

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий механики и оптики

На правах рукописи

Книга Екатерина Викторовна

**Алгоритмы контроля вычислительной системы
интегрированной модульной авионики и
ее функциональных элементов**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники и систем
управления (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н, доцент
Жаринов И.О.

Санкт-Петербург – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	4
Введение.....	8
Глава 1. Применение технологии ИМА при проектировании бортовых вычислительных систем	15
1.1. Архитектура комплексов бортового оборудования	15
1.2 Основы проектирования изделий класса ИМА. Технические решения.....	18
1.2.1 Сетевые организации вычислительных систем класса ИМА	28
1.3. Роль и место БЦВС ИМА в составе современных комплексов	33
1.3.1 Задачи комплексов авионики	33
1.3.2 Виды бортовых интерфейсов	33
1.4 Постановка задачи создания средств контроля вычислительной системы класса ИМА и ее компонентов	38
1.5 Выводы	47
Глава 2. Состав и структура бортовой цифровой вычислительной системы класса интегрированной модульной авионики	49
2.1. Функциональная схема интегрированной вычислительной системы	49
2.2. Функциональная схема базового КФМ для БЦВС ИМА	53
2.3. Назначение, внутренняя структура и принцип работы конструктивно- функциональных модулей ИМА	56
2.3.1. Модуль вычислительный	56
2.3.2. Модуль ввода-вывода	57
2.3.3. Модуль графический	59
2.3.4. Модуль-коммутатор	61
2.3.5. Модуль массовой памяти	62
2.4. Вычислительные структуры ИМА на основе базовых конструктивно- функциональных элементов авионики	65
2.5. Выводы	70

Глава 3. Принципы построения автоматизированных рабочих мест для проверки компонентов ИМА и алгоритмы тестирования ВС	71
3.1 Организация межмодульного информационного обмена.....	71
3.2 Принципы последовательной и параллельной проверки функционирования мультивычислителя.....	73
3.3 Алгоритм фонового контроля мультипроцессора ИМА.....	77
3.4 Принцип построения автоматизированных рабочих мест	82
3.4.1 Автоматизированное рабочее место по контролю и диагностике ВС ...	82
3.4.2 Унифицированное автоматизированное рабочее место по проверке КФМ.....	85
3.5 Алгоритм работы ВС	93
3.6 Выводы	96
Глава 4. Экспериментальные исследования и результаты моделирования работы элементов и устройств вычислительной системы ИМА.....	97
4.1 Оценка надежности вычислительных структур	97
4.2 Организация обмена данными между авиационными системами для формирования и вывода на экран географических информационных данных	104
4.3 Опыт применения мультипроцессора для формирования видеопотока изображения геоинформационных данных в авионике	109
4.4 Исследование свойств электромагнитной совместимости бортовой цифровой вычислительной машины в работе с приборным оборудованием авионики.....	115
4.4 Выводы	119
Заключение	120
Литература	122
Приложение А	139

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АРК – автоматический радиокompас
- АРМ - автоматизированное рабочее место
- АЦП - аналого-цифровой преобразователь
- БВС – бортовая вычислительная система
- БГС - бортовой графической станции
- БИНС – бесплатформенная инерциальная навигационная система
- БИС - бортовой интерфейсной станции
- БКО – бортовой комплекс обороны
- БКС – блок концентрации сигналов
- БЛС - бортовая локальная сеть
- БРЛС – бортовая радиолокационная станция
- БСКИ - бортовая система картографической информации
- БЦВМ - бортовая цифровая вычислительная машина
- БЦВС - бортовая цифровая вычислительная система
- ВС - вычислительная система
- ГИД - географические информационные данные
- ДИСС – доплеровский измеритель составляющих скорости и угла сноса
- ДПЛА – дистанционно-пилотируемый летательный аппарат
- ЖК - жидкокристаллический
- ЗБН – защищенный бортовой накопитель
- ЗГО – запросчик госопознавания
- ИВС - интегрированная вычислительная система
- ИЛС – индикатор на лобовом стекле (коллиматорный индикатор)
- ИМА - интегрированная модульная авионика
- ИУЭП - интеллектуальный узел электропитания
- ИЭВМ - инструментальная электронно-вычислительная машина
- КВВ - каналы ввода-вывода
- КПОД - контроллер памяти общего доступа

КСС – комплекс средств связи

КФМ - конструктивно-функциональный модуль

ЛА - летательный аппарат

л/б – левый борт

МВ - модуль вычислительный

МВВ - модуль ввода-вывода

МВЭ - модуль вторичных источников электропитания

МГ - модуль графический

МК - модуль коммутатора

МКИО - мультиплексный канал информационного обмена

МПОН - модуль процессора общего назначения

МПП - модуль постоянной памяти

МН - модуль напряжений

МНМ - модуль унифицированного носителя мезонинов

МОИ А818 - модуль оптических интерфейсов ARINC818

МС МВЭ - модуль сопряжения МВЭ

МС МУПД - модуль сопряжения МУПД

МСК - модуль сетевого коммутатора AFDX

МСУ - модуль сопряжения универсальный

МУПД - модуль универсального процессора данных

МФД – многофункциональный дисплей

МФПУ – многофункциональный пульт управления

МФЦИ - многофункциональный цветной индикатор

МЦП - модуль центрального процессора

МЦПС - модуль цифровых процессорных сигналов

НСЦИ – наשלемная система целеуказания и индикации

НТД - нормативно-техническая документация

ОВО – общевертолетное оборудование

ОЗУ - оперативное запоминающее устройство

ОПС – обзорно-прицельная станция

п/б – правый борт

ПЗУ - постоянное запоминающее устройство

ПК - последовательные каналы

ПКВ – пилотажный комплекс вертолета

ПЛИС - программируемая логическая интегральная схема

ПМ - программный модуль

ПО - программное обеспечение

ПРД - передатчик

ПУ – пульт управления

РВ – радиовысотомер малых высот

РК - разовые команды

СВР – система ви-деорегистрации

СВС – система воздушных сигналов

СК - системный контроллер

СНС – спутниковая навигационная система

СО – самолетный ответчик

СУО – система управления оружием

ТпСЛ – тепловизионная станция летчика

УАРМ - унифицированного автоматизированного рабочего места

УВИ - узел связи с внешними интерфейсами

УКД - узел контроля и диагностики

УМИ - узел связи межмодульного интерфейса

УПМ - узел поддержки модуля

УСМ - узел связи с мезонинами

УФМ - узел функций модуля

ФМ - функциональный модуль

ФПО - функциональное программное обеспечение

ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь

ЦКМ - цифровая карта местности

ЭМП - электромагнитные помехи

CPU — Central Processor Unit

DME – радиодальномер

DVI – Digital Visual Interface

LVDS - Low Voltage Differential Signal

VOR/ILS – навигационно-посадочное оборудование

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. На современном этапе развития отечественная авиационная промышленность подходит к созданию летательного аппарата (ЛА) нового поколения. Ключевая роль в создании ЛА нового поколения отводится созданию новой универсальной вычислительной системы (ВС). Универсальная ВС входит в состав ряда авиационных комплексов (пилотажный, навигационный и пр.), управляющих движением ЛА в полете, и разрабатывается согласно концепции, получившей название «интегрированная модульная авионика» (ИМА), подробно изложенной в группе стандартов ARINC 651-655.

Стандарты ARINC 651-655 регламентируют порядок разработки компонентов аппаратного и программного обеспечения ВС, из которых в последующем строится универсальная ВС для авиационного применения. Реализация предложенных в стандартах идей предполагает придание ВС ИМА:

- качественно новых эксплуатационных свойств;
- повышенных значений технико-экономических показателей по сравнению с существующими сегодня вычислительными системами (ВС четвертого поколения), находящимися в эксплуатации.

Практический опыт разработки ВС четвертого поколения и перспективных ВС ИМА показал существенные отличия в принципах их структурной организации и выявил объективную потребность современного производства в создании новых методов и средств автоматического и автоматизированного контроля, специализированных под вычислительные системы ИМА и обеспечивающих свойство реконфигурации ВС при возникновении отказов в полете.

Принятые в ВС четвертого поколения технические решения в области организации средств контроля оказываются неприменимыми для создания средств контроля перспективных ВС, в связи с чем актуальной является задача создания и исследования методов и средств контроля ВС, специализированных под ВС ИМА.

Объектом исследования диссертационной работы является бортовая

цифровая вычислительная система, разрабатываемая согласно концепции ИМА.

Предметом исследования диссертационной работы являются методы и средства контроля ВС ИМА, применяемые во время полета ЛА и во время производства ВС и ее функциональных элементов на заводе-изготовителе.

Цель диссертационной работы заключается в разработке средств контроля ВС ИМА, обеспечивающих проверку вычислительной системы и входящих в нее функциональных элементов (модулей) в процессе полета ЛА и в процессе производства ВС на заводе-изготовителе.

Задачи диссертационного исследования:

1. Анализ принципов построения ВС ИМА и ее функциональных элементов (модулей).
2. Анализ существующих методов и средств контроля вычислительных систем ИМА.
3. Выбор технических решений, положенных в основу создания алгоритмов контроля ВС ИМА.
4. Разработка схемы унифицированного автоматизированного рабочего места (АРМ) проверки, используемого для контроля функциональных элементов ВС ИМА на заводе-изготовителе.
5. Разработка алгоритмов контроля ВС ИМА во время полета ЛА.
6. Разработка алгоритмов контроля функциональных элементов ВС ИМА в составе унифицированного рабочего места проверки.
7. Разработка программного обеспечения (ПО), реализующего алгоритмы контроля функциональных элементов ВС ИМА на заводе-изготовителе.
8. Апробация алгоритмов контроля ВС ИМА в составе реальной вычислительной системы.

Научная новизна результатов диссертационной работы. В процессе выполнения комплексных теоретических и экспериментальных исследований и внедрения результатов диссертационной работы в авиационную промышленность решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в разработке алгоритмического и программного обеспечения средств автоматического и

автоматизированного контроля перспективных ВС ИМА и ее функциональных компонентов. Научной новизной обладают следующие результаты:

1. Алгоритм контроля ВС ИМА в полете ЛА, отличающийся от известных: параллельным принципом организации контроля всех функциональных элементов; введением процедуры многократного перекрестного контроля каждого функционального элемента; введением процедуры мажорирования результатов контроля каждого функционального элемента ВС, повышающих в совокупности достоверность контроля ВС ИМА.

2. Алгоритмы и комплекс программ для контроля функциональных элементов ВС ИМА, применяемые в составе унифицированного АРМ на заводе-изготовителе, отличающиеся от известных модульным принципом построения структуры тестов с разделением модулей тестов по функциональной принадлежности каждого тестируемого компонента.

3. Математические модели оценки вероятности безотказной работы ВС ИМА, учитывающие различные актуальные для авиационной промышленности способы резервирования функциональных элементов (модулей) ВС: резервирование на уровне подсистем, резервирование на уровне однотипных функциональных модулей и скользящее резервирование на уровне идентичных функциональных модулей.

4. Аппаратно-программный комплекс для контроля и диагностики функциональных элементов ВС ИМА, функционирующих в нормальных и специальных условиях эксплуатации, включающий программное обеспечение, информационно-измерительное обеспечение, алгоритмическое обеспечение.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке новых средств автоматического и автоматизированного контроля ВС ИМА и ее функциональных элементов.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в том, что в процессе диссертационного исследования созданы:

1. Комплекс программ для контроля ВС ИМА и ее функциональных элементов в составе предложенного АРМ. Программное обеспечение контроля

внедрено в производственный процесс изготовления конструктивно-функциональных модулей, входящих в состав изделия СБВС-011 разработки ФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова».

2. Комплекс математических моделей оценки вероятности безотказной работы вычислительной системы, включенный в программу обеспечения надежности ВС, создаваемых на этапе изготовления и испытаний опытных образцов изделий вычислительной техники авиационного применения.

Методы исследований. Результаты, полученные в диссертационной работе, основаны на использовании методов теории систем, методов системного анализа и синтеза, методов математического моделирования, методов теории надежности, методов теории вероятностей и математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм контроля бортовой цифровой вычислительной системы ИМА, функционирующей в процессе полета ЛА.

2. Алгоритмы и комплекс программ контроля функциональных модулей вычислительной системы ИМА, используемые в составе унифицированного автоматизированного рабочего места на заводе-изготовителе.

3. Математические модели оценки вероятности безотказной работы вычислительной системы ИМА и ее функциональных элементов.

4. Аппаратно-программный комплекс для контроля функциональных элементов вычислительной системы ИМА на заводе-изготовителе.

Внедрение результатов диссертационной работы:

1. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры Машинного проектирования бортовой электронно-вычислительной аппаратуры Университета ИТМО при чтении лекций по курсу «Автоматизация проектирования аппаратных и программных компонентов аналого-цифровых вычислительных комплексов» и «Аналого-цифровые вычислительные комплексы на базе ЭВМ и оптико-электронных систем». В частности, внедрены:

- Алгоритм контроля бортовой цифровой вычислительной системы класса интегрированной модульной авионики.

- Алгоритмы и комплекс программ для контроля функциональных элементов (модулей) цифровой вычислительной системы класса интегрированной модульной авионики в составе унифицированного АРМ.

2. Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс и разработки ФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П. А. Ефимова» при проектировании средств контроля и диагностики бортовых цифровых вычислительных систем. В частности, при создании изделия СБВС-011 внедрены:

- Математические модели оценки вероятности безотказной работы ВС ИМА, учитывающие различные способы резервирования функциональных компонентов (модулей): резервирование на уровне подсистем, резервирование на уровне однотипных функциональных модулей и скользящее резервирование на уровне идентичных функциональных модулей.

- Аппаратно-программный комплекс для контроля и диагностики функциональных элементов ВС ИМА, функционирующих в нормальных и специальных условиях эксплуатации, включающий программное обеспечение, информационно-измерительное обеспечение и алгоритмическое обеспечение.

3. Результаты диссертационной работы внедрены в следующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах:

- НИОКР «Создание образцов комплекса унифицированных базовых элементов бортового оборудования открытой архитектуры на основе интегрированной модульной авионики. Создание образцов вычислительных и интерфейсных средств: бортовой системы специального назначения общих вычислительных ресурсов с типоразмером модулей 6U» (заказчик – ОАО «Авиаприбор-холдинг», 2013-2014 гг.);

- НИР «Исследования по созданию конкурентоспособного на мировом рынке отечественного бортового оборудования на основе разработки новых функций КБО, платформы интегрированной авионики 2-го поколения и функционального программного обеспечения, создания прототипов инновационных распределенных общесамолетных систем и

высокоинтегрированных многофункциональных систем КБО с минимальной номенклатурой стандартных унифицированных модулей на базе перспективной технологии проектирования» (заказчик – ФГУП «ГосНИИАС», 2011-2015 гг.);

- ОКР «Разработка изделия 57 для объекта ПСШ» (заказчик – ОАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого», 2013-2014 гг.);

- ОКР «Разработка аппаратно-программных средств радиационно-стойкого контура бортовой вычислительной системы для объектов 45.03М и 70М» (заказчик – ОАО «Туполев», 2014-2016 гг.);

- НИР «Проектирование и разработка методов создания безопасных информационных и технологических систем» (заказчик – Университет ИТ-МО, НИР №610479, 2012-2015гг.).

4. Исследования по теме диссертационной работы поддержаны грантом «Исследование принципов тестирования бортовых цифровых вычислительных систем перспективных летательных аппаратов», диплом ПСП №14223, в рамках Конкурса грантов 2014 года для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 26 печатных работ, из них 6 статей опубликовано в рецензируемых научных журналах, в том числе 5 статей из перечня ВАК РФ [38, 54, 55, 58, 90] и 1 статья – в издании из базы цитирования Scopus [112], 19 статей опубликованы в сборниках трудов международных и региональных конференций [45-53, 56, 57, 59-62, 69-70, 79, 111], 1 учебное пособие [89].

Апробация результатов работы. Основные научные положения и практические результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях и семинарах: XLII научная и учебно-методическая конференция, Университет ИТМО, 29.01.2013 - 01.02.2013, Санкт-Петербург, Россия; XV Конференция молодых ученых “Навигация и управление движением”, ОАО “Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, 12.03.2013 - 15.03.2013, Санкт-Петербург, Россия; XLIII научная и учебно-

методическая конференция, Университет ИТМО, 28-31 января 2014, Санкт-Петербург, Россия; XVI Конференция молодых ученых “Навигация и управление движением”, ОАО “Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, 11-14 марта 2014, Санкт-Петербург, Россия; XVIII Всероссийская научно-практическая конференция «Научное творчество молодежи. Математика. Информатика», Кемеровский государственный университет, 24-25 апреля 2014, г. Анжеро-Судженск, Россия; XX международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 14-18 апреля 2014, г. Томск, Россия; International Conference of Young Scientists Automation & Control, Санкт-Петербургский Политехнический университет, 21-22 ноября 2013, Санкт-Петербург, Россия; XII международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии», Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 12-14 ноября 2014, г. Томск, Россия; XIII Международная научно-практическая конференция им. А.Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование», Кемеровский государственный университет, 20-22 ноября 2014, г. Анжеро-Судженск, Россия; XLIV научная и учебно-методическая конференция, Университет ИТМО, 03.02.2015 - 06.02.2015, Санкт-Петербург, Россия; XVII Конференция молодых ученых “Навигация и управление движением”, ОАО “Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, 17-20 марта 2015, Санкт-Петербург, Россия.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения и списка литературы. Материал изложен на 145 страницах машинописного текста, включает 37 рисунков и 7 таблиц. Акты внедрения и дипломы приведены в приложении диссертации.

ГЛАВА 1. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИМА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

1.1. Архитектура комплексов бортового оборудования

Бортовые цифровые вычислительные комплексы начали свое развитие на рубеже 60-х годов. Архитектура бортового комплекса строилась по независимому принципу (рис. 1.1, а): каждая система комплекса выполняла определенную функцию авионики и была подключена к соответствующим измерительным датчикам. При этом практически никакого обмена между отдельными системами комплекса предусмотрено не было. Типичными представителями такой организации архитектуры вычислительной системы являются входящие в ее состав ЦВМ-263 и ЦВМ-264 [4, 63].

Дальнейшее развитие бортовых цифровых авиационных комплексов развивалось в направлении создания распределенных вычислительных структур. Сегодня принято выделять два подхода к созданию комплексов авионики: построение федеративной и интегрированной архитектуры.

Федеративная архитектура бортовых комплексов появилась в начале 80-х годов (рис. 1.1, б). Ее главным отличием является автономное, независимое распределение функций авионики между отдельными подсистемами. При этом определены отношения между системами и выделенными для нее ресурсами. Каждая функция бортового комплекса реализуется своей подсистемой. Обмен между системами осуществляется посредством бортовых линий передач информации. Типичными представителями федеративной архитектуры являются вычислительные машины и системы AP04, Piccolo [119, 120] и БЦВМ 90-50XXX, БЦВМ “Багет-53”.

Основными недостатками федеративной архитектуры являются [110, 113, 122]:

- неунифицированные конструкторские решения на отдельные системы, входящие в состав блоков;

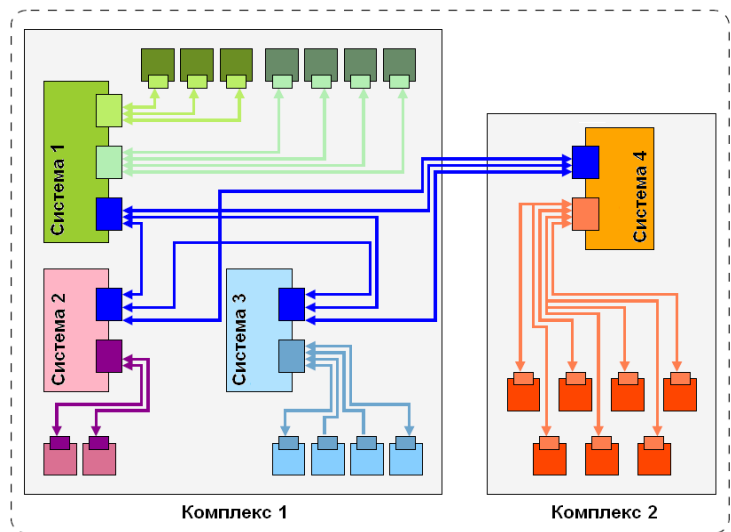
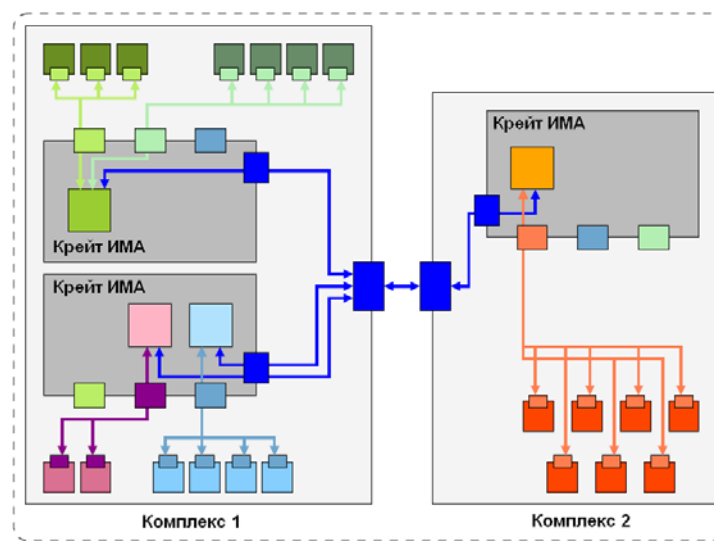
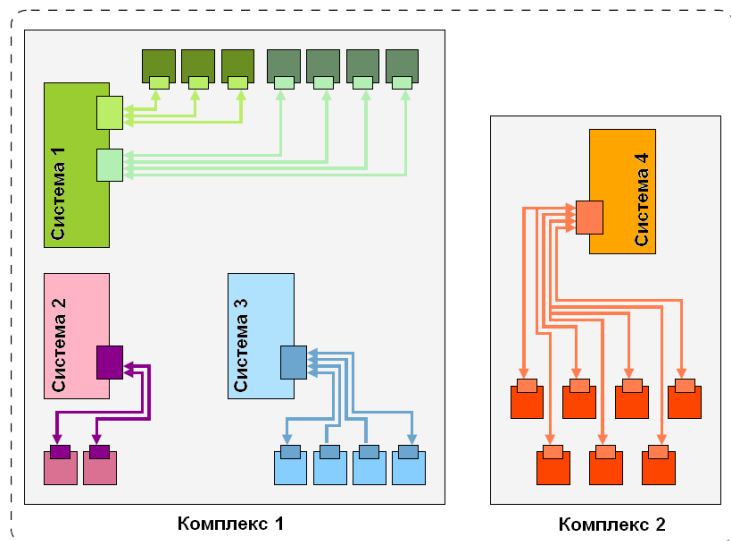


Рисунок 1.1 — Примеры построения авионики летательных аппаратов:

- а) независимое исполнение архитектуры;
- б) федеративное исполнение архитектуры;
- в) интегрированное модульное исполнение архитектуры.

- программное обеспечение неразрывно связано с физическим «воплощением» аппаратуры, законченным продуктом является вычислитель с программой;

- электронная компонентная база достаточно быстро “снимается” с производства и требует замены и длительного изготовления изделия данного типа;

- системная интеграция является уникальным процессом творческой деятельности главного конструктора, который трудно автоматизировать;

- сертификация системы является долгой и дорогостоящей процедурой;

- стандартизацией охвачены только общесистемные интерфейсы и бортовые линии передачи информации.

С начала 2000-х годов архитектура бортовых комплексов начала развиваться в соответствии с концепцией интегрированной модульной авионики [33, 92-100, 107]. Примеры архитектуры приведены на рис. 1.1, в. В подходе ИМА функции бортового комплекса выделяются в логические разделы, которые могут располагаться как в одном физическом вычислительном устройстве, так и в нескольких. Все вычислительные устройства, соединенные посредством высокоскоростных бортовых интерфейсов, являются высокоинтегрированными устройствами с общим программным уровнем, типичным для спецификации ARINC 653 APEX [101].

Основными принципами построения интегрированных вычислительных систем являются [6, 7, 21, 24, 83, 109]:

- модульная, открытая, микропроцессорно-независимая архитектура БЦВС, позволяющая наращивать вычислительные ресурсы, совмещать изделий различных производителей, выполненных в едином стандартном конструктивном исполнении;

- распределенная обработка сигналов и данных на основе многопроцессорных вычислительных средств в распределенной архитектуре вычислительных систем, использование распределенной мультизадачной операционной системы реального времени;

- использование высокоскоростных информационных каналов и интерфейсов для межсистемного, межмодульного и внутримодульного информационного обмена;

- использование технологии разработки программного обеспечения (ПО) с использованием сертифицированных языков программирования высокого уровня;

- использование унифицированных компонентов (модулей, узлов) в качестве конструктивно-сменных единиц авионики, за счет чего повышаются эксплуатационные свойства вычислительной системы.

Сравнительные характеристики различных принципов построения бортовой архитектуры представлены в табл. 1.1 [31, 36, 108, 114].

1.2 Основы проектирования изделий класса ИМА. Технические решения

Основные причины создания новых цифровых вычислительных систем обусловлены желанием разработчиков придать аппаратуре новые эксплуатационные свойства за счет [3, 84, 87, 102, 103, 121]:

- повышения требований к времени реакции исполнительных элементов авионики на задающее воздействие, координации действий летного состава и элементов авионики, точности вычисления параметров движения летательных аппаратов;

- повышения требования к интеллектуализации ПО комплексов летательного аппарата;

- повышения требований к безопасности, регулярности и эффективности выполнения полетов;

- повышения требований по надежности аппаратуры вычислительных комплексов летательного аппарата;

- снижения стоимости и оперативности технического обслуживания в период эксплуатации, а также отсутствия необходимости технического обслуживания в межсервисные периоды.

Таблица 1.1

Сравнительные характеристики принципов построения архитектуры бортовых комплексов

Характеристика	Принцип построения архитектуры		
	Независимый	Федеративный	Интегрированный
1	2	3	4
Совместимость разработок	Различные разработки мало совместимы друг с другом в силу использования специализированных проектных решений, разрабатываемых под конкретный летательный аппарат		Используется принцип стандартизации и унификации, ориентированный на разработку стандартизованных устройств (модулей ИМА), совместимых между собой. Появляется возможность использования коммерческих технологий, в частности COTS.
Используемые бортовые интерфейсы	Используется вся номенклатура интерфейсов. В первых поколениях бортового оборудования использовались аналоговые средства передачи информации. В современных бортовых комплексах используются высокоскоростные цифровые каналы связи.		
Отказоустойчивость	Вследствие независимости систем имеет место взаимное влияние отказов. Выявление отказа реализуется путем анализа результатов выполнения встроенного аппаратно-программного контроля.	Вследствие связи систем посредством бортовых интерфейсов, имеет место распространение отказа одного комплекса на связанные с ним системы. Выявление отказа реализуется использованием встроенного аппаратно-программного контроля.	Вследствие использования динамического назначения задач на вычислительные ресурсы, системы, выполняющие разные по важности функции, выявляются отказы других систем. Выявление отказа реализуется механизмом анализа результатов выполнения программного контроля.
	Избыточность аппаратных и программных средств защищает бортовой комплекс от случайных и систематических ошибок вычислений, а также уменьшает погрешность вычислений.		

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
Продолжительность, цена разработки, комплексирование и сертификация авиационной аппаратуры	Разработка, настройка, проверка, а также сертификация систем бортового комплекса выполняются каждым производителем отдельно. Каждая из фирм-производителей предоставляет гарантийное и послегарантийное обслуживание своих разработок. Эти факторы не позволяют минимизировать стоимость или время создания комплекса в масштабах времени и стоимости создания объекта. Комплексирование авионики осуществляется в составе объекта, после разработки и изготовления всех входящих в него подсистем.		Фирмы-производители комплексов ориентированы на разработку модулей ИМА, стандартизованных и унифицированных в соответствии с действующими авиационными стандартами. Обеспечение соответствия разработок авиационным стандартам позволяет привлекать коммерческие COTS-технологии к использованию в объектах гражданского назначения. Разработка и сертификация модулей осуществляются производителем и не зависит от типа летательного аппарата. Комплексирование авионики проводится на головном предприятии в едином технологическом цикле, благодаря проектированию программного обеспечения на базе единой аппаратно-программной платформы.
Ремонтопригодность	Ремонт и восстановление оборудования проводятся на специализированных авиаремонтных заводах, где должен находиться достаточный объем запасов исправной аппаратуры. Если используются несколько авиаремонтных заводов, то каждый завод должен иметь достаточный запас аппаратуры, что увеличивает издержки в создании бортового оборудования.		Применение единых стандартизованных модулей ИМА ограниченной номенклатуры упрощает техническое обслуживание летательных аппаратов различного типа. На каждом авиаремонтном заводе необходимо иметь лишь ограниченный набор исправных унифицированных модулей ИМА.

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
Модернизация	Вследствие независимости систем, модернизация затрагивает только одну систему, которой в дальнейшем потребуется повторная сертификация.	Модернизация возможна на нескольких уровнях: на уровне системы и на уровне комплекса. После модернизации требуется повторная сертификация.	Аппаратная и программная части модулей ИМА независимы друг от друга. Изменяются только средства встроенного аппаратно-программного контроля. Такой подход позволяет повторно сертифицировать только те аппаратные или программные части модулей, которые подвергались непосредственному изменению.
Габаритные размеры, и масса	Каждая функция авионики выполняется соответствующей системой. В силу этого, общие габаритные размеры комплекса велики. Распространенное соединение систем по принципу «точка-точка» увеличивает общую массу за счет большого числа проводников каналов связи.	Принцип комплексной обработки бортовой информации позволяет снизить габаритные размеры комплекса. Распространены мультиплексированные линии связи, что сокращает общий вес кабельной сети.	Несколько систем объединены в единый конструктивный элемент (крейт ИМА). Вследствие расположения источников и приемников информации максимально друг к другу габаритные размеры комплекса значительно уменьшены. Распространены высокоскоростные мультиплексированные линии связи, а также оптоволоконные каналы связи, что также сокращает общий вес кабельной сети.

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
Усложнение функциональных задач комплекса, программирование аппаратуры комплекса	Усложнение функциональных задач бортового оборудования производится путем изменения программного обеспечения, а также путем добавления дополнительных линий связи между комплексами. Изменение ПО реализует информационную избыточность бортового оборудования. Наращивание задач проводится в рамках одного комплекса/системы. Габаритные размеры, масса и энергопотребление аппаратуры может изменяться. Введение дополнительных систем может потребовать новых приемников и источников пилотажно-навигационной информации.	Усложнение функциональных задач бортового оборудования производится путем изменения программного обеспечения, а также путем интеграции с другими системами. Изменение ПО реализует информационную избыточность. Интеграция требует изменения каналов связи, что приводит к усложнению архитектуры бортового оборудования. Изменение архитектуры может потребовать пересертификацию комплекса. При введении дополнительных систем может потребоваться введение специальных устройств – приемников и источников пилотажно-навигационной информации.	Модульный принцип построения программного обеспечения позволяет интегрировать дополнительные программные приложения для увеличения количества функциональных задач в состав исходного кода. При наличии достаточных ресурсов и быстродействия интеграция новых программных приложений производится без дополнительных доработок уже имеющихся приложений. Наращивание функциональных задач может потребовать изменения количества линий связи или топологии схемы связи бортового комплекса.

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
Энергопотребление	Каждая система, входящая в состав комплекса бортового оборудования, устанавливается индивидуально и является автономным потребителем бортовой электроэнергии.		В состав крейта ИМА (единого конструктива) могут входить несколько различных систем. Крейт является автономным потребителем электроэнергии I категории.
Потребность в системе охлаждения	Каждая система в составе объекта увеличивает тепловыделение, что требует охлаждения аппаратуры. Для систем с одинаковым функциональным назначением комплексы ИМА требуют меньшего объема охлаждения по сравнению с другими принципами построения архитектуры авиационных комплексов за счет конструктивной интеграции.		
Элементная база	Используются в основном дискретные элементы (арифметическое устройство, ОЗУ, ПЗУ, устройство управления и вторичный источник электропитания)	Широкое применение больших интегральных микросхем и ЭРИ высокой степени интеграции	Переход к сверхбольшим интегральным микросхемам микропроцессоров со встроенной системой команд. Также применяются «системы на кристалле».
Принцип построения ПО	Введение дополнительных задач реализовано путем изменения прикладного программного обеспечения, т.е. все уже существующие приложения будут изменены. При изменении ПО потребуются пересертификация системы.		ПО строится по модульному принципу. Таким образом при имеющемся достаточном временном запасе новые функции авионики могут быть интегрированы в систему без изменения уже существующих программных приложений.

Перспективный интегрированный комплекс бортового оборудования должен отвечать требованиям по обеспечению всепогодного круглосуточного применения, обеспечению минимального времени подготовки к работе, обеспечению высоких показателей надежности, обеспечению требований по простоте и удобству эксплуатации и обслуживания, а также требований по сертификации.

Создание современных комплексов авионики осуществляется в соответствии с концепцией интегрированной модульной авионики.

Основные эксплуатационные свойства комплексов ИМА достигаются за счет [17, 20, 83, 84, 87]:

- открытой сетевой распределенной архитектуры построения бортового комплекса с возможностью наращивания вычислительных ресурсов;
- магистрально-модульной иерархической структуры вычислителя;
- multifunctionality интегрированной вычислительной системы (ИВС);
- крейтово-модульного исполнения ИВС;
- принципов стандартизации и унификации проектных решений на аппаратном и программном уровне;
- отсутствия необходимости обслуживания комплекса в межсервисные периоды с сохранением требуемого уровня безопасности полетов и показателей надежности аппаратуры;
- реализации возможности автоматической диагностики аппаратуры с последующей реконфигурацией структуры вычислительной системы при обнаружении отказов в полете.

Элементы вычислительной системы, создаваемой по принципам открытой архитектуры, следует проектировать с использованием стандартизованных и общепринятых технических решений и системных наработок.

Сетевая распределенная структура должна быть приспособлена к динамическому распределению имеющихся ресурсов с целью сохранения работоспособности аппаратуры при возможных отказах оборудования и

достижении вычислительной системой максимальной производительности. Такая архитектура обеспечит возможность программно-управляемой реконфигурации аппаратных средств для придания необходимых функциональных характеристик авиационной технике с целью повышения показателей отказоустойчивости.

Важной особенностью открытой архитектуры, свойственной ИМА, является отсутствие жестко установленных логических связей между элементами бортового оборудования (вычислительными системами, датчиками, индикаторами). Это позволяет реализовывать динамически реконфигурируемую вычислительную структуру комплекса с перераспределением задач в пределах доступных вычислительных ресурсов.

Мультифункциональность вычислительной системы ИМА означает возможность выполнения большого количества функций вычислительной системы ЛА на одних и тех же аппаратных средствах. Таким образом переход от федеративной к интегрированной архитектуре обеспечивает качественно новый уровень проектного решения: переход от идеи «система – одна функция» к идее «много функций в одном вычислительном ядре». Реализация идеи «много функций в одном вычислительном ядре» позволяет осуществить независимое проектирование программных и аппаратных платформ.

Крейтово-модульное стандартизованное исполнение вычислительной системы реализуется на практике путем построения вычислительной системы на базе ограниченного набора унифицированных компонентов. К таким компонентам можно отнести: базовую несущую конструкцию крейта, минимально достаточный набор унифицированных и стандартизованных конструктивно-функциональных модулей и мезонинов с высокой производительностью.

Принцип стандартизации и унификации означает единый подход к созданию системных, схемотехнических, программных и конструктивно-технологических решений, что впоследствии приводит к упрощению модернизации состава бортового комплекса и возможности наращивания функциональных задач авионики.

Организация вычислительных систем ИМА позволяет повысить производительность и показатели надежности аппаратуры, в частности, время наработки на отказ. Это достигается путем построения эффективной организации вычислительных процессов в распределенной вычислительной среде за счет реализации:

- аппаратных составляющих комплекса в виде минимального набора стандартизованных высокопроизводительных конструктивно-функциональных модулей;
- операционной системы реального времени, которая обеспечивает распределение программных приложений для решения функциональных задач;
- высокоскоростных сетевых каналов информационного обмена, обеспечивающих необходимую пропускную способность и отказоустойчивость системы.

Современный авиационный комплекс ЛА представляет собой совокупность систем, реализующих на борту различные задачи по управлению ЛА, и включает в себя (рис. 1.2):

- информационно-управляющее поле (управляющие органы кабины, нацеленная система целеуказания и индикации, индикатор лобового стекла (коллиматорные, широкоугольные), многофункциональные индикаторы, пульта управления, система видеорегистрации);
- бортовую цифровую вычислительную систему и блок формирования сигналов;
- пилотажно-навигационную информационную систему (автоматический радиоконпас, радиовысотомер, система автоматического управления, система воздушных сигналов, радиосистема ближней и дальней навигации, система бесплатформенного курса и вертикали, инерциально-навигационная система, спутниковая навигационная система и т.д.).

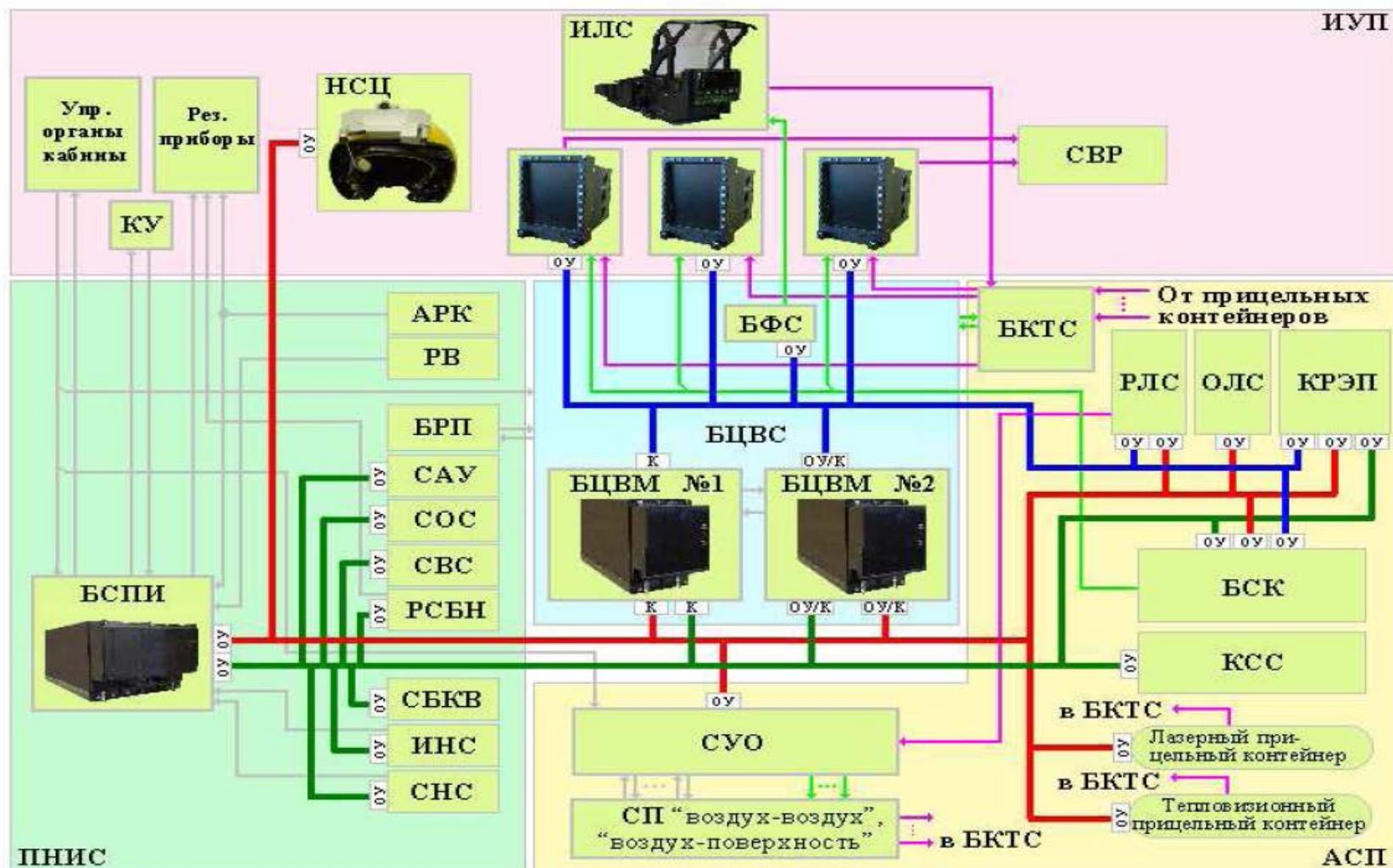


Рисунок 1.2 – Структурно-функциональная схема типового БРЭО [29]
(на примере разработок ОАО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»)

1.2.1 Сетевые организации вычислительных систем класса ИМА

Сетевая организация вычислительных систем класса ИМА должна отвечать следующим требованиям [23, 26, 78, 83, 88]:

- топология вычислительной сети должна использовать открытые стандарты на аппаратное и программное обеспечение;
- топология вычислительной сети БЦВС должна быть масштабируемой;
- топология вычислительной сети БЦВС должна поддерживать высокий уровень взаимосвязанности;
- сетевые требования не должны вводить расширение номенклатуры используемых типов конструктивно-функциональных модулей (КФМ);
- должна обеспечиваться полная взаимозаменяемость КФМ по крепежно-посадочным местам, способу установки и функциям;
- топология вычислительной сети БЦВС должна поддерживать различные уровни защиты данных от случайных сбоев;
- топология вычислительной сети БЦВС должна обеспечивать возможность изменения конфигурации системы с целью реализации свойства отказоустойчивости.

Среди множества возможных конфигураций БЦВС различают [76] полносвязные (когда каждый из абонентов сети непосредственно связан со всеми остальными абонентами по отдельным физическим линиям связи) и неполносвязные сети. Из неполносвязных конфигураций различают: ячеистую топологию, кольцевую топологию, звездообразную топологию и конфигурацию «общая шина». Примеры существующих изделий вычислительных систем класса ИМА следующие:

- МПВК разработки ЗАО НПП «Авиационная и Морская Электроника» (Санкт-Петербург);
- «Базис 5.0» разработки ОАО «Научно-конструкторское бюро вычислительных систем» (г. Таганрог);
- БВС-1 разработки ОАО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро» (г. Москва, г. Раменское);

- «Крейт 6U» разработки ФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова».

Согласно технической документации [82] МПВК предназначен для многоканальной цифровой обработки больших потоков информации в реальном масштабе времени и может быть использован как в качестве автономной бортовой вычислительной системы, так и для построения кластерных суперЭВМ. В состав МПВК входят:

- до 8 модулей цифровых процессорных сигналов (МЦПС), представляющих собой двухпроцессорных устройств (один процессор установлен на основной плате, второй – на дополнительном мезонинном модуле);
- модуль центрального процессора (МЦП);
- объединительная кросс-плата межмодульных соединений;
- модуль блока питания.

Для организации внутрисистемного взаимодействия используются стандартный интерфейс – системная шина CompactPCI (PICMG 2.0 D3.0) и специализированные интерфейсы. Уровень внутрисистемного взаимодействия представлен:

- системным уровнем, который обеспечивает организацию информационного взаимодействия сигналов МЦПС с МЦП по стандартному магистрально-шинному интерфейсу CompactPCI;
- уровнем информационного взаимодействия МЦПС, который обеспечивает высокоскоростной обмен данными между модулями МЦПС по специализированному интерфейсу;
- уровнем межпроцессорного взаимодействия, который обеспечивает обмен данными между основным и мезонинным процессорами в модуле МЦПС.

На рис. 1.3 изображена внутренняя структура МПВК с внутренними связями. Топология внутренней сети состоит из топологии типа «линия» при соединении контроллеров специализированного интерфейса модулей МЦПС и топологии типа «общая шина», по которой соединяются все контроллеры CompactPCI модулей МЦПС и модуля МЦП.

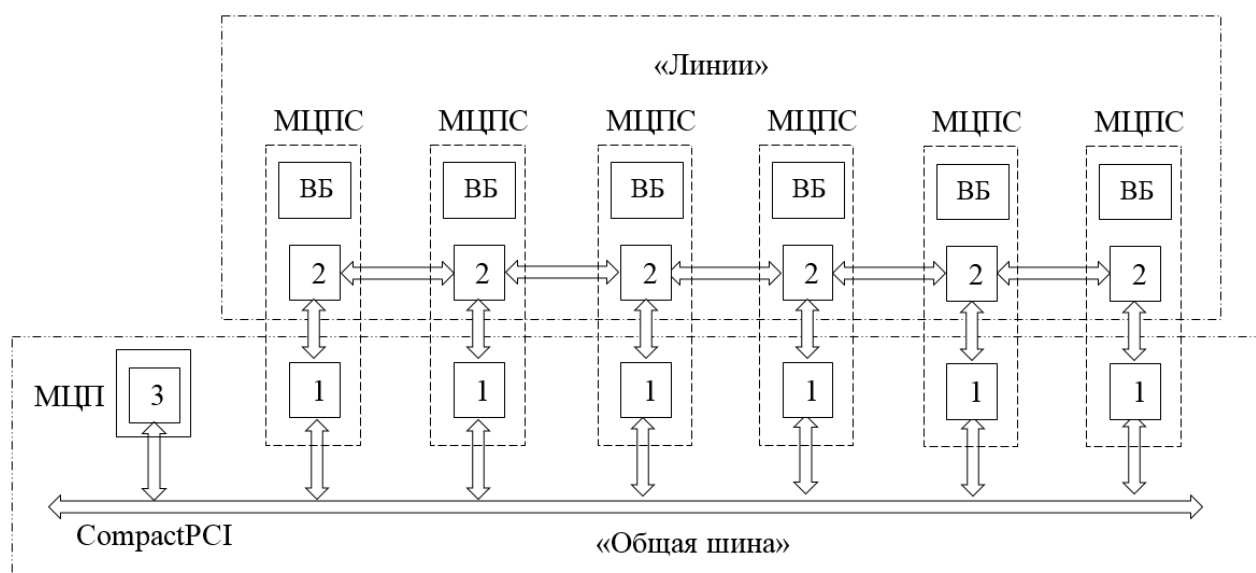


Рисунок 1.3 - Сетевая топология МПВК:

1 – контроллер CompactPCI МЦПС;

2 – контроллер специализированного интерфейса МЦПС;

3 – контроллер CompactPCI МЦП; ВБ – вычислительный блок

Проект «Базис 5.0» [39] предназначен для применения в качестве унифицированных базовых аппаратно-программных средств в комплексах бортового оборудования перспективных самолетов разных типов. «Базис 5.0» состоит из модуля универсального процессора данных (МУПД), модуля унифицированного носителя мезонинов (МНМ), модуля сетевого коммутатора AFDX (МСК), модуля вторичных источников электропитания (МВЭ), модуля сопряжения МУПД (МС МУПД), модуля оптических интерфейсов ARINC818 (МОИ A818), модуля сопряжения универсальный (МСУ) и модуля сопряжения МВЭ (МС МВЭ). Все модули соединены быстродействующей распределенной коммутационной средой PCI-Express.

Сетевая топология комплекса «Базис 5.0» представлена на рис. 1.4. Топология соответствует стандартной сетевой топологии типа «общая шина».

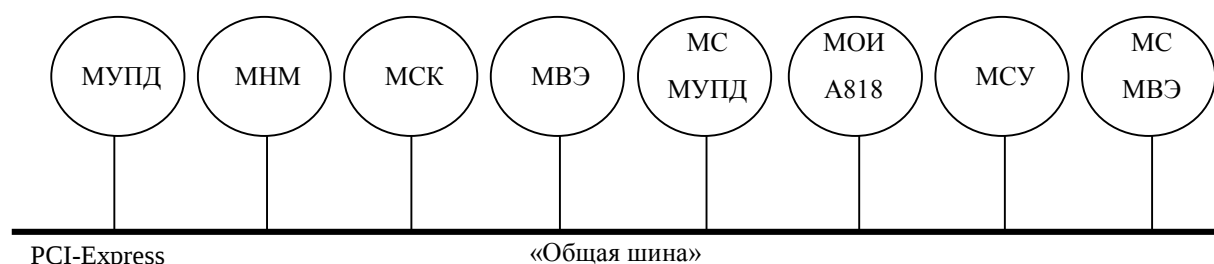


Рисунок 1.4 - Сетевая топология комплекса «Базис 5.0»

Бортовая вычислительная система (БВС-1) [81] предназначена для реализации функций вычислителя и функций управления в составе вычислительных систем перспективных бортовых комплексов военных и гражданских летательных аппаратов. Сетевая топология данной системы представляет собой резервированную полнодуплексную сеть. В основе сети лежит последовательный высокоскоростной интерфейс, обеспечивающий связь модулей, входящих в ее состав и, также, связь с другими системами бортового оборудования. БВС-1 состоит из модулей процессора общего назначения (МПОН) и модуля коммутатора (МК). Архитектура системы является симметричной многопроцессорной с дублированной средой коммутации каналов стандарта ARINC664. Топология внутренней сети системы БВС-1 изображена на рис. 1.5 и является топологией типа «двойная звезда».

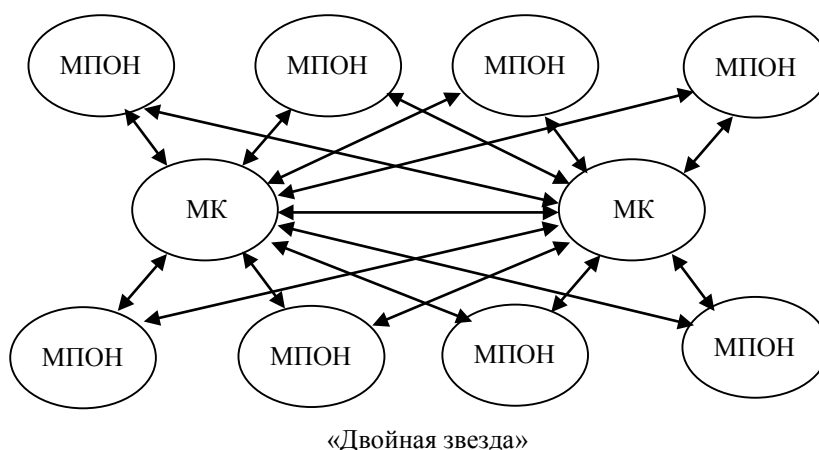


Рисунок 1.5 - Сетевая топология системы БВС-1

Одним из путей практической реализации перспективных БЦВС является путь построения вычислительных систем с применением технологии коммутируемых высокоскоростных интерфейсов SpaceWire в качестве внутрисистемного интерфейса, а также в качестве внешнего интерфейса для подключения сетевых абонентов в составе летательного аппарата [104, 105, 115, 116].

БЦВС «Крейт» построена на основе унифицированных КФМ различного назначения. Структура БЦВС «Крейт» представлена на рис. 1.6 [37, 57, 58].

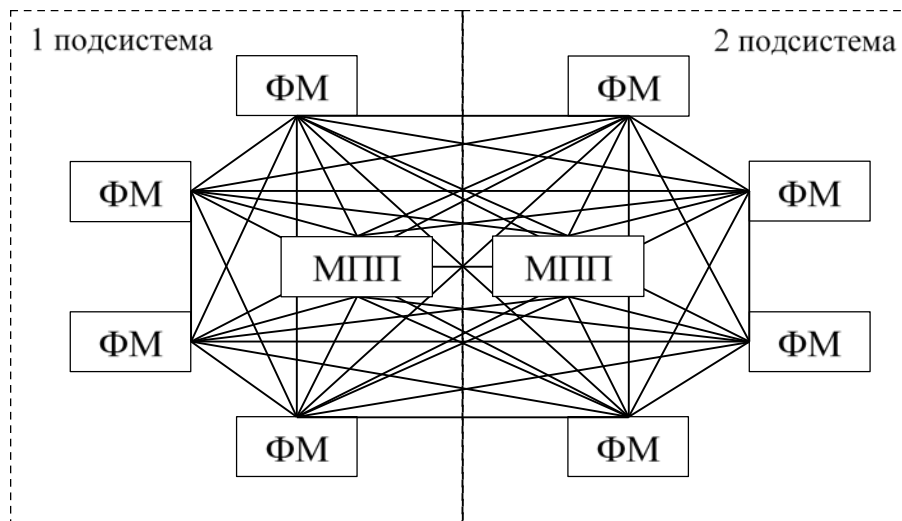


Рисунок 1.6 - Комбинационная схема сетевой топологии БЦВС «Крейт»: МПП – модуль постоянной памяти; ФМ – функциональный модуль

В основу архитектуры БЦВС положены составляющие сетевой топологии коммутации модулей по схеме типа «двойная звезда» и «полносвязная сеть».

Сетевая топология системы «Крейт», представленная на рис. 1.6, является смешанной топологией. С одной стороны – это полносвязная сеть, так как все модули соединены между собой, но также тут присутствуют схемные решения топологии типа «двойная звезда», так как все КФМ соединены с двумя модулями МПП, которые обеспечивают работу комплекса в целом (распределяют задачи, контролируют состояние исправности компонентов и т.п.). Соединяя в себе достоинства обоих сетевых решений, система «Крейт»:

- повышает надежность работы автономного комплекса, позволяя не только реализовать скользящее резервирование компонентов, но и перераспределять пути трафика данных при выходе из строя соединительных связей;
- обеспечивает максимальную пропускную способность каналов благодаря подключению всех абонентов сети по типу «точка-точка» через неблокирующий коммутатор;
- обеспечивает программно управляемое исполнение функциональных задач авионики, позволяя реализовывать различные вычислительные структуры в единой конструкции вычислителя. Это может быть организация распределенных вычислений или, например, организация мажорирования данных, причем

изменение функций каждого из модулей возможно непосредственно во время полета.

1.3. Роль и место БЦВС ИМА в составе современных комплексов

1.3.1 Задачи комплексов авионики

В настоящее время вычислительные системы, установленные на борту ЛА, выполняют следующие основные функции авионики [19, 30, 85]:

- автоматизированное и ручное самолетовождение (планирование полета, навигация, управление в горизонтальной и вертикальной плоскостях и др.);
- подготовка параметров для отображения необходимой пилотам информации на многофункциональных индикаторах (навигационная, метеорадиолокационная, справочная и др.);
- контроль технического состояния общесамолетных систем, а также регистрация результатов контроля и др.

1.3.2 Виды бортовых интерфейсов

Современные бортовые комплексы состоят из ряда подсистем, соединяются соответствующими бортовыми интерфейсами. В то же время, сама система, состоящая из набора КФМ, должна иметь свой внутренний межмодульный интерфейс. В составе объектов перспективных ЛА рассматриваются к внедрению следующие виды интерфейсов [32, 64, 75]:

- Fibre Channel (FC-AE-ASM);
- ARINC 818 (Avionics Digital Video Bus (ADVB));
- Avionics Full Duplex Switched Ethernet (ARINC664P7);
- последовательный код по ГОСТ 18977-79 и РТМ 1495-75 с изм.2, 3, РК по ГОСТ 18977-79;
- мультиплексный канал информационного обмена по ГОСТ Р 52070;
- SpaceWire (ECSS-E-ST-50-12C).

Техническое описание и основные эксплуатационные свойства бортовых интерфейсов представлены в табл. 1.2 [2, 5].

Таблица 1.2

Описание свойств бортовых интерфейсов, значимые для создания компонентов авионики

Название	Fibre Channel (FC-AE-ASM)	ARINC818	Avionics Full Duplex Switched Ethernet (ARINC664P7)
1	2	3	4
Режим передачи информации	асинхронный	асинхронный	асинхронный
Тип связи (физическая среда)	- одномодовое волокно; - многомодовое волокно; - витая пара; - коаксиальный или твинаксиальный кабель.	- одномодовое волокно; - многомодовое волокно; - витая пара; - коаксиальный или твинаксиальный кабель.	волоконно-оптические кабели или витые медные пары
Функциональн ое назначение	- межсистемный; - внутрисистемный; - межприборный.	- внутрисистемный; - межприборный.	- межсистемный; - внутрисистемный; - межприборный.
Принцип передачи информации	последовательный	последовательный	последовательный
Тип данных	цифровые данные	цифровые видеоданные, аудиоданные и др. данные	цифровые данные
Режим обмена	дуплексный	дуплексный	дуплексный
Топология связи	- точка-точка; - управляемая петля; - коммутируемая связная архитектура.	- точка-точка	- точка-точка

Продолжение таблицы 1.2

1	2		4
Управление передачей информации	с детерминированным доступом к каналу	с детерминированным доступом к каналу	с детерминированным доступом к каналу
Преимущества	- передача информации на большие расстояния; - высокая пропускная способность между двумя портами ввода/вывода; - одновременное обращение к данным за счет использования топологии коммутируемой решетки; - одновременный обмен данными, предназначенными для разных устройств; - отсутствие конфликтов на шине снижает время ее простоя; - задержка ответа на запрашивание данных отсутствует; - механизмы контроля не зависят от топологии.	- высокая пропускная способность; - малое время ожидания при передаче несжатого цифрового видео; - передача видео данных в реальном времени с минимальной скоростью 1 Гбит/с.	- оконечная система может поддерживать до 128 виртуальных каналов передачи, которые выявляются 16-битным индикатором MAC-адреса; - интерфейс базируется на Ethernet технологии, которая хорошо отработана и имеет богатые возможности для обеспечения всех необходимых в авиационных системах потребностей

Продолжение таблицы 1.2

Название	Последовательный код по ГОСТ 18977-79 и РТМ 1495-75 с изм.2, 3, РК по ГОСТ 18977-79	Мультиплексный канал информационного обмена по ГОСТ Р 52070-2003	SpaceWire (ECSS-E-ST-50-12C)
1	2	3	4
Режим передачи информации	асинхронный	асинхронный	синхронный
Тип связи (физическая среда)	коаксиальный кабель	коаксиальный кабель	витая пара
Функциональное назначение	- межсистемный; - межприборный.	- межсистемный; - межприборный.	- межсистемный; - внутрисистемный; - межприборный.
Принцип передачи информации	последовательный	последовательный	последовательный
Тип данных	цифровые данные	цифровые данные	цифровые данные
Режим обмена	сиплексный	мультиплексный	полудуплексный
Топология связи	точка-точка	Магистральный (шина)	точка-точка

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4
Управление передачей информации	с детерминированным доступом к каналу	с централизованным управлением	с детерминированным доступом к каналу
Преимущества	- Простой и удобный интерфейс для выполнения последовательных передач - Количество приемников на шине – до 20 шт., количество передатчиков – 1 шт. - Информация передается циклически, следовательно, если данные приняты неверно, в следующем цикле могут быть исправлены.	- Наличие соответствующих ЭРИ позволяет при реализации устройств с данным интерфейсом обеспечить выполнение требований стойкости к воздействию СВВФ по ГОСТ РВ 20.39.305-98 - Количество абонентов может достигать 32.	- разработан в соответствии с требованиями аэрокосмических применений; - высокоскоростная коммутация пакетов с «червячной маршрутизацией» (низкие задержки, высокая пропускная способность); - гибкость и масштабируемость сети - многообразие методов маршрутизации; - сквозное встраивание управляющих кодов в стек протоколов; - стабилен в отношении отказов и сбоев; - малое энергопотребление; - поддержка системных функций и систем реального времени - компактно реализуется в интегральных схемах

1.4 Постановка задачи создания средств контроля вычислительной системы класса ИМА и ее компонентов

Для перспективных ЛА необходимо разрабатывать новые методы и средства контроля бортовых комплексов класса ИМА и их структурной организации, позволяющие повышать показатели надежности, такие как наработка на отказ и достоверность контроля.

Для создания реконфигурируемых многопроцессорных бортовых вычислительных систем с характеристиками, которые будут соответствовать требованиям перспективных комплексов бортового оборудования, разрабатываются бортовые системы, структура которых основана на использовании унифицированных функциональных модулей различного назначения, причем их тип и количество не должны влиять на принципы организации вычислительной системы и принципы ее функционирования. При создании средств и методов контроля БЦВС класса ИМА необходимо использовать принципы унификации и стандартизации, основанные на внутренних функциональных узлах компонентов БЦВС.

Работы по проектированию функциональных модулей для БЦВС перспективных ЛА в настоящее время ведутся по двум разным подходам к аппаратной реализации, которые определяют внутреннюю структуру функциональных модулей класса ИМА.

Согласно первому подходу вся структура КФМ состоит из набора цифровых ПЛИС, которые выполняют все функциональные задачи. Такой подход развивается на ряде предприятий [41-44]: Таганрогский научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем, НИИ многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева Южного федерального университета (г. Таганрог), Южный научный центр Российской академии наук (г. Ростов-на-Дону), ФГУП «НИИ «Квант» (г. Москва), «Специальная астрофизическая обсерватория РАН» (пос. Нижний Архыз), НИЦ «СуперЭВМ и нейрокомпьютеров» (г. Таганрог), НИВЦ МГУ (г. Москва).

Специалистами предприятий разработано семейство многопроцессорных систем, основу которых составляют базовые вычислительные модули: 24V7-750, «Тайгета», «Саиф», «Ригель», 16V5-75, «Орион-5». Характеристики базовых модулей представлены в табл. 1.3 [65, 73, 74]. Внешний вид базовых модулей представлен на рис. 1.7.

Вычислительные модули имеют открытую масштабируемую архитектуру, позволяющую программно реконфигурировать вычислительную систему. Основу модулей составляют элементы ПЛИС (в зависимости от модуля количество варьируется от 16 до 64 шт.), которые соединены быстродействующими каналами связи (LVDS, Ethernet и др.). ЭПИ расположены в узлах плоской сетки и соединены «прямоугольной» системой связей. При этом соединяются только соседние элементы ПЛИС, а данные между несмежными элементами ПЛИС передаются «транзитом» через промежуточные элементы.

На основе базового модуля 16V5-75 может быть построена вычислительная система, содержащая несколько базовых модулей и запрограммированная для решения функциональной задачи авионики.

Предложенная разработчиками в модуле аппаратная реализация имеет очевидные преимущества в виде высокого быстродействия, малых габаритных размеров базовых модулей, легко реализуемую программно-управляемую реконфигурацию.

Вместе с этим подход на основе использования только ПЛИС имеет существенные недостатки в виде большого энергопотребления, что отразится на значительном увеличении габаритных размеров блока в связи с необходимостью введения сложной системы охлаждения, и в виде существенной зависимости проектного решения от используемой импортной элементной базы, так как выбор отечественных аналогов ограничен. Кроме того, требуется разработка составляющих проекта: нового программного обеспечения, операционной системы, компиляторов и комплексов ПО для программирования вычислительной системы.

Таблица 1.3

Характеристики базовых модулей, выполненных на основе ПЛИС

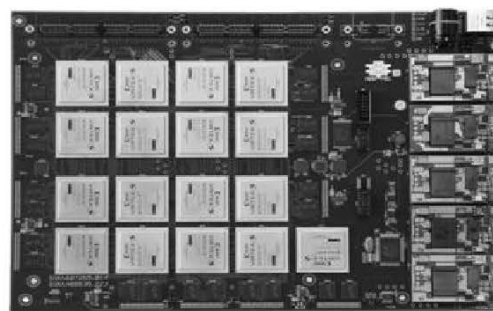
Характеристика модуля	Наименование модуля					
	24V7-750	Тайгета	Саиф	Ригель	16V5-75	Орион-5
1	2	3	4	5	6	7
Семейство ПЛИС	Virtex-7	Virtex-7	Virtex-6	Virtex-6	Virtex-5	Virtex-5
Количество ПЛИС	24	32	32 (8x4)	32 (8x4)	16	64
Производительность вычислительного модуля Pi_{32}/Pi_{64} (Гфлопс)	2600/820	2400/1200	1600/500	1600/500	140/75	250x4
Производительность при решении задач символьной обработки данных (Топ/с)	42	42	199,6	199,6	Данные в технической документации не предоставлены	116,2
Производительность при решении задач математической физики, арифметики с плавающей запятой (Тфлопс)	2,2/0,8	2,2/0,8	Данные в технической документации не предоставлены	Данные в технической документации не предоставлены	Данные в технической документации не предоставлены	0,67

Продолжение таблицы 1.3

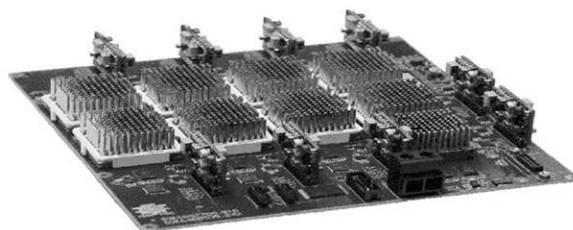
1	2	3	4	5	6	7
Скорость передачи данных с блоками распределенной памяти (Гбит/с)	16,4	16,4	12,8	12,8	Данные в технической документации не предоставлены	12,8
Скорость передачи данных между ПЛИС вычислительного поля (Тбит/с)	2,0	2,0	1,0	1,0	Данные в технической документации не предоставлены	1,2
Скорость передачи данных с другими вычислительными модулями (Тбит/с)	0,5	0,5	0,001	0,001	0,022	1,2
Интерфейс	LVDS	LVDS, Ethernet	GE	GE	LVDS	LVDS
Мощность, Вт	1200	1240	1200	1200	200	1000



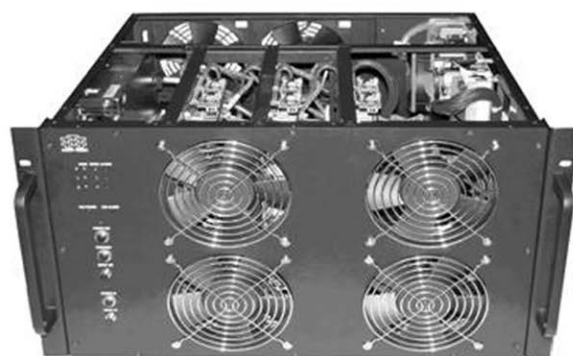
а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 1.7 – Базовые модули:

а) «Орион-5», б) 16V5-75, в) «Ригель», г) Саиф д) «Тайгета», е) 24V7-750

Согласно второму подходу элементом, выполняющим основные функциональные задачи, возлагаемые на функциональный модуль, является процессор. Дополнительно к нему при необходимости могут быть установлены сопроцессоры и/или микросхемы ПЛИС.

Развитием второго подхода занимаются следующие предприятия Российской Федерации [40, 45-48, 77]: ФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова» (Санкт-Петербург), ООО СКТБ «СКИТ» (г. Саратов), ВНИИРА (Санкт-Петербург), МИЭА (г. Москва), НПО «Полет» (Нижний Новгород), ФГУП «НИИ Авиационных систем» (г. Москва), ОАО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро» (г. Москва) и др.

Специалистами разных предприятий разработаны модули, представленные на рис. 1.8:

- а) Вычислитель бортовой формата 3U VPX ВБ (ООО СКТБ «СКИТ»);
- б) Мезонин графического процессора для бортового вычислителя МГП ВБ (ООО СКТБ «СКИТ»);
- в) Модуль цифровых процессоров сигналов (ЗАО НПП «Авиационная и Морская Электроника»);
- г) Модуль центрального процессора МЦП (ЗАО НПП «Авиационная и Морская Электроника»);
- д) Вычислительный модуль (ФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова»);
- е) Графический модуль (ФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова»);
- ж) Модуль графического контроллера М583-01-01 (ОАО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»);
- з) Модуль процессора общего назначения МПОН-2 ОАО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»).

Основные технические характеристики представлены в табл. 1.4.



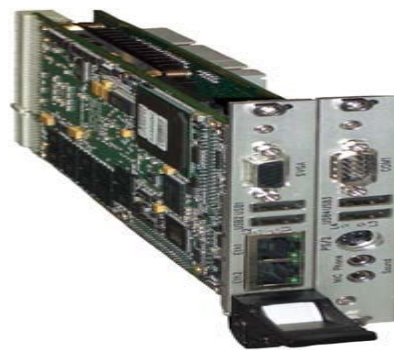
а)



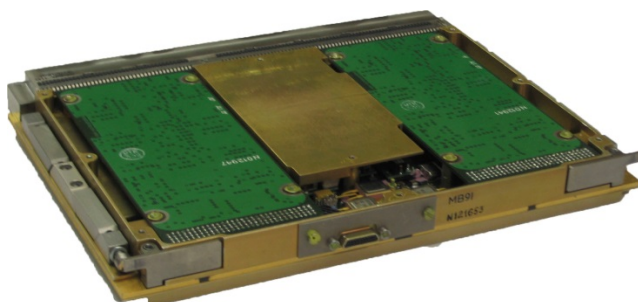
б)



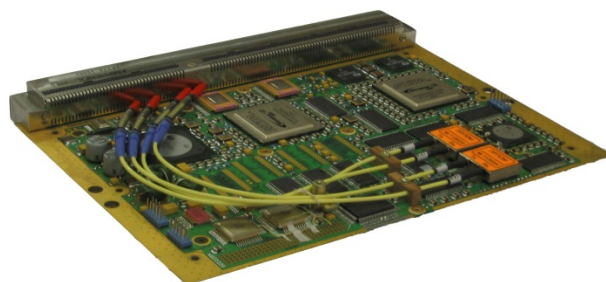
в)



г)



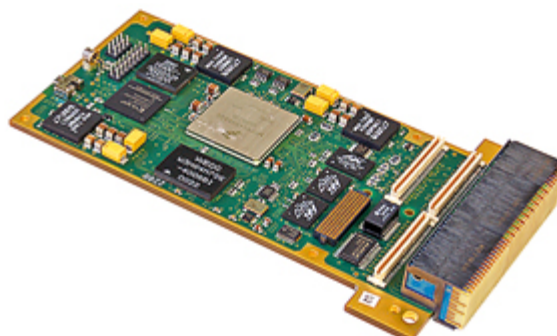
д)



е)



ж)



з)

Рисунок 1.8 – Модули разработки различных предприятий на основе процессорного элемента.

Таблица 1.4

Основные технические характеристики модулей

Характеристика	М583-01-01	МПОН-2	МВ	МГ
1	2	3	4	5
Процессор	«Ruby» MB86298, ф. Fujitsu	MPC8545, 1ГГц, Freescale	1892BM8Я, ГУП НПС «Элвис»	1892BM7Я, ГУП НПС «Элвис»
ПЗУ	Данные в технической документации не предоставлены	256 МБ (NORFlash)	32 МБ	512 МБ (NORFlash)
ОЗУ	256 МБ	512 МБ, (SDRAM DDR2)	12 МБ	112 МБ
Интерфейсы	Fibre Channel - 1 шт. PCI Express x1 – 2 шт. JTAG – 1 шт.	Ethernet 1000BASE-CX – 2 шт. Ethernet 100BASE-TX – 1 шт. RS232-C – 2 шт. PCI – 1 шт. I ² C – 1 шт. JTAG – 1 шт.	SpaceWire 14 шт.	Fibre Channel – 2 шт. SpaceWire - 4 шт.
Напряжение питания	12В или 5В	12В	12В	12В
Масса	не более 0,2 кг	не более 0,6 кг	не более 1,5 кг	не более 1,5 кг
Потребляемая мощность	до 10 Вт	до 22 Вт	до 8 Вт	до 25 Вт

1	2	3	4	5
Характеристика	ВБ	МГП ВБ	МЦПС	МЦП
Процессор	Freescale P1010 (PowerPC e500)	Fujitsu GPU	TMS320c6713	Intel Pentium 4
ПЗУ	64 Мбайт (NORFlash)	Данные в технической документации не предоставлены	Не менее 2 Мбайт	Данные в технической документации не предоставлены
ОЗУ	DDR3, 266-800 МГц SDRAM, 256 Мбайт	DDR2, SDRAM, 256 Мбайт	Не менее 256 Мбайт	SDRAM до 512 Мбайт
Интерфейсы	PCI Express x1 – 1 шт. ARINC 664 – 2 шт. Ethernet 10/100 - 1 шт. RS232-C – 2 шт. RS232/RS485 – 1 шт.	входы аналогового видео RS-170/NTSC/PAL – 2 шт. вход DVI-D - 1 шт. выход DVI-D - 2 шт.	Ethernet 100/1000BaseTX – 4 шт. LVDS – 2 шт. специализированный канал межпроцессорного обмена данными в модуле	EIDE Ultra ATA/100 – 2 шт. CompactPCI – 1 шт. USB 2.0 – 2 шт. RS-485 – 2 шт.
Напряжение питания	+12В, +3,3В	+12В, +3,3В	Данные в технической документации не предоставлены	Данные в технической документации не предоставлены
Потребляемая мощность	7 Вт	10 Вт	Данные в технической документации не предоставлены	Данные в технической документации не предоставлены

Из анализа рис. 1.8 и табл. 1.4 видно, что технические характеристики модулей, в основе которых заложен процессорный элемент, не уступают техническим характеристикам модулей, в основе которых лежат элементы ПЛИС, а по некоторым параметрам превышает (потребляемая мощность, габаритные размеры, масса и др.). Учитывая тот факт, что в настоящее время большой упор стоит на реализации замены импорта в отечественных изделиях (в том числе модулей бортовых вычислительных систем ИМА), данный подход является более перспективным, чем реализация модулей ИМА исключительно на элементах ПЛИС.

Вычислительные системы, используемые на ЛА, выполняют множество сложных функций в полете. Таким образом, их работоспособность нужно отслеживать в каждый момент времени. Используемые средства для контроля и диагностики для систем предыдущих поколений не могут быть использованы для контроля и диагностики перспективных вычислительных систем. Таким образом, необходимо развивать направления исследования средств контроля и диагностики бортовых цифровых вычислительных систем класса ИМА и разрабатывать новые алгоритмы для этих целей.

1.5 Выводы

1. Для построения перспективных бортовых цифровых вычислительных систем следует руководствоваться концепцией интегрированной модульной авионики.

2. Для построения модулей ИМА необходимо определить номенклатуру вычислительных модулей, а также схемы связи и виды используемых интерфейсов.

3. Для разработки вычислительных модулей ИМА требуется разработка схем проверок и программного обеспечения, специализированных под изделия класса ИМА, как в процессе эксплуатации на летательном аппарате, так и в процессе производства на заводе-изготовителе.

4. Унификация модулей ИМА позволит построить автоматизированное рабочее место по проверки изделий, обладающее повышенными показателями унификации и стандартизации проектных решений.

ГЛАВА 2. СОСТАВ И СТРУКТУРА БОРТОВОЙ ЦИФРОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КЛАССА ИНТЕГРИРОВАННОЙ МОДУЛЬНОЙ АВИОНИКИ

2.1. Функциональная схема интегрированной вычислительной системы

Работы по проектированию архитектуры БЦВС для перспективных типов ЛА в настоящее время проводятся рядом предприятий Российской Федерации: ФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова» (Санкт-Петербург), ВНИИРА (Санкт-Петербург), МИЭА (г. Москва), НПО «Полет» (Нижний Новгород), ФГУП «НИИ Авиационных систем» (г. Москва), ОАО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро» (г. Москва) и др. Достигнутые разработчиками результаты защищены патентами [1, 15, 25, 34, 35]: RU 2413280 C1; RU 2413655 C2; RU 108868 U1; RU 106404 U1; RU 88462 U1 и др.

БЦВС класса ИМА представляет собой многомодульную многопроцессорную вычислительную систему, выполненную в едином конструктиве, с использованием унифицированных конструктивно-функциональных модулей. Номенклатура КФМ для вычислителей ИМА представлена шестью функциональными компонентами, классифицируемыми в соответствии со своим назначением на:

- модуль вычислительный (МВ);
- модуль графический (МГ);
- модуль ввода-вывода (МВВ);
- модуль постоянной памяти (МПП);
- модуль-коммутатор (МК);
- модуль напряжений (МН).

Модуль вычислительный предназначен для реализации общих и специальных алгоритмов управления движением летательного аппарата, для выполнения математических расчетов в реальном масштабе времени, для оценки результатов фоновое тестирования бортового оборудования и т.д.

Модуль графический предназначен для приема информации от бортовых

источников видеоизображения (в том числе, телевизионной и радиолокационной информации), для обработки и формирования графической информации, для вывода видеоизображения на средства индикации, расположенные в кабине пилота летательного аппарата (пульты управления, МФЦИ, широкоугольные коллиматорные индикаторы и т.д.).

Модуль ввода-вывода предназначен для реализации функций согласования между разнородными бортовыми интерфейсами (последовательные каналы (ПК) связи [27], мультиплексные каналы информационного обмена (МКИО) [28], аналоговые сигналы, разовые команды (РК), оптический канал связи по стандарту ARINC-818 и пр.) с целью организации информационного взаимодействия абонентов БРЭО на борту летательного аппарата.

Модуль массовой памяти предназначен для хранения в своем постоянном запоминающем устройстве (твердотельном накопителе) баз данных функционального программного обеспечения, тестового ПО, баз данных экспертно-советующих систем, для обработки запросов, поступающих от вычислительных модулей, графических модулей и модулей ввода-вывода на исполнение специальных приложений программного обеспечения и для поддержки функции реконфигурации бортовой цифровой вычислительной системы при возникновении физических отказов аппаратуры.

Модуль-коммутатор предназначен для реализации сопряжения внутреннего межмодульного интерфейса БЦВС с интерфейсом внешней бортовой локальной сети (БЛС) летательного аппарата. Внешняя бортовая сеть ЛА, взаимодействующая с аппаратурой ИМА, проектируется на базе интерфейсов: AFDX (ARINC664P7), SpaceWire (ECSS-E-ST-50-12C), МКИО (ГОСТ Р 52070-2003), Fibre Channel (FC-AE-ASM).

Модуль напряжений предназначен для преобразования напряжения резервированной первичной бортовой электрической сети (~115В 400 Гц; +27В) объекта во вторичные напряжения питания (+1.8; +2.5В; +3.3В; +5В; ±6В; +12В, ±15В), необходимые для функционирования КФМ, входящих в состав вычислительной системы.

Принцип построения вычислителей класса ИМА целесообразно рассмотреть на примере. Функциональная схема БЦВС ИМА представлена на рис. 2.1 [58]. БЦВС содержит 10 различных по функциональному применению модулей. В изделии используется следующее сочетание КФМ: 2 МПП, 4 МВ, 2 МК, 2 МГ, 2МВВ и 2 МН. Все модули (за исключением МН) соединены в межмодульную локальную сеть через сетевой интерфейс. На рис. 2.1 в качестве такого интерфейса используется последовательный интерфейс SpaceWire.

Для построения различных по функциональному применению вычислительных систем (графической станции, интерфейсной станции и др.) может быть использовано иное сочетание функциональных модулей (ФМ), необходимое для выполнения конкретных функций авионики. Например, для выполнения изделием вычислительных функций отсутствует необходимость использования в его составе графического модуля, в связи с чем на свободный «слот» можно установить дополнительные вычислители, повышающие производительность системы. Для реализации дополнительных графических функций вычислительную систему следует комплектовать дополнительными графическими модулями за счет уменьшения в ее составе вычислительных модулей. Так, например, строятся графические станции или бортовая цифровая картографическая система. Для построения интерфейсных станций, необходимо добавить в состав системы больше модулей ввода-вывода, а графические модули и “лишние” вычислительные модули исключить из состава системы.

Вычислительная система может быть также разделена на несколько подсистем для реализации резервирования модулей. В таком случае, при реализации двойного резервирования вычислительная система комплектуется аналогичным набором КФМ дважды, но при этом количество КФМ, использующееся для реализации функций авионики в едином конструктиве уменьшается. На рис. 2.1 показано именно такое разделение. Таким образом, в одну подсистему будут входить: 1 МК, 1 МПП, 2 МВ, 1 МГ, 1МВВ и 1 МН. Вторая подсистема будет состоять из аналогичных модулей.

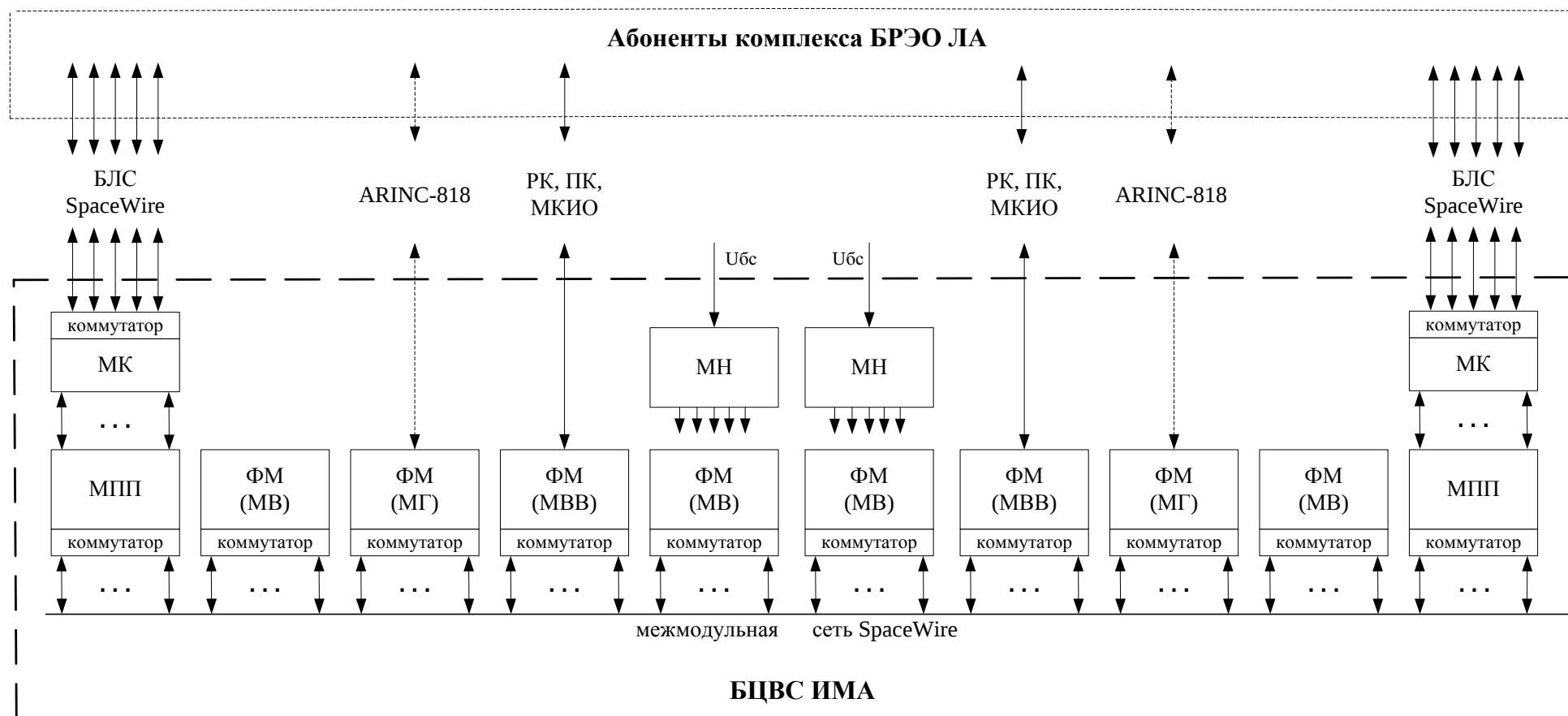


Рисунок 2.1 - Функциональная схема БЦВС ($U_{бс}$ – напряжение бортовой электрической сети питания).

2.2. Функциональная схема базового КФМ для БЦВС ИМА

С целью повышения показателей стандартизации и унификации, для удобства и ускорения выполнения этапов проектирования и производства КФМ, процесс разработки КФМ целесообразно осуществлять на базе единых стандартизованных технических решений. Поэтому целесообразно введение обобщенной функциональной схемы базового модуля, на основе которого в дальнейшем может быть получено семейство специализированных по функциональному применению модулей (вычислительных, графических, ввода-вывода, коммутаторов и др.) и средств их контроля [67, 72].

Функциональная схема базового КФМ для БЦВС представлена на рис. 2.2. Схема базового модуля включает [45, 46, 50]:

- узел поддержки модуля (УПМ);
- интеллектуальный узел электропитания (ИУЭП);
- узел связи межмодульного интерфейса (УМИ);
- узел функций модуля (УФМ);
- узел контроля и диагностики (УКД);
- узел связи с внешними интерфейсами (УВИ);
- узел связи с мезонинами (УСМ).

Узел УПМ синхронизирует работу всех узлов КФМ, управляет инициализацией КФМ, управляет встроенным аппаратно-программным контролем модуля, а также осуществляет:

- управление электропитанием модуля (формирует сигналы управления электропитанием «авария сети электропитания», «отключить электропитание модуля»);
- контроль качества электропитания модуля (сохраняет контекстные параметры внешнего электропитания);
- инициализацию и идентификацию модуля в составе БЦВС (сохраняет и формирует контекстную информацию о КФМ: индивидуальная информация завода-изготовителя, тип модуля, номер производственной партии, основные технические характеристики модуля и т.д.);

- контроль и регистрацию состояния исправности модуля (формирует результаты тестирования и другую сервисную информацию, определяющую текущее состояние модуля);
- управление загрузкой программного обеспечения модуля;
- ведение журнала состояния модуля (сохраняет параметры состояния модуля, характеризующие его долговременные свойства, либо нарушение работоспособности (количество рабочих часов, выполненные работы по техническому обслуживанию, фиксация состояния отказа модуля и др.) в специальной энергонезависимой памяти).

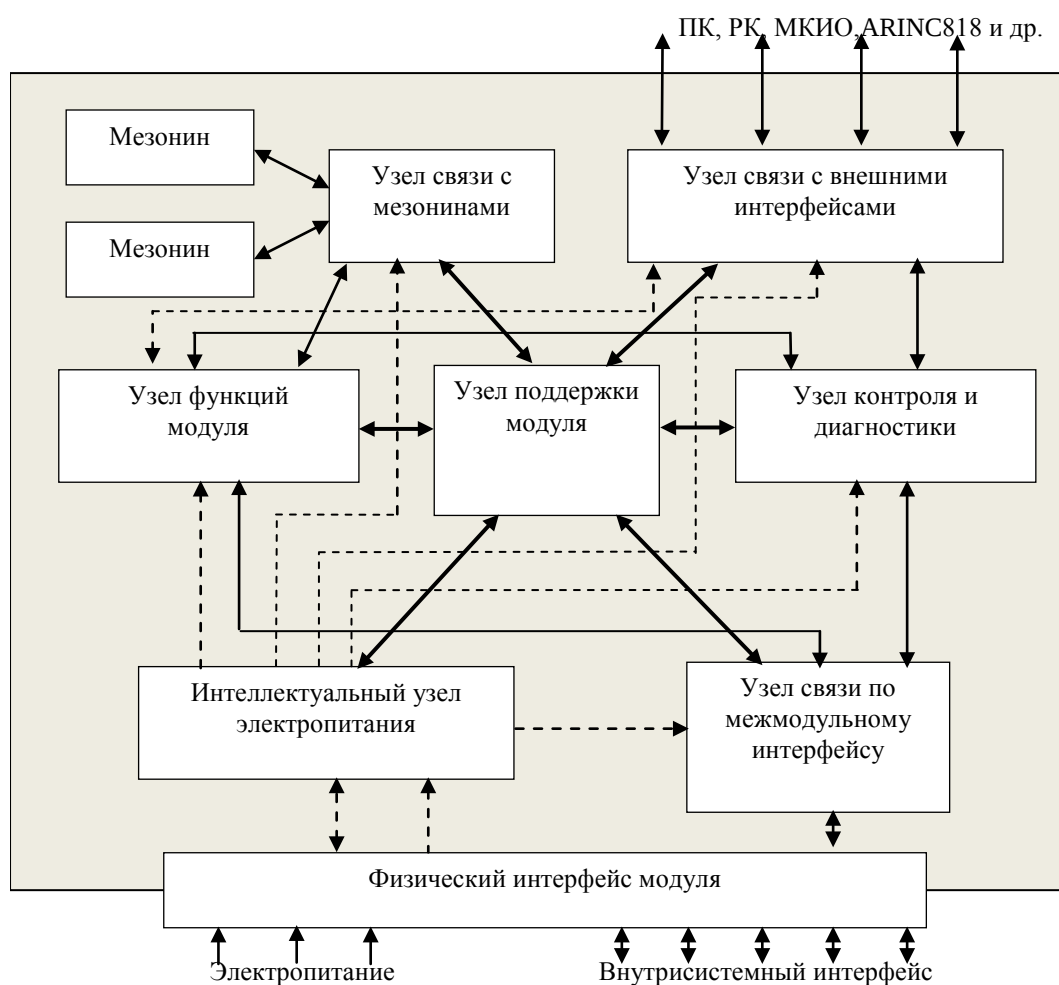


Рисунок 2.2 - Функциональная схема базового КФМ ИМА.

Узел ИУЭП обеспечивает: преобразование первичных напряжений электропитания модуля во вторичные напряжения, которые необходимы для

работы узлов модуля; коммутацию напряжений питания на внутренние узлы модуля; защиту системы энергоснабжения вычислителя от короткого замыкания по первичным и вторичным сетям электропитания, выдачу в узел УПМ информации о параметрах внешнего электропитания.

Узел УМИ обеспечивает сопряжение УФМ и УКД с межмодульным интерфейсом БЦВС. УМИ может быть выполнен в виде СБИС, реализующей прием и передачу информации по межмодульному интерфейсу, а также прием и передачу данных в УФМ и УКД.

Узел УФМ предназначен для реализации функционального назначения модуля, которое различается в зависимости от типа КФМ (обработка данных, обработка сигналов от датчиков пилотажно-навигационного комплекса, обработка и формирование изображений в графическом или совмещенном режиме «графика и метеоданные», «графика и геоинформационные данные» и т.д.).

Узел УКД обеспечивает контроль и автоматическую диагностику всех внутренних узлов модуля. Каждый КФМ предоставляет аппаратные и программные средства для обеспечения обнаружения неисправностей в пределах его собственных ресурсов с помощью организации тестов встроенного контроля (тесты начального включения электропитания, непрерывные тесты, инициированные тесты).

Узел УВИ обеспечивает обмен информацией по внешним интерфейсам (разовые команды, последовательные каналы, мультиплексные каналы информационного обмена) с узлом УФМ и в обратном направлении.

Узел УСМ обеспечивает обмен информацией УФМ с различными мезонинными компонентами (платами расширения), устанавливаемыми на КФМ для расширения функциональных возможностей модуля и построения новых вычислительных конфигураций (увеличение числа каналов обмена, введение сопроцессора поддержки вычислений, увеличение емкости накопителя постоянной памяти и др.). Так, например, модуль МВ можно преобразовать в МПП путем добавления мезонинных плат с большим объемом постоянной

памяти, или преобразовать в MBV путем установки плат-мезонинов, реализующих дополнительное число входных-выходных интерфейсов вычислительной системы.

Физический интерфейс КФМ обеспечивает подключение оптических и электрических сигналов модуля к межмодульному интерфейсу в составе единой вычислительной системы.

2.3. Назначение, внутренняя структура и принцип работы конструктивно-функциональных модулей ИМА

2.3.1. Модуль вычислительный

Модуль вычислительный представляет собой набор аппаратных средств центрального процессора и предназначен для расчета общих и специальных алгоритмов управления движением летательного аппарата в реальном масштабе времени и т.д. MB в составе БЦВС обеспечивает [45, 46, 50]:

- прием от модуля массовой памяти по внутренней локальной сети SpaceWire специализированного программного обеспечения, занесение полученных данных в резидентное оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и их исполнение на встроенном вычислительном узле;

- информационный обмен данными по бортовой локальной сети ЛА с другими абонентами комплекса авионики через интерфейс сопряжения, обеспечиваемый МК;

- предоставление функциональному программному обеспечению (ФПО) программных, аппаратных и временных ресурсов для обеспечения возможности обработки полученной информации средствами ФПО;

- выдачу подготовленной ФПО информации в бортовую сеть ЛА через технические средства MBV, МГ, МК.

Функциональная схема MB приведена на рис.2.3.

На основе MB могут быть получены другие по функциональному назначению модули путем добавления к конструкции MB плат-мезонинов и расширения узла УФМ.

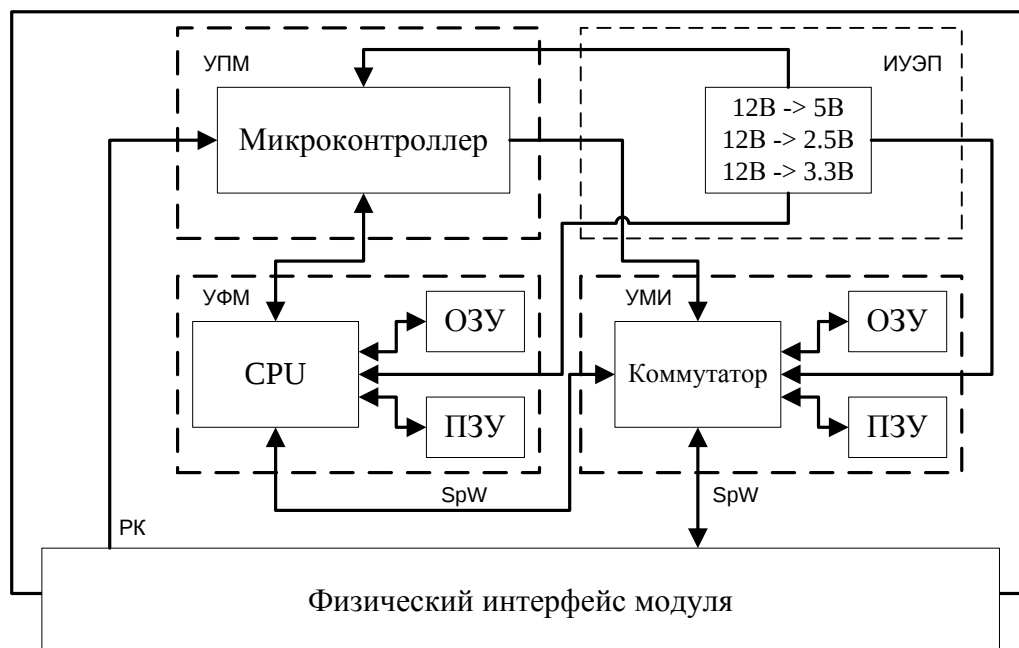


Рисунок 2.3 - Функциональная схема вычислительного модуля.

Принцип работы МВ заключается в следующем: при подаче электропитания, модуль осуществляет инициализацию входящих в его состав компонентов (микросхемы программируемой логики, микроконтроллер, микропроцессор и др.). После инициализации МВ принимает из постоянной памяти МПП функциональное программное обеспечение БЦВС по внутренней локальной сети SpaceWire и заносит его во внутреннее ОЗУ. Дальнейшая работа МВ в составе БЦВС определяется алгоритмом функционального программного обеспечения, заданным разработчиком ПО для БЦВС.

2.3.2. Модуль ввода-вывода

Модуль ввода-вывода предназначен для организации взаимодействия абонентов на борту летательного аппарата друг с другом по мультиплексным каналам информационного обмена по ГОСТ Р 52070-2003 (аналог зарубежного стандарта MIL-1553), по последовательным каналам связи и по разовым командам по РТМ 1495-75 с изм.2,3 и ГОСТ 18977-79 (аналог зарубежного стандарта ARINC-429).

Функциональная схема модуля ввода-вывода [45] представлена на рис. 2.4. Как видно из рис. 2.4, внутренняя структура модуля ввода-вывода построена на основе структуры базового вычислительного модуля за исключением дополнительного узла УСМ, который необходим для обмена информацией с платами-мезонинов. Платы-мезонины вводятся для обеспечения аппаратно-программной поддержки функций ввода-вывода данных по специализированным бортовым интерфейсам.

Мезонинные платы представляют собой отдельное устройство с контроллером интерфейса для связи с узлом УСМ на плате-носителе (в данном случае для этой цели используется параллельный интерфейс PCI 2.2). По этому интерфейсу в модуль поступают данные, необходимые для выдачи абонентам БРЭО по специализированным бортовым интерфейсам. А также, аналогично, в другую сторону. Мезонин принимает информацию по специализированным бортовым интерфейсам, преобразует ее и выдает на плату-носитель.

Принцип работы MBV в составе БЦВС описывается следующим образом: при включении напряжения электропитания начинается процесс инициализации модуля, включающий предустановку и запуск микроконтроллера, микропроцессора, коммутатора, а также элементов ПЛИС. Затем из МПП загружается ФПО в ОЗУ модуля MBV по локальной сети по интерфейсу SpaceWire. Дальнейшая работа модуля в составе БЦВС определяется алгоритмом функционального программного обеспечения, предусмотренным разработчиком. В процессе функционирования БЦВС, когда модуль получает данные по локальной сети SpaceWire, модуль передает эти данные в УСМ, обеспечивающий выдачу данных по требуемому бортовому интерфейсу через платы-мезонины, на которых реализованы программно управляемые контроллеры бортовых интерфейсов. Аналогично, наоборот, MBV получает данные по специализированным бортовым интерфейсам, преобразует их и может передать любому из модулей в составе вычислительной системы по интерфейсу локальной сети.

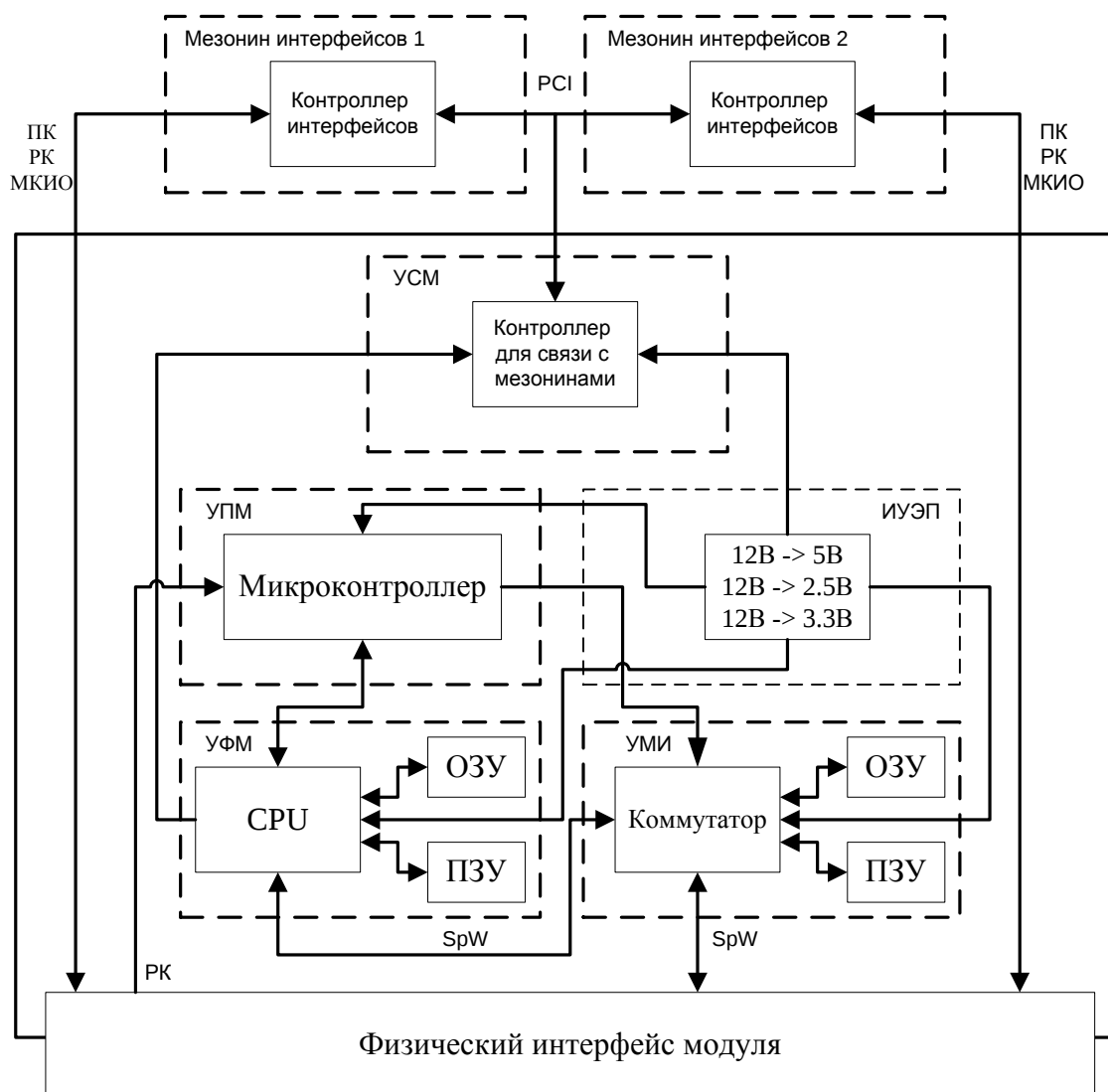


Рисунок 2.4 - Функциональная схема модуля ввода-вывода.

2.3.3. Модуль графический

Модуль графический предназначен для организации приема, обработки внешней видеоинформации и формирования выходного видеосигнала на бортовые средства индикации информационно-управляющего поля кабины пилота летательного аппарата. МГ в составе БЦВС обеспечивает [45, 70, 79]:

- выполнение математических операций (преимущественно в полярной системе координат);
- выполнение специализированных преобразований данных для осуществления аппаратно-программной поддержки графических функций стандарта OpenGL;

- прием и передачу видеоданных по цифровому оптическому интерфейсу на основе технологии Fibre Channel (стандарт ARINC-818);
- прием и передачу данных по межмодульному интерфейсу БЦВС на основе технологии SpaceWire.

Внутренняя структура МГ реализована на основе структуры базового вычислительного модуля. В отличие от ММВ, где вводятся дополнительные мезонины, поддерживающие требуемые интерфейсы, в МГ расширяется узел УФМ добавлением специализированного графического контроллера, поддерживающего функцию передачи видеоизображения по интерфейсу Fibre Channel. Функциональная схема МГ представлена на рис.2.5.

Принцип работы МГ заключается в следующем. При подаче напряжения электропитания МГ проводит инициализацию внутренних узлов модуля. Затем по локальной сети SpaceWire модуль получает от МПП и заносит в ОЗУ ФПО, алгоритмом которого определяется дальнейшая работа модуля в составе БЦВС.

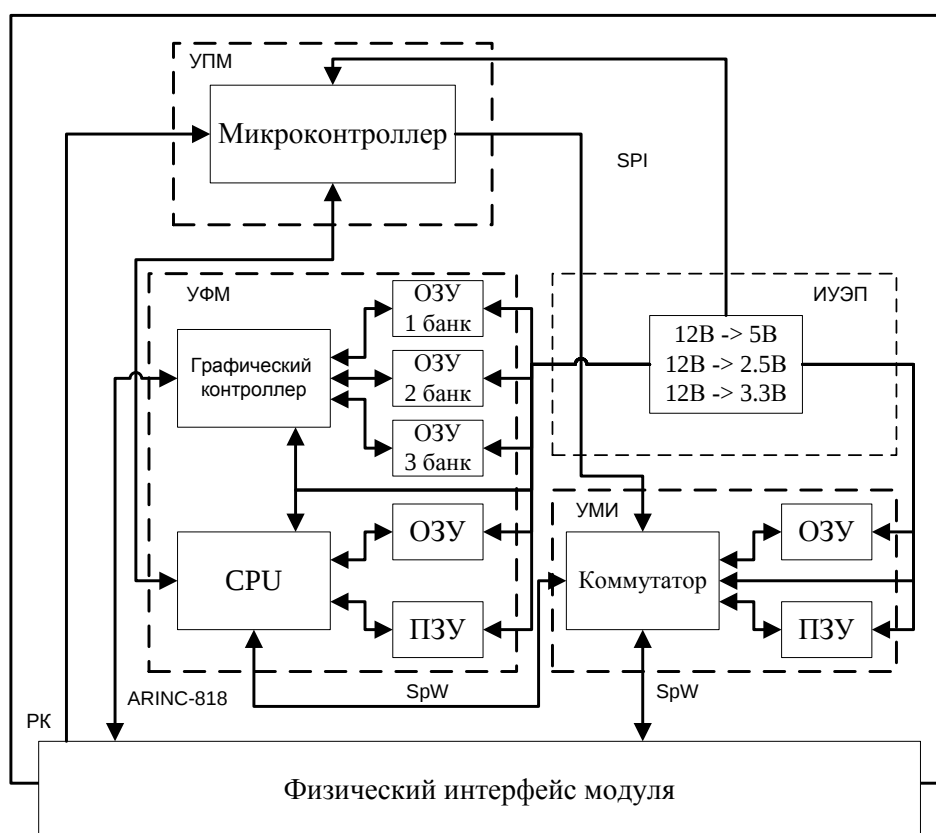


Рисунок 2.5 - Функциональная схема графического модуля.

В частности, для наשלемной системы целеуказания и индикации [70], входящей в состав БРЭО, МГ получает видеоизображение с камеры обзора закабинного пространства и пилотажно-навигационную информацию для построения графического изображения. Два изображения совмещаются в МГ с учетом заданного углового положения ЛА. Для бортовой цифровой картографической системы [80] модуль формирует видеоизображение геоинформационных данных в совмещенном с пилотажно-навигационной информацией режиме. Известны режимы совмещения навигационной и метеорадиолокационной информации.

Синтезированное в МГ изображение передается по цифровому каналу обмена Fibre Channel на средства индикации бортовой системы отображения, входящей в состав информационно-управляющего поля кабины пилота ЛА.

2.3.4. Модуль-коммутатор

Модуль-коммутатор предназначен для согласования разнородных видов интерфейсов бортового оборудования авионики и межмодульных интерфейсов БЦВС. МК в составе БЦВС обеспечивает [45, 46, 50]:

- преобразование электрического сигнала в оптический сигнал и оптического сигнала в электрический сигнал интерфейса FC-AE-ASM;
- выполнение функции оптико-электронного согласования интерфейсов SpaceWire и Fibre Channel (спецификация FC-AE-ASM);
- выполнение функции коммутации электрических сигналов бортовой сети ЛА на основе интерфейса SpaceWire с сигналами внутренней локальной сети БЦВС на основе SpaceWire.

Внутренняя структура МК реализована за счет расширения узла УФМ базового вычислительного модуля путем добавления в него специализированных элементов: приемников и передатчиков оптического сигнала Fibre Channel и контроллера интерфейса Fibre Channel. Функциональная схема модуля коммутатора представлена на рис.2.6.

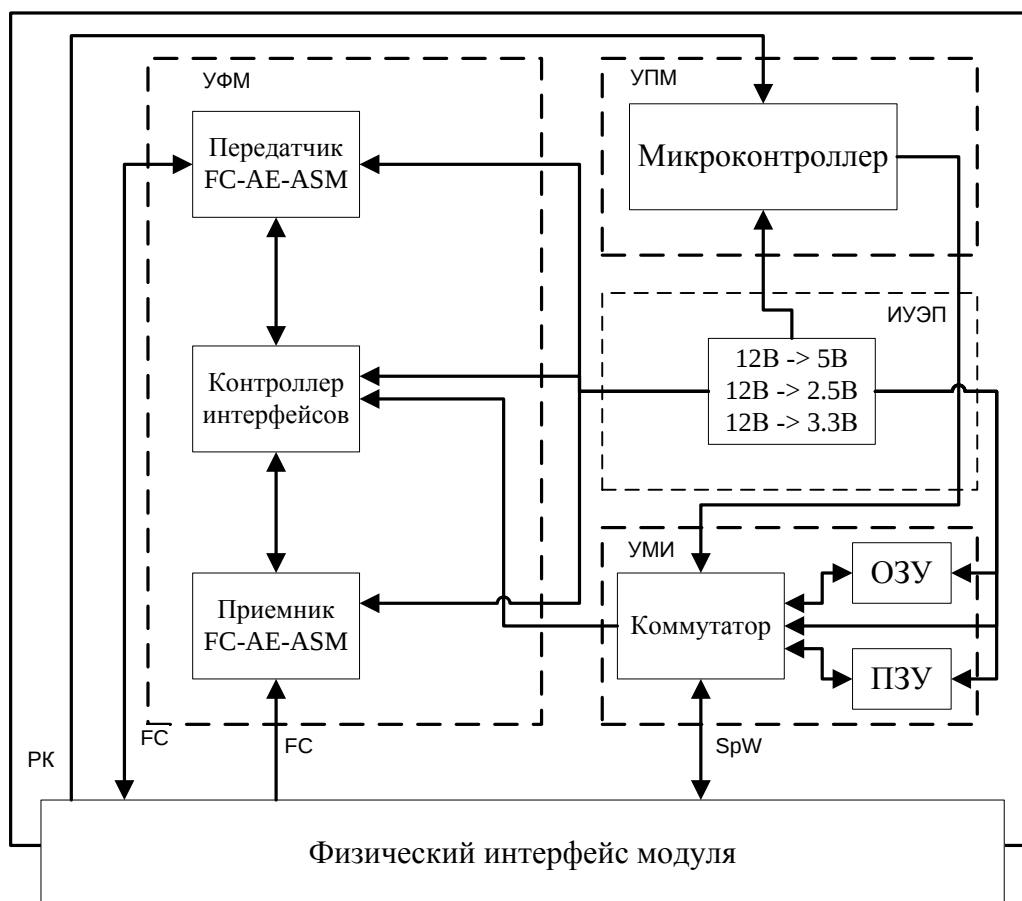


Рисунок 2.6 - Функциональная схема модуля-коммутатора.

Принцип работы МК состоит в следующем. При включении напряжения электропитания происходит инициализация всех узлов модуля. Затем по локальной сети SpaceWire МК получает ФПО от модуля МПП и заносит его в ОЗУ. Дальнейшая работа модуля в составе БЦВС определяется алгоритмом ФПО, предусмотренным разработчиком ПО. В частности, в составе БГС, МК получает телевизионное изображение с внешних источников (камеры), передает в МГ, где реализовано преобразование этого изображение и/или совмещение кадров изображений графической информации, необходимой для пилота.

2.3.5. Модуль массовой памяти

Модуль массовой памяти помимо функций хранения данных в энергонезависимой памяти, выполняет роль арбитра в составе вычислительной системы.

МПП в качестве модуля памяти в составе БЦВС обеспечивает [45, 46, 50]:

- прием информации по бортовой локальной сети ЛА;
- хранение в энергонезависимой памяти данных;
- загрузку в резидентное ОЗУ, установленное на модуле, данных ФПО и их исполнение;
- выдачу специализированных компонентов ФПО по локальной сети в соответствующие КФМ;
- выдачу сформированной средствами ФПО информации по сети информационного обмена абонентам бортового оборудования авионики.

МПП в качестве арбитра вычислительной системы обеспечивает:

- контроль модулей, из которых состоит вычислительная система;
- ведение журнала, в который заносятся данные тестирований вычислительной системы в процессе полета;
- принятие решение о том, отказал ли модуль, исходя из результатов тестирования;
- принятие решение о необходимости реконфигурации.

Внутренняя структура МПП реализована на основе структуры базового вычислительного модуля и получается путем добавления узла УСМ для связи со специализированными платами-мезонинами, необходимыми для расширения объема постоянной памяти модуля, предназначенной для хранения ФПО. Функциональная схема МПП представлена на рис. 2.7 [45].

Мезонинные платы содержат контроллер интерфейса для обмена информации с платой-носителем (в данном случае используется параллельный интерфейс PCI 2.2), контроллер для доступа к постоянной памяти, установленной на мезонине, а также элементы памяти в количестве необходимом для реализации функций авионики. Мезонин получает данные от платы-носителя и загружает эти данные в энергонезависимую память. В соответствии с целевым назначением изделия данные загружаются на этапе предполетной подготовки, т. к. этими данными являются программное обеспечение, компоненты конфигурирования радиоэлементов программируемых логических интегральных схем КФМ и т.п.

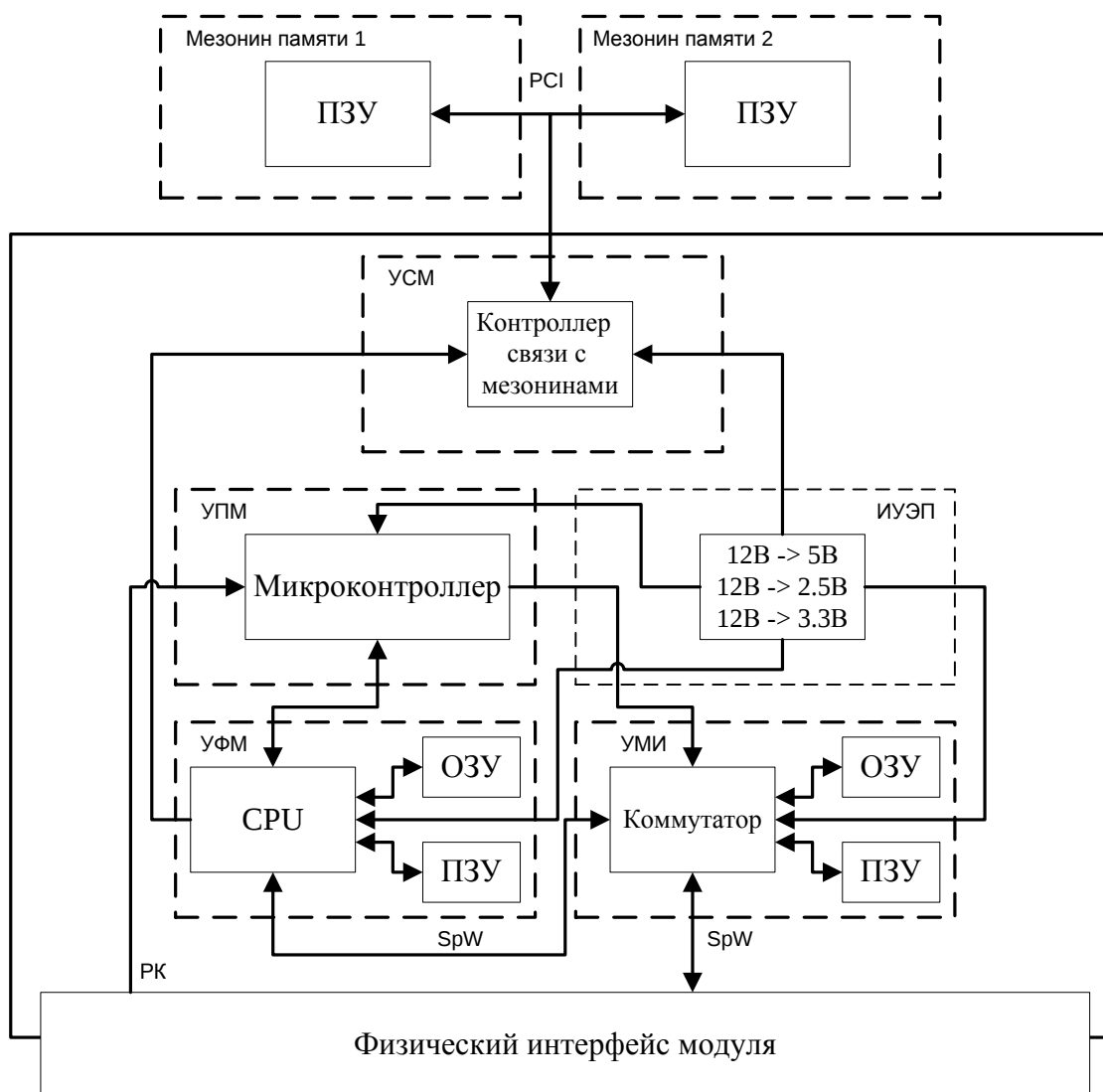


Рисунок 2.7 - Функциональная схема модуля массовой памяти.

Принцип работы МПП следующий. При включении напряжения электропитания МПП инициализирует входящие в его состав компоненты. Затем МПП по локальной сети SpaceWire передает в ОЗУ КФМ БЦВС функциональное программное обеспечение. Далее МПП осуществляет контроль состояния исправности модулей, анализирует данные встроенного тестового контроля и при выявлении отказа и имеющихся в системе аппаратных и программных ресурсах производит реконфигурацию БЦВС, перераспределяя функциональное программное обеспечение между исправными компонентами.

2.4. Вычислительные структуры ИМА на основе

базовых конструктивно-функциональных элементов авионики

Представленные структуры КФМ предназначены для создания реконфигурируемых вычислительных систем, выполненных в соответствии с рекомендациями группы стандартов ARINC-651—ARINC-655, распространяющихся на бортовую аппаратуру класса интегрированной модульной авионики. В процессе выполнения с участием автора научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ показано, что различные по функциональному назначению КФМ могут быть построены на основе внутренней структуры базового вычислительного модуля:

- путем добавления специализированных узлов;
- путем расширения узла функций модуля;
- путем введения в состав модуля специализированных плат-мезонинов, реализующих конкретные функции авионики (реализация специализированных бортовых интерфейсов, реализация дополнительного объема памяти).

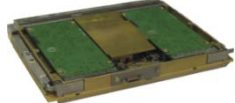
Технические характеристики отдельных представителей различных семейств КФМ приведены в табл. 2.1.

Элементная база приведенных в табл. 2.1 функциональных модулей, в основном, состоит из ОЗУ, постоянного запоминающего устройства (ПЗУ), процессоров и контроллеров, элементов ПЛИС отечественных разработок (в частности, разработки ЗАО «ПКК Миландр», ГУП НПЦ «Элвис», ОАО «Воронежский завод полупроводниковых приборов» и др.), что является достоинством предлагаемых технических решений. Вместе с этим, характеристики отечественных ЭРИ сказываются на производительности модулей т. к. используемые для аналогичных целей импортные процессоры, микроконтроллеры, микросхемы памяти и элементы ПЛИС имеют лучшие соответствующие количественные характеристики.

Состав модулей и соответствие внутренних узлов модулей узлам базового модуля иллюстрируется табл. 2.2 [50, 51].

Технические характеристики
представителей различных семейств КФМ

Таблица 2.1

Вид КФМ	Характеристики	Внешние интерфейсы	Конструктивное исполнение	Напряжение питания, В	Масса, кг
 МВ	Производительность 600 MFLOPS	SpaceWire 10 шт. 400 Мбит/с, 14 каналов	Защищенный модуль типоразмера 6U по стандарту VITA 48.2	+12	1,5
 МГ	Производительность 6 GFLOPS	ARINC818 2 канала; SpaceWire 2 канала	Защищенный модуль типоразмера 6U по стандарту VITA 48.2	+12	1,5
 МВВ	Производительность 600 MFLOPS	Вых. ПК – 10 шт.; Вх. ПК – 5 шт.; Вх. РК – 4 шт.; Вых. РК – 4 шт.; МКИО – 2 шт., резервированные; SpaceWire 10 шт. 400 Мбит/с, 2 канала	Защищенный модуль типоразмера 6U по стандарту VITA 48.2	+12, +5, ±6	1,5
 МПП	Производительность 6 GFLOPS, Память 1024 Мбайт	SpaceWire 10 шт. 400 Мбит/с, 12 каналов	Защищенный модуль типоразмера 6U по стандарту VITA 48.2	+12, +5	1,5
 МН	Преобразует напряжение бортовой сети	Выходное напряжение питания +6В, -6В, +12В, +5В	Защищенный модуль типоразмера 6U по стандарту VITA 48.2	+27	2,5

Распределение унифицированных узлов базового модуля по КФМ

Таблица 2.2

КФМ	УФМ (CPU)	УФМ (графика)	УФМ (интерфейсы)	УПМ	УМИ	ИУЭП	УСМ	Мезонин	
								память	интерфейс
МВ	+	—	—	+	+	+	—	—	—
МПП	+	—	—	+	+	+	+	+	—
МГ	—	+	—	+	+	+	—	—	—
МВВ	—	—	+	+	+	+	—	—	+
МК	—	—	+	+	+	+	—	—	—

Как видно из таблицы, для различных по назначению функциональных модулей основными компонентами внутренней структуры являются узлы УПМ, УМИ и ИЭУП. Узел УФМ является обязательным для каждого из модулей, но имеется несколько его разновидностей: один для вычислительных функций (CPU), другой – для реализации графических функций (графика), третий – для реализации интерфейсных функций (интерфейсы). Далее, в зависимости от наличия/отсутствия мезонинных расширителей функций, в структуре содержатся/отсутствуют узел УСМ и мезонины. Символом «+» отмечено наличие узла в модуле, символом «-» отмечено отсутствие узла.

Анализ данных табл. 2.1 и табл. 2.2 показывает, что предлагаемая номенклатура КФМ является достаточной для создания семейства вычислителей, покрывающих потребности авиационной промышленности в создании перспективных образцов бортового приборного оборудования. В табл. 2.3 представлен помодульный состав бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ), бортовой системы картографической информации (БСКИ), бортовой графической станции (БГС), бортовой интерфейсной станции (БИС), выполненных с применением рассмотренных модулей: МВ, МВВ, МГ, МПП, МК, МН.

Таблица 2.3

Наименование изделия	Наименование модуля					
	МВ	МПП	МН	МВВ	МГ	МК
БЦВМ	+	+	+	—	—	—
БГС	+	+	+	—	+	+
БИС	+	+	+	+	—	—
БСКИ	+	+	+	+	+	—

В каждое из представленных в табл. 2.3 изделие входит модуль МПП, модуль МВ и модуль МН, т.к. без наличия этих модулей работа изделия невозможна. Наличие модулей МВВ, МГ и МК зависит непосредственно от назначения изделия. Так, для БЦВС нет необходимости во введении в ее структуру модулей МГ, тогда, как для БГС и БСКИ они выполняют основные функции работы с видеоизображением. Модуль МК требуется лишь для БГС, а модуль МВВ – для БИС и БСКИ.

Вычислительные структуры изделий класса ИМА, выполненных на основе предлагаемых функциональных элементов авионики, представлены на рис. 2.8 [45, 46, 50]. На рисунке приведены структуры изделий БГС, БИС, БЦВС и БЦКС. В приведенных структурах реализован принцип двойного резервирования (каждый модуль содержится в удвоенном количестве), реализация которого не является необходимым. Как видно из рис. 2.8, все модули, входящие в состав одной вычислительной системы соединены в локальную сеть (по интерфейсу SpaceWire) путем соединения «точка-точка», т.е. каждый модуль имеет информационную линию передачи с каждым другим модулем. Таким образом, при условии, что резервирование может быть реализовано на уровне изделия в целом, система может использовать все функциональные модули, помещающиеся в конструктивное исполнение вычислительной системы, что повышает производительность системы.

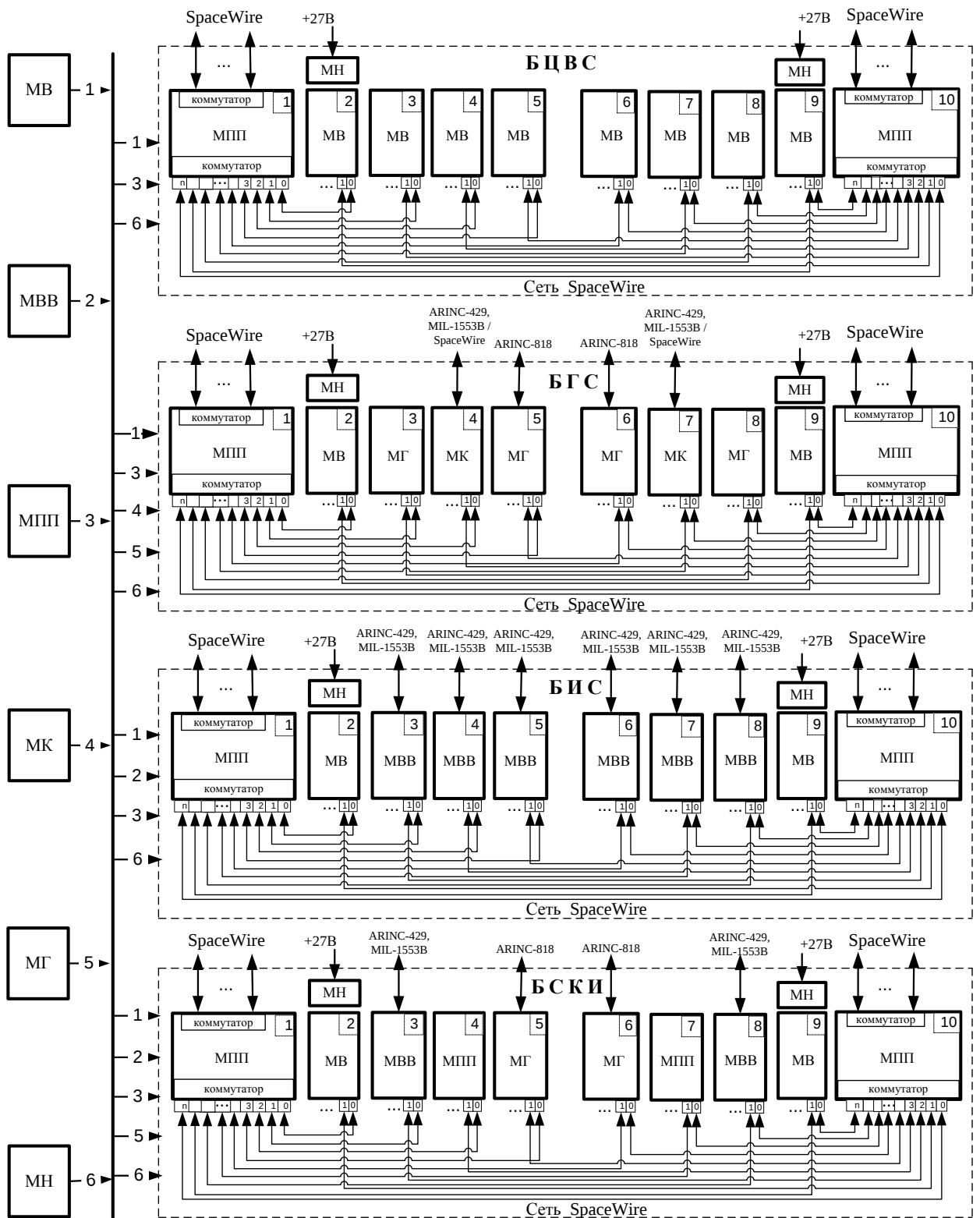


Рисунок 2.8 - Состав и внутренние структуры вычислительных систем ИМА.

2.5. Выводы

1. Комплексы бортового радиоэлектронного оборудования современного ЛА строятся на базе унифицированных конструктивно-функциональных модулей, номенклатура которых представлена шестью видами:

- модуль вычислительный;
- модуль графический;
- модуль ввода-вывода;
- модуль массовой памяти;
- модуль-коммутатор;
- модуль напряжений.

2. Различные по своему назначению КФМ получаются путем введения во внутреннюю структуру унифицированного базового модуля авионики новых специализированных функциональных компонентов: узел функций модуля для вычислителя, узел функций модуля для графического модуля, узел функций модуля для реализации интерфейсов, специализированные мезонины памяти и интерфейсные мезонины.

3. Различные по своему назначению вычислительные системы класса ИМА строятся путем комбинирования в едином конструктиве различных по назначению КФМ. В частности, из предлагаемого набора КФМ в различных сочетаниях могут быть получены:

- бортовая цифровая вычислительная система;
- бортовая цифровая картографическая система;
- бортовая графическая станция;
- бортовая интерфейсная станция и др.

4. Схема генерации проектных решений изделий одного класса (для структуры КФМ и для структуры БЦВС в целом) допускает применение математического аппарата генетических алгоритмов в приложении к автоматизированному процессу создания бортовых цифровых вычислительных систем класса ИМА.

ГЛАВА 3. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ РАБОЧИХ МЕСТ ДЛЯ ПРОВЕРКИ КОМПОНЕНТОВ ИМА И АЛГОРИТМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ВС

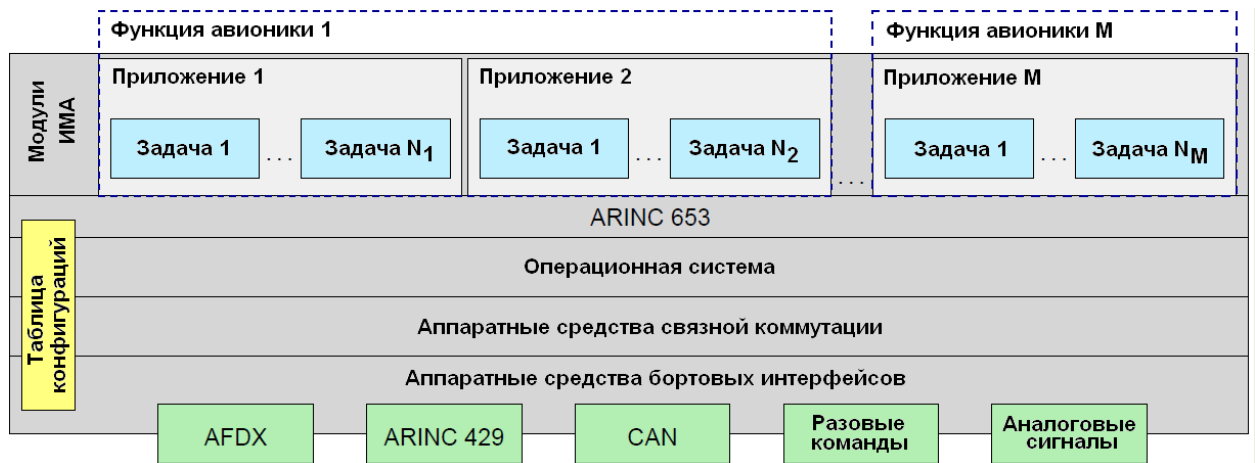
3.1 Организация межмодульного информационного обмена

Реализация принципов организации межмодульного информационного обмена в вычислительной системе на логическом уровне предполагает информационный обмен в вычислителе в следующих режимах работы [106, 114]:

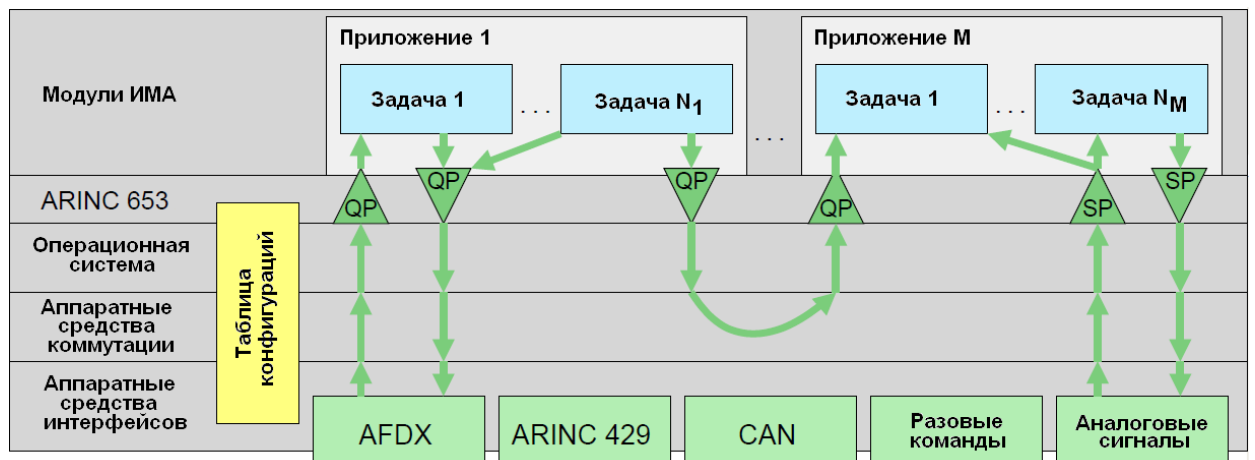
- статический режим, соответствующий начальному моменту включения вычислителя;
- динамический режим, соответствующий рабочему состоянию вычислителя в составе ЛА;
- тестовый режим, соответствующий режиму проверки вычислителя на функционирование.

Статический режим представляет собой режим работы ВС, в котором реализуются функции начальной самопроверки аппаратуры КФМ встроенными аппаратно-программными средствами, инициализируются процессор и ПЛИС, осуществляется загрузка операционной системы и программных компонентов драйверов устройств ввода-вывода, проводится оценка соответствия данных постоянной памяти КФМ значениям их контрольных сумм. Состав аппаратно-программных составляющих ВС, используемых на этапе выполнения статического режима работы ВС, приведен на рис. 3.1,а.

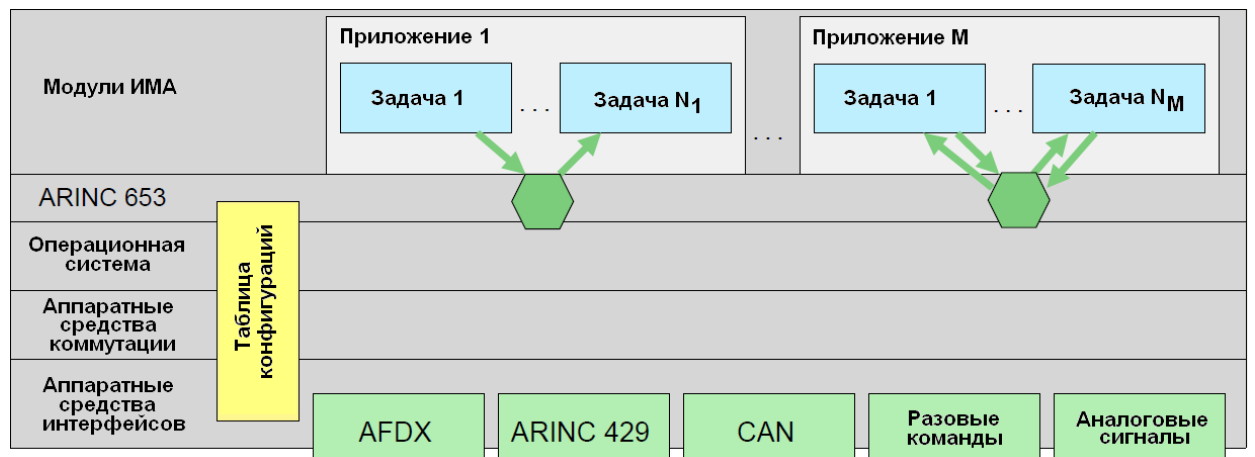
Динамический режим представляет собой режим работы БЦВС, в котором реализуются основные функции авионики. В этом режиме осуществляется информационный обмен между программными приложениями, исполняющими бортовые задачи авионики на различных КФМ. При этом данные циркулируют как между КФМ одной ВС, так и между КФМ, входящими в состав других ВС абонентов БРЭО.



а)



б)



в)

Рисунок 3.1 – Аппаратно-программные составляющие БЦВС ИМА: а) в статическом режиме, б) в динамическом режиме (QP соответствует синхронному процессу передачи данных, SP – асинхронному), в) в режиме выполнения теста встроенного контроля (примеры).

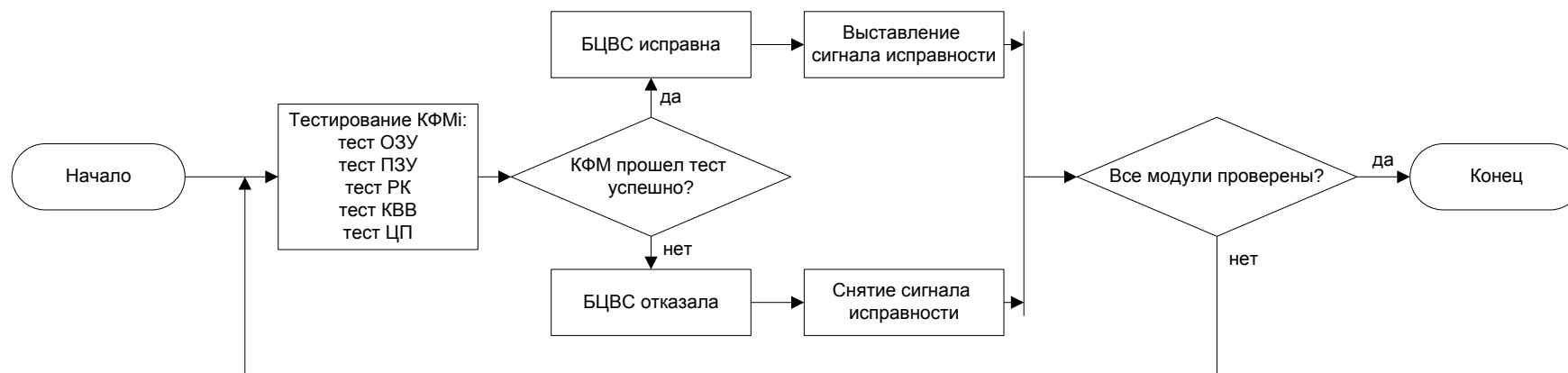
Для примера на рис. 3.1, б приведен случай взаимодействия аппаратно-программных компонентов, обеспечивающий:

- синхронный процесс передачи данных между КФМ, исполняющим задачу 1 приложения 1, по интерфейсу AFDX с абонентами БРЭО ЛА;
- синхронный процесс передачи данных между КФМ, исполняющими задачу N_1 приложения 1 и задачу 1 приложения М (межмодульный обмен);
- асинхронный процесс передачи данных между КФМ, исполняющим задачу N_M приложения М, по аналоговому интерфейсу с абонентами БРЭО объекта.

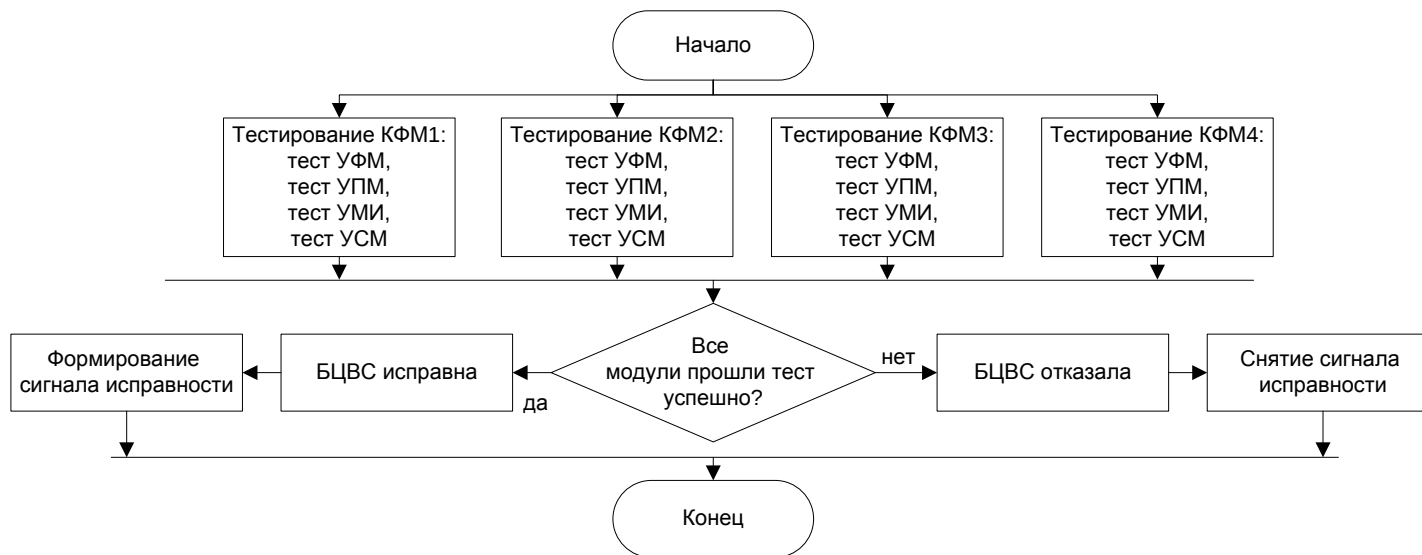
Тестовый режим представляет собой режим работы ВС, в котором реализуются функции автоматического (фоновое) и расширенного (с уходом от выполнения бортовой задачи) контроля. Режим автоматического контроля представляет собой такое состояние аппаратуры, при котором наряду с выполнением бортовых задач (в фоне) осуществляется проверка исправности состояния аппаратуры ВС. Расширенный контроль предполагает принудительный перевод ВС в режим тестирования для проведения контрольной проверки исправности узлов ВС в объеме, значительно превосходящем объем проверки в автоматическом режиме. Организация тестирования ВС предполагает взаимный межмодульный обмен контрольными данными (так называемый петлевой контроль). На рис. 3.1, в приведен пример схемы взаимодействия аппаратно-программных составляющих ВС, соответствующей тестовому режиму работы ВС.

3.2 Принципы последовательной и параллельной проверки функционирования мультивычислителя

На современном этапе развития авиационного оборудования усложнение задач, выполняемых на борту ВС, введение новых структурных и схемотехнических решений привело к появлению различных подходов к организации проверки ВС и к разработке средств контроля [117, 118, 123, 124].



а)



б)

Рисунок 3.2 – Алгоритм цикла тестирования ВС:

а) при реализации последовательной схемы проверки; б) при реализации параллельной схемы проверки.

Так как в ВС 4-ого поколения (федеративный принцип) применялась топология «общая шина» с одним ведущим модулем, который инициировал процедуру проверки, тестовый контроль выполнялся только по последовательному алгоритму проверки, пример которого представлен на рис. 3.2, а. Тест модулей состоял из процедур выполнения «подтестов» отдельных узлов модуля. Для каждого из узлов выполнялись специализированные тесты.

В процессе проверки процессорного элемента используется тест команд и тест прерываний. Тест команд предполагает выполнение каждой команды из состава системы команд микропроцессора, при этом используются все виды адресации. Тест прерываний предполагает проверку правильности работы микропроцессора со стеком, проверку правильной реакции микропроцессора на возможные виды прерываний, поддерживаемые системой, в том числе – на «аварийные» прерываний (т. н. исключений), возникшие, например, при программном обращении к физическому устройству по несуществующему физическому адресу абонента на шине.

В процессе проверки ячеек памяти ПЗУ используется подпрограмма подсчета контрольной суммы секторов или ПЗУ в целом и ее сравнения с заданным значением. ПЗУ может проверяться целиком или по секторам, соответственно значений контрольной суммы может быть несколько (по числу проверяемых секторов) или одно. Значения контрольных сумм хранятся в незадействованных ячейках памяти этой же ПЗУ. При этом при работе в динамическом режиме ячейки памяти ПЗУ этого КФМ не модифицируются.

В процессе проверки ячеек памяти ОЗУ в каждую ячейку заносится определенный код, который считывается из той же ячейки памяти и сравнивается с записанным ранее (т. е. выполняется тест «бегущей единицы» или «бегущего нуля»). Отдельно проводится тест адресов. Во время работы в динамическом режиме проверка модуля может проводиться только той части ОЗУ, которая не задействована для решения бортовой задачи.

В процессе проверки КВВ обеспечивается проверка коммутации однотипных входных и выходных приемо-передатчиков КФМ с целью передачи и

приема тестовой кодовой посылки. При такой схеме проверки с петлевой обратной связью реализуется проверка всего приемопередающего тракта модуля. Во время работы в динамическом режиме проверка может осуществляться только с использованием межмашинного ресурса с передачей по межмашинным каналам связи тестовых кодовых посылок, использованием битов четности кода и др.

Алгоритм последовательной проверки является ресурсоемким и недопустимым для перспективных устройств, работающих в реальном масштабе времени и выполняющие более трудоемкие задачи по критерию минимизации директивного времени исполнения бортовой задачи.

В перспективных ВС используются вычислительные модули, которые иницируют и выполняют тест самостоятельно в соответствии с алгоритмом ПО. В такой системе осуществляется алгоритм параллельной проверки, представленной на рис. 3.2, б. После подачи электропитания на ВС, каждый из КФМ, входящий в состав ВС (на рис. 3.2, б представлен пример для 4 КФМ), иницирует свой тест начального включения, который проверяет каждый из узлов модуля последовательно. После выполнения каждого этапа проверки (тестирование одного из узлов КФМ) формируется результат проверки, который заносится (сохраняется) в УКД и вызывается при формировании интегрального сигнала исправности КФМ.

Таким образом, тестирование вычислительных систем проводится на борту самолета в процессе полета, а также на заводе-изготовителе. В полете проводится полный набор тестов: тест начального включения, фоновые тесты и инициированные (автономные) тесты. На автоматизированном рабочем месте нет необходимости проводить весь набор тестов, и можно ограничиться лишь автономным тестом, т.к. он может проконтролировать весь набор функциональных элементов, входящих в вычислительную систему (модуль). На рис. 3.3 представлены все виды тестов, используемых для контроля БЦВС. Тесты подразделены на тесты, которые выполняются в полете, и тесты, которые выполняются в составе унифицированного автоматизированного рабочего места (УАРМ). Тесты могут выполняться для вычислительных систем ИМА как по

последовательному алгоритму, так и по параллельному. Для вычислительных систем 4-ого поколения возможен только вариант последовательного выполнения тестов.

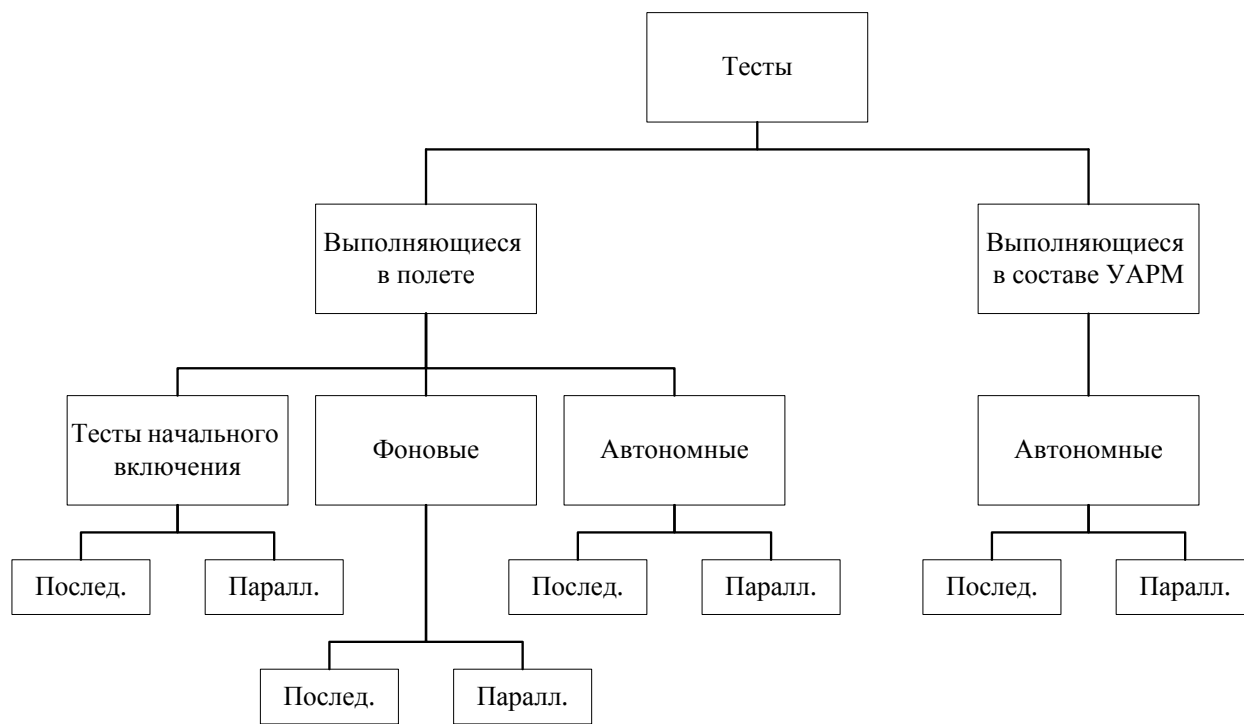


Рисунок 3.3 – Виды тестов, применяемые для контроля БЦВС.

3.3 Алгоритм фонового контроля мультипроцессора ИМА

Структура ВС основана на схеме, представляющей собой комбинацию сетевых топологий «полносвязная сеть» и «двойная звезда» (см. рис. 1.7): 2 МПП соединены с каждым из 8 ФМ, которые соединены между собой по принципу «каждый с каждым».

Каждый КФМ имеет коммутацию с остальными модулями ВС по отдельной физической линии связи, что позволяет отказаться от проведения внутреннего контроля каждого модуля и организовать инициирование внешнего функционального контроля в ВС в целом. Внешний функциональный контроль повышает уровень полноты контроля за счет использования в процессе проверки различных участков памяти, каналов ввода-вывода, сетевого интерфейса. При этом для организации внешнего контроля схемы проверки, состоящей из одного модуля, тестирующего другой модуль в составе ВС, оказывается недостаточной.

Необходимо, чтобы каждый модуль проходил как минимум три этапа проверки от разных модулей, входящих в состав ВС. Затем результат тестирования определяется по схеме мажорирования результатов тестирования КФМ трех этапах проверки.

Каждый КФМ инициирует тестирование по определенному параметру для трех других модулей системы. Причем, все три этапа тестирования основаны на выполнении функциональной задачи, исполняемой в полете этим КФМ. Три КФМ передают проверяемому КФМ разные тестовые данные, которые модуль обрабатывает, получает результат проверки для каждого из предъявленных тестов и передает результат проверки обратно тому модулю, который инициировал тест. Алгоритм прохождения такого контроля одним ФМ представлен на рис. 3.4 и представляет собой реализацию следующих процедур [38, 49]:

1. Первый сторонний ФМ (например, ФМ2) инициирует функциональный тест для проверяемого модуля ФМ1. ФМ1 выполняет данный тест, формирует результат проверки и передает его модулю ФМ2.

2. ФМ1 инициирует функциональный тест для ФМ2. ФМ2 выполняет тест и передает результат проверки в ФМ1. ФМ1 сравнивает полученный ФМ2 результат проверки с эталонным результатом, содержащимся в памяти модуля ФМ1. Затем ФМ1 передает модулю-арбитру результат прохождения ФМ2 теста: если эталонный результат проверки совпадает с полученным от ФМ2 результатом, значит ФМ2 исправен и может продолжать выполнять бортовую задачу, если не совпадает — модуль ФМ2 неисправен.

3. Следующий сторонний ФМ инициирует функциональный тест для ФМ1. ФМ1 выполняет тест, формирует результат проверки и передает его модулю ФМ3.

4. ФМ1 инициирует функциональный тест для ФМ3, получает от него результат проверки, сравнивает результат с эталонным значением и передает модулю-арбитру результат: исправен или не исправен ФМ3.

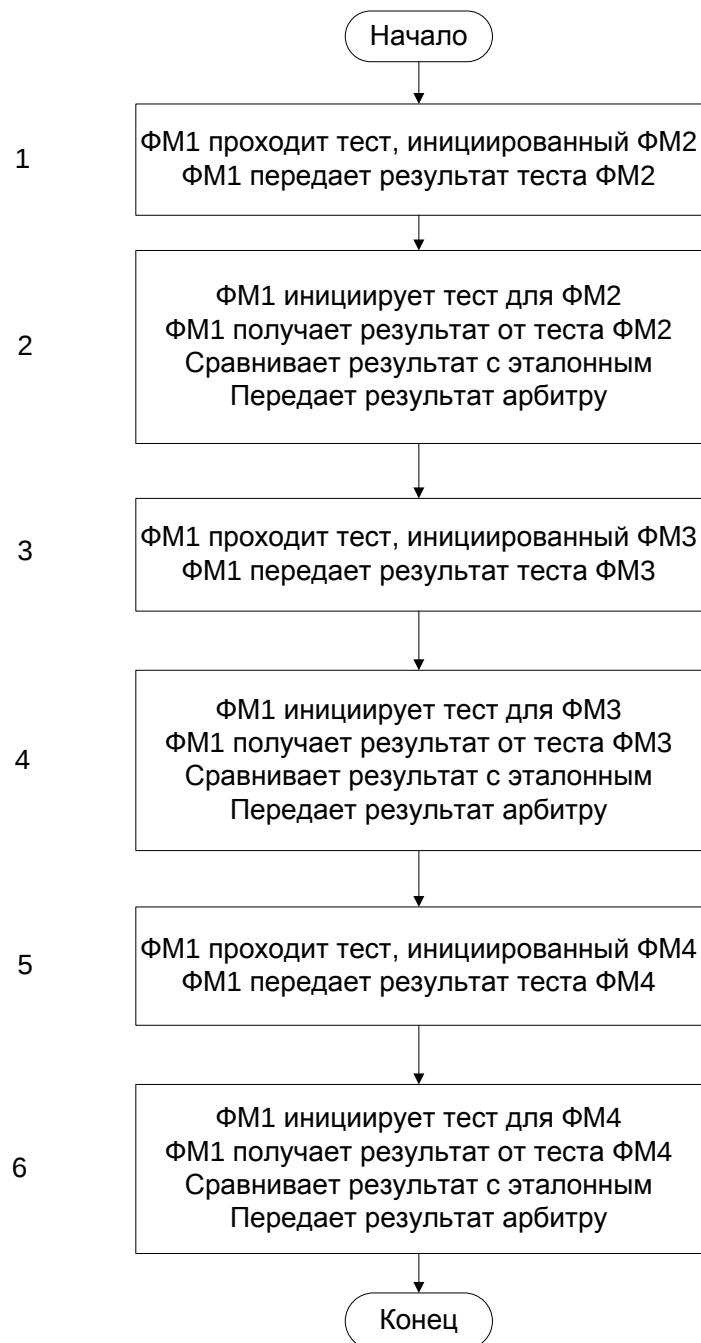


Рисунок 3.4 – Алгоритм работы функционального модуля в режиме тестового контроля (пример тестирования для одного ФМ).

5. Следующий сторонний ФМ (в данном случае ФМ4) инициирует функциональный тест для ФМ1. ФМ1 выполняет данный тест, формирует результат проверки и передает его модулю ФМ4.

6. ФМ1 инициирует функциональный тест для ФМ4, получает от него результат проверки, сравнивает его с эталонным значением и передает модулю-арбитру результат теста: исправен или не исправен ФМ4.

Параллельно с этим при получении сторонними модулями, которые инициировали тест для ФМ1, т.е. ФМ2, ФМ3 и ФМ4, результатов от ФМ1 эти модули сравнивают полученный результат с эталонным, который находится в их ячейках постоянной памяти и направляют результат (исправен или неисправен модуль ФМ1) модулю-арбитру. На рис. 3.4 представлен алгоритм тестирования только для одного из четырех модулей. Остальные модули, в том числе и модуль-арбитр, проходят тестирование аналогичным образом: контроль ФМ2 инициируют ФМ1, ФМ3 и ФМ4; контроль ФМ3 инициируют ФМ1, ФМ2 и ФМ4, контроль ФМ4 инициируют ФМ1, ФМ2 и ФМ3.

Таким образом, все ФМ в одной подсистеме БЦВС проходят по три фазы тестирования, инициированные разными сторонними модулями одной подсистемы, и инициируют тестирование трех других ФМ.

После того, как модуль-арбитр, роль которого выполняет МПП, получает все результаты прохождения всеми ФМ тестов, МПП анализирует эти результаты и, либо формирует интегральный сигнал исправности БЦВС, либо (при обнаружении отказавшего модуля) запускает процедуру реконфигурации вычислительной системы.

Алгоритм анализа модулем-арбитром результатов выполнения тестов для одного функционального модуля представлен на рис. 3.5. Арбитр анализирует данные тестов от трех модулей, инициирующих тест для одного функционального модуля, и, если от двух из них была получена информация о несовпадении контрольных значений выполнения тестов, модуль считается неисправным. Результаты тестирования для остальных функциональных модулей анализируются по аналогичному алгоритму. Например, от ФМ2 и ФМ3 пришли данные о успешном прохождении теста ФМ1, а от ФМ4 пришли данные о неуспешном прохождении теста ФМ1. Тогда, согласно алгоритму на рис. 3.5 ФМ1 будет считаться исправным.

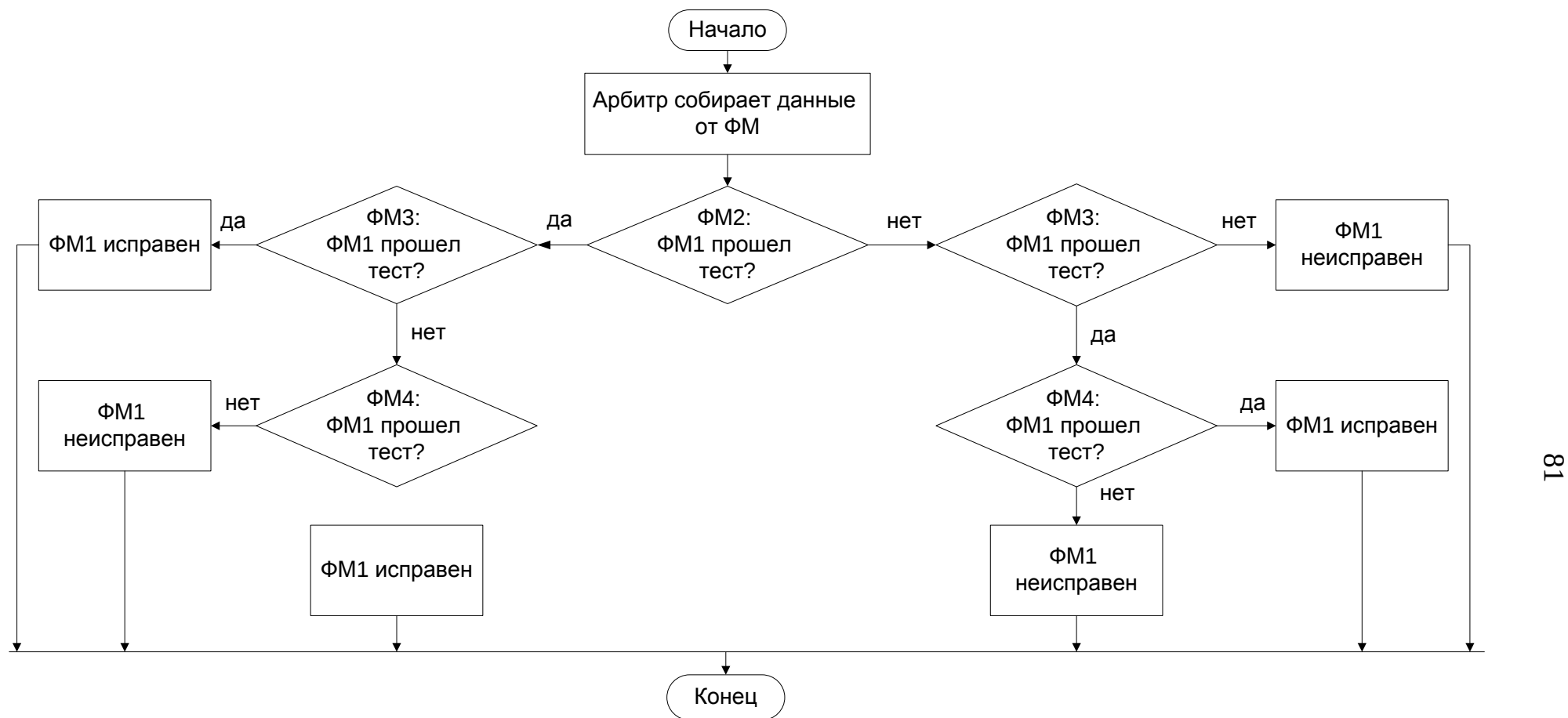


Рисунок 3.5 – Алгоритм анализа результатов тестирования для одного функционального модуля модулем-арбитром.

3.4 Принцип построения автоматизированных рабочих мест

В состав средств контроля ВС и ее компонентов входят (см. рис. 3.6):

- инструментальная электронно-вычислительная машина (ИЭВМ) (персональный или промышленный компьютер);
- специализированное программное обеспечение (программные модули (ПМ) проверки ОЗУ, ПЗУ, проверки каналов ввода-вывода, проверки центрального процессора (CPU — Central Processor Unit), программные модули поддержки бортовых интерфейсов ARINC-429, ARINC-818, MIL-1553, SpaceWire);
- специализированное аппаратное обеспечение (интерфейсные платы сопряжения инструментальной ЭВМ (через порты PCI/USB) и изделия (через интерфейсы ARINC-429, ARINC-818, MIL-1553, SpaceWire), а также соединительные кабели связи и источники питания).

В совокупности указанные компоненты представляют собой автоматизированное рабочее место (АРМ) по проверке ВС. АРМ разрабатывается на основании технического задания в рамках действующей нормативно-технической документации (НТД) и также включает специальное измерительное и испытательное оборудование, методики испытаний ВС и ее компонентов (модулей). Для проверки КФМ, входящих в состав ВС, разрабатываются самостоятельные АРМ [22, 38].

3.4.1 Автоматизированное рабочее место по контролю и диагностике ВС

При изготовлении ВС на заводе-изготовителе необходимо проверить состояние аппаратуры вычислительной системы на функционирование. Для этого используется ПО АРМ по проверке ВС.

Для проверки работоспособности ВС на автоматизированном рабочем месте проверки используются средства встроенного контроля и средства наземного контроля.

Средства встроенного контроля состоят из:

- теста начального включения всех модулей, входящих в ВС;

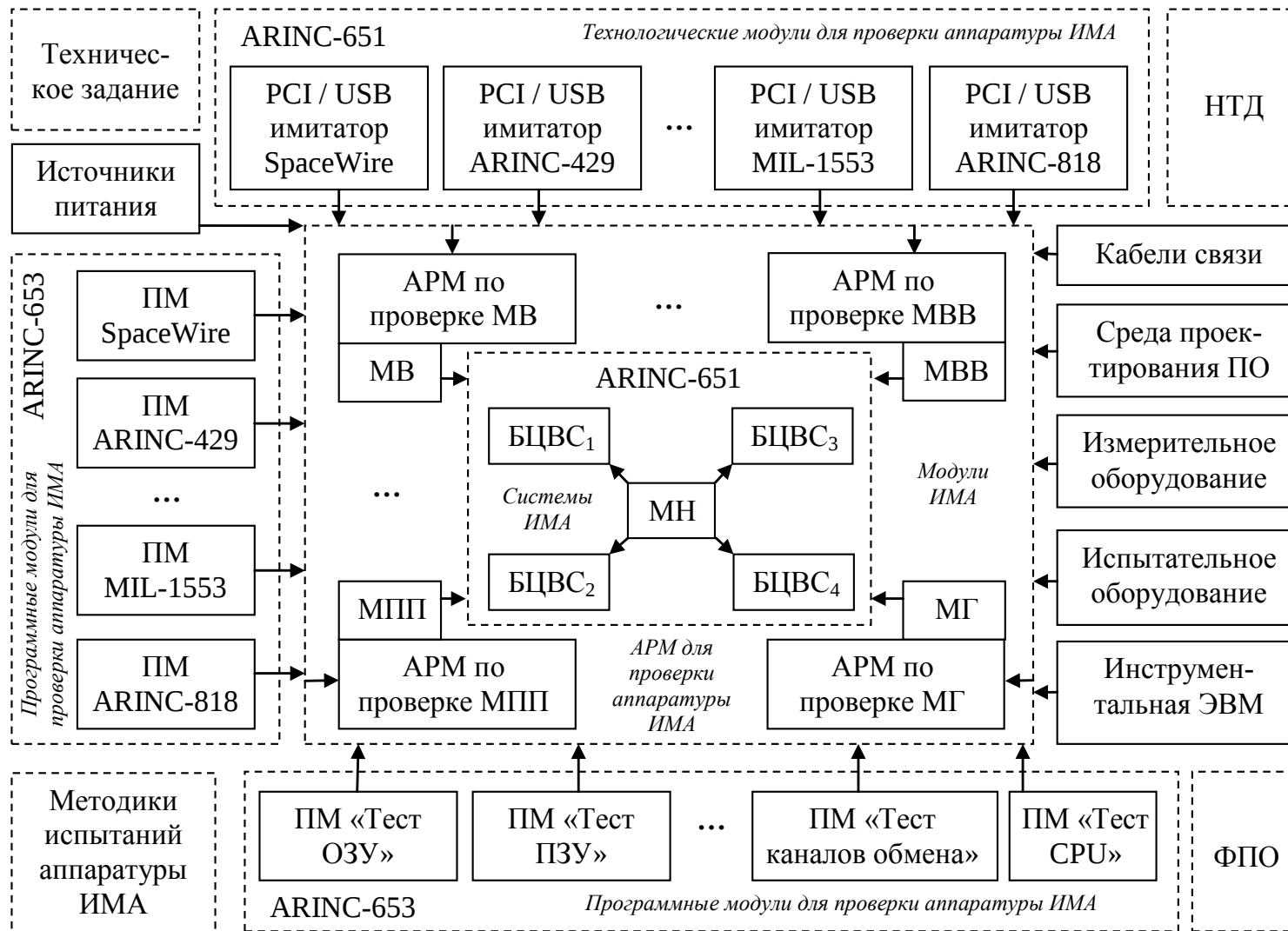


Рисунок 3.6 - Компоненты пространства проектных решений при синтезе АРМ по проверке аппаратуры класса ИМА (КФМ и ВС).

- теста фонового контроля всех модулей, входящих в БЦВС во время загрузки функционального программного обеспечения;

- теста наземного контроля всех модулей, входящих в ВС;

- инструментальной программы для проверки ВС, установленной на ИЭВМ.

Тест наземного контроля состоит из:

- тест ячеек памяти ОЗУ, ПЗУ;

- тест микроконтроллеров и микропроцессоров;

- тест устройств ввода-вывода (для MBV);

- тест каналов ввода-выводов.

После прохождения всех тестов формируется или «снимается» сигнал исправности каждого модуля в отдельности в зависимости от результатов выполнения теста. Если тест окончен с положительным результатом, устанавливается, если с отрицательным, «снимается». Результат выполнения теста передается в ИЭВМ по каналам SpaceWire.

Программа контроля ВС записывает тесты наземного контроля ВС в КФМ, проводит проверку внутрисистемных и внешних каналов обмена. После прохождения теста программа контроля анализирует сигналы исправности КФМ и формирует интегральную исправности всей ВС.

Функциональная схема АРМ по проверки ВС представлена на рис. 3.7. АРМ обеспечивает [38]:

- загрузку ПО для тестирования ВС;

- процесс тестирования ВС;

- контроль выдаваемой информации;

- имитацию обмена по каналам ввода-вывода (SpaceWire, ПК, МКИО).

В состав АРМ проверки ВС входят [38]:

- ИЭВМ, в составе которой установлены технологические модули для обеспечения информационного обмена по каналам SpaceWire, МКИО, ARINC-429, для обеспечения приема и выдачи графического изображения;

- принтер для документирования процесса тестирования;

- комплект соединительных жгутов;

- источники питания;
- программное обеспечение для тестирования.

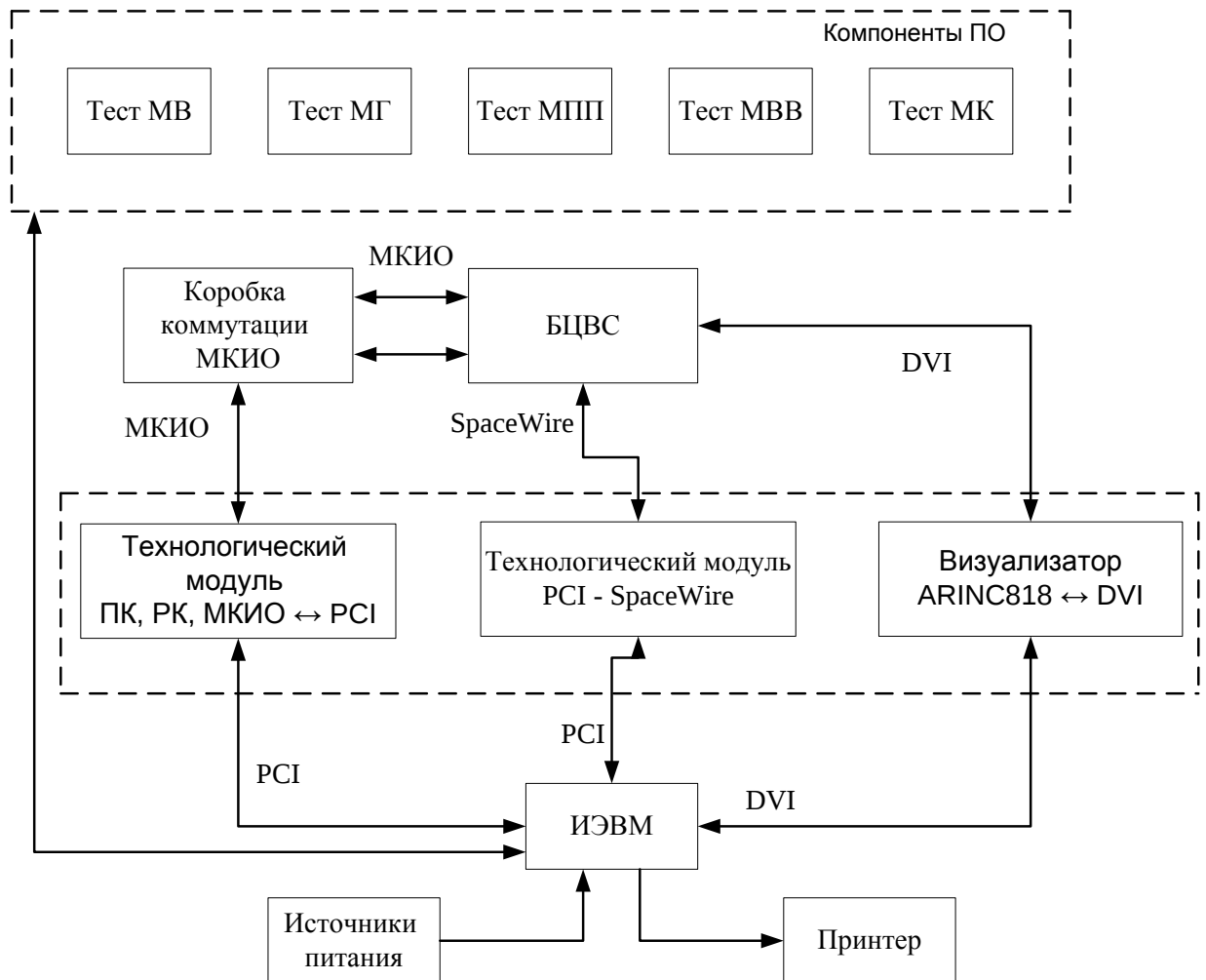


Рисунок 3.7 - Схема автоматизированного рабочего места для проверки БЦВС класса ИМА (DVI – Digital Visual Interface).

Инструментальная программа для проверки ВС обеспечивает занесение в ВС тестового ПО и обмен информацией с КФМ, входящими в состав БЦВС.

3.4.2 Унифицированное автоматизированное рабочее место по проверке КФМ

В процессе производства КФМ изготовители сталкиваются с проблемой контроля качества выпускаемой продукции. Традиционно контроль качества продукции на авиаприборостроительном предприятии осуществляется

посредством проверки каждого изготовленного изделия в составе автоматизированного рабочего места.

АРМ по проверке КФМ должно обеспечивать:

- имитацию процессов информационного обмена по интерфейсам SpaceWire для всех типов модулей, по ПК, РК, МКИО для модулей ввода-вывода, по интерфейсу Fibre Channel для модуля графического и модуля-коммутатора;
- контроль процесса тестирования;
- загрузку программного обеспечения, тестирование и ведение файлов отчета по тестированию каждого модуля.

Функциональная схема АРМ представлена на рис. 3.8.

АРМ по проверке КФМ содержит:

- инструментальную электронно-вычислительную машину, обеспечивающую установку инструментальных и программных средств;
- технологическое оборудование (технологические модули, обеспечивающие сопряжение интерфейсов КФМ и интерфейсов ИЭВМ, комплект соединительных жгутов для соединения рамы с установленным КФМ с технологическим оборудованием и источником питания);
- программное обеспечение для тестирования каждого модуля, принтер для вывода на печать результатов тестирования;
- источник питания для подачи напряжения на КФМ;
- комплект эксплуатационной документации, содержащий инструкции для проверки и загрузки тестового программного обеспечения.

В унифицированном рабочем месте используются компоненты технологического оборудования, специфичные по отношению к типу тестируемого модуля. Для МВ требуется только технологический модуль, обеспечивающий сопряжение интерфейса PCI и интерфейса SpaceWire. Для МВВ дополнительно необходим технологический модуль для сопряжения каналов ПК, РК и МКИО с интерфейсом ИЭВМ. Для МГ необходим технологический модуль для сопряжения SpaceWire и PCI, а также визуализатор для сопряжения интерфейса Fibre Channel и DVI. Визуализатор подключается непосредственно к

монитору с выходом DVI. Отличия в схемах связи для разных типов КФМ показаны на рис. 3.8 различными типами линий.

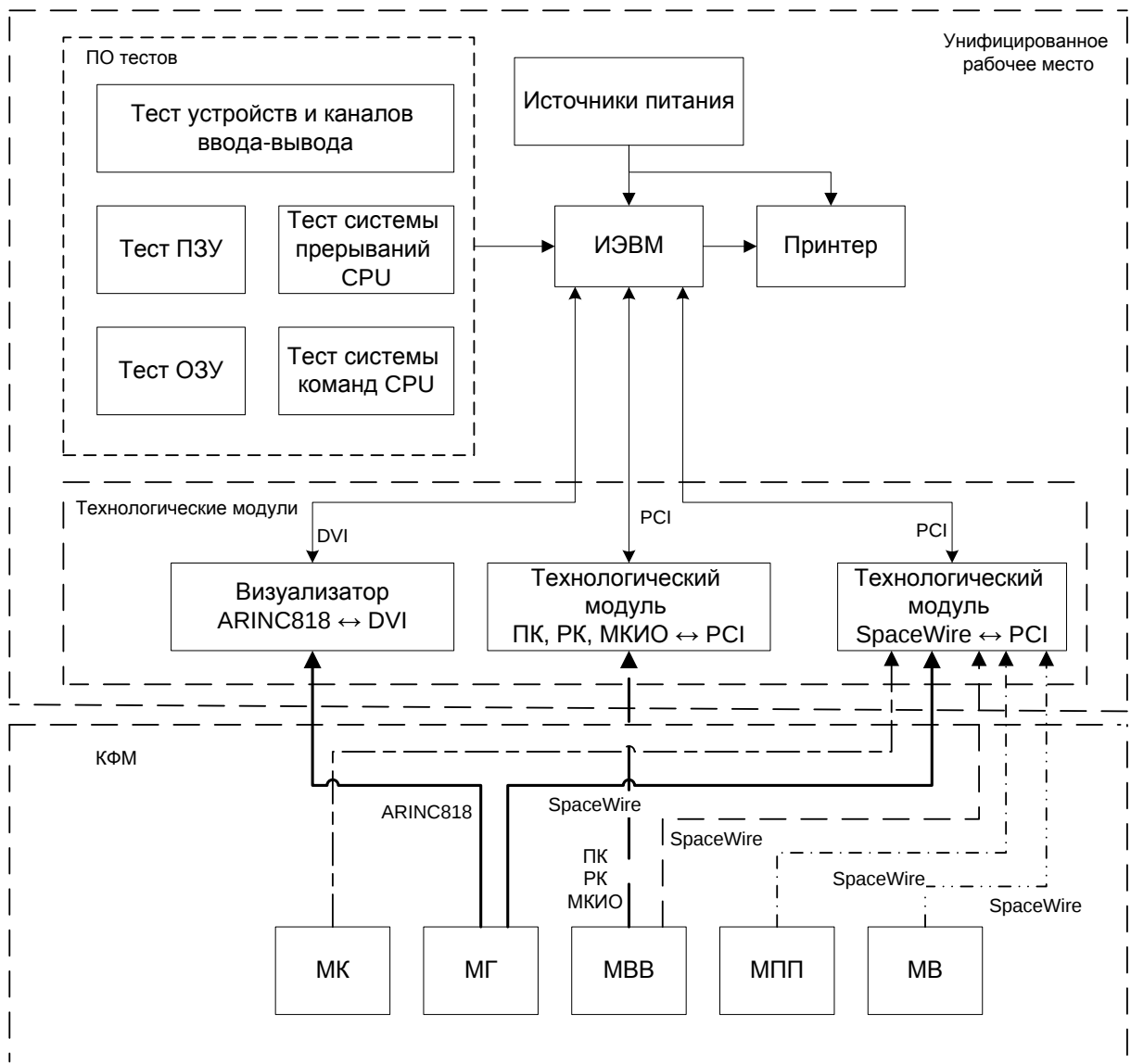


Рисунок 3.8 – Функциональная схема унифицированного автоматизированного рабочего места (DVI – Digital Visual Interface).

Алгоритмы тестирования представлены на рис. 3.9.

Тестирование начинается с подачи на КФМ напряжения питания. Затем загружается и запускается необходимое программное обеспечение для тестирования модуля. Во время тестирования модуля проверяются все узлы КФМ: ячейки памяти ОЗУ, ячейки памяти ПЗУ, система команд процессора, система

прерываний процессора, устройства и каналы ввода-вывода. Все результаты тестирования выдаются на экран, а также заносятся в файл отчета. Различают 2 вида алгоритмов проверки модулей в составе АРМ: в последовательном режиме (рис. 3.9,а) и в параллельном режиме (рис. 3.9,б).

Инструментальная программа проверки КФМ обеспечивает занесение в КФМ тестового ПО по технологическому каналу и обмен информацией между ИЭВМ и КФМ. Внешний вид рабочих окон программ САПР по проверке КФМ представлены на рис. 3.10 - 3.12.

Рабочее окно инструментальной программы разделено на несколько фрагментов. Слева находит лог проведенных тестов. Снизу командная строка для проведения отдельных операций, например, чтение или запись в ОЗУ/ПЗУ. В центре рабочего окна находит структурная схема тестируемого модуля. Под структурной схемой находятся кнопки начала теста и остановки теста, а также кнопка для получения отчета, а в дополнительное окно выводится информация о результате полного теста: «модуль исправен» или «модуль отказал». Справа в рабочем окне находятся кнопки для проведения тестов отдельных узлов модуля с дополнительными настройками.

Например, можно проводить полный тест ОЗУ, установив три элемента управления, или можно установить только галочку «тест адресов», и будет проведен только данный тест.

Инструментальная программа имеет возможности как проведения полного теста, так и выполнения тестов для отдельных узлов модуля. На рис. 3.12, б представлена ситуация, когда отдельно были протестированы:

- ОЗУ узла межмодульного интерфейса по тесту «бегущей единицы», тесту «бегущего нуля» и тесту адресов;
- ПЗУ узла функций модуля (выделенное пространство: 256 адресов, начиная с 33);
- процессор узла функций модуля по тесту системы команд.

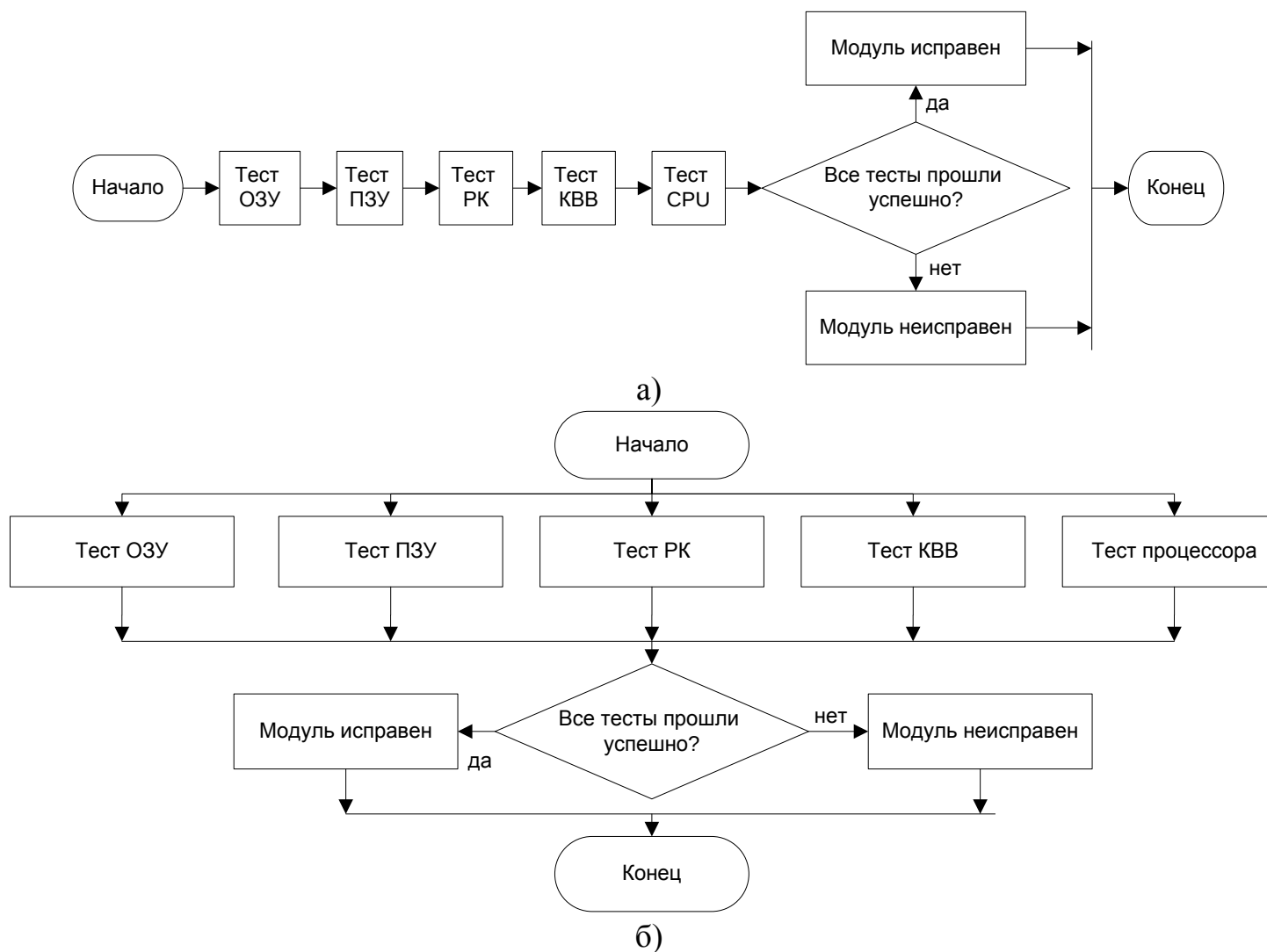
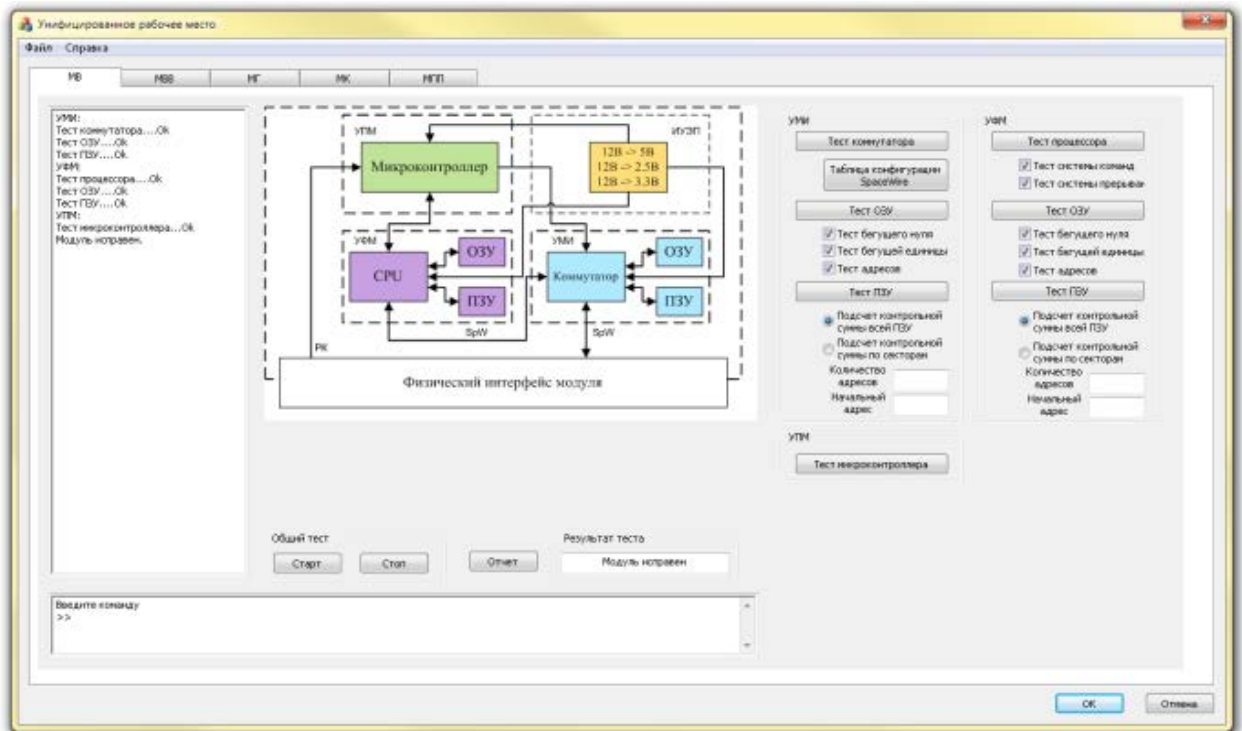
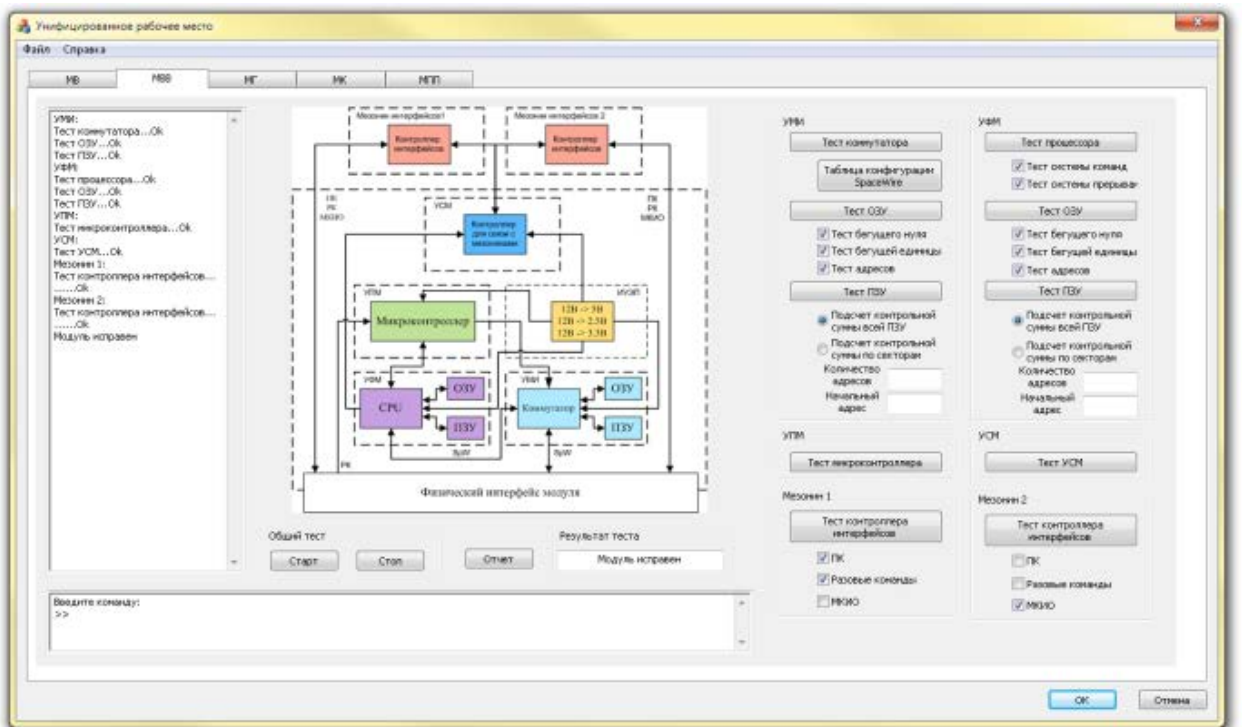


Рисунок 3.9 – Алгоритмы работы автоматизированного рабочего места проверки КФМ
а) в последовательном режиме, б) в параллельном режиме.



а)

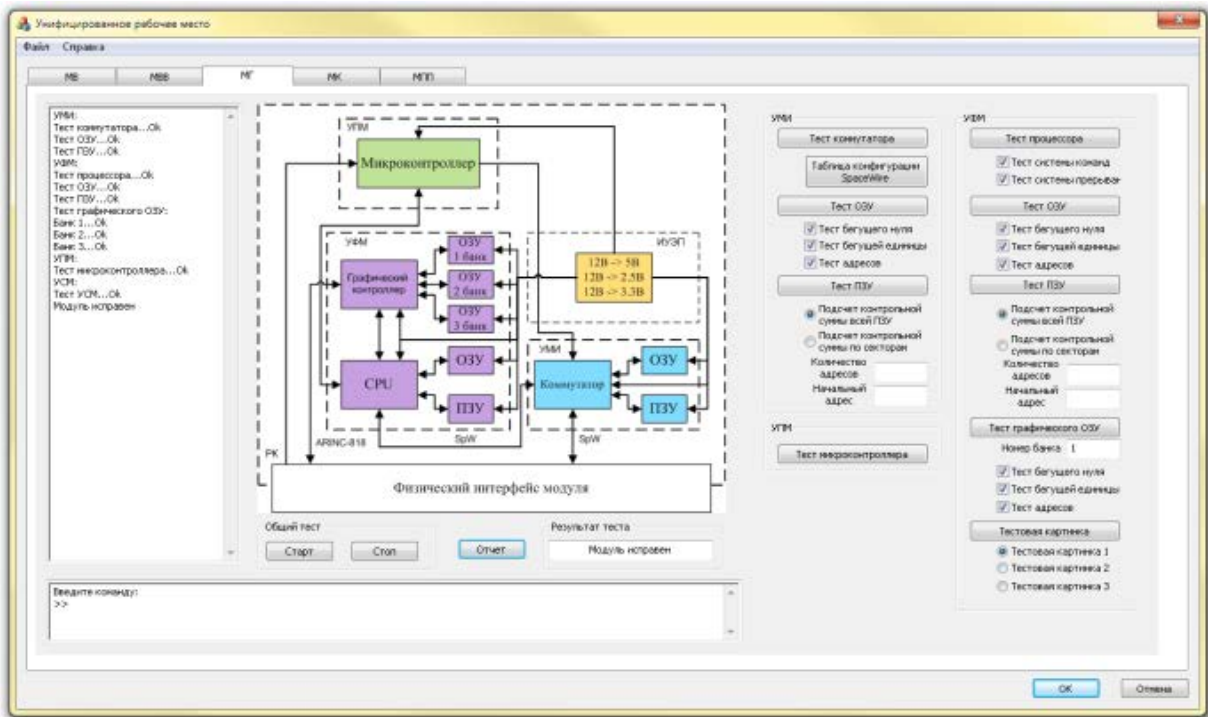


б)

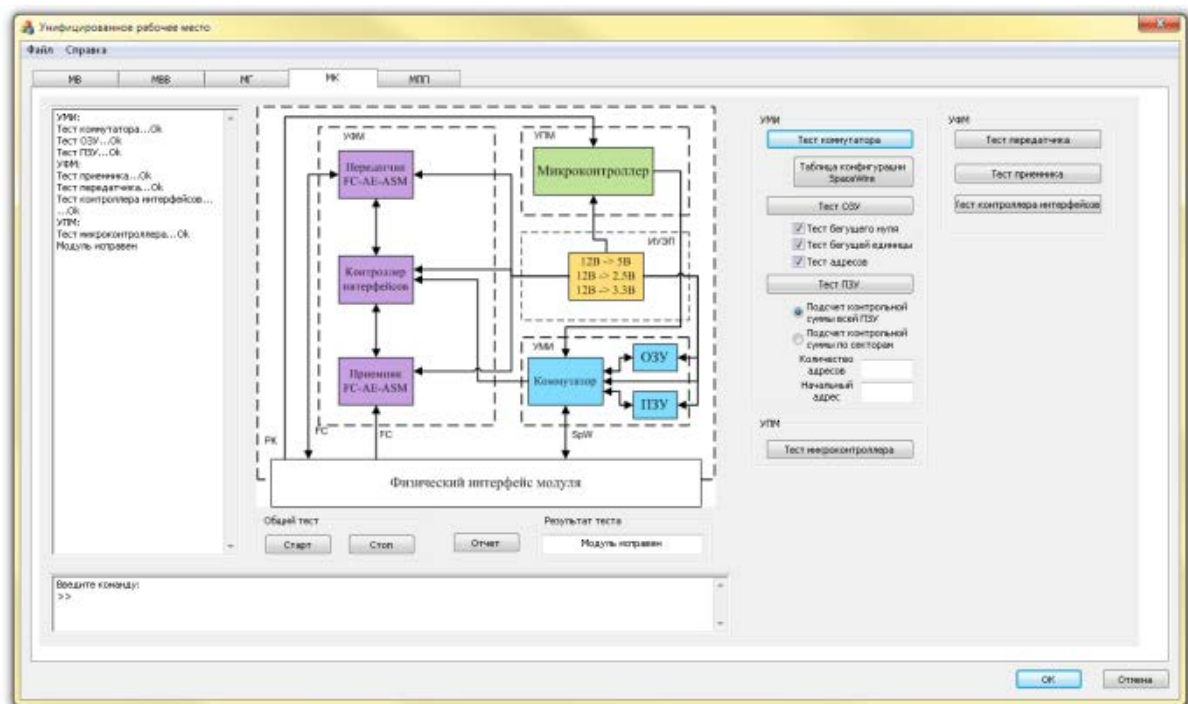
Рисунок 3.10 – Рабочее окно программы САПР для проверки КФМ:

а) Модуль вычислительный (полный тест);

б) Модуль ввода-вывода (полный тест).



а)

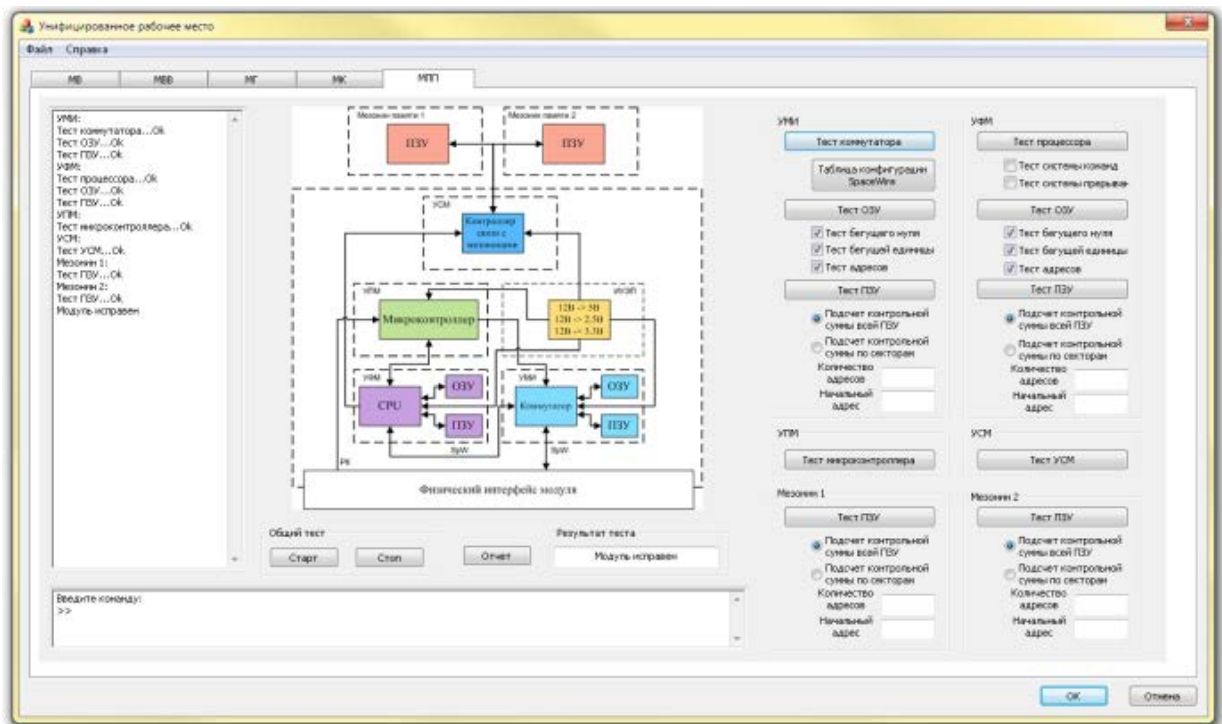


б)

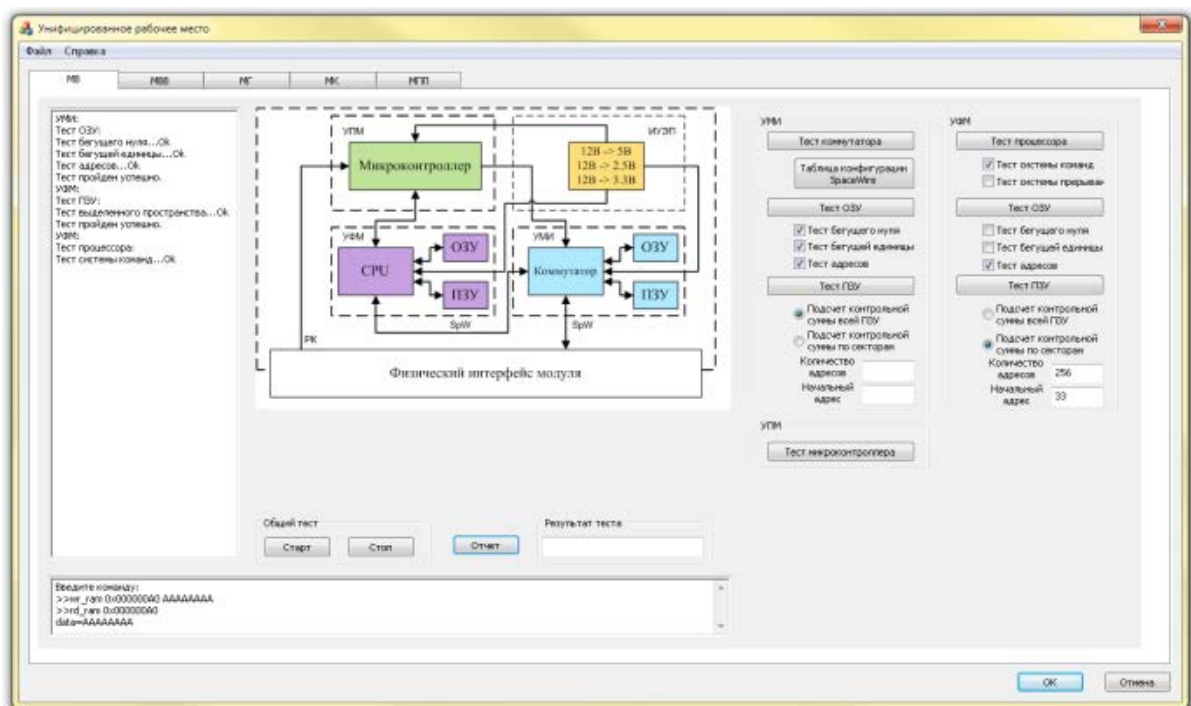
Рисунок 3.11 – Рабочее окно программы САПР для проверки КФМ:

а) Модуль графический (полный тест)

б) Модуль коммутатор (полный тест)



a)



6)

Рисунок 3.12 – Рабочее окно программы САПР для проверки КФМ:

а) Модуль постоянной памяти (полный тест)

б) Модуль вычислительный (выполнение отдельных тестов и команд).

3.5 Алгоритм работы ВС

Алгоритм работы БЦВС представлен на рис. 3.13. После подачи питающих напряжений на БЦВС проводится тест начального включения каждого модуля из двух подсистем. Проводится полный тест оперативного запоминающего устройства, тестируется постоянное запоминающее устройство путем подсчета и сравнения контрольных сумм и устройств ввода-вывода. Результат о прохождении теста выдается в МПП, где записывается в журнал. При неудачном прохождении теста, начинается реконфигурация системы при имеющихся аппаратных ресурсах. Если ресурсов в системе нет, то снимается сигнал исправности, и БЦВС считается отказавшей. При успешном прохождении теста устанавливается сигнал исправности и из МПП начинается загрузка функционального программного обеспечения для каждого функционального модуля в системе.

После выполнения каждого цикла ФПО проводится тестовый контроль в фоновом режиме. Режим выполнения теста определяется разовой командой «автоматический контроль». При ее наличии тест проводится в расширенном режиме, при отсутствии – в стандартном режиме.

В расширенном тестовом режиме контентная информация из каждого модуля заносится в энергонезависимое ПЗУ и проводится тест. Тест включает в себя полный тест ОЗУ, тест ПЗУ на подсчет контрольных сумм, тест процессора, системы прерываний и устройств ввода-вывода.

В стандартном режиме тест включает в себя тест ОЗУ лишь в выделенной области, которую не затрагивает ФПО, тест ПЗУ на подсчет контрольных сумм и тест системы команд процессора. После завершения теста в обоих режимах, информация о результате выдается в МПП, где заносится в журнал. При успешном завершении теста формируется сигнал исправности и БЦВС приступает к выполнению следующего цикла ФПО. При неудачном завершении теста начинается реконфигурация.

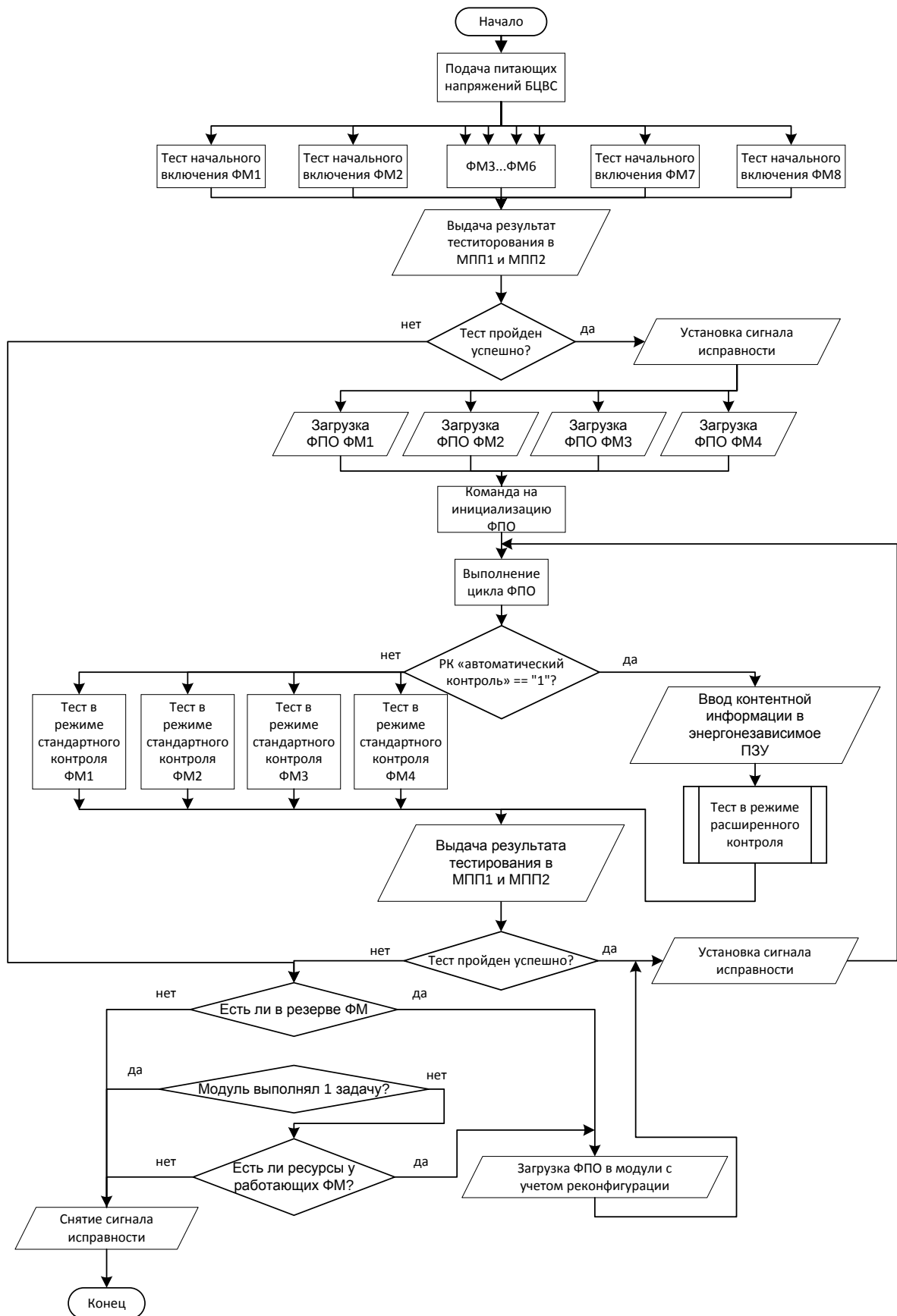


Рисунок 3.13 – Обобщенный алгоритм работы БЦВС во время полета.

Алгоритм работы БЦВС в режиме реконфигурации зависит от распределения задач на модули. Возможные варианты распределения задач:

- а) назначение одного функционального задания авионики (программного приложения) на один вычислительный ресурс БЦВС;
- б) назначение нескольких функциональных заданий авионики (программных приложений) на несколько вычислительных ресурсов БЦВС;
- в) назначение одного функционального задания авионики (программного приложения) на несколько вычислительных ресурсов БЦВС.

Решение задачи о назначении приложений осуществляется аппаратно-программными средствами БЦВС путем организации логических протоколов взаимодействия между КФМ по внутреннему коммутируемому каналу связи SpaceWire.

Реконфигурация при назначении каждой задачи на индивидуальное функциональное устройство возможна только при наличии модулей в резерве. Если модуль в резерве есть, ему передается ФПО отказавшего модуля, модифицируется ФПО остальных работающих модулей, и БЦВС возвращается к выполнению своей задачи. Если модуля в резерве нет, то снимается сигнал исправности БЦВС, и БЦВС считается отказавшей.

Реконфигурация при назначении нескольких задач на функциональный модуль возможна не только при наличии резервного модуля, а также если у работающих модулей имеются дополнительные ресурсы для выполнения задач, которые выполнял отказавший модуль. В таком случае, задачи отказавшего модуля распределяются между работающими модулями.

Реконфигурация при назначении задач, когда один модуль выполняет одну задачу, а три других модулей выполняют по несколько задач, зависит от того, какой из модулей отказал. Если отказал тот модуль, который выполнял одну задачу, то реконфигурация возможно только при наличии резервных модулей. Если отказал тот модуль, который выполнял несколько задач, то реконфигурация также возможна при наличии дополнительных ресурсов на оставшихся двух

модулях, выполняющих несколько задач. В таком случае, эти два модуля начинают выполнять задачи отказавшего модуля.

После проведения реконфигурации алгоритм работы БЦВС состоит в следующем: при положительном реконфигурировании выставляется сигнал исправности и БЦВС возвращается к выполнению ФПО. При неудачном реконфигурировании снимается сигнал исправности, и БЦВС считается отказавшей.

3.6 Выводы

1. К настоящему времени сформировались различные подходы к построению средств тестирования. Тесты аппаратуры бортового оборудования 4-ого поколения не подходят для контроля вычислительных систем 5-ого поколения в связи с существенным отличием в организации архитектуры вычислительных систем и увеличении требований по надежности и отказоустойчивости.

2. Тестирование аппаратуры бортового оборудования 5-ого поколения следует организовывать с учетом новых подходов к архитектуре вычислительной системы. Конструктивно-функциональные модули, объединенные в единую локальную сеть, следует тестировать путем внешнего функционального контроля с введением процедуры мажорирования. Причем, проведение теста инициируется сторонним модулем, входящим в состав вычислительной системы.

3. Предложенные схемы автоматизированного рабочего места и программное обеспечение соответствует структуре модулей, представленных в 1 и 2 главах.

4. Автоматизированное рабочее место и программное обеспечение позволяют проводить тестирование за приемлемое время с обеспечением заданных показателей надежности.

5. Модульное построения тестов конструктивно-функциональных модулей позволяет составить набор тестов, из которых можно составить функциональный тест для любого из типов вычислительных модулей.

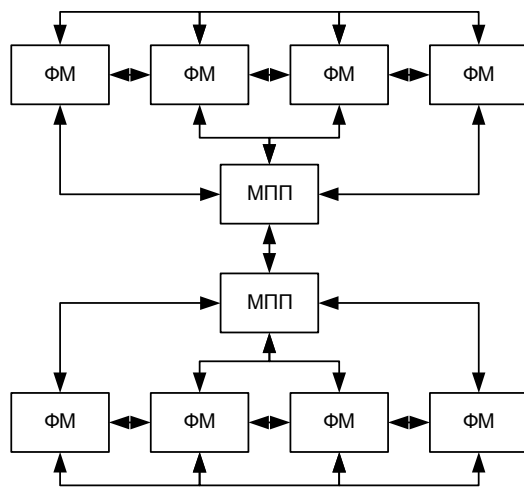
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИМА

4.1 Оценка надежности вычислительных структур

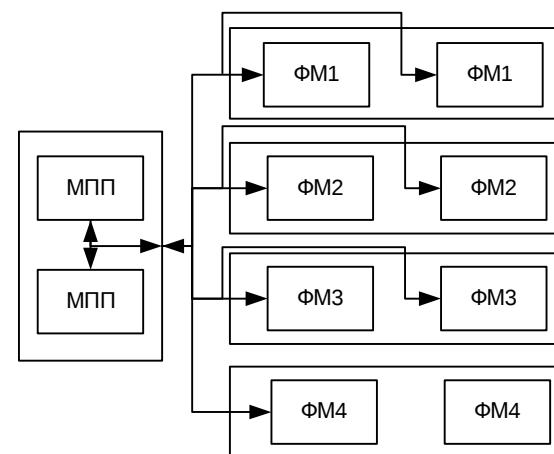
Существенными для оценки надежности вычислителей класса ИМА являются внутренняя структура вычислителя [8-14, 71], в качестве которой рассматривается схема связи ФМ в изделии, и λ -характеристики надежности элементной базы ФМ, входящей в изделие. При этом оценка надежности изделия может быть выполнена путем аналитического вывода выражения для вероятности $P(t)$ безотказной работы изделия и построения семейства графиков зависимости этой вероятности на заданном временном интервале. Временной интервал характеризует ожидаемое время непрерывной работы изделия в эксплуатации.

На основе универсальной функциональной схемы вычислителя класса ИМА (см. рис. 2.1) на практике разрабатываются различные варианты внутренних структур изделий авионики, реализуемых на логическом уровне. Необходимо отметить, что физическая среда распространения информации в изделии соответствует схеме связи рис. 1.7, а логическая среда распространения информации организуется программными средствами. Таким образом, не каждая физическая линия передачи информации оказывается задействованной в логическом протоколе обмена в ВС.

На рис. 4.1 представлены исследуемые варианты исполнения бортовой аппаратуры, перспективные для практического исследования. На рис. 4.1, а представлена схема внутренней связи ФМ в вычислительной системе, разделенной на две идентичных подсистемы, в каждой из которой задействовано по четыре ФМ и по одному МПП. В составе объекта (летательного аппарата) подсистемы резервируют друг друга. При отказе одного из КФМ в подсистеме вся подсистема считается неисправной, функции вычислителя исполняет резервная подсистема.



а)



б)

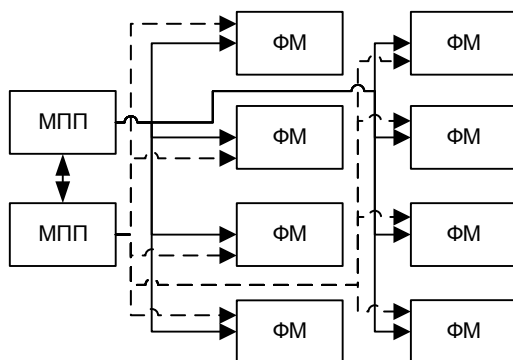


Рисунок 4.1 - Варианты исполнения бортовых в
вычислительных систем класса ИМА:

- а) резервирование на уровне подсистем,
- б) резервирование на уровне однотипных ФМ,
- в) скользящее резервирование на уровне идентичных ФМ.

На рис. 4.1, б представлена схема внутренней связи КФМ в вычислительной системе, состоящей из четырех ФМ различного типа. Каждый ФМ резервируется идентичным ФМ такого же типа. Общее число функциональных модулей в вычислительной системе соответствует варианту рис. 4.1, а. Модули МПП резервируют друг друга. Распределение задач между подсистемами не осуществляется, каждый модуль одной подсистемы резервирует идентичный модуль другой подсистемы.

На рис. 4.1, в представлена схема внутренней связи ФМ в вычислительной системе, состоящей из двух МПП и восьми идентичных ФМ, например, МВ. Такая вычислительная система используется в случае, когда для выполнения заданных функций авионики требуется вычислительный ресурс только четырех ФМ и одного МПП, вторая группа модулей в том же составе находится в резерве. Все ФМ, находящиеся в резерве, могут заменить любой из отказавших в полете ФМ, т.е. резервирование в вычислителе ИМА реализовано не на уровне подсистем, а на уровне ФМ.

На рис. 4.2 представлены эквивалентные схемы надежности для каждой из внутренних схем связи, приведенных на рис. 4.1.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ одного ФМ определяется по формуле:

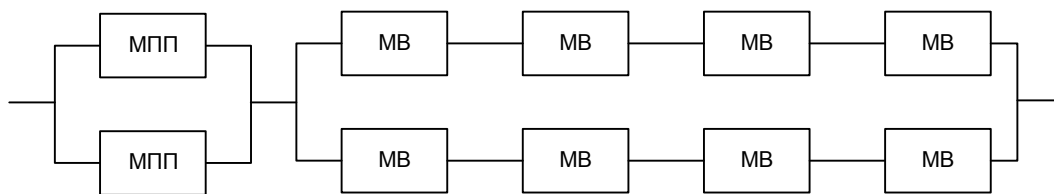
$$P_{\text{ФМ}}(t) = e^{-\lambda t}, \quad (4.1)$$

где λ – интенсивность отказов элементной базы модуля, t – время полета летательного аппарата.

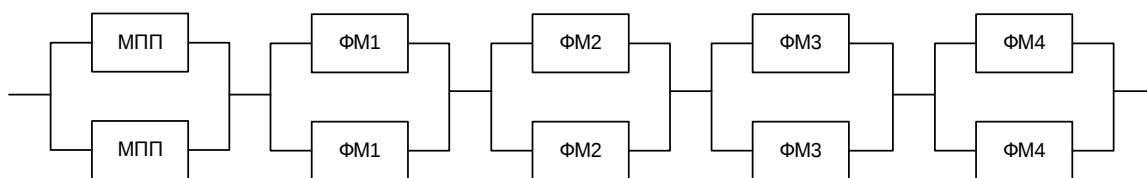
Для варианта эквивалентной схемы надежности, представленной на рис. 4.2, а, вероятность безотказной работы $P(t)$ вычислителя ИМА будет определяться по формуле:

$$P_1(t) = 1 - \left(1 - (P_{\text{МПП}}(t) \cdot P_{\text{ФМ}}^4(t))\right)^2, \quad (4.2)$$

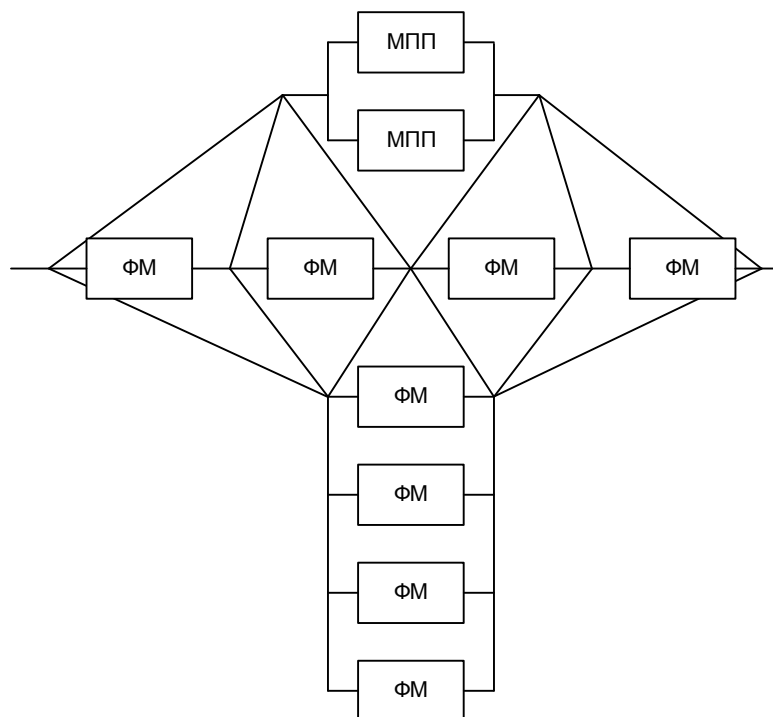
где $P_{\text{МПП}}(t)$ – вероятность безотказной работы МПП, $P_{\text{ФМ}}(t)$ – вероятность безотказной работы ФМ.



а)



б)



в)

Рисунок 4.2 - Эквивалентные схемы надежности:

а) резервирование на уровне подсистем,

б) резервирование на уровне однотипных ФМ,

в) скользящее резервирование на уровне идентичных ФМ.

Для варианта эквивалентной схемы надежности, представленной на рис. 4.2, б, вероятность безотказной работы $P(t)$ вычислителя ИМА будет определяться по формуле:

$$P_2(t) = [1 - (1 - P_{МПП}(t))^2] \times \\ \times [(1 - (1 - P_{\Phi M1}(t)))(1 - (1 - P_{\Phi M2}(t)))(1 - (1 - P_{\Phi M3}(t)))(1 - (1 - P_{\Phi M4}(t)))], \quad (4.3)$$

где $P_{\Phi Mi}(t)$ - вероятность безотказной работы для i -го ФМ.

В варианте схемы надежности, представленной на рис. 4.2, в, вероятность безотказной работы $P(t)$ вычислителя ИМА будет определяться по формуле:

$$P_3(t) = [1 - (1 - P_{МПП}(t))^2] \cdot \left[\sum_{i=4}^8 [C_8^i P_{\Phi M}^i(t) \cdot (1 - P_{\Phi M}(t))^{8-i}] \right]. \quad (4.4)$$

Если принять, что вероятности безотказной работы всех ФМ примерно одинакова, т.е. в состав каждого ФМ входит примерно одно и то же число радиоэлементов со сравнимыми показателями λ -надежности, выражения (4.2)-(4.4) примут вид соответственно:

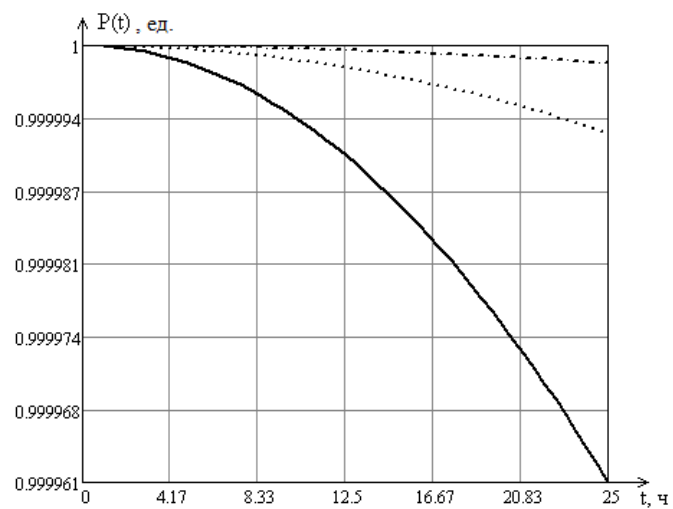
$$P_1(t) = 1 - (1 - P^5(t))^2 \quad (4.5)$$

$$P_2(t) = [1 - (1 - P(t))^2] \cdot \prod_{i=1}^4 [1 - (1 - P(t))^2], \quad (4.6)$$

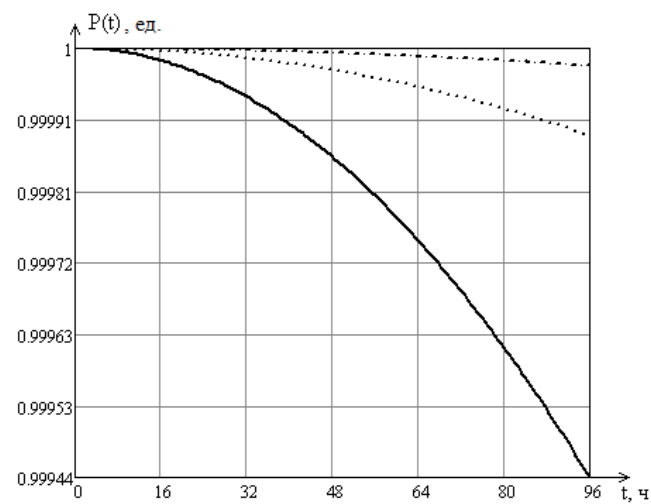
$$P_3(t) = [1 - (1 - P(t))^2] \cdot \left[\sum_{i=4}^8 [C_8^i \cdot P^i(t) \cdot (1 - P(t))^{8-i}] \right]. \quad (4.7)$$

На рис. 4.3 представлены семейства зависимостей для различных вариантов применения вычислителей ИМА. На рис. 4.3, а представлена зависимость вероятности безотказной работы для варианта исполнения вычислительной системы на гражданском самолете. Для определенности расчетов время полета принято 25 ч.

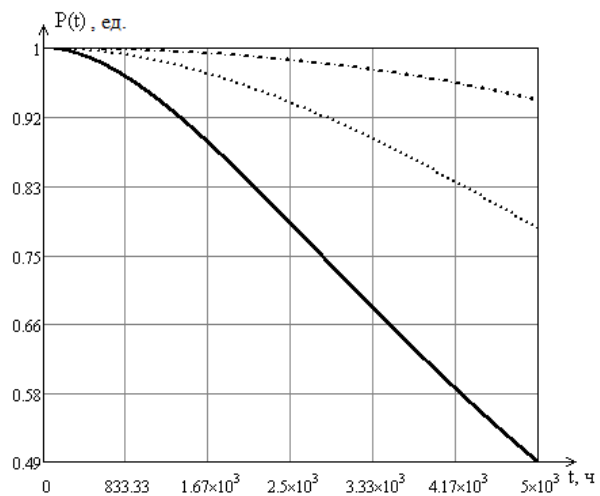
На рис. 4.3, б представлена зависимость вероятности безотказной работы вычислителя ИМА для варианта исполнения аппаратуры на морском судне. Время плавания принято для определенности 4 дня (96 ч). На рис. 4.3, в представлена зависимость вероятности безотказной работы для варианта исполнения вычислительной системы на космическом аппарате.



а)



б)



в)

Рисунок 4.3. Семейства зависимостей вероятностей

безотказной работы:

а) для самолета (25 ч),

б) для морского судна (96 ч),

в) для космического аппарата (5000 ч).

Время полета принято для определенности 5000 ч. В расчетах принята λ -характеристика ФМ на уровне $50 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$.

Средняя наработка на отказ вычислительных систем для рассматриваемых случаев будет рассчитываться по формуле:

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (4.8)$$

где t – время работы вычислительной системы.

Результаты расчетов, полученные по формулам (4.5) - (4.8), следующие: $T_1 = 6000$ ч, $T_2 = 10127$ ч, $T_3 = 14444$ ч.

В результате исследования были рассмотрены различные варианты реализаций внутренней структуры бортовой цифровой вычислительной системы класса ИМА.

В варианте исполнения, когда система разделена на две подсистемы, каждая из которой состоит из МПП и 4 ФМ, для исправного состояния вычислителя необходимо, чтобы все модули одной подсистемы были работоспособны. При отказе хотя бы одного ФМ вся подсистема считается неисправной. Для такой системы средняя наработка на отказ составит 6000 ч при λ -характеристике ФМ на уровне $50 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$.

В варианте исполнения, когда в системе присутствует 4 разновидности функциональных модулей, каждый из которых резервируется одним модулем такого же типа, и 2 модуля МПП, один из которых находится в резерве, для выхода из строя системы необходимо, чтобы отказали либо одновременно 2 МПП, либо два ФМ одного типа. Средняя наработка на отказ для такого случая при λ -характеристике ФМ на уровне $50 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$ составит 10127 ч.

В варианте исполнения, когда в системе присутствует 8 ФМ и 2 МПП, и для работы вычислителя достаточно 4 ФМ и 1 МПП, а в резерве имеется один МПП и 4 ФМ, средняя наработка на отказ при λ -характеристике ФМ на уровне $50 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$ составит 14444 ч.

Таким образом, расчеты показали, что самым надежным из рассмотренных вариантов является вариант исполнения внутренней

структуры аппаратуры ИМА по схеме, приведенной на рис. 4.1, в (рис. 4.2, в).

4.2 Организация обмена данными между авиационными системами для формирования и вывода на экран географических информационных данных

В настоящее время на борт пилотируемых летательных аппаратов внедряется все больше устройств для формирования и вывода на экран географических информационных данных. Географические информационные данные являются картографической информации, которая может быть представлена в растровом или векторном виде.

Системой, которая выполняет функцию формирования видеопотока данных, является БСКИ, а системой, которая служит для индикации картографической информации, является многофункциональный цветной индикатор (МФЦИ), в состав которой входит жидкокристаллическая панель [66]. Обмен данным между БСКИ и МФЦИ может производиться по аналоговому интерфейсу RGB или по цифровому интерфейсу ARINC-818. Главным вопросом соединения БСКИ и МФЦИ являются отличия в организации архитектуры модулей графических, входящих в состав БСКИ и МФЦИ, которые выполняют функции формирования и приема видеоизображения. Таким образом, необходимо применять унифицированные проектные решения.

Организация обмена информацией между БСКИ и МФЦИ представлена на рис. 4.4. Как видно из рис., БСКИ состоит из модуля памяти, модуля ввода-вывода, модуля вычислительного, модуля графического и модуля напряжения, которые объединены в локальную сеть по интерфейсу SpaceWire (за исключением модуля напряжений). МФЦИ состоит из модуля памяти, модуля ввода-вывода, модуля графического, модуля напряжений и модуля вычислительного. Также в состав МФЦИ входит жидкокристаллическая панель с набором кнопок для управления режимами вывода на экран изображения и настройки этого изображения. Модули в составе МФЦИ соединены между собой в аналогичную локальную сеть по интерфейсу SpaceWire.

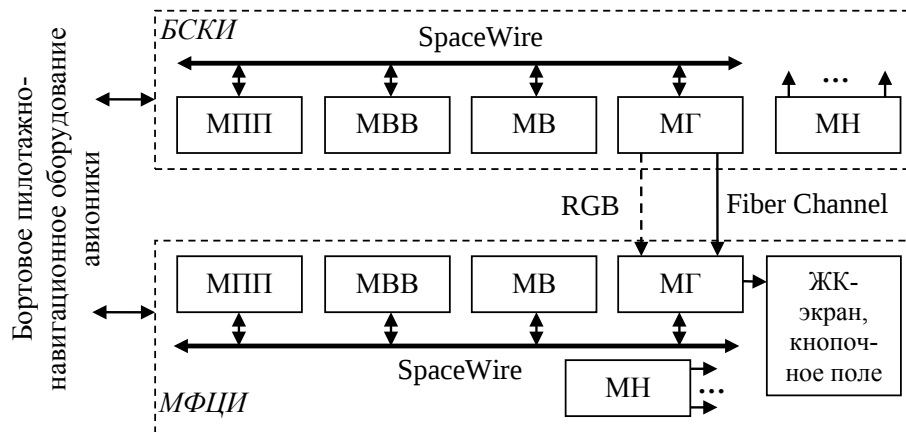
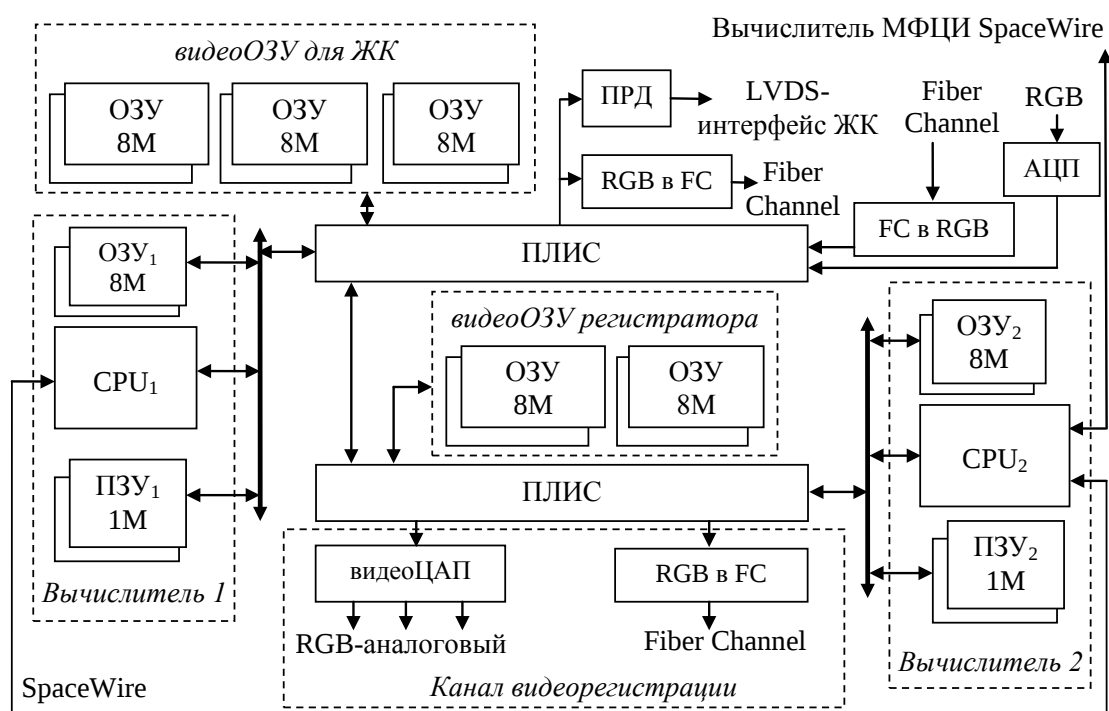


Рисунок 4.4 – Организация обмена информации между МФЦИ и БСКИ.

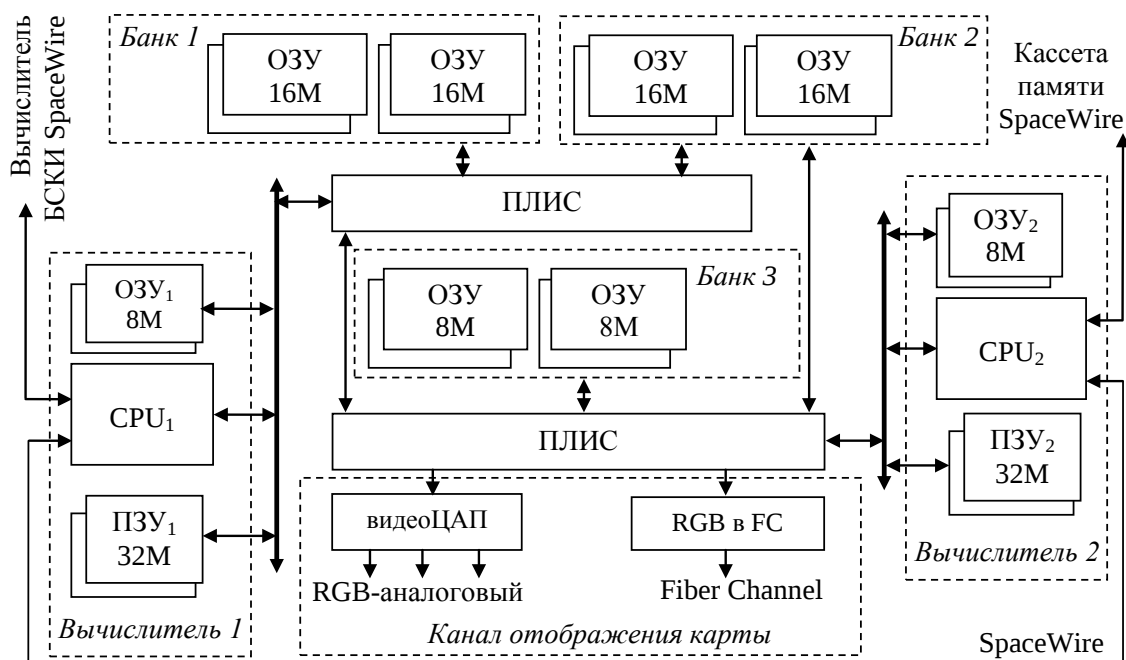
Обмен данным между БСКИ и МФЦИ может производиться по аналоговому интерфейсу RGB (пунктирная линия на рис. 4.4) или по цифровому интерфейсу ARINC-818 (сплошная линия на рис. 4.4). В результате на МФЦИ выводится кадр, содержащий географические информационные данные и пилотажно-навигационную информацию [80].

Внутренняя структура модуля графического, входящего в состав индикатора, представлена на рис. 4.5, а. Модуль графический состоит из:

- двух процессоров CPU_1 и CPU_2 , к которым подключены устройства памяти в виде постоянной памяти ($ПЗУ_1$ и $ПЗУ_2$) и оперативной памяти ($ОЗУ_1$ и $ОЗУ_2$);
- элементов ПЛИС, к которым подключено несколько банков видеОЗУ;
- цифро-аналогового преобразователя (видеоЦАП) для организации вывода RGB интерфейса на систему видеорегистрации;
- аналого-цифровой преобразователя (АЦП) для организации приема RGB интерфейса;
- ряда элементов для преобразования RGB интерфейса в интерфейс ARINC818 (RGB в FC);
- приемопередатчика LVDS (Low Voltage Digital Signal) для передачи потока видеоизображения на индикатор;
- ряда элементов для преобразования ARINC818 в RGB интерфейс.



а)



б)

Рисунок 4.5 - Внутренняя структура графических модулей:

а) МГ, входящий в состав МФЦИ;

б) МГ, входящий в состав БСКИ.

Внутренняя структура графического модуля, входящего в картографическую систему представлена на рис. 4.5, б.

МГ состоит из:

- двух процессоров CPU_1 и CPU_2 , к которым подключены устройства памяти в виде постоянной памяти ($ПЗУ_1$ и $ПЗУ_2$) и оперативной памяти ($ОЗУ_1$ и $ОЗУ_2$);
- элементов ПЛИС, к которым подключено несколько банков видеОЗУ;
- цифро-аналогового преобразователя (видеоЦАП) для организации вывода RGB интерфейса;
- ряда элементов для преобразования RGB интерфейса в интерфейс ARINC818 (RGB в FC);
- банки оперативного запоминающего устройства в количестве трех штук, которые служат для формирования кадра видеоизображения с географическими информационными данными.

Графический модуль, входящий в состава индикатора, выполняет такие задачи, как:

- прием, обработка и вывод на панель индикатора графической информации по LVDS-интерфейсу;
- прием, обработка и вывод на панель индикатора телевизионного сигнала, который модуль получает от картографической системы; сигнал может быть в формате ARINC818 или RGB;
- формирование и вывода на систему регистрации телевизионного сигнала по интерфейсу ARINC818 или по интерфейсу RGB;
- прием и выдача данных, получаемых от модулей, входящих в состав МФЦИ по интерфейсу локальной шины SpaceWire;
- прием и выдача сигналов, поступающих от кнопок, установленных на индикаторе, по интерфейсу локальной шины SpaceWire;

Графический модуль, входящий в состава картографической системы, выполняет такие задачи, как:

- формирования видеопотока информации, представляющей собой карту или рельеф местности; формирование происходит на основе получаемой по межмодульному интерфейсу от внешнего устройства (кассеты);

- формирование графического изображения на основе данных, поступающих от других модулей, входящих в состав БСКИ, для возможности совмещения кадров видеоизображения.

Графический модуль, входящий в БСКИ, выполняет следующие действия. Модуль принимает пилотажно-навигационную информацию, приходящую от вычислительного модуля, куда попадают через модуль ввода-вывода. Пилотажно-навигационная информация содержит текущие координаты летательного аппарата [68]. Эта информация преобразуется в первом процессоре и выдается во второй процессор для установки сигналов управления для модуля памяти, который содержит географические информационные данные для зон полетов летательного аппарата. Координаты положения летательного аппарата определяют адрес сектора в таблице секторов ПЗУ, который содержит цифровую карту местности.

Затем в банках видеоОЗУ складывается индикационный кадр видеоизображения цифровой карты местности. С помощью видеоЦАП или с помощью преобразователей «RGB в FC», видеокادر из банка ОЗУ выдается на индикатор по телевизионному каналу или по цифровому оптическому интерфейсу.

Графический модуль, входящий в МФЦИ, выполняет следующие действия. Графический модуль принимает поток видеоизображения, преобразовывая его с помощью АЦП или с помощью преобразователя «FC в RGB» для отображения на жидкокристаллической панели индикатора. Отображение изображения производится с использованием банков видеоОЗУ, которые применяются в режиме «запись/чтение/стирание».

Первым и вторым процессором (CPU_1 и CPU_2) производятся необходимые расчеты пилотажно-навигационной информации, поступающей в индикатор через модуль ввода-вывода. Построение графических примитивов («линия», «полигон», «треугольник» и др.) в банках ОЗУ обеспечивается с помощью элементов ПЛИС.

Показанные на рис. 4.5 внутренние структуры графических модулей имеют показатели стандартизации и унификации не ниже 70%, таким образом,

снижается сложность организации обмена данными между изделиями в едином бортовом навигационном комплексе летательного аппарата.

Совместимые интерфейсы, форматы хранения и обмена данными, одинаковые системы команд содействуют упрощению и ускорению процесса проектирования навигационных систем, позволяют создавать семейства изделий с единых методологических позиций, которые обладают повышенными показателями заимствования результатов, приобретенных при разработки изделий-аналогов.

4.3 Опыт применения мультипроцессора для обработки и формирования видеоизображения в авионике

Многофункциональные цветные индикаторы (МФЦИ), в состав которых входят жидкокристаллические (ЖК) панели являются ведущим средством представления географических информационных данных (ГИД) на борту современных летательных аппаратов являются [68, 79]. Индикационный кадр геоинформационных данных формируется в бортовой системе картографической информации и передается по телевизионному (в формате RGB) или оптическому (по стандарту ARINC-818) интерфейсу в МФЦИ для отображения. Для исследования временных свойств работы алгоритма, представленного на рис. 3.13, в составе устройства была проведена серия экспериментов.

Формирование индикационного кадра осуществляется техническими средствами модуля графического контроллера, входящего в состав БСКИ и представляющего собой мультипроцессор, выполненный в классе структур интегрированной модульной авионики [23, 78].

Графический контроллер был реализован на основе двухпроцессорного модуля. Функциональная схема двухпроцессорного модуля изображена на рис. 4.6.

В состав двухпроцессорного модуля входят:

- два цифровых процессора (CPU_1 и CPU_2)
- системный контроллер (СК), который реализован на базе элементов

программируемых логических интегральных схем;

- постоянное запоминающее устройство для каждого процессора (ПЗУ₁₍₂₎)
- оперативное запоминающее устройство для каждого процессора (ОЗУ₁₍₂₎);
- ОЗУ общего доступа и контроллер памяти общего доступа (КПОД), который реализован с применением элементов программируемых логических интегральных схем; КПОД выполняет функцию графического контроллера.

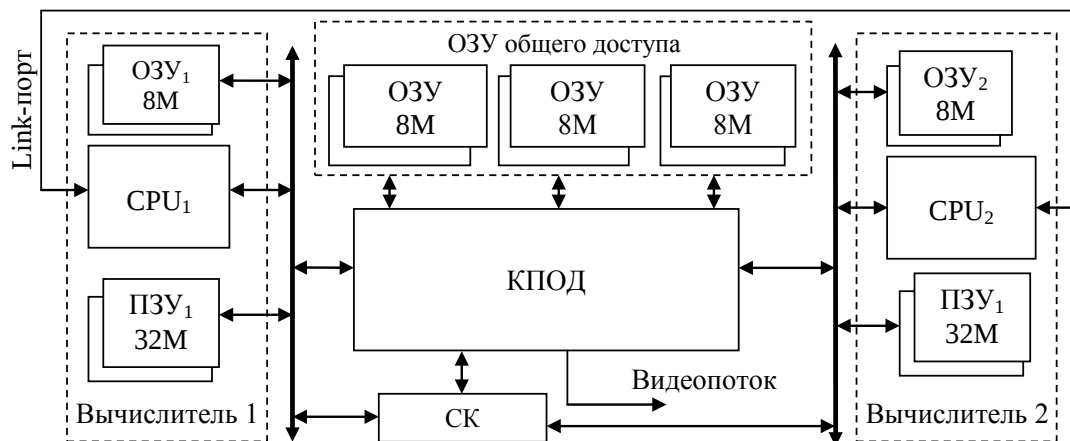


Рисунок 4.6 - Функциональная схема двухпроцессорного модуля.

Модуль представляет собой двухпроцессорную плату. Плата реализована на основе процессоров типа 1892BM2T. Цифровой оптический интерфейс использовался для передачи видеоизображения.

В приложении к анализу временных оценок алгоритма, изображенного на рис. 3.13, было реализовано четыре задачи формирования и отображения:

1) формирование видеоизображения для динамически изменяющейся двумерной цифровой карты местности (ЦКМ) с выводом изображения на индикатор, разрешение экрана которого составляет 1024x768 пикселей; изображение формировалось на основе данных, хранящегося в ПЗУ процессоров (рис. 4.7, а);

2) формирование единого видеоизображения, которое состоит из двух динамически изменяющихся двумерных изображений цифровой карты местности на основе данных, хранящихся в ПЗУ процессоров, и вывод этого изображения на

экран с суммарным разрешением экрана 1024x1024 пикселей с разным масштабом: 1:1 км и 1:4 км (см. рис. 4.7, б);

3) формирование видеоизображения трехмерной динамически изменяющейся поверхности с проведением расчетов на основе математической формулы самой поверхности и координат цветности пикселей для полученной поверхности; отображение этой поверхности на экране индикатора;

4) формирование видеоизображения трехмерного рельефа ЦКМ на основе данных, хранящихся в ПЗУ процессора (матрицы высот) (см. рис. 4.7, в).

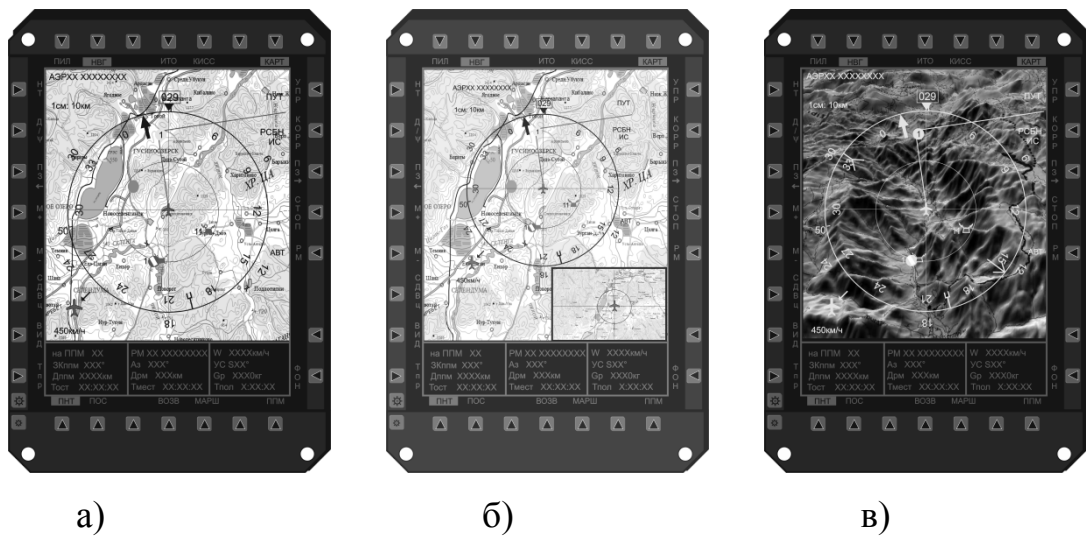


Рисунок 4.7 - Примеры отображения карты местности на индикаторе

- а) двумерное отображение карты местности,
- б) двумерное отображение карты местности с функцией «картинка в картинке»,
- в) трехмерное отображение карты местности.

В задаче 1 (двумерное отображение карты местности) один из процессоров (CPU_2) выбирает данных из ПЗУ₂, в котором содержится карта местности, и устанавливает точку позиционирования летательного аппарата, используя данные о настоящем местоположении объекта, которые возможно получить от спутниковой или инерциальной навигационной системы

Этот процессор (CPU_2) выполняет обработку данных карты местности в данные, представляющие собой абсолютные координаты экрана индикатора с

возможностью реализации поддержки поворота карты (в полярной системе координат).

Другой процессор (CPU_1) обеспечивает формирование конечного представления видеоизображения. Результат работы CPU_2 определяет цвет каждого пикселя.

Работа модуля представлена следующими этапами, которые осуществляются одновременно:

- один процессор (CPU_2) реализует указанную операцию и выдает результат этого действия в другой процессор (CPU_1), который записывает пришедшие данные в свое ОЗУ;

- другой процессор (CPU_1) реализует указанную операцию (одновременно с реализацией функций графического контроллера в контроллере общего доступа к памяти), затем записывает получившиеся данные в банк ОЗУ с общим доступом;

- контроллер общего доступа к памяти выполняет очищение (обнуляет) банка ОЗУ и производит запись данных из другого банка ОЗУ (учитывая полученные данные на предшествующем этапе) в выходной буфер ОЗУ третьего банка ОЗУ общего доступа;

- тест выполняется на фоне общей задачи.

В задаче 2 выполняется подобная обработка информации для формирования двух видеоизображений с разным масштабом карты местности.

В задаче 3 CPU_1 выполняет все действия для формирования изображения, а CPU_2 не применяется.

Работа модуля при этом представлена следующими этапами, которые осуществляются одновременно:

- процессор (CPU_1) реализует указанную операцию (одновременно с реализацией функций графического контроллера в контроллере общего доступа к памяти), затем записывает получившиеся данные в банк ОЗУ с общим доступом

- контроллер общего доступа к памяти выполняет очищение (обнуляет) банка ОЗУ и производит запись данных из другого банка ОЗУ (учитывая полученные данные на предшествующем этапе) в выходной буфер ОЗУ третьего

банка ОЗУ общего доступа;

- тест выполняется на фоне общей задачи.

В задаче 4 CPU₁ выполняет все действия для формирования изображения, а CPU₂ не применяется. CPU₁ выполняет выборку матрицы высот из своего ПЗУ, затем обрабатывает эти данные и получает их векторный формат (примитивы в виде треугольника), вычисляет цвет и оттенок выводимых на экран компонентов карты местности и переводит векторный формат изображения в пиксельный формат, подходящий для вывода на панель индикатора.

Работа модуля при этом представлена следующими этапами, которые осуществляются одновременно:

- процессор (CPU₁) реализует указанную операцию (одновременно с реализацией функций графического контроллера в контроллере общего доступа к памяти), затем записывает получившиеся данные в банк ОЗУ с общим доступом

- контроллер общего доступа к памяти выполняет очищение (обнуляет) банка ОЗУ и производит запись данных из другого банка ОЗУ (учитывая полученные данные на предшествующем этапе) в выходной буфер ОЗУ третьего банка ОЗУ общего доступа;

- тест выполняется на фоне общей задачи.

Реализовано два аппаратных режима.

В первом аппаратном режиме осуществлена поддержка следующих графических функций: очищение памяти, копирование информации в видеоОЗУ, функция пиксельного процессора с реализацией формирования примитива «Линия». Первый процессор (CPU₁) производит расчет координат пределов элементарных объектов и записывает их в ОЗУ или передает их во второй процессор (CPU₂) для формирования примитивов типа «Полигон». Первый процессор также выполняет формирования символов и букв.

Во втором аппаратном режиме осуществлена поддержка следующих графических функций: очищение памяти, копирование информации в видеоОЗУ функция пиксельного процессора с реализацией формирования горизонтальной линии между двум точками, с реализацией функции формирования цветов и

оттенков; процессора линий с возможностью формирования примитива типа «Ломаная линия».

При этом первый процессор выполняет предобработку элементарных объектов по минимуму и записывает данные в память процессора линий, откуда информация выдает на контроллер аппаратного формирования линий, а далее в один из банков ОЗУ при формировании примитива «Линия» или в пиксельный процессор при формировании других примитивов. Первый процессор также производит формирование букв и символов.

Оценка производительности системы отображения географических информационных данных в режиме выполнения ФПО и тестов реализована путем измерения частоты (в Гц) обновления кадров видеоизображения при отображении цифровой карты местности. Результаты сведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты оценки производительности системы

Режим	Задача			
	1	2	3	4
1	4 – 9 Гц	5 – 12 Гц	3,5 Гц	0,29 Гц
2	7,5 – 10 Гц	5 – 12 Гц	5,9 Гц	0,36 Гц

Некоторый разброс при реализации первой и второй задачи в обоих режимах определяется зависимостью от сложности карты местности и числа выводимых на экран слоев.

Малое увеличение производительности системы при переходе от первого аппаратного режима ко второму аппаратному режиму объясняется тем, что добавляется реализация функции обсчета цветов и оттенков, что добавляет дополнительно операцию «чтение-модификация» (расчет координат и цвета), таким образом, количество операций взаимодействия с ОЗУ повышается примерно в два раза и выполняются дополнительные расчеты.

4.4 Исследование свойств электромагнитной совместимости бортовой цифровой вычислительной машины в работе с приборным оборудованием авионики

После изготовления изделия на этапе проведения предварительных или межведомственных испытаний проводится оценка соответствия изделия требованиям технического задания по электромагнитной совместимости в работе с бортовым оборудованием.

При проведении экспериментов по оценке уровней создаваемых электромагнитных помех (помехоэмиссии) исследованию подлежат:

- измерение напряжения электромагнитных помех в проводах питания изделия (прямом и обратном);
- измерение силы тока электромагнитной помехи в цепях питания и в сигнальных цепях (кабелях связи);
- измерение напряженности электрического поля электромагнитной помехи с различных сторон изделия.

При проведении экспериментов по оценке восприимчивости изделия к электромагнитным помехам (ЭМП) исследованию подлежат:

- устойчивость изделия к воздействию магнитного поля, вызванного протеканием переменного тока в проводе-индукторе;
- устойчивость изделия к воздействию магнитного поля звуковой частоты;
- устойчивость изделия к воздействию на соединительные кабели изделия электрического поля;
- устойчивость изделия к воздействию на соединительные кабели изделия полей переходных процессов;
- устойчивость изделия к воздействию на провода электропитания изделия радиочастотных электромагнитных помех;
- устойчивость изделия к воздействию на соединительные кабели изделия радиочастотных электромагнитных помех;
- устойчивость изделия к воздействию на изделие и соединительные кабели радиочастотного излучения;

- устойчивость изделия к воздействию на провода электропитания изделия электромагнитных помех звуковых частот.

Для обеспечения устойчивости изделия к внешним электромагнитным помехам в изделии применяются специализированные электрорадиокомпоненты, устойчивые к повышенному уровню ЭМП; поглощающие ЭМП материалы и покрытия; конструктивные элементы заземления изделия и элементы металлизации его частей.

В частности, для снижения уровня излучаемых ЭМП от жгутов и кабелей предпринимаются следующие меры:

- экранировка цепей с импульсными токами и наиболее важных аналоговых цепей с низким динамическим диапазоном;

- взаимная компенсация магнитных потоков, создаваемых этими цепями, за счет применения бифилярного монтажа;

- осуществление качественного заземления экранирующего слоя жгутов и снижение индуктивности при осуществлении металлизации экранирующего слоя жгутов и кабелей;

- снижение полного сопротивления шин заземления;

- снижение площади контура излучения ЭМП путем уменьшения длины жгутов и кабелей;

- размещение жгутов и кабелей как можно ближе к заземленным элементам конструкции: шасси, корпус блока и т.п.;

- применение материалов с частотно-зависимыми свойствами на основе высокочастотных ферритов для экранирования силовых цепей, цепей с импульсными токами и наиболее важных аналоговых цепей с низким динамическим диапазоном.

В части проектирования многослойной печатной платы для уменьшения уровня излучаемых ЭМП необходимо соблюдать следующие правила:

- для увеличения межслойной емкости и обеспечения эффективной высокочастотной развязки необходимо, чтобы слои питания и земли были смежными. Полигоны электропитания располагать

во внутренних слоях многослойной печатной платы. Слои электропитания следует делать максимально сплошными, уменьшая площадь неметаллизированных участков.

- все высокочастотные цепи располагайте во внутренних слоях, смежных со слоями GND. Изменение направления трассы проводника высокоскоростных сигналов в топологии многослойной печатной платы выполнять в виде дуги.

- все пространство печатной платы, на котором не располагаются компоненты схемы и линии связи, должно быть залито полигоном земли.

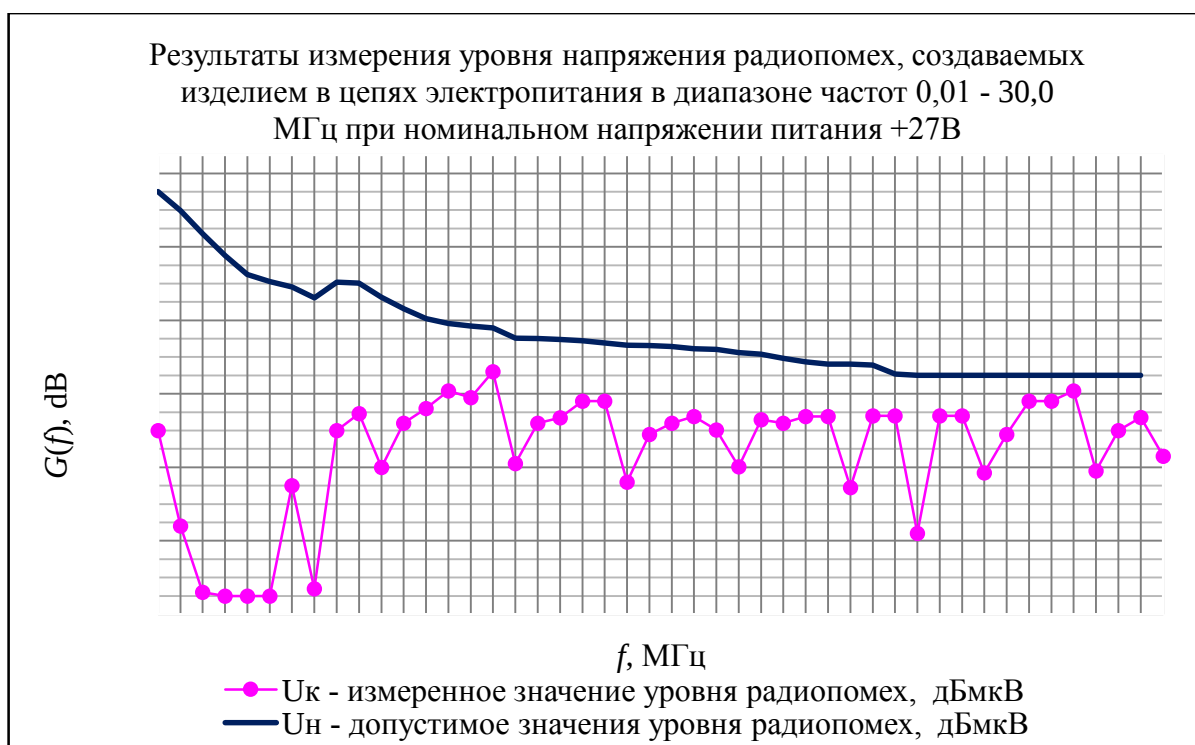
- разделять шины электропитания цифровых и аналоговых схем.

- проводники ввода-вывода печатной платы необходимо делать как можно более короткими и предусматривать фильтрацию выходных сигналов.

Для снижения помехоэмиссии изделия применяются различные схемные решения (в первую очередь фильтры радиопомех), рассчитанные на подавление спектральных составляющих основных частот, на которых функционирует изделие и их гармоник; применяются специализированные материалы и покрытия (серебро, латунь и др.), снижающие уровень излучаемых ЭМП; используются конструктивные элементы заземления изделия и элементы металлизации его частей.

Для оценки эффективности схемных и конструктивно-технологических решений, положенных в основу проектирования изделия авионики класса БЦВМ (бортовой цифровой вычислительной машины), была проведена серия экспериментов. Оценке подлежал уровень излучаемых изделием ЭМП в диапазоне частот 0,01 МГц – 100 МГц.

Результаты экспериментов приведены на рис. 4.8.



а)



б)

Рисунок 4.8 - Результаты измерения уровня помехоэмиссии изделия $G(f)$ при номинальном напряжении питания +27В в диапазоне частот f :

а) 0,01 МГц – 30 МГц, б) 30 МГц – 100 МГц.

Отдельно на рис. 4.8, а приведен график уровня ЭПМ, зарегистрированной при работе изделия в диапазоне частот 0,01 МГц – 30 МГц, на рис. 4.8, б — в диапазоне частот 30 МГц – 100 МГц. Разными линиями на графиках представлен уровень зарегистрированных ЭМП и допустимый уровень, соответствующий требованиям нормативно-технической документации для данного класса аппаратуры.

Наличие ярко выраженных пульсаций ЭМП в низкочастотной области объясняется особенностями работы изделия и связано с тактовой частотой информационного обмена изделия с другими абонентами ботового комплекса по каналам связи.

В высокочастотной области уровень допустимых ЭМП постоянен, а пульсации излучаемых изделием ЭМП обусловлены работой изделия на тактовой частоте процессора, примененного в изделии, с дополнительной генерацией ЭМП на частотах гармоник основной частоты. Важно заметить, что гармоники возникают как по основной частоте работы изделия, так и по комбинированным частотам, генерируемым вследствие работы узлов изделия (устройства ввода вывода, межмодульная магистральная шина и т.д.) на частотах, отличных от основной.

4.4 Выводы

1. Предложенная физическая схема соединений локальной сети внутри вычислительной системы позволяет реализовывать различные логические соединения исходя из необходимой функциональной задачи. Варианты логических соединений влияют на показатели надежности. Предпочтительной является схема резервирования скользящее резервирование на уровне идентичных модулей.

2. Проведены эксперименты по оценке временных характеристик работы тестов (рис. 3.13) и ФПО на реальном изделии. Показано, что структура изделия оказывает влияние на временные характеристики цикла выполнения бортовой задачи

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования поставленная цель выполнена: проведен анализ принципов построения вычислительных систем интегрированной модульной авионики и ее компонентов, проведен анализ принципов контроля и диагностики вычислительных систем ИМА, разработаны алгоритмы контроля и диагностики вычислительных систем ИМА во время полета и во время настройки на заводе-изготовителе, разработан аппаратно-программный комплекс для настройки и проверки вычислительных систем и ее компонентов на заводе-изготовителе.

Таким образом, в диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Проведен анализ принципов построения вычислительных систем интегрированной модульной авионики и ее компонентов. Установлено, что существует два направления построения архитектуры вычислительных модулей: на основе элементов ПЛИС и с использованием процессоров и сопроцессоров. Показано, что подход к построению архитектуры вычислительных модулей с использованием процессоров является более перспективным. Предложена внутренняя структура базового модуля, на основе которой можно построить внутреннюю структуру любого из функциональных модулей, необходимых для построения различных вычислительных систем.

2. Проведен анализ существующих методов и алгоритмов контроля и диагностики вычислительных систем перспективного ЛА. Показано, что для вычислительных систем 4-ого поколения использовался последовательный принцип построения тестирования., Предложено для перспективных вычислительных систем использовать параллельный принцип тестирования.

3. Произведен выбор технических решений для разработки алгоритмов контроля и диагностики вычислительных систем перспективного ЛА. Показано, что для вычислительных систем 4-ого поколения использовалось тестирование каждого из модулей, входящих в состав системы, отдельно. Предложена новая схема тестирования вычислительной системы в процессе полета, путем

инициирования внешнего функционального контроля с введением процедуры мажорирования.

4. Предложено унифицированного рабочего места проверки, используемое для настройки и проверки компонентов вычислительной системы перспективного ЛА. Показано, что для всей номенклатуры вычислительных модулей класса ИМА возможно использовать унифицированное рабочее место проверки с применением необходимых технологических модулей проверки.

5. Разработано программное обеспечение, используемое для проверки компонентов вычислительной системы перспективного ЛА на заводе-изготовителе. Показано, что программное обеспечение должно иметь модульный принцип построения. Предложен базовый набор тестов, из которых можно составить тест для любого из функционального модуля.

7. Предложен алгоритм контроля вычислительной системы во время полета. Установлено, что для перспективных вычислительных систем следует использовать «внешнее» инициированное тестирование с введением мажорирования результатов тестирования функциональных компонентов.

8. Проведена серия экспериментов по тестированию модулей с использованием предложенных алгоритмов. Показаны временные характеристики работы алгоритма тестирования изделия.

9. Проведена оценка надежности для 3 случаев организации внутренней структуры вычислительной системы класса ИМА. Показано, что для различного применения вычислительной системы (для летательного аппарата, для морского судна и для космического аппарата) возможны различные реализации схем резервирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимов О.В., Егоров К.А., Итенберг И.И., Ковальчученко А.Ф., Куликов Д.А., Сивцов С.А., Федосов Е.А., Чуянов Г.А. Базовая несущая конструкция платформы интегрированной модульной авионики [Текст] // Патент на полезную модель №106404 U1 RU, МПК G06F 1/16. №2010129389/08. Заявл. 15.07.2010. Оpubл. 10.07.2011.
2. Авакян, А. А. Интерфейсная технология ETHERNET-ARINC-429 [Текст] // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2005. – Том 1. – С. 233-235.
3. Авакян, А. А. Унифицированная интерфейсно-вычислительная платформа для систем интегральной модульной авионики [Текст] // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2013. – №65. – С. 29-45.
4. Антимиров, В. М. Поколения бортовых цифровых вычислительных систем [Текст] / В. М. Антимиров, М. Б. Трапезников // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2002. – №2. – С. 38-46.
5. Бабанин, И. Г. Бортовая сеть дуплексной передачи данных через Ethernet-AFDX (общие положения) [Текст] / И.Г. Бабанин, А.А. Волынец // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций. Курск. – 2010. – С. 211-213.
6. Бачило, С. А. Интегрированная авиационная система синтезированного и улучшенного видения [Текст] / С.А. Бачило, Д.Ю. Дзягун, И.И. Итенбург И. И. [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – №3. – С. 126-132.
7. Белоусов, Ю. А. Отказоустойчивые бортовые вычислительные системы. Вопросы построения аппаратной части [Текст] // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – №3. – С. 18-23.
8. Богатырев, В.А. К распределению функциональных ресурсов в отказоустойчивых многомашинных вычислительных системах [Текст]

- // Приборы и Системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 12. – С. 1–5.
9. Богатырев, В.А. Комбинаторно-вероятностная оценка надежности и отказоустойчивости кластерных систем [Текст] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – №6. – С.21-26.
 10. Богатырев, В.А. Надежность вариантов размещения функциональных ресурсов в однородных вычислительных сетях [Текст] // Электронное моделирование. – 1997. – №3. - С.21.
 11. Богатырев, В.А. Надежность и эффективность резервирования компьютерных сетей [Текст] // Информационные технологии. – 2006. – №9. – С.25-30.
 12. Богатырев, В.А. Оптимальное резервирование системы разнородных серверов [Текст] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – №12. – С.30-36.
 13. Богатырев, В.А., Объединение резервированных серверов в кластеры высоконадежной компьютерной системы [Текст] / В.А. Богатырев, С.В. Богатырев // Информационные технологии. – 2009. – №6. – С.41-47.
 14. Богатырев, В.А. Организация межмашинного обмена в дублированных вычислительных комплексах [Текст] / В.А. Богатырев, И.Ю. Голубев, В.Ф. Беззубов // Известия вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 8-13.
 15. Богданов А.В., Васильев Г.А., Виноградов П.С., Егоров К.А., Зайченко А.Н., Ковернинский И.В., Петухов В.И., Романов А.Н., Смирнов Е.В., Уткин Б.В., Федосов Е.А., Шукалов А.В. Платформа интегрированной модульной авионики [Текст] // Патент на полезную модель №108868 U1 RU, МПК G06F 9/00, №2011121962/08. Заявл. 01.06.2011. Оpubл. 27.09.2011.
 16. Бондаренко, И.Б., Принятие технических решений с помощью многоагентных систем [Текст] / И.Б. Бондаренко, А.Г. Коробейников,

- Н.Н. Прохожев [и др.] // NB: Кибернетика и программирование. – 2013. – №1. – С. 16–20.
17. Буздалов, Д. В., Инструментальные средства проектирования систем интегрированной модульной авионики [Текст] / Д.В. Буздалов, С.В. Зеленев, Е.В. Корныхин [и др.] // Труды Института системного программирования РАН. – 2014. – Том 26. – Выпуск 1– С. 201-230.
 18. Видин, Б.В. Декомпозиционные методы в задачах распределения вычислительных ресурсов многомашинных комплексов бортовой авионики [Текст] / Б.В. Видин, И.О. Жаринов, О.О. Жаринов // Информационно-управляющие системы. – 2010. – №1. – С.2-5.
 19. Волынец, А. А. Требования к системе информационного обмена перспективных летательных аппаратов [Текст] / А.А. Волынец, А.М. Потапенко // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций. Курск. – 2010. – С. 193-197.
 20. Воробьев, А.В. Научные основы создания отказоустойчивых интегрированных вычислительных комплексов систем управления летательными аппаратами [Текст] : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.13.05. – М.: МГИЭМ – 2010. – 32 с.
 21. Галушкин, В. В., Сквозная технология проектирования комплексов бортового оборудования перспективных воздушных судов [Текст] / В.В. Галушкин, Д.И. Катков, В.В. Косьянчук [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – №3. – С. 201-209.
 22. Гатчин, Ю.А., Модели и методы проектирования интегрированной модульной авионики [Текст] / Ю.А. Гатчин, Б.В. Видин, И.О. Жаринов [и др.] // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2010. – №1. – С.12-20.
 23. Гатчин, Ю. А. Основы проектирования вычислительных систем интегрированной модульной авионики [Текст] / Ю.А. Гатчин, И.О. Жаринов. – М. : Машиностроение, 2010. – 224 с.

24. Герасимов, Г. И. Распределенная сетевая информационно-вычислительная система модернизируемых и перспективных боевых авиационных комплексов [Текст] // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – №2. – С. 23-26.
25. Герлих Х. Модульная система авионики самолета [Текст] // Патент №2413655 С2 RU, МПК В64С 19/00. №2008123940/11. Заявл. 16.11.2006. Оpubл. 10.03.2011. Бюл. №7.
26. Горбачев, С.В. Масштабируемые архитектуры распределенных систем на технологии SpaceWire на базе платформы «Мультикор» [Текст] / С.В. Горбачев, Д.А. Рождественский, Е.А. Суворова [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. – 2006. – № 2. – С. 69–80.
27. ГОСТ 18977-79. Комплексы бортового оборудования самолетов и вертолетов. Типы функциональных связей. Виды и уровни электрических сигналов [Текст] – М.: Изд-во стандартов, 1979.
28. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования. [Текст] – М.: Изд-во стандартов, 2003.
29. Джанджгава, Г. И. Авионика пятого поколения: новые задачи – новая структура [Текст] // Вестник авиации и космонавтики. – 2001. – №5. – С. 8-10.
30. Джанджава, Г. И. Концепция создания интегрированных комплексов бортового оборудования летательных аппаратов нового поколения [Текст] / Г.И. Джанджава, Г.И. Герасимов, А.П. Рогалев [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. – 2002. – №6. – С. 3-8.
31. Джанджгава, Г. И. Интегрированная динамически реконфигурируемая система комплексной обработки информации бортовых комплексов навигации, управления и наведения [Текст] / Г.И. Джанджава, А.П. Рогалев, А.В. Бабаченко [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. – 2002. – №6. – С. 8-14.

32. Дьяченко, О. А. Анализ возможностей семейства протоколов Fibre Channel применительно к авиационным системам передачи данных [Текст] / О.А. Дьяченко, А.А. Волынец // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций. Курск. – 2010. – С. 208-211.
33. Евгенов, А. В. Направления развития интегрированных комплексов бортового оборудования самолетов гражданской авиации [Текст] // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – №3. – С. 48-53.
34. Егоров, К.А., Итенберг И.И., Ковернинский И.В., Тимченко А.П., Федосов Е.А., Чуянов Г.А. Платформа интегрированной модульной авионики [Текст] // Патент №2413280 С1 RU, МПК G06F 9/02. №2009127190/08. Заявл. 14.07.2009. Оpubл. 27.02.2011. Бюл. №6.
35. Егоров, К.А., Итенберг И.И., Ковернинский И.В., Тимченко А.П., Федосов Е.А., Чуянов Г.А. Платформа интегрированной модульной авионики [Текст] // Патент на полезную модель №88462 С1 RU, МПК G06F 9/00. №2009127040/22. Заявл. 14.07.2009. Оpubл. 10.11.2009.
36. Жаринов, И.О. Принципы построения и методы автоматизации проектирования вычислительных систем интегрированных комплексов бортового оборудования [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.13.12 – СПб: НИУ ИТМО, 2011 – 298 с.
37. Жаринов, И.О. Принципы построения крейта бортовой многопроцессорной вычислительной системы для авионики пятого поколения [Текст] / И.О. Жаринов, Б.В. Видин, Р.А. Шек-Иовсепянц // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4 (68). – С. 21–27.
38. Захарова, О.Л. Алгоритмы и программные средства тестирования бортовых цифровых вычислительных систем интегрированной модульной авионики [Текст] / О.Л. Захарова, Ю.А. Кирсанов, Е.В. Книга [и др.] // Информационно-управляющие системы. – 2014. – №3. – С.19-29.

39. Итенберг, И.И. Интегрированная модульная электроника – новая стратегия на рынке приборостроения [Текст] // Новый оборонный заказ. Стратегии. – 2010. – № 5. – С. 64–65.
40. Итенберг, И. И. Отечественная платформа интегрированной модульной авионики для перспективных гражданских самолетов и вертолетов [Текст] / И.И. Итенберг, Д.А. Куликов, К.В. Тарандевич [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – №3. – С. 133-140.
41. Каляев А. В. Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений [Текст] / А.В. Каляев, И.И. Левин. – М.: Янус-К. 2003. – 380 с.
42. Каляев, И. А. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные системы для решения потоковых задач [Текст] / И.А. Каляев, И.И. Левин // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2011. – №2. – С. 12-22.
43. Каляев, И. А. Вычислительные системы с реконфигурируемой архитектурой на основе ПЛИС Virtex-6 и Virtex-7 [Текст] / И.А. Каляев, И.И. Левин, А.И. Дордопуло [и др.] // Вестник южного научного центра. – 2013. – Т. 9. – С. 107-114.
44. Каляев, И. А. Семейство вычислительных систем с высокой реальной производительностью на основе ПЛИС [Текст] / И.А. Каляев, И.И. Левин, Е.А. Семерников // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14. – №5(40). – С. 91-101.
45. Книга, Е.В. Вычислительные структуры компонентов интегрированной модульной авионики [Текст] // Материалы XVI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» – СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электронприбор», 2014. – С.365-370.
46. Книга, Е.В. Особенности построения внутренней структуры модулей вычислительных систем класса интегрированной модульной авионики (материалы конференции) [Текст] // Гироскопия и навигация. – 2014. – №2. – С.136.

47. Книга, Е.В. Построение вычислительных систем перспективных летательных аппаратов на основе интерфейса SpaceWire [Текст] // Материалы XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» – СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2013. – С.303-309.
48. Книга, Е.В. Принципы организации вычислительных систем перспективных летательных аппаратов (материалы конференции) [Текст] // Гироскопия и навигация. – 2013. – №2. – С.156.
49. Книга, Е.В. Алгоритм тестирования мультипроцессорных многомодульных бортовых цифровых вычислительных систем интегрированной модульной авионики [Текст] / Е.В. Книга, И.О. Жаринов // Вестник науки Сибири. – 2014. – №2 (12). – С.107-114.
50. Книга, Е.В. Классификация и структура конструктивно-функциональных модулей бортовых цифровых вычислительных систем интегрированной модульной авионики [Текст] / Е.В. Книга, И.О. Жаринов // Сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – Том 2. – С.189-190.
51. Книга, Е.В. Организация внутренней структуры модулей перспективных бортовых цифровых вычислительных систем авионики [Текст] / Е.В. Книга, И.О. Жаринов // Сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов научно-педагогической школы кафедры ПБКС «Информационная безопасность, проектирование и технология элементов и узлов компьютерных систем» / Под ред. Ю.А. Гатчина СПб: НИУ ИТМО, 2013. – Выпуск 1. – С.127-131.
52. Книга, Е.В. Особенности унификации и стандартизации проектных решений при конструировании крейтов интегрированной модульной авионики [Текст] / Е.В. Книга, И.О. Жаринов // Сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов научно-педагогической

- школы кафедры ПБКС «Информационная безопасность, проектирование и технология элементов и узлов компьютерных систем» : Под ред. Ю.А. Гатчина – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – Выпуск 2. – С.85-90.
53. Книга, Е.В. Принципы организации межмодульного информационного обмена в бортовых цифровых вычислительных системах интегрированной модульной авионики [Текст] / Е.В Книга., И.О. Жаринов // Сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов научно-педагогической школы кафедры ПБКС «Информационная безопасность, проектирование и технология элементов и узлов компьютерных систем» / Под ред. Ю.А. Гатчина – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – Выпуск 2. – С.91-95.
54. Книга, Е.В. Принципы построения комбинированной топологии сети для перспективных бортовых вычислительных систем [Текст] / Е.В. Книга, И.О. Жаринов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – №6. – С.92-98.
55. Книга, Е.В. Средства автоматизированного контроля мультипроцессорных многомодульных бортовых вычислительных систем [Текст] / Е.В. Книга, И.О. Жаринов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2014. – №6. – С.10-16.
56. Книга, Е.В. Средства автоматизированного контроля функциональных компонентов интегрированной модульной авионики [Текст] / Е.В. Книга, И.О. Жаринов // Сборник трудов XII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии» – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – Том 1. – С.422-423.
57. Книга, Е.В. Топология внутренней электрической сети Spacewire для перспективных типов бортовых цифровых вычислительных систем авионики [Текст] / Е.В. Книга, И.О. Жаринов // Сборник трудов

- молодых ученых, аспирантов и студентов научно-педагогической школы кафедры ПБКС «Информационная безопасность, проектирование и технология элементов и узлов компьютерных систем» / Под ред. Ю.А. Гатчина – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – Выпуск 1. – С.122-126.
58. Книга, Е.В. Принципы организации архитектуры перспективных бортовых цифровых вычислительных систем в авионике [Текст] / Е.В. Книга, И.О. Жаринов, А.В. Богданов [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – №2. – С. 163-165.
 59. Книга, Е.В. Оценка вероятности безотказной работы вычислительных структур интегрированной модульной авионики для различных конфигураций аппаратных средств [Текст] / Е.В. Книга, И.О. Жаринов, Д.А. Заколдаев [и др.] // Сборник трудов XII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии» – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – Том 1. – С.416-417.
 60. Книга, Е.В. Базовые структуры модулей и вычислительных систем интегрированной модульной авионики [Текст] / Е.В. Книга, И.О. Жаринов, М.О. Костишин // Сборник трудов XVIII Всероссийской научно-практической конференции «Научное творчество молодежи. Математика. Информатика» – Томск: Изд-во Томского университета, 2014. – Часть 1. – С.137-144.
 61. Книга, Е.В. Оценка параметров помехоэмиссии бортовой цифровой вычислительной машины в цепях электропитания [Текст] / Е.В. Книга, И.О. Жаринов, М.О. Костишин // Сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» –

Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – Том 1. – С.103-104.

62. Книга, Е.В. Организация работы бортовой цифровой вычислительной системы с поддержкой функции реконфигурации [Текст] / Е.В. Книга, П.П. Парамонов, А.В. Шукалов [и др.] // Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции им. А.Ф. Терпугова «Информационные технологии и математическое моделирование» – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – Часть 1 – С.90-95.
63. Колпаков, К.М. История развития бортовых цифровых вычислительных машин в России [Текст] // PCweek. 1999. №32. [Электронный ресурс, режим доступа: www.pcweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=51809, открытый. Дата обращения: 18.02.2015].
64. Колядинцев, В. А. Использование интерфейса Fibre Channel для обмена видеоинформацией в бортовых системах [Текст] / В.А. Колядинцев, О.О. Попов // Ветник новгородского государственного университета. – 2005. – №30. – С. 93-99.
65. Коновальчик, А. Высокопроизводительные вычислительные системы с реконфигурируемой архитектурой, построенной на ПЛИС [Текст] // Современные технологии автоматизации. – 2013. – №3. – С. 70-72.
66. Копорский, Н.С. Бортовые средства отображения информации современных пилотируемых летательных аппаратов [Текст] / Н.С. Копорский, Б.В. Видин, И.О. Жаринов // В кн. Современные технологии : Под ред. С.А. Козлова и В.Л. Ткалич. – СПб: СПбГУ ИТМО. – 2004. – С. 154-165.
67. Копорский, Н.С. Организация вычислительного процесса в многомашинном бортовом вычислительном комплексе [Текст] / Н.С. Копорский, Б.В. Видин, И.О. Жаринов // Известия вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – №6. – С.41-50.

68. Костишин, М.О. Оценка точности визуализации местоположения объекта в геоинформационных системах и системах индикации навигационных комплексов пилотируемых летательных аппаратов [Текст] / М.О. Костишин, И.О. Жаринов, О.О. Жаринов [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 1. – С. 130–137.
69. Костишин, М.О. Исследование эргономических свойств бортовых средств отображения пилотажно-навигационных параметров и геоинформационных данных в авионике [Текст] / М.О. Костишин, И.О. Жаринов, Е.В. Книга // Сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2014. – Том 1. – С.109-110.
70. Костишин, М.О. Опыт применения мультипроцессора для формирования видеопотока изображения геоинформационных данных в авионике [Текст] / М.О. Костишин, И.О. Жаринов, Е.В. Книга [и др.] // Сборник трудов XVIII Всероссийской научно-практической конференции «Научное творчество молодежи. Математика. Информатика». – Томск: Изд-во Томского университета. – 2014. – Часть 1. – С.147-152.
71. Кузнецова, О.А. Оценка надежности структурно избыточных комплексов авионики с учетом среднего времени между восстановлениями при отказах [Текст] // Изв. вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – № 3. – С. 65–69.
72. Кучерявый, А. А. Бортовые информационные системы: Курс лекций [Текст] / Под ред. В. А. Мишина и Г. И. Ключева. 2-е изд. перераб. и доп. Ульяновск: УлГТУ. – 2004. – 504 с.
73. Левин, И. И. Модульно-наращиваемая многопроцессорная вычислительная система со структурно-процедурной организацией

- вычислений на основе ПЛИС-технологии [Текст] // Искусственный интеллект. – 2003. - №4. – С. 446-453.
74. Левин, И. И. Семейство высокопроизводительных реконфигурируемых вычислительных систем [Текст] // Вестник Томского государственного университета. – 2008. – №2(3). – С. 77-93.
75. Михайлуца, К. Т. Основные архитектурные концепции информационно-вычислительной среды бортового оборудования перспективных летательных аппаратов [Текст] / К.Т. Михайлуца, Е.Э. Чернышев, Шейнин Ю.Е. // Современные технологии извлечения и обработки информации. – СПб: Радиоавионика. – 2001. – 175 с.
76. Олифер, В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы [Текст] / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер : Учебник для вузов. – 3-е изд. – СПб: Питер, 2007. – 958 с.
77. ООО Специальное Конструкторское Технологическое Бюро «Системы Контроля и Телематики» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.skitlab.ru, свободный. Яз. рус. (дата обращения 27.02.2015).
78. Парамонов, П. П. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении [Текст] / П.П. Парамонов, И.О. Жаринов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – №2 – С. 1-17.
79. Парамонов, П.П. Организация информационного взаимодействия авиационных средств формирования и отображения геоинформационных данных [Текст] / П.П. Парамонов, И.О. Жаринов, О.О. Жаринов [и др.] // Сборник трудов XVIII Всероссийской научно-практической конференции «Научное творчество молодежи. Математика. Информатика». – Томск: Изд-во Томского университета. – 2014. – Часть 1. – С.159-164.

80. Парамонов, П.П. Принцип формирования и отображения массива геоинформационных данных на экран средств бортовой индикации [Текст] / П.П. Парамонов, М.О. Костишин, И.О. Жаринов [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 6. – С. 136–142.
81. Раменское приборостроительное конструкторское бюро. Бортовая вычислительная станция «БВС-1». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.rpkb.ru, свободный. Яз. рус. (дата обращения 16.04.2013).
82. Севбо, В. Многопроцессорный вычислительный комплекс для задач «жесткого» реального времени [Текст] / В. Севбо, А. Орлов, А. Лошаков // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 3. – С. 32–38.
83. Турчак, А.А. Архитектура вычислительных систем для интегрированной модульной авионики перспективных летательных аппаратов [Текст] / А.А. Турчак, Е.Э. Чернышев, К.Т. Михайлуца [и др.] // Радиотехника. – 2002. – № 9. – С. 87–95.
84. Федосов, Е. А. Проект создания нового поколения интегрированной модульной авионики с открытой архитектурой [Текст] // Полет. – 2008. – №8. – С. 15-22.
85. Федосов, Е.А. Интегрированная модульная авионика [Текст] / Е.А. Федосов, В.В. Косьянчук, Н.И. Сельвесюк // Радиоэлектронные технологии. – 2015. – №1. – С.66-71.
86. Феофанов, В.К. Нашлемная система целеуказания и индикации на базе координаточувствительного фотоприемника «Мультискан» [Текст] / В.К. Феофанов, П.П. Парамонов, В.Д. Суслов [и др.] // Датчики и системы. – 2001. – №8. – С.2-3.
87. Чуянов, Г. А. Перспективы развития комплексов бортового оборудования на базе интегрированной модульной авионики [Текст] / Г.А. Чуянов, В.В. Косьянчук, Н.И. Сельвесюк // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – №3. – С. 55-62.

88. Шахматов, А. В. Сетевая архитектура сопряжения комплексов бортового оборудования космического аппарата [Текст] / А.В. Шахматов, М.Ю. Вергазов, С.А. Чекмарев [и др] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева – 2012. – №4. – С. 148-154.
89. Шукалов, А.В. Принципы построения средств контроля интегрированных многомодульных вычислительных систем авионики [Текст] : учеб. пособие /А.В. Шукалов, Е.В. Книга, П.П. Парамонов – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 72 с.
90. Шукалов, А.В. Принципы построения вычислительных компонентов систем интегрированной модульной авионики [Текст] / А.В. Шукалов, П.П. Парамонов, Е.В. Книга [и др.] // Информационно-управляющие системы. – 2014. – №5. – С.64-71.
91. Шушпанов, Н. А. Перспективные интегрированные вычислительные комплексы вертолетов [Текст] / Н.А. Шушпанов, М.Ю. Линник, И.О. Ковязин // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – №2. – С. 27-32.
92. Ananda, C.M. Civil aircraft advanced avionics architectures- An insight into SARAS avionics, present and future [Текст] // In Conference on Civil Aerospace Technologies, National Aerospace Laboratories, Bengaluru. – 2003. – P. 1-7.
93. Ananda, C.M. General aviation aircraft avionics: integration & system tests [Текст] // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – May 2009. – V.5. – Issue 5. – P. 19-25.
94. Ananda, C.M. Integrated on aircraft test report of communication system [Текст] // National Aerospace Laboratories, Bengaluru. Technical Report No. 10, TR-32. – April 2003. – P. 9-100.
95. Ananda, C.M. Integrated on aircraft test report of navigation system [Текст] // National Aerospace Laboratories, Bengaluru. Technical Report No. 10, TR-33. – April 2003. – P.11-125.

96. Ananda, C.M. Integrated on aircraft test report of display system [Текст] // National Aerospace Laboratories, Bengaluru. Technical Report No. 10, TR-34. – April 2003. – P.14-160.
97. Ananda, C.M. Integrated on aircraft test report of radar system [Текст] // National Aerospace Laboratories, Bengaluru. Technical Report No. 10, TR-35. – April 2003. – P. 5-53.
98. Ananda, C.M. Integrated on aircraft test report of data acquisition and reporting system [Текст] // National Aerospace Laboratories, Bengaluru. Technical Report No. 10, TR-36. – April 2003. – P. 9-52.
99. Ananda, C.M. Integrated on aircraft test report of engine instruments and other display systems [Текст] // National Aerospace Laboratories, Bengaluru. Technical Report No. 10, TR-37. – April 2003. – P.10-59.
100. Ananda C.M. Avionics Systems, Integration, and Technologies of Light Transport Aircraft [Текст] / C.M. Ananda, K.G. Venkatanarayana, M. Preme [и др.] // Defence Science Journal. – July 2011. – Vol. 61. – No. 4.– P. 289-298.
101. ARINC Specification 653, Avionics Application Software Standard Interface, Published by ARINC, 2551 Riva Road, Annapolis, MD 21401. <http://www.arinc.com>
102. Bieber, P. New Challenges for Future Avionic Architectures [Текст] / P. Bieber, , F. Bonioi, M. Boyer [и др.] // AerospaceLab Journal. – May 2012. – Issue 4. – P.1-10.
103. Bluff, R.J. Integrated modular avionics: system modeling [Текст] // Microprocessors and Microsystems. – 1999. – №23. – P. 435–448.
104. Cook, Barry M. Ethernet over SpaceWire – Hardware issues [Текст] / Barry M. Cook, Paul Walker // Acta Astronautica. – 2007. – №61. – P. 243 – 249.
105. Cook, Barry M. Ethernet over SpaceWire – software issues [Текст] / Barry M. Cook, Paul Walker // Acta Astronautica. – 2007. – №61. – P. 250 – 256.
106. Chen, Y.S., Chen D R. An efficient DVS algorithm for fixed-priority real-time applications [Текст] / Y.S. Chen, D.R. Chen // International

- Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications. – 2010. – P.29-37.
107. Eveleens, René L.C. Open Systems Integrated Modular Avionics – The Real Thing [Текст] // Mission Systems Engineering. – Educational Notes RTO-EN-SCI-176, 2006. – Neuilly-sur-Seine, November, France: RTO. – Paper 2. – P. 2-22.
 108. Gamati, A. A Modeling Paradigm for Integrated Modular Avionics Design [Текст] / A. Gamati, C. Brunette, R. Delamare [и др.] // 32nd EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications. – 2006.
 109. Gamatie, A. Synchronous Design of Avionic Applications based on Model Refinement [Текст] / A. Gamatie, Th. Gautier, P.Guernic // Journal of Embedded Computing. – 2006. – №3-4. – P. 273-289.
 110. Garside, R. Integrating ModularAvionics: A new role emerges [Текст] / R. Garside, F.J. Pighetti // IEEE/AIAA 26th Digital Avionics Systems Conference, DASC'07. – Dallas, TX. – Oct. 2007.
 111. Kniga, E.V. Analysis and algorithms of the control in advanced digital avionics systems [Текст] / E.V. Kniga, I.O. Zharinov // Automation & Control: Proceedings of the International Conference of Young Scientists «ISCAC-2013». – Saint-Petersburg: Polytechnic University. – 2013. – P. 28-32.
 112. Kniga, E. Organization of onboard digital computer system with reconfiguration [Текст] / E. Kniga, A. Shukalov, P. Paramonov // Communications in Computer and Information Science. – 2014. – Vol. 487. – P.197-204.
 113. López, Juan. Modular avionics for seamless reconfigurable UAS missions [Текст] / Juan López, Pablo Royo, Cristina Barrado [и др.]// In 27th Digital Avionics Systems Conference. – DASC 2008. – Florida, USA. – P. A3-1-10.

114. Ott, Alik. System Testing In The Avionics Domain [Текст]: Dissertation Zur Erlangung Des Grades Einer Doktorin Der Ingenieurwissenschaften. – Germany: Universität Bremen, 2007. – 434 p.
115. Parkes, S. M., The operation and uses of the SpaceWire time-code [Текст] // International SpaceWire Seminar. – ESTEC Noordwijk. – The Netherlands. – November, 2003.
116. Parkes, Steve. SpaceWire: Spacecraft on board data-handling network [Текст] / Steve Parkes, Philippe Armbrusterb. // Acta Astronautica. – 2010. – №66. – P. 88-95.
117. Sheikh, A. A best-response algorithm for multiprocessor periodic scheduling [Текст] / A. Al Sheikh, O. Brun, P.-E. Hladik [и др.] // Proc. of the 23rd Euromicro Conference on Real-Time Systems. – 2011. – P. 228–237.
118. Tianran, Zhou. Design of Energy-efficient hierarchical scheduling for integrated modular avionics systems [Текст] / Zhou Tianran, Xiong Huagang // Chinese Journal of Aeronautics. – 2012. – №25. – P. 109-114.
119. UAV Navigation AP04 autopilot [Электронный ресурс]
<http://www.uavnavigation.com/uavprod/uavprod>
120. Vaglianti, B. Piccolo System User's Guide [Текст]/ B. Vaglianti, R. Hoag, M. Niculescu, // Cloud Cap Technologies, <http://cloudcaptech.com>, 2005
121. Walter, C.J. MAFT: A multicomputer architecture for fault tolerance in real-time control systems [Текст]. – IEEE Trans. Comp. – 1988. – №37(4) . – P. 398-405.
122. Watkins, C.B. Transitioning From Federated Avionics Architectures to Integrated Modular Avionics [Текст]/ C.B. Watkins, R. Walter // IEEE. – 2007.
123. Zhang, Huinan. Testing Method of Integrated Modular Avionics Health Monitoring [Текст] / Huinan Zhang, Shihai Wang, Bin Liu [и др.] // Chemical engineering transactions. – 2013. – V.33. – P. 649-654.

124. Zhou, Q. Research of simulation testing environment for integrated modular avionics software [Текст] / Q. Zhou, Y. Wu, B. Liu // Advanced Science Letters. – 2012. – V.6. – P.453-458.

Приложение А
(справочное)



XVI КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

**НАВИГАЦИЯ
И УПРАВЛЕНИЕ
ДВИЖЕНИЕМ**

ДИПЛОМ

III степени

награждается

**Екатерина Викторовна
КНИГА**

за лучший доклад, представленный на секции
**ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
УСТРОЙСТВА СИСТЕМ
НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ**


академик РАН
В.Г.ПЕШЕХОНОВ

11-14 марта 2014 г.
Санкт-Петербург,
Россия

ЭЛЕКТРО
ПРИБОР



ПРАВИТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

ДИПЛОМ

СЕРИЯ ПСП № 14223

ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ГРАНТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА
ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ, МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ,
МОЛОДЫХ КАНДИДАТОВ НАУК 2014 г.

Наташа Екатерина Викторовна

ГУБЕРНАТОР САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Г.С. ПОЛТАВЧЕНКО



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

КНИГА
Екатерина Викторовна

ЗА ПОБЕДУ В КОНКУРСЕ

Аспирант года - 2014

II место

Ректор Университета ИТМО



В.Н. Васильев





УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

СЕРТИФИКАТ

КНИГА Екатерине Викторовне

участнику Круглого стола
победителей конкурса грантов для студентов ВУЗов,
расположенных на территории Санкт-Петербурга,
аспирантов ВУЗов, отраслевых и академических институтов,
расположенных на территории Санкт-Петербурга

Ректор Университета ИТМО

ITMO *more than a*
UNIVERSITY



В.Н. Васильев

Санкт-Петербург
2014



Утверждаю

Генеральный директор ФГУП
«Санкт-Петербургское ОКБ
«Электроавтоматика» им. П.А.
Ефимова»

А.В. Шукалов

«13» 03 2015 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
Книги Екатерины Викторовны, выполненной на тему

«Алгоритмы контроля вычислительной системы интегрированной модульной
авионики и ее функциональных элементов» в разработках
ФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова»

Настоящий акт подтверждает, что ряд результатов, полученных в
диссертационной работе Книги Е. В., реализован при разработке
специализированной бортовой вычислительной системы СБВС-011.

В частности, использованы следующие результаты:

1. Математические модели оценки вероятности безотказной работы
вычислительной системы класса ИМА, учитывающие различные способы
резервирования функциональных компонентов (модулей): резервирование на
уровне подсистем, резервирование на уровне однотипных функциональных
модулей и скользящее резервирование на уровне идентичных
функциональных модулей.

2. Аппаратно-программный комплекс для контроля и диагностики
функциональных компонентов (модулей) вычислительной системы ИМА,
функционирующих в нормальных и специальных условиях эксплуатации,
включающий программное обеспечение, информационно-измерительное
обеспечение, алгоритмическое обеспечение.

Результаты диссертации позволили решить задачи
автоматизированного контроля перспективных бортовых вычислительных
систем с целью повышения достоверности контроля в эксплуатации.

Руководитель учебно-научного центра -

ученый секретарь НТС

д.т.н., доцент

Начальник НИЦ-1 - главный конструктор

И.О. Жаринов
13.03.2015

И.О. Жаринов

В.А. Нечаев

В.А. Нечаев
13.03.2015

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебно-организационной
и административной работе
Санкт-Петербургского Национального
исследовательского университета
информационных технологий,
механики и оптики

д.ф.-м.н., профессор

(подпись, уч. степень, звание)

Ю.Л. Колесников



2015 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Книги Екатерины Викторовны, выполненной на тему «Алгоритмы контроля вычислительной системы интегрированной модульной авионики и ее функциональных элементов» по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Книги Е.В. используются в учебном процессе кафедры Машинного проектирования бортовой электронно-вычислительной аппаратуры Университет ИТМО.

Основные понятия, определения и результаты диссертационного исследования Е.В. Книги введены в следующие дисциплины:

1. Автоматизация проектирования аппаратных и программных компонентов аналого-цифровых вычислительных комплексов;
2. Аналого-цифровые вычислительные комплексы на базе ЭВМ и оптико-электронных систем.

В данных дисциплинах внедрены следующие результаты диссертации:

1. Алгоритм контроля бортовой цифровой вычислительной системы класса интегрированной модульной авионики.

2. Алгоритмы и комплекс программ для контроля функциональных элементов (модулей) цифровой вычислительной системы класса интегрированной модульной авионики в составе унифицированного автоматизированного рабочего места.

Зав. каф. МП БЭВА, д.т.н., доцент

И.О. Жаринов

доцент каф. МП БЭВА

В.А. Нечаев

12.03.2015
12.03.2015