОСиУ, для которых отказ сбойного характера не является

катастрофическим и может привести лишь к снижению эффективности целевой работы, определяемой комплексным (системным) показателем, задаваемым на уровне ЦОСиУ, а именно коэффициентом сохранения эффективности $K_{\rm эф}$ [212]. К данному классу, в частности, также могут относиться БК в аппаратуре с циклическим (сеансным) характером работы, при этом показатель $P_{\rm B}^{\rm CAC}$ должен вычисляться только на тех периодах экстремальных условий, для которых задано требование обеспечения работоспособности.

Допустимый уровень снижения $P_{\rm B}^{\rm CAC}$ ограничивается минимальным значением $K_{\rm 3\phi}$, соответствующего предельному состоянию ЦОСиУ, при котором дальнейшая эксплуатация КА нецелесообразна. В качестве примера некритичных отказов сбойного характера следует отметить результаты натурной эксплуатации БК в составе ЦОСиУ КА двойного назначения «АРКОН» [215], в которых в период с 27.07.2002 по 10.08.2003 в качестве последствий отказов сбойного характера были зафиксированы 25 нештатных ситуаций (НС). Для парирования этих ситуаций потребовалось применение восстановления БК командами с Земли, при этом перерывы в целевой работе составили от 2 до 10 ч. По результатам анализа телеметрической информации причиной нештатных ситуаций были непарируемые сбои ОЗУ БК.

Использование рассмотренной методики достоверной оценки показателей надежности позволит повысить качество проектирования высоконадежных БК с применением СБИС. Это особенно актуально для КА с длительными САС, действующих в составе орбитальных группировок. Кроме того, так как методика учитывает радиационные факторы, эти показатели могут быть использованы в качестве количественных критериев радиационной стойкости БК в дополнение к традиционному показателю запаса по поглощенной дозе.

Автором разработаны рекомендации [4А] по выбору номенклатуры ЭРИ, которые обеспечивают заданные требования к показателям надежности в условиях жестких ограничений на массу, габариты и энергопотребление блоков в КА и соответствуют требованиям индустриального диапазона стойкости [6А, 19А, 217]. В блоках ЦОС применяются ЭРИ следующих технологических исполнений: КМОП, БиКМОП, биполярных (БП) исполнений, смешанных БиКМОП-исполнений и N-МОП исполнений. В частности, номенклатура дискретных ЭРИ КМОП и БиКМОП исполнений включает высокоинтегрированные СБИС (процессоры, контроллеры, статические и динамические

ОЗУ, FLASH-ЗУ программной памяти, программируемые вентильные матрицы со встроенной FLASH-памятью задания рабочей конфигурации и т.д.) с субмикронными топологическими нормами в диапазоне 0,13...0,6 мк и стойкостью к ионизационным эффектам от 5 до 20 крад. Номенклатура ЭРИ биполярных и смешанных исполнений включает также аналого-цифровые преобразователи (АЦП), операционные усилители (ОУ), преобразователи постоянных уровней напряжения и биполярные транзисторы (БТ) п-р-п- и р-п-р-типов, используемые в линейных и ключевых режимах, со стойкостью к ИЭ от 10 до 50 крад.

При испытаниях в группе ОУ выявлено как снижение стойкости в 8,6 раз при $D_{\gamma} = 10$ крад, CM = 25/0,001 и входном каскаде на БТ *p-n-p*-типа [218], так и увеличение стойкости и в 3 раза при $D_{\gamma} = 40$ крад, CM = 28/0,008 и входном БТ *n-p-n*-типа [219]. В группе компараторов отмечается как отсутствие влияния P_{μ} на стойкость при $D_{\gamma} = 10$ крад, CM = 50/0,02 и входном БТ *n-p-n*-типа [220,221], так и значительное снижение стойкости в 17 раз при $D_{\gamma} = 40$ крад, CM = 28/0,008 и входном БТ *p-n-p*-типа [219]. По БТ, применяемых в ключевых режимах, в [221] зафиксировано отсутствие влияния P_{μ} , на стойкость при $D_{\gamma} = 10$ крад, CM = 50/0,02, но это не исключает возможности влияния интенсивности излучений на стойкость других технологических исполнений БТ.

Снижение стойкости ЭРИ при низкой интенсивности излучений может компенсироваться увеличением стойкости от следующих факторов эксплуатации, приведенных в [19А]. Во-первых, при штатной эксплуатации блоков ЭРИ могут функционировать как преимущественно в динамическом режиме, так и при определенном соотношении статических и динамических фаз работы. Для КМОП ИС получены экспериментальные данные по увеличению дозы отказа с 30 крад в статике до 80 крад в динамике. Во-вторых, рабочий участок витка ВЭО, на котором необходимо выполнение целевой задачи, ограничен и составляет по времени приблизительно половину длительности всего витка в области апогея, что допускает возможность выключения питания всех или части блоков ЦОС на нерабочих участках. В-третьих, для блоков, взаимодействующих с аппаратурой радиосвязи, реальное соотношение периодов рабочих сеансов связи и нерабочих периодов может быть значительно ниже. Увеличение стойкости ЭРИ в сеансовых режимах функционирования блоков, отмеченное в [222], обусловлено тем, что накопление зарядов при выключенном питании происходит медленнее в условиях отсутствия постоянных электрических полей, имеющих место в статическом режиме ЭРИ при включенном питании на нерабочих участках и препятствующих их релаксации.

В [6А] проведен анализ предлагаемых в [223] четырех методов ускоренных испытании на стойкость к НИИ с обоснованием ограничений трех методик зачетного типа и целесообразности применения методики определительных испытаний МОП и БиКМОП ЭРИ с использованием процедуры поэтапного циклического «облученияотжига». При реализации этой процедуры в условиях согласованного выбора параметров отжига (температуры и длительности), а также электрических режимов работы достигается возможность адекватного определения уровней стойкости, учитывающих влияние всех факторов эксплуатации.

В большинстве случаев для определения показателей стойкости вместо прямых испытаний ЭРИ на воздействие протонов и электронов использовались более доступные имитационные установки стационарного гамма- или рентгеновского облучения [224] с пересчетом полученных у-доз отказа. Способ расчета [183] основан на пересчете ЭРИ стойкости к нейтронам с помошью фиксированного коэффициента эквивалентности. Предварительные оценки коэффициента эквивалентности K_{зр}^{стр} показали для ряда ЭРИ блоков ЦОС значительные отличия результатов применения двух способов его расчета. Поэтому предложены и рассмотрены дополнительные испытания блоков на стойкость по дозовым эффектам (ДЭ). При наличии нерадиационностойких ЭРИ блок подлежит доработке вплоть до замены этих ЭРИ на более стойкие аналоги или для них вводится дополнительная пассивная защита, снижающая локальную дозу. Рассмотренные условия требуют уточнения по следующим причинам. Во-первых, для принятия обоснованного решения о доработке необходима замена их приближенных оценок по справочным данным на уточненные оценки по фактическим уровням стойкости. Во-вторых, критериальное условие необходимости дозовых испытаний – наличие ЭРИ с $K_3 < K_3^{T3}$ – требует уточнения в зависимости от используемых при расчетах исходных данных по стойкости.

Наряду с уточнением нормативных условий проведения дозовых испытаний блоков целесообразно рассмотреть соответствующие ограничения достоверности их результатов с применением рекомендуемых в [183] имитационных методик гамманейтронных облучений для оценки стойкости к эффектам ионизации и структурным эффектам, соответственно. Эти ограничения обусловлены разбросом локальных радиационных условий эксплуатации ЭРИ в составе блоков, отсутствием поглощения потоков этих облучений пассивной защитой блоков, возможности обеспечения штатных электрических режимов функционировании блоков до завершения набора испытательных доз, влиянием на стойкость интенсивности облучения и рядом других условий [183, 6А].

Для испытаний по стойкости к структурным эффектам при нейтронном облучении сохраняется ряд ограничений, обусловленных отсутствием поглощения потока нейтронов пассивными средами блоков и разбросами локальных доз ЭРИ от протонов, близкими к разбросам $D_{сум}$. Это подтверждается результатами расчетов по программе «PROTON-3D» [225] протонных компонент D_p , достигающих 90 % $D_{сум}$ для ряда ЭРИ блоков.

Отдельного рассмотрения требуют испытания блоков, в которых осуществляются преобразования аналоговых сигналов в код с заданными погрешностями. В трактах этих преобразований работают по несколько ЭРИ и общая их погрешность определяется совместной дозовой деградацией соответствующих аналоговых параметров ЭРИ в реальных условиях их схемного включения и может наиболее адекватно оцениваться только при испытаниях в составе блоков. Необходимость оценки совместной деградации параметров ЭРИ в составе блоков распространяется ещё на блоки линий связи, включающих тракты приема и преобразования в код с погрешностью 1 % аналоговых сигналов постоянных напряжений, поступающих с датчиков (раздел 2).

При определении норм испытаний резервированных блоков следует учитывать реальное использование каналов резерва при эксплуатации. В мажорированном бортовом компьютере все три канала используются одновременно и их нормы испытаний должны определяться по результатам расчётной оценки доз по наиболее нагруженным ЭРИ. В таких условиях работоспособность каждого из каналов должна обеспечиваться на половине САС КА.

Использование рассмотренных выше уточнений и ограничений применения нормативных требований при расчётной поэлементной и экспериментальной оценках стойкости блоков по дозовым эффектам позволит:

 повысить достоверность оценки и избежать наиболее опасных последствий в виде преждевременных отказов блоков ЦОСиУ при штатной эксплуатации на орбите изза пропуска нестойких ЭРИ; • обоснованно подтвердить в ряде случаев допустимость применения при указанном диапазоне локальных доз ЭРИ индустриального уровня стойкости из реально доступной номенклатуры ограниченной стоимости;

• исключить ложные заключения по признанию стойких ЭРИ нестойкими;

• гарантированно обосновать необходимость замены ЭРИ на более стойкие исполнения в случае невозможности обеспечения стойкости с помощью локальной защиты;

• определить целесообразность проведения испытаний блоков с использованием гамма- и нейтронного излучений с учетом возможности получения достоверных результатов.

При принятии решений по допустимости применения ЭРИ в блоках ЦОСиУ необходимо учитывать рассмотренные в [6А] различные радиационно-стимулированные эффекты необратимых отказов: отказы в ЭРИ МОП-исполнений от воздействия ТЗЧ (эффект Э2) и снижение безотказности ЭРИ вследствие ускорения деградации электропараметров активных структур при совместном лействии процессов естественного старения и излучений на длительных САС КА (7 и 10 лет). Проведена оценка стойкости к тиристорному эффекту (ТЭ) от ТЗЧ для основных КМОП ЭРИ, используемых в блоках ЦОС. По результатам экспериментальных исследований для большинства ЭРИ этого класса получены пороговые значения линейных потерь энергии менее 15 МэB·см² [4A, 6A].

Кроме эффектов катастрофических отказов от ТЭ, рассмотрены другие последствия от воздействия ТЗЧ и возможности их парирования. В СБИС сигнальных процессоров ТЭ не приводит к отказу, но его устранение требует выключения питания и последующего его включения средствами внешнего управления. В микросхемах перепрограммируемой памяти на технологии FLASH в [226] выявлен эффект функционального сбоя от ТЗЧ с включением режима стирания памяти. Полученные при испытаниях пороговые значения L_0 позволили уточнить допустимость принятия положительного решения по применению ЭРИ с $L_0 \ge 60$ МэВ·см²/мг.

Для отбраковки ЭРИ предусматриваются ускоренные испытания двух выборок ЭРИ на разных мощностях облучения. При допущении в [4A,6A] о зависимости снижения безотказности ЭРИ преимущественно от процессов поверхностной ионизации обосновано применение для этих выборок циклических процедур поэтапного

-168 -

«облучения-отжига». В этом случае достигается также возможность совмещения этих двух видов испытаний и соответствующая экономия затрат.

Очевидно, что рассмотренные дополнительные испытания «критичных» ЭРИ по стойкости к ДЭ, ТЭ от ТЗЧ и эффектам СБ требуют соответствующих затрат, однако, общий объем этих затрат несопоставимо меньше цены отказа БА КА на этапе натурной эксплуатации. Отметим, что одной из наиболее вероятных причин потери трех КА «Монитор», «КазСат» и «Персона», по мнению экспертов, является выход из строя радиоэлектронной аппаратуры с применением ЭРИ, принципиально не предназначенных для работы в условиях радиационных воздействий космического пространства и поставляемых без соответствующей сертификации этих ЭРИ по условиям эксплуатации КА на длительных САС.

Приложение В

Алгоритмы взаимного информационного согласования

В.1 Алгоритм А6 взаимного информационного согласования (ВИС)

В качестве *s*-сбоеустойчивого алгоритма ВИС, предназначенного для использования в *r*-м (r = 1, ...) цикле алгоритма ССД-3, предлагается следующий алгоритм А6, в котором используется алгоритм А2 ВИС [164] в предположении, что, если модуль цифровой обработки сигналов (МОС) M_i не передает в процессе ВИС некоторое согласуемое значение, то соответствующее вычисленное алгоритмом А2 согласованное значение будет равно специальному значению NIL.

Все обозначения сбоев, отказов, согласованных значений и др., заключенные в круглые скобки с верхним индексом r, отображают соответствующие объекты, относящиеся к r-му циклу системного самодиагностирования (ССД). Так, через (ВИС)^r обозначается процесс ВИС, выполняемый в r-м цикле ССД, через (M_i^k)^r – сбой МОС M_i , проявившийся в искажении информации, переданной ею в k-м раунде (ВИС)^r, через (O_j^k)^r – сбой передающего УС О_i в k-м раунде (ВИС)^r, через (M_i)^r – программный сбой МОС M_i , а через (O_i)^r – отказ передающего УС, идентифицированные в r-м цикле ССД. В качестве критерия программного сбоя M_i (отказа O_i) примем проявление более чем 5 сбоев в двух смежных циклах ССД.

Алгоритм А6 имеет вид:

1. В первом раунде (ВИС)^{*r*} каждый M_i (*i* = 1, ..., *n*) передает всем другим МОС собственное значение согласуемой информации и получает от них их значения. В каждом из раундов 2, ..., 2s + 1 каждый M_i передает еще раз собственное значение согласуемой информации, а также всю информацию, полученную в предыдущем раунде. В каждом из раундов 2s + 2, ..., 2s + 1 + m каждый M_i передает всю информацию, полученную в предыдущем раунде.

2. Для каждого i = 1, ..., n и каждого k = 1, ..., 2s + 1 при помощи алгоритма A2 ВИС определяются все согласованные значения $(C_i^k)^r$, $(C_{i,j}^k)^r$, ..., (j = 1,...,n), которые могут быть определены по результатам пересылок на шаге 1. Значение согласованного элемента $(C_i)^r$, соответствующего *i*-му МОС в векторе ВИС, находится путем мажорирования всех значений $(C_i^k)^r$ (k = 1, ..., 2s + 1). При невозможности мажорирования (из-за отсутствия равенства хотя бы s + 1 различных значений $(C_i^k)^r$) элементу $(C_i)^r$ приписывается значение NIL.

3. Для каждого $(C_i)^r =$ NIL подозреваемая область неисправностей будет $(M_i)^r$ V $(O_i)^r$. Для каждого $(C_i^k)^r \neq$ NIL, такого, что $(C_i^k)^r \neq (C_i)^r \neq$ NIL, подозреваемая область неисправностей будет $(M_i^k)^r$ V $(O_i)^r$. Для каждого $(C_{\dots,i}^k)^r =$ NIL (многоточие обозначает последовательность индексов длиной v = 0, ..., 2s) – подозреваемая область $(M^{k+v})^r$ V $(O^{k+v})^r$. Для каждого $(C_{\dots,i,j}^k)^r$ \neq NIL такого, что $(C_{\dots,i,j}^k)^r \neq (C_{\dots,i}^k)^r$ \neq NIL (многоточия обозначают одинаковую последовательность индексов длиной v = 0, ..., 2s) – подозреваемая область $(O_i^{k+v})^r$ V $(M_j^{k+v+l})^r$ V $(O_j^{k+v-1})^r$.

4. Строится конъюнкция $(L)^r$ из всех логических выражений подозреваемых областей, найденных на третьем шале, которая преобразуется к виду дизъюнкции конъюнкций ($\Sigma\Pi$). В каждом терме выполняются упрощения типа $(M^k_i)^r (M^k_i)^r = (M^k_i)^r$, $(O^k_i)^r (O^k_i)^r = (O^k_i)^r (O^k_i)^r = (O^k_i)^r$. Из $\Sigma\Pi$ исключаются все термы, каждый из которых включает обозначения неисправностей более чем *m* различных элементов системы, в результате чего в $\Sigma\Pi$ остаются только термы, каждый из которых состоит из обозначений неисправностей не более чем *m* различных элементов системы. Если в терме имеется более *s* обозначений сбоев одного и того же элемента с различными обозначениями раундов, то все они заменяются на обозначение программного сбоя или отказа соответствующего элемента.

Конец алгоритма А6.

В.2 Алгоритм системного самодиагностирования ССД-3

Сбои по характеру проявления можно разбить на два типа: 1) сбои с произвольным, но отличным от правильного проявлением; 2) сбои с однозначным проявлением. К сбоям первого типа относятся «враждебные» сбои *O_i* при передаче результата проверки в проверяющие МОС или при выполнении ВИС, сбой МОС при формировании собственного ЛСП. Сбоями второго типа являются сбои МОС при выполнении задаваемых проверок.

Отрицательный результат проверки при отсутствии других проявлений неисправностей должен быть однозначно зафиксирован всеми проверяющим МОС. И если этого нет, т.е. хотя бы один проверяющий МОС зафиксировал отрицательный результат и хотя бы один другой – положительный, то это значит, что в случае

действительного существования отрицательного результата проверки проверяемого МОС в системе в проверяемым МОС и/или проверяющим МОС, не зафиксировавшей отрицательный результат проверки, случилось, по крайней мере, еще одно проявление неисправности, предотвратившее или скомпенсировавшее (нейтрализовавшее) фиксацию отрицательного результата в проверяющем МОС. Назовем описанную ситуацию условием компенсации. Предположим, что *i*-й МОС проверяют *j*-й и *p*-й МОС. Если *і*-й МОС зафиксировал отрицательный результат проверки *і*-й МОС, а *р*-й – не зафиксировал, то это значит, что компенсация произошла при передаче результата из *i*-го в *p*-й МОС из-за сбоя *O_i*, или при формировании собственного ЛСП из-за сбоя в *p*-м МОС, или из-за более чем *s* сбоев O_p в процессе ВИС. Это условие должно учитываться в случаях, когда предполагается возникновение сбоя *i*-й МОС при выполнении ею предписанных проверок.

Алгоритм ССД-3 *г*-го цикла ССД, выполняемого *i*-м МОС (*i* = 1, ..., *n*), имеет шаги с первого по третий, совпадающие с соответствующими фазами приведенного выше состава цикла ССД. Эти шаги являются отдельными ЭКД данного алгоритма с соответствующими номерами.

Последующие шаги алгоритма ССД-3 имеют вид:

4. Взаимообмен собственными ЛСП при помощи алгоритма А6 ВИС. При обнаружении проявлений неисправностей в процессе ВИС строится логическое выражение (*L*)^{*r*} подозреваемой области неисправностей, в котором каждый верхний индекс *v*, обозначающий номер раунда ВИС, заменяется индексом *v* + 3, отображающим номер ЭКД. Если цель ССД достигнута, то конец алгоритма.

5. Формирование ГСП из всех СЛСП. Если в ГСП признаков неисправности не имеется, форматы всех СЛСП правильны и отсутствует выражение $(L)^r$, то r := r + 1 и осуществляется переход к первому шагу. Если в ГСП признаков неисправности не имеется, форматы всех СЛСП правильны и имеется выражение $(L)^r$, то $(K)^r := (L)^r$ и производится переход к шестому шагу. Если в ГСП имеется хотя бы один признак неисправности или формат хотя бы одного СЛСП не соответствует правильному формату (например, в этом СЛСП имеется хотя бы один признак, не равный признакам исправности или неисправности), то строится выражение подозреваемой области неисправностей $(K)^r$ следующим образом. Для каждого признака неисправности, соответствующего проверке *j*-го МОС со стороны *p*-го МОС, каждого СЛСП

формата строится логическое выражение подозреваемой области правильного неисправности $(M_i^1)^r$ V $(O_i^2)^r$ V $(M_p^3)^r$ V $(O_p)^r$. Для каждого *j*-го СЛСП неправильного формата строится логическое выражение подозреваемой области неисправностей $(M_i^3)^r$ $V(O_i)^r$. Строится конъюнкция $(K)^r$ всех полученных выражений подозреваемой области неисправностей и выражения $(L)^r$, если оно имеется. Для каждой *j*-й вершины графа проверок, имеющей несколько входных дуг таких, что среди приписанных им значений имеются как нулевой, так и единичный результат, выполняются следующие преобразования: каждый терм полученного выражения, содержащий сбой $(M_i^{1})^r$, логически умножается на конъюнкцию выражений $(O_i^2)^r \vee (M_p^2)^r \vee (O_p)^r$, каждое из которых взаимно однозначно соответствует одной из дуг, идущей из p-й (p = 1, ..., n) в *i*ю вершину и имеющей нулевое значение. Причем каждой такой дуге соответствует одно такое выражение. Этим учитываются отмеченные выше возможные условия компенсации неисправностей. Над полученным выражением $(K)^r$ выполняются преобразования, аналогичные преобразованиям на четвертом шаге алгоритма Аб. Если цель ССД достигнута, то конец алгоритма.

6. Если выражения $(K)^r$ и $(K)^{r-1}$ имеются, то в соответствии с принятым критерием программного сбоя МОС и отказа O_i строится конъюнкция выражений $(K)^r$ и $(K)^{r-1}$, над которой выполняются преобразования, аналогичные преобразованиям на четвертом шаге алгоритма А6. Если цель ССД достигнута, то конец алгоритма. Иначе r:= r + 1 и переход к первому шагу.

Конец алгоритма ССД-3.

В.3 Алгоритм А7 взаимного информационного согласования

Существуют следующие различные варианты формирования подозреваемой области неисправностей при первом виде проявлений неисправностей:

а) невыдача сообщения из МОС M_i в раунде k. В этом случае все согласованные значения МОС, соответствующие согласуемым значениям из данного сообщения, передаваемого в раунде k, будут равны значению P, согласованное значение текущего признака выдачи $(V_i^k)^r$ будет равно 1, а подозреваемая область неисправности будет $(M_i^k)^r \vee (O_i^k)^r$;

б) $(C_i^k)^r \neq (C_i)^r$, $(C_i^k)^r \neq$ NIL, $(C_i)^r \neq$ NIL. Логическое выражение подозреваемой области: $(M_i^k)^r \vee (O_i^k)^r$;

в) $(C^{k}_{...,i})^{r} \neq (C_{...,ij})^{r}, (C^{k}_{...,i})^{r} \neq \text{NIL}, (C_{...,ij})^{r} \neq \text{NIL}$ или $(V^{k}_{...,i})^{r} \neq (V_{...,ij})^{r}, (V^{k}_{...,i})^{r} \neq \text{NIL},$ $(V_{...,ij})^{r} \neq \text{NIL},$ где многоточиями в каждом неравенстве обозначается одинаковая последовательность индексов длиной *q*. Логическое выражение подозреваемой области: $(O_{i}^{k+q})^{r} \vee (M_{j}^{k+q+1})^{r} \vee (O_{j}^{k+q+1})^{r};$

г) значение $(C^{k}_{...,i})^{r}$ или хотя бы один признак $(V^{k}_{...,i})^{r}$, входящий в составное согласованное значение, равно NIL. Если многоточие в обозначениях определяет последовательность индексов длиной $q \ge 0$, то логическое выражение подозреваемой области неисправностей будет $(M_{i}^{k+q})^{r} (O_{i}^{k+q})^{r} \vee (O_{i}^{k+q})^{r};$

д) для неопределенного значения $(C_i)^r$: для каждого $(C_i^k)^r = NIL$ строится выражение вида (г); для значений $(C_i^k)^r \neq NIL$, если имеется d пронумерованных групп согласованных значений $(C_i^k)^r \neq NIL$ (k=1,...,2s+1), в каждой из которых значения $(C_i^k)^r$ одинаковы и число элементов в j-й (j = 1,...,d) группе равно q_j , то предполагается, что значение согласованных значений из группы с наибольшим q_j является правильным, все значения согласованных значений других групп неправильные и для каждого согласованного значения $(C_i^k)^r$ с неправильным значением строится выражение вида (б); формируется конъюнкция всех построенных выражений.

Неисправности третьего вида (ошибки МОС при обработке полученной в процессе взаимообменов информации), проявившиеся в раундах 1,...,2*s*+1, могут приводить только к отмеченным выше случаям (а) – (д) проявлений неисправностей и отображаются в приведенных выражениях подозреваемых областей неисправностей.

Алгоритм А7 ВИС имеет следующий вид:

1. В каждом раунде k = 1, ..., 2s + 1 каждый МОС M_j (j = 1, ..., n) передает собственное значение $(3^k_j)^r$ и всю информацию, сформированную из сообщений, полученных в предыдущем раунде из других МОС, ожидает поступления и проверяет факт прихода сообщения от M_i $(i = 1, ..., n; i \neq j)$ и формирует сообщение для передачи в следующем раунде по правилам, изложенным выше.

В раундах 2s + 2,..., 2s + 1 + m каждый M_j (j = 1,..., n) передает всю информацию, полученную в предыдущем раунде, с учетом тех же правил формирования фиктивных согласуемых значений и фиктивных сообщений в случае их неполучения, что и в раундах 1,..., 2s + 1, но без добавления ко всем согласуемым значениям текущего признака получения.

2. Каждый МОС M_i (i = 1, ..., n) при помощи алгоритма А2 ВИС [168] вычисляет согласованное значение для каждого согласуемого значения (собственного согласуемого значения МОС или приписанного к нему признака получения), передаваемого в каждом сообщении каждого МОС M_i (i = 1, ..., n) в раундах 1, ..., 2s+1, и результирующее согласованное значение каждого M_i .

3. По вычисленным согласованным значениям определяются все случаи проявлений неисправностей вида (а)–(д) и для каждого из них строится соответствующее логическое выражение подозреваемой области неисправности.

4. Строится конъюнкция $(L)^r$ из всех логических выражений подозреваемых областей, найденных на третьем шаге, которая преобразуется к виду дизъюнкции конъюнкций ($\Sigma\Pi$). В каждом терме выполняются упрощения тина $(M_i^k)^r$ $(M_i^k)^r = (M_i^k)^r$, $(O_i^k)^r = (O_i^k)^r$, $(M_i)^r (M_i^k)^r = (M_i)^r$, $(O_i)^r (O_i^k)^r = (O_i)^r$. Из $\Sigma\Pi$ исключаются все термы, каждый из которых включает обозначения неисправностей более чем *m* различных элементов системы, в результате чего в $\Sigma\Pi$ остаются только термы, каждый из которых состоит из обозначений неисправностей не более чем *m* различных элементов системы. Если в терме имеется более *s* обозначений сбоев одного и того же элемента с различными обозначениями раундов, то все они заменяются на обозначение программного сбоя или отказа соответствующего элемента.

Конец алгоритма А7.

Рассмотрим пример использования алгоритма А7. Предположим, что в полносвязной MBC из n = 7 MOC при числе m = 2 допустимых неисправностей MOC и их передающих VC, требуемом уровне сбоеустойчивости s = 1 в процессе выполнения алгоритма А7 (ВИС)^{*r*} из-за проявлений неисправностей передающих VC O_3 и O_4 на втором шаге вычислены согласованные значения $(C_4)^r \neq (C_4)^r$, $(C_4)^r \neq \text{NIL}$, $(C_4^1)^r \neq \text{NIL}$, $(C_{2,3}^1)^r = \text{NIL}$ и других проявлений неисправностей не обнаружено. Алгоритмом А6 [1А] в этом случае строятся логические выражения подозреваемых областей неисправностей соответственно $(M_4^1)^r \text{ V } (O_4^1)^r (M_3^2)^r \text{ V } (O_3^2)^r$, конъюнкция которых, приведенная к виду $\Sigma \Pi$, дает выражение $(M_4^1)^r (M_3^2)^r \text{ V } (M_4^1)^r (O_3^2)^r \text{ V } (O_4^1)^r (M_3^2)^r \text{ V } (O_4^1)^r (M_3^2)^r \text{ N } (O_3^1)^r$, включающее четыре подозреваемых элемента системы.

Алгоритм А7 для проявления неисправности $(C_4)^r \neq (C_4)^r$, $(C_4)^r \neq \text{NIL}$, $(C_4)^r \neq r$ NIL строит выражение подозреваемой области $(M_4^1)^r$ V $(O_4^1)^r$, а для проявления $(C_3^2)^r \neq$ NIL – выражение $(M_3^2)^r (O_3^2)^r$ V $(O_3^2)^r$. В конъюнкции $(L)^r$ этих выражений, приведенной к виду $\Sigma\Pi$, после исключения термов, отображающих неисправности более двух элементов системы, остаются два терма $(M_4^1)^r (O_3^2)^r$ и $(O_4^1)^r (O_3^2)^r$, однозначно идентифицирующие сбой и включающие в качестве подозреваемых еще два элемента системы: M_4 и O_4 .

В.4 Алгоритм АЛЗ взаимного информационного согласования

Алгоритм АЛЗ состоит в следующем. При выполнении первого ВИС (r = 1) при помощи s-сбоеустойчивого алгоритма A7 каждый *i*-й MOC (*i* = 1,...,*n*) вычисляет согласованные значения, соответствующие всем значениям, переданным в раундах 1, ..., 2s + 1, и строит одинаковое во всех исправных МОС выражение $(L)^r$ подозреваемой области неисправностей, проявившихся в начальных раундах 1,..., 2s + 1. Затем каждый *i*-й MOC (i = 1, ..., n) сравнивает каждое полученное им в раундах 2s + 11, 2s + 1+m (последних раундах) значение $(Z_{G,i,...,i}^k)^r$ (где k = 1, ..., 2s + 1; G - 1, ..., 3s + 1; G - 1, ..., 3sпоследовательность длиной 0,..., 2s номеров тех MOC, через которые это значение передавалось в раундах 1,..., 2s, а j = 1, ..., n – номер МОС, передавшего это значение в (2s + 1)-м раунде), с соответствующим согласованным значением $(C_{G,i}^k)^r \neq \text{NIL}$, вычисленным для значения $(Z_{G,i}^{k})^{r}$, переданного *j*-м МОС в (2s + 1)-м раунде, и из всех полученных признаков равенства и неравенства формирует собственный локальный синдром $(\mathbf{b}_i)^1$. В $(\mathbf{B}\mathbf{H}\mathbf{C})^r$ (r > 1) каждый *i*-й МОС формирует составное согласуемое значение $(\prod_i)^r = ((3_i)^r, (\overline{b_i})^{-1})$ и согласовывает его при помощи алгоритма А7 ВИС. Обозначим через $(\prod_{i}^{k})^{r} = ((3_{i}^{k})^{r}, (\overline{b}_{i}^{k})^{r-1})$ и $(E_{i,j}^{k})^{r} = ((Z_{i,j}^{k})^{r}, (F_{i,j}^{k})^{r-1})$ соответственно согласуемое составное значение *i*-й MOC, передаваемое ею в k-м (k = 1, ..., 2s + 1) раунде $(BИC)^r$ на основе алгоритма A7, и составное согласуемое значение, которое поступает при этом в *j*-й МОС. Через $(E^{k}_{i,j,...,p})^{r} = ((Z^{k}_{i,j,...,p})^{r}, (F^{k}_{i,j,...,p})^{r-1})^{r-1}$ обозначим составное согласуемое значение, которое соответствует значению $(E_{i}^{k})^{r}$, переданному в (k + 1)-м раунде из M_i и прошедшему в следующих раундах через ряд МОС, отображенных многоточием, а в *t*-м раунде поступившему в M_p. Причем значение $(Z_{i,j,...,p}^{k})^{r}$ соответствует согласуемому значению $(3_{i}^{k})^{r}$ из $(\prod_{i}^{k})^{r}$, а значение $(F_{i,j,...,p}^{k})^{r}$ соответствует значению $(\mathbf{b}^{k}_{i})^{r-1}$. Через $(D^{k}_{i})^{r} = ((C^{k}_{i})^{r}, (B^{k}_{i})^{r-1})$ и $(D^{k}_{i,j})^{r} = ((C^{k}_{i,j})^{r}, (B^{k}_{i,j})^{r-1})$ обозначим соответственно согласованные составные значения, вычисленные при помощи алгоритма А2 ВИС для значения $(\prod_{i=1}^{k})^{r}$, переданного из M_{i} в k-м раунде, и для $(E_{ii}^k)^r$, переданного значения ИЗ M_i В (*k* +1)-м раунде. Через

 $(D^{k}_{i,j,...,p})^{r} = ((C^{k}_{i,j,...,p})^{r}, (B^{k}_{i,j,...,p})^{r})$ обозначим согласованное значение, вычисленное при помощи алгоритма А2 [164] для значения $(E^{k}_{i,j,...,p})^{r}$ с той же последовательностью индексов, отображаемых многоточием, переданного в (t + 1)-м раунде из M_{p} . Через $(D^{k}_{i})^{r} = ((C^{k}_{i})^{r}, (B^{k}_{i})^{r-1})$ обозначим результирующее согласованное составное значение, вычисленное по алгоритму А7 ВИС.

В (ВИС)^{*r*} (*r* > 1) каждый *i*-й МОС после завершения согласования извлекает из найденного результирующего согласованного составного значения $(D_j)^r$ каждого *j*-го МОС (*j* = 1,...,*n*) согласованное значение $(B_j)^{r-1}$ и из всех таких значений формирует согласованный глобальный синдром (Γ)^{*r*-1}, который, исходя из способа построения, вопервых, будет одинаковым во всех исправных МОС и, во-вторых, будет отображать случаи проявления неисправностей МОС и передающих УС в последних раундах (ВИС)^{*r*-1}. Затем каждый *i*-й МОС при помощи одного и того же алгоритма дешифрации осуществляет по (Γ)^{*r*-1} идентификацию обнаруженных проявлений неисправностей и строит логическое выражение (*P*)^{*r*-1} подозреваемой области неисправностей, отображающее допустимые совокупности проявлений неисправностей, при каждом из которых возможно имеющее место поведение всех МОС и передающих УС в последних раундах (ВИС)^{*r*-1}. Затем строит конъюнкцию (*O*)^{*r*-1} выражения (*L*)^{*r*-1} полученного в (ВИС)^{*r*-1} и выражения (*P*)^{*r*-1}, которая будет идентифицировать проявления допустимых неисправностей, случившихся во всех раундах (ВИС)^{*r*-1}.

После этого в соответствии с принятым критерием отказа и программного сбоя каждый *i*-й МОС строит конъюнкцию из логических выражений $(O)^r$ для различных ВИС, определяющую допустимые сочетания неисправностей, при которых возможно реальное поведение МОС в этих ВИС.

Алгоритм дешифрации (Г)^{*r*} состоит в следующем. Каждый *i*-й МОС по (Г)^{*r*} определяет все случаи межмашинной передачи согласуемых значений такие, что для значения, переданного в *t*-м раунде (t = 2s + 1, ..., 2s + 1 + m) (ВИС)^{*r*} из *p*-го МОС, в (Г)^{*r*} зафиксировано равенство (неравенство) соответствующему согласованному значению, а для принятого *q*-м МОС в этом же раунде данного значения в (Г)^{*r*} зафиксировано неравенство). Такая ситуация возможна по причине: а) действительного неравенства (равенства) полученного и согласованного значений из-за сбоя (O_p^t)^{*r*} при передаче этого значения или из-за сбоя (M_q^t)^{*r*} при его приеме; б) в случае действительного равенства (неравенства) этих значений и фиксации их неравенства

(равенства) или из-за сбоя $(M_q^{2s+m+2})^r$, приведшего к ошибочному значению признака сравнения при формировании в *q*-м МОС собственного локального синдрома, или из-за программного сбоя $(M_q)^{r+1}$ либо отказа $(O_q)^{r+1}$, проявившегося в не менее чем *s*+1 сбое *q*го МОС либо передающего УС O_q при взаимопередачах согласуемых значений в (ВИС)^{*r*+1}. Все эти условия описываются логическим выражением $(O_p^t)^r$ V $(M_q^t)^r$ V $(M_q^{2s+m+2})^r$ V $(M_q)^{r+1}$ V $(O_q)^{r-1}$. Отметим, что сбой $(M_q^{2s+m+2})^r$ является сбоем при обработке информации, а не сбоем при межмашинном обмене информацией.

В представленном выражении с целью уменьшения его громоздкости не отображены возможные случаи сочетания совокупности сбоев q-го МОС и совокупности сбоев q-го передающего УС такие, что каждая из совокупностей не идентифицируется по принятым критериям соответственно как программный сбой M_q или отказ O_q . В худшем случае это может приводить в случае неисправности и M_q , и O_q к идентификации программного сбоя M_q или отказа O_q при совокупностях их сбоев, не удовлетворяющих принятым критериям.

Конъюнкция всех построенных при дешифрации $(\Gamma)^r$ выражений, приведенная к виду дизъюнкции конъюнкций, будет выражением $(P)^r$.

В целом алгоритм АЛЗ выполнения (ВИС)^{*r*} в *i*-м МОС в качестве первых четырех шагов включает четыре шага алгоритма А7, в которых на первом шаге вместо собственного согласуемого значения $(3^k_i)^r$ (k=1,...,2s+1) передается собственное составное согласуемое значение $(\prod_{i=1}^{k})^r = ((3^k_i)^r, (\mathbb{B}^k_i)^{r-1})$, на втором шаге при помощи алгоритма А2 ВИС [164] вычисляются также согласованные значения $(B_j)^r$, а четвертый шаг дополняется условием, что если в полученном выражении (L)^{*r*} цель идентификации достигнута, то конец алгоритма АЛЗ.

Остальные шаги алгоритма АЛЗ имеют вид:

5. Из каждого определенного результирующего согласованного составного значения $(D_j)^r \neq \text{NIL} (j=1,...,n)$ извлекается согласованный локальный синдром $(B_j)^{r-1}$ и из всех таких синдромов строится глобальный синдром $(\Gamma)^{r-1}$, одинаковый во всех исправных МОС системы.

6. По $(\Gamma)^{r-1}$ определяются все случаи межмашинной передачи согласуемых составных значений такие, что для значения, переданного в *t*-м раунде (t = 2s+1, ..., 2s+1+m) (ВИС)^{*r*-1} из *p*-го МОС, в $(\Gamma)^{r-1}$ зафиксировано равенство (неравенство)

соответствующему согласованному составному значению, а для принятого q-м МОС в этом же раунде данного согласуемого составного значения в $(\Gamma)^{r-1}$ зафиксировано неравенство (равенство). Для каждого такого случая строится выражение подозреваемой области неисправностей $(O_p^t)^{r-1} \vee (M_q^t)^{r-1} \vee (M_q^{2s+m+2})^{r-1} \vee (M_q)^r \vee (O_q)^r$. Строится конъюнкция $(P)^{r-1}$ всех таких выражений, которая преобразуется к виду $\Sigma \Pi$. Если цель идентификации в выражении $(P)^{r-1}$ достигнута, то конец алгоритма АЛЗ. Если этого не достигнуто, то строится конъюнкция $(O)^{r-1} = (L)^{r-1} (P)^{r-1}$, которая преобразуется к виду $\Sigma \Pi$. Если в полученном выражении цель идентификации достигнута, то конец алгоритма АЛЗ.

7. В соответствии с принятыми критериями программного сбоя МОС и отказа передающего УС, состоящих в обнаружении не менее s + 1 сбоев соответствующего элемента в двух смежных ВИС, строится конъюнкция $(O)^{r-2}(O)^{r-1}$ и преобразуется к виду $\Sigma\Pi$. Если в полученном выражении цель идентификации достигнута, то конец алгоритма АЛЗ.

8. Сравнение каждого согласованного значения $(D^{k}_{G,h})^{r} \neq \text{NIL}$ (где через G обозначена произвольная последовательность номеров МОС длиной 0,..., 2s; k = 1,..., 2s + 1; h = 1,...,n), определенного для каждого согласуемого составного значения $(E^{k}_{G,h})^{r}$, переданного h-м МОС в (2s + 1)-м раунде, со всеми соответствующими значениями $(E^{k}_{G,h,...})^{r}$, полученными данным i-м МОС в раундах 2s+1,..., 2s+1+m, и занесение результата в локальный синдром $(E^{k}_{i})^{r}$. Данный шаг является (2s + m + 2)-м элементарным контролируемым действием алгоритма.

Конец алгоритма АЛЗ при выполнении (ВИС)^{*r*}.

В.5 Алгоритм РСД-1 распределённого системного диагностирования

Обозначим *r*-й (r = 1,...) цикл распределённого системного диагностирования (РСД) через (РСД)^{*r*}. Все обозначения (информации, проявлений неисправностей, сообщений и др.), относящиеся к (РСД)^{*r*}, также будем заключать в скобки с верхним индексом *r*.

В настоящем разделе предполагается, что 1) всем МОС известны состав и формат ЛСП каждого МОС системы; 2) работа исправных МОС осуществляется с необходимой степенью синхронности, обеспечивающей правильность выполняемых межмашинных взаимодействий; 3) МОС-приемник межмашинного сообщения может определить передавший это сообщение МОС-передатчик.

Предположим, что обмен информацией между МОС в процессе (РСД)^{*r*} осуществляется при помощи сообщений. Межмашинная передача сообщения между соседними МОС-передатчиком и МОС-приемником по каналу связи между ними выполняется в течение одного временного кванта, имеющего собственный порядковый номер последовательности квантов данного (РСД)^{*r*}. В кванте каждый МОС по любому своему каналу может передать только одно сообщение. Каждое передаваемое сообщение состоит из одного или нескольких элементов. Каждый элемент сообщения имеет предписанный ему маршрут посылки от МОС-источника к МОС-получателю, который может состоять из одной или нескольких передач из МОС-передатчиков к МОС-приемникам. Каждому МОС известен формат каждого получаемого сообщения, т.е. известно, что требуется сделать с каждым элементом, и если необходима передача элемента по предписанному маршруту, то известно, по какому каналу связи, в каком кванте и в каком месте сообщения должен быть передан этот элемент в соответствии с его маршрутом.

Будем представлять каждый МОС M_i в виде совокупности частей, каждая из которых участвует в выполнении обмена по одному из межмашинных каналов связи данного МОС. Аппаратно эти части могут пересекаться в различных сочетаниях в зависимости от конструктивных особенностей МОС. Часть МОС M_i , относящуюся к дуплексному каналу связи с соседней МОС M_j , обозначим через $M_{i/j}$, а часть МОС M_j , относящуюся к этому же каналу – через $M_{j/i}$.

Любую пересылку по маршруту, например, от МОС-источника M_j к МОСполучателю M_p через МОС-транслятор M_i , можно представить как последовательное выполнение своих функций передачи и приема частей $M_{j/l}$, $M_{l/p}$, $M_{p/l}$. Предположим, что МОС M_j в процессе (РСД)^{*r*} пересылает по данному маршруту некоторое сообщение со значением информации $(S_j)^r$. Это значение, переданное из M_j , в кванте *t*, обозначим через $(S^t_j)^r$. Это же значение, поступившее в кванте *t* в МОС M_i , обозначим через $(S^t_{j,l})^r$, переданное из M_i в кванте *q* – через $(S^{t,q}_{j,l})^r$, а поступившее в M_p в кванте *q* – через $(S^{t,q}_{j,l,p})^r$. Таким образом, верхние и нижние индексы однозначно определяют местоположение значения при его перемещении по маршруту.
Сбоем МОС будем называть ее ошибки в одном элементарном контролируемом действии (ЭКД), с точностью до которого возможна идентификация сбоя по моменту его возникновения. В настоящей работе в качестве отдельных ЭКД принимаются автономные действия МОС в первых трех фазах (РСД)^{*r*} (r = 1,...) и каждый из квантов межмашинных передач во всех фазах (РСД)^{*r*}. В каждом *r*-м цикле РСД все ЭКД пронумерованы, начиная с единицы.

Будем говорить, что один сбой покрывает по своим проявлениям другой сбой, если любое возможное проявление (искажение информации) второго сбоя может возникнуть и при первом сбое.

Самопроверка МОС M_i , выполняемая в первой фазе (РСД)^{*r*}, может дать отрицательный результат вследствие одного сбоя этом МОС в процессе проверки. При этом сбой данного МОС M_i в кванте (РСД)^{*r*} при посылке результатов проверки в проверяющие МОС покрывает сбой M_i при его самопроверке. Аналогичные выводы можно сделать и для других автономных действий МОС, завершающихся передачей результатов этих действий в другие МОС. Если система определяет правильность автономного действия МОС M_i по передаваемым из него в *t*-м кванте результатам, то сбой МОС M_i при передаче результатов покрывает сбой этого МОС при выполнении данного автономного действия. Поэтому в качестве ЭКД достаточно рассматривать последовательно пронумерованные, начиная с единицы, кванты межмашинных передач сообщений, выполняемых в процессе (РСД)^{*r*}.

Сбоем части МОС $M_{j/i}$ в *t*-м кванте будем называть событие в этой части, состоящее в искажении сообщения, поступившего в *t*-м кванте через эту часть в канал связи между M_i и M_j (в том числе, отсутствие такого поступления) при передаче сообщения из M_i , или в искажении сообщения, поступившего в *t*-м кванте из канала связи в M_i (в том числе, отсутствие такого поступления) при передаче этого сообщения из M_j . Обозначим такой сбой через $(M_{i/j}^t)^r$.

Будем считать, что сбой различных частей МОС M_i в одном и том же кванте t, например, сбои $(M_{i/j}^t)^r$ и $(M_{i/l}^t)^r$ является одним и тем же сбоем в МОС M_i в кванте t, обозначим его через $(M_{i/j,l}^t)^r$. Сбой в t-м кванте всего МОС M_i по предположению определяется как некоторая совокупность сбоев его частей (например, более mдействующих в t-м кванте частей M_i) и будет обозначаться через $(M_i^t)^r$. Критерием программного сбоя МОС может приниматься превышение над допустимой частоты сбоев хотя бы одной части этого МОС или превышение над допустимой суммарной частоты сбоев различных частей. Предполагается возможность восстановления вычислительного процесса в МОС, находящегося в состоянии программного сбоя, со стороны исправных МОС системы, которое состоит в восстановлении информации в сбившегося МОС и втягивании его в согласованную с исправными МОС работу [167]. Программный сбой МОС M_i , идентифицированный в (РСД)^{*r*}, обозначим через (M_i)^{*r*}. Критерием отказа части МОС может являться, например, превышение над допустимой частоты программных сбоев МОС, вызванных сбоями этой части.

Предлагаемый алгоритм РСД-1 предназначен для систем, имеющих следующие структурные свойства: С1) в графе D системы имеется подграф F [230], гомеоморфный полносвязному графу G с числом вершин более 3m (m – допустимое число неисправных МОС); вершины подграфа F и их МОС, соответствующие вершинам графа G, являются основными, остальные вершины графа D и их МОС – неосновными, неосновные вершины подграфа F и их МОС – разделительными; С2) от каждой неосновной вершины графа D имеются непересекающиеся (кроме начальной вершины) маршруты к не менее чем 2m + 1 основным вершинам.

Алгоритм РСД-1 выполнения системой последовательности циклов (РСД)^{*r*} (r = 1,...) предполагает, что для каждого МОС системы определены 2m + 1 проверяющие основные МОС. Этот алгоритм, кроме проверок МОС и их каналов связи, выполняемых проверяемыми МОС в 1-й фазе РСД, и проверок их результатов в проверяющих МОС во 2-й фазе РСД, содержит еще три проверяющих механизма. Первый механизм состоит в проверке того, что информация, поступающая из проверяемого основного или неосновного МОС по непересекающимся маршрутам в 2m + 1, проверяющая основные МОС, является одинаковой и соответствует исправному состоянию этого проверяемого МОС. Второй механизм обнаруживает и идентифицирует проявления неисправностей МОС, приводящие к тому, что согласованное значение МОС, определяемое в процессе взаимного информационного согласования (ВИС), равно специальному значению NIL [229]. Третий механизм включает проверку одинаковости информации, которая поступает на 9-м и 10-м шагах представленного ниже алгоритма, в каждом неосновном МОС системы по непересекающимся (кроме конечного МОС) маршрутам из 2m + 1

основных МОС. Отметим, что информация, вычисленная при помощи алгоритма ВИС на 3-м шаге представленного алгоритма, должна быть одинаковой во всех исправных основных МОС.

Алгоритм РСД-1 при выполнении цикла (РСД)^{*r*} имеет следующий вид.

1. Каждый МОС M_i выполняет собственную проверку, формирует ее результат $(R_i)^r$, передает в 1-м кванте контрольное сообщение каждому соседнему МОС, проверяет правильность контрольного сообщения, принятого от каждого соседнего МОС, и формирует вектор $(N_i)^r$ результатов этих проверок, формирует сообщение из значений $(R_i)^r$, $(N_i)^r$, а также значения $(R_i^t)^{r-1}$, если данный МОС M_i является неосновной, и, начиная с 2-го кванта, посылает это сообщение по непересекающимся маршрутам в 2m + 1 проверяющие основные МОС. Предположим, что самые длинные из таких пересылок заканчиваются в (s-1)-м кванте.

2. Каждый проверяющий основной МОС M_i (i = 1, ..., n) сравнивает с эталоном каждый поступивший к нему результат $(R^{2, ..., t}_{j, ..., i})^r$ (j = 1, ..., n), формирует результат $(SR^{2, ..., t}_{j, ..., i})^r$ этого сравнения, заменяет им значение $(R^{2, ..., t}_{j, ..., i})^r$ в соответствующем поступившем сообщении и из всех таких сообщений формирует собственный $(ЛСП_i)^r$.

3. Каждый проверяющий основной МОС M_i (i = 1,..., n) определяет (ЛСП_i)^r в качестве собственного составного согласуемого значения $(3_i)^r$ и все МОС подграфа *F*, гомеоморфного полносвязному графу, выполняют (ВИС)^{*r*} по алгоритму из [229]. Каждый основной МОС M_i , вычисляет вектор $(H_i)^r$, одинаковый во всех исправных MOC И содержащий составное согласованное значение $(C_n)^r$, основных соответствующее составному согласуемому значению $(3_p)^r$ каждого основного МОС M_p (p = 1, ..., n). Каждому согласуемому значению $(SR^{2, ..., t}, p)^r$ $(2 \le t \le s - 1)$ из $(3_p)^r$ соответствует согласованное значение $(CSR^{2,...,t}_{...,p})^r$ в $(C_p)^r$, каждому согласуемому значению $(N^{2,...,t}_{...,p})^r$ из $(3_p)^r$ – согласованное значение $(CN^{2,...,t}_{...,p})^r$ в $(C_p)^r$, а каждому согласуемому значению $(RT^{2,...,t}_{...,p})^{r-1}$ из $(3_p)^r$ – согласованное значение $(CRT^{2,...,t})^{r-1}$ в $(C_p)^r$. Здесь нижняя (верхняя) последовательность индексов у согласуемого значения совпадает с нижней (верхней) последовательностью индексов у соответствующего согласованного значения.

4. Каждый основной МОС M_i (i = 1, ..., n) для каждого согласованного составного значения (C_p)^r = NIL (p = 1, ..., n) [229], отображающего сбой МОС M_p в начальном

кванте первого раунда взаимообменов (ВИС)^{*r*}, строит логическое выражение подозреваемых неисправностей из одного обозначения сбоя $(M_p)^r$, где *s* – порядковый номер в (РСД)^{*r*} начального кванта взаимообменов в первом раунде (ВИС)^{*r*}.

5. Каждый основной МОС M_i (i = 1, ..., n) для каждого p (p = 1, ..., n) извлекает из всех $(C_j)^r \neq \text{NIL}$ (j = 1, ..., n) все содержащиеся в них значения $(CSR^{2,...}_{p,...})^r$ и формирует из них первую группу. Далее извлекаются все содержащиеся в $(C_j)^r \neq \text{NIL}$ значения $(CN^{2,...}_{p,...})^r$ и формируется вторая группа, и, наконец, извлекаются все содержащиеся в них значения $(CRT^{2,...}_{p,...})^{r-1}$, если они имеются, и формируется третья группа. Затем путем мажорирования каждой из групп извлеченных значений вычисляет соответственно значения $(VCSR_p)^r$, $(VCN_p)^r$ и $(VCRT_p)^{r-1}$. При невозможности получения определенного результата мажорирования, т.е. при отсутствии в группе более половины одинаковых значений, соответствующему значению $(VCSR_p)^r$, $(VCN_p)^r$ или $(VCRT_p)^{r-1}$ приписывается значение NIL, отображающее сбой МОС M_p во 2-м кванте (РСД)^r.

6. Каждый основной МОС M_i (*i* = 1,..., *n*) анализирует каждое значение (*VCSR*_{*p*})^{*r*} (p = 1, ..., n) и при его значении, не соответствующем значению равенства результата правильному результату, строит логическое проверки МОС M_n выражение подозреваемых неисправностей, состоящее из одного обозначения сбоя $(M_{D}^{2})^{r}$. Каждый основной МОС M_i (i = 1,..., n) анализирует каждое значение (VCN_p)^r и ($VCRT_p$)^{r-1} (p= 1, ..., *n*) и при его равенстве значению NIL строит логическое выражение подозреваемых неисправностей из одного обозначения сбоя $(M_p^2)^r$. Каждый основной МОС M_i (i = 1,..., n) анализирует каждое значение $(VCN_p)^r \neq \text{NIL}$ (p = 1, ..., n) и для каждого неравенства в нем, отображающего неравенство эталону поступившего в МОС *М_p* контрольного сообщения в 1-м кванте из соседнего МОС *M_i*, строит выражение подозреваемых неисправностей $(M^{1}_{j/p})^{r} \vee (M^{1}_{p/j})^{r} \vee (M^{2}_{p})^{r}$ отображающее возможность сбоя, во-первых, частей МОС $M_{j/p}$ и $M_{p/j}$ соответственно при передаче и приеме в 1-м кванте контрольного сообщения, и, во-вторых, МОС M_p при передаче им значения $(N_p)^r$ во 2-м кванте.

7. Каждый основной МОС M_i (i = 1,..., n) для каждого неосновного МОС M_{ω} $(\omega = 1,..., n)$ анализирует значения признаков сравнения в значении $(VCRT_{\omega})^{r-1} \neq \text{NIL}$ и для каждого значения неравенства в нем, отображающего неравенство поступившего в МОС M_{ω} в $(\text{РСД})^{r-1}$ сообщения $(P^{q,t,...,z}_{j,l,p,...,v,\omega})^{r-1}$ и определенного результата $(VP_{\omega})^{r-1}$

мажорирования всех таких сообщений (здесь q(z) – порядковый номер в (РСД)^{*r*} начального (конечного) кванта посылки сообщения $(P_j)^{r-1}$ из основного МОС M_j в неосновной МОС M_{ω}), строит выражение подозреваемых неисправностей

$$(M^{q}_{j/l})^{r-1} \vee (M^{q}_{l/j})^{r-1} \vee (M^{t}_{l/p})^{r-1} \vee (M^{t}_{p/l})^{r-1} \vee \dots \vee (M^{z}_{\omega/\omega})^{r-1} \vee (M^{z}_{\omega/\omega})^{r-1} \vee (M^{z}_{\omega/\omega})^{r},$$

где последний терм отображает сбой МОС M_{ω} во 2-м кванте (РСД)^r.

8. Каждый основной МОС M_i (i = 1, ..., n) для каждого j (j = 1, ..., n) сравнивает определенные значения $(VCSR_j)^r$, $(VCN_j)^r$ и $(VCRT_j)^{r-1}$, если оно имеется, соответственно с каждым из значений $(CSR^{2,k,...,t}_{j,l,p,...,v,\omega})^r$, $(CN^{2,k,...,t}_{j,l,p,...,v,\omega})^r$ и $(CRT^{2,k,...,t}_{j,l,p,...,v,\omega})^{r-1}$ ($\omega = 1,..., n$ – номер основного МОС, являющегося проверяющим для МОС M_j) и для каждого неравенства строит выражение подозреваемых неисправностей

$$(M_{j/l}^{2})^{r} \vee (M_{l/j}^{2})^{r} \vee (M_{l/p}^{k})^{r} \vee (M_{p/l}^{k})^{r} \vee \dots \vee (M_{\nu/\omega}^{t})^{r} \vee (M_{\omega/\nu}^{t})^{r} \vee (M_{\omega/\nu}^{s})^{r},$$

где t – порядковый номер кванта в (РСД)^{*r*}, в котором значения $(R^{2,k,\ldots,t}_{j,l,p,\ldots,v,\omega})^r$, $(N^{2,k,\ldots,t}_{j,l,p,\ldots,v,\omega})^r$ и $(RT^{2,k,\ldots,t}_{j,l,p,\ldots,v,\omega})^r$ поступают в проверяющий основной МОС M_{ω} ; *s* – порядковый номер в (РСД)^{*r*} начального кванта взаимообменов первого раунда в (ВИС)^{*r*}.

9. Каждый основной МОС M_j (j = 1,..., n) в соответствии с принятым критерием программного сбоя МОС формирует конъюнкцию из логических выражений подозреваемых неисправностей, построенных в (РСД)^{*r*} и предыдущих циклах РСД, преобразует эту конъюнкцию к виду дизъюнкции конъюнкций, исключает из этой дизъюнкции термы, не соответствующие заданному значению *m* допустимого числа неисправных МОС, и в результате получает выражение (O_j)^{*r*}. В случае отсутствия выражений подозреваемых неисправностей, участвующих в образовании выражения (O_j)^{*r*}, МОС M_j формирует выражение (O_j)^{*r*} специального формата, однозначно отображающего данный случай. Затем МОС M_j формирует сообщение (P_j)^{*r*}, содержащее выражение (O_j)^{*r*}, и посылает его в *q*-м кванте по предписанным маршрутам в неосновные МОС системы таким образом, что такие сообщения должны поступить в каждый неосновной МОС M_i (l = 1,..., n) по непересекающимся (кроме конечной вершины) маршрутам из 2m + 1 основных МОС. 10. Каждый основной МОС M_i (i = 1,..., n) ожидает заранее известное время (количество квантов) окончания пересылки сообщений в неосновные МОС системы. Каждый неосновной МОС M_{ω} ($\omega = 1,..., n$) путем мажорирования поступивших к нему сообщений $(P^{q,...}_{...,\omega})^r$ вычисляет значение $(VP_{\omega})^r$, выделяет из $(VP_{\omega})^r$ выражение $(O_{\omega})^r$, сравнивает со значением $(VP_{\omega})^r$ каждое из поступивших сообщений $(P^{q,...}_{...,\omega})^r$ и из полученных признаков равенства и неравенства формирует собственное значение $(RT_{\omega})^r$.

11. Каждый основной и неосновной МОС M_{ω} ($\omega = 1,..., n$) системы анализирует выражение $(O_{\omega})^r$, фиксирует новые программные сбои МОС и проверяет выражение $(O_{\omega})^r$ на соответствие принятому критерию окончания процесса идентификации. Если такое соответствие имеется, то МОС M_{ω} , переходит к действиям, предусмотренным после окончания процесса идентификации.

Конец алгоритма цикла $(PCД)^{r}$.

Приложение Г

Акты внедрения

Акт внедрения в ОАО «РКК «Энергия»

УТВЕРЖДАЮ Генеральный конструктор АО «РКК «Энергия» Е.А. Микрин 2016 г. 14.01.16 АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Комиссия в составе:

Председатель Р.М.Самитов - зам. руководителя НТЦ;

члены комиссии И.В.Орловский - зам. руководителя НТЦ;

Н.К.Беренов - начальник отдела

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы В.Ю.Гришина, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, а именно:

 анализ эффектов катастрофических отказов центрального процессора от тиристорного эффекта и эффектов функционального сбоя от ТЗЧ с включением режима стирания памяти в микросхемах перепрограммируемой памяти на технологии FLASH;

 анализ последствий от воздействия ТЗЧ на микропроцессорные комплекты ЭРИ и возможностей их парирования;

 рекомендации по организации работы средств внешнего управления СБИС микропроцессора и поддержки восстановления прерванного процесса вычислительной обработки и управления; рекомендации по корректировке программного обеспечения для восстановления содержимого FLASH памяти

использованы при разработке и производстве блоков аппаратуры БВС ЦВМ 101 ЮШКР 4665, БУС101-1 ЮШКР, БУС101-2 ЮШКР из состава системы управления движением космическими кораблями серий «Союз-ТМА» и «Прогресс-М».

Указанные блоки заменили производимую ранее аппаратуру БЦВК «Аргон-16», значительно увеличив производительность при снижении массогабаритных характеристик и значительно удешевив стоимость. В результате внедрения БВС была создана концепция «цифрового борта» космических кораблей.

Технико-экономический эффект от внедрения результатов работы составляет около 750 млн. рублей.

Председатель комиссии

Члены комиссии

Р.М.Самитов И.В.Орловский И.В.Орловский

- 189 -

Акт внедрения в ОАО «Корпорация «Комета»

УТВЕРЖДАЮ Главный инженер ОАО «Корпорация «Комета» В.В. Бодин, к.т.н. 03 2016 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ результатов кандидатской диссертационной работы Гришина Вячеслава Юрьевича

Комиссия в составе:

заместителя генерального конструктора	В.Ю. Боброва
начальника ООНС-46, к.т.н.	С.А. Соболева
начальника отдела	М.В. Ленточникова

рассмотрев результаты и материалы диссертационной работы установила, что переданные в ОАО «Корпорация «Комета» материалы:

 алгоритм информационного обмена сигналами в вычислительных системах и управляющих комплексах космических анпаратов;

 оценка максимальной скорости информационного обмена и пропускной способности модулей ввода-вывода;

 рекомендации по выбору элементной базы для схемотехнической реализации модулей ввода-вывода;

 анализ применимости положений и требований действующих нормативных документов по оценке стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к радиационным воздействиям;

 обоснование уточнений, необходимых для повышения достоверности оценки стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов по дозовым эффектам с учетом условий эксплуатации и используемых технологических исполнений электрорадиоизделий (ЭРИ);

 методика проведения и обоснование основных задач дополнительных испытаний «критичных» ЭРИ по стойкости к дозовым эффектам, тиристорным эффектам (ТЭ) от тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и структурным эффектам;

 анализ эффектов катастрофических отказов ЦПС от ТЭ и эффектов функционального сбоя от ТЗЧ с включением режима стирания памяти в микросхемах перепрограммируемой памяти на технологии FLASH;

 анализ последствий от воздействия ТЗЧ на микропроцессорные комплекты ЭРИ и возможностей их парирования;

 рекомендации по организации работы средств внешнего управления и поддержки восстановления прерванного СБИС MΠ процесса вычислительной обработки и управления;

- рекомендации по корректировке программного обеспечения для восстановления содержимого FLASH памяти;

 систематизированные требования к номенклатуре радиационных характеристик бортовых компьютеров и их элементов;

ресурсосберегающая декомпозиция структуры спецвычислителя и соответствующая архитектура вычислительных средств для КА с длительными сроками активного существования;

 оптимальная интеграция определенных подмножеств функций в интересах создания архитектур, способных обеспечить длительные сроки активного существования КА, в том числе в условиях применения элементной базы ограниченной стойкости;

- методика достоверного оценивания интенсивности непарируемых и необнаруживаемых в модулях цифровой аппаратуры сбоев (для расчета кратностей динамического резервирования) с использованием адекватных имитационных испытаний БИС и методов корректного пересчета их результатов к реальным спектрам тяжелых заряженных частиц на орбите;

 методика достоверной оценки предельно накопленной дозы (для расчета) кратностей резервирования модулей) на основе взаимоувязанных режимов дозовых испытаний БИС и методов пересчета их результатов, совместно учитывающих реальные режимы работы БИС на борту КА

реализованы в комплектах КД, ЭД и ПД на блоки ВУ ЮШКР.466521.012, ЛКА-05 ЮШКР.467124.028-05, ЛКА-06 ЮШКР.467124.028-06, ЦБК ЮШКР.466521.001, БСО ЮШКР.467444.094, БВМ ЮШКР.466535.020.

Результаты диссертационной работы использованы:

 при создании блоков ВУ, эксплуатирующихся на КА 14Ф112 №№12 - 15 с ноября 2010 г.;

 при проектировании блоков ЛКА-05, ЛКА-06, ЦБК, БСО, БВМ, входящих в состав Модуля Целевой Аппаратуры космического аппарата 14Ф142. Блоки успешно прошли автономные и комплексные испытания, а с ноября 2015 г. проходят летные конструкторские испытания в составе КА на высокоэллиптической орбите.

Заместитель генерального конструктора

В.Ю. Бобров

Начальник ООНС-46, к.т.н.

С.А. Соболев

Начальника отдела

ивев М.В. Ленточников