

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОУ ВПО ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



Смельчакова Галина Александровна

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ УПРАВЛЯЮЩИХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка
информации (промышленность)»

Диссертация
на соискание учёной степени кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:
д.т.н., профессор Шестаков А.Л.

Челябинск - 2016

Содержание

Введение	5
Глава 1. Особенности разработки управляющих вычислительных систем ракетно-космической техники.....	11
1.1 Анализ тенденций развития управляющих вычислительных систем ракетно-космической техники.....	11
1.2 Анализ архитектуры управляющих вычислительных систем	16
1.3 Анализ методов оценки надежности вариантов архитектуры управляющих вычислительных систем	20
1.3.1 Основные понятия и определения	20
1.3.2 Анализ методов оценки показателей надежности технических систем.....	23
1.3.3 Анализ автоматизированных систем оценки показателей надежности сложных технических систем	27
Выводы	30
Глава 2. Развитие методов и средств сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры управляющих вычислительных систем	32
2.1 Методика сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры управляющих вычислительных систем	32
2.2 Модификация метода статистического моделирования для оценки надежности управляющих вычислительных систем.....	34
2.3 Вопросы применения генераторов случайных чисел для моделирования сложных систем	38
2.4 Программное обеспечение для сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры управляющих вычислительных систем	45
Выводы	58
Глава 3. Повышение надежности управляющих вычислительных систем ракетно-космической техники.....	60

3.1 Анализ вариантов резервирования с минимальным уровнем аппаратурной избыточности.....	60
3.2 Повышение надежности управляющих вычислительных систем резервированием источника вторичного электропитания.....	65
3.3 Повышение надежности системного модуля бортовой цифровой вычислительной системы модификацией блока контроля	72
3.4 Повышение надежности управляющей вычислительной системы совершенствованием технических решений	79
3.4.1 Апробация технологии SpaceWire модулем управляющей вычислительной системы.....	79
3.4.2 Контроллер магистрали повышенной функциональной надежности ..	82
Выводы	92
Глава 4. Вопросы обеспечения надежности управляющих вычислительных систем ракетно-космической техники.....	94
4.1 Обеспечение полноты отработки алгоритмов функционирования управляющих вычислительных систем	94
4.1.1 Обработка программного и аппаратного обеспечения управляющих вычислительных систем.....	94
4.1.2 Проверка метода оценки надежности на моделирующем комплексе отработки аппаратуры и программ	97
4.2 Применение технологии моделирования плат для анализа целостности сигналов модуля управляющих вычислительных систем	100
4.2.1 Методика анализа с применением программного обеспечения Ansys на примере вычислительного модуля	101
4.2.2 Анализ результатов моделирования сигналов модуля	108
4.3 Обеспечение достоверности передачи информации по магистрали.....	110
4.4 Оценка целесообразности восстановления вычислительных модулей в полете	115
Выводы	118
Заключение.....	120

Список сокращений и условных обозначений	122
Список литературы	124
Приложение А. Результаты расчета вероятностей отказа систем.....	141
Приложение Б. Пример файла с описанием формальной модели УВС.....	143
Приложение В. Интерфейс пользователя программного обеспечения.....	147
Приложение Г. Экспериментальные данные.....	162
Приложение Д. Последовательности бит для моделирования сигналов модуля .	170
Приложение Е. Акт об использовании результатов диссертационного исследования	171

Введение

Одним из направлений технической политики России является разработка систем автоматического управления (САУ), которые применяются для решения задач управления объектами ракетно-космической техники (РКТ). Центральным звеном системы управления является управляющая вычислительная система (УВС), которая в составе системы управления выполняет следующие функции:

- организация взаимодействия со смежными подсистемами (например, подсистемой инерциальной навигации, спутниковой навигации, подсистемой оптической коррекции, преобразовательной-коммутирующей аппаратурой и др.);
- обработка информации подсистем и датчиков;
- решение функциональных задач управления объектом РКТ;
- выполнение самопроверок, тестирование смежных подсистем;
- организация использования резерва.

УВС должны обеспечивать работоспособность САУ при воздействии неблагоприятных для радиоэлектронной аппаратуры факторов, таких как механические нагрузки в виде ударов, вибрации, воздействие полей электромагнитного, ионизирующего излучения, изменение температуры окружающей среды в широком диапазоне и другие. Решение этой задачи ограничивает номенклатуру микроэлектронных компонентов, возможных для построения УВС, [16, 77] приводит к необходимости развития методов и средств нейтрализации отказов в работе вычислительных средств САУ.

Вопросам проектирования надежных управляющих вычислительных систем посвящены работы Хетагурова Я.А. [123], Чертока Б.Е. [117], Микрина Е.А. [75, 78], Авена О.И., Когана Я.А. [2], Кульба В.В., Павлова Б.В., Платонова В.Н. [75], Антимирова В.М. [4, 7, 8, 10, 11, 16, 20, 25], Русанова В.Н. [93], Головкина Б.А. [53], Гурского Б.Г. [64] и др. Разработка таких систем ведется в АО «НПО автоматики» (г. Екатеринбург) с 60-х годов XX века [68], создано несколько поколений бортовых цифровых вычислительных систем и аппаратуры для корабельных систем управления [8, 30, 32]. Для сохранения ведущих позиций предприятия по соз-

данию управляющих вычислительных систем РКТ необходима постоянная разработка и внедрение новых технических решений, не уступающих по своему техническому уровню разработкам отечественных (например, [45, 78, 82, 92]) и зарубежных компаний (например, [123, 127, 135]). Внедрение новых решений требует проработки вариантов реализации и их сравнительного анализа надежности, который целесообразно проводить на этапе раннего проектирования системы, что позволяет также получить обоснованную оценку целесообразности внедрения технического решения.

Оценке надежности сложных технических систем на этапе проектирования системы посвящены работы Ушакова И.А., Беляева Ю.К., Богатырева В.А., Болотина В.В. [119], Гнеденко Б.В., Соловьева А.Д. [51], Острейковского В.А. [83], Половко А.М., Гурова С.В. [86], Буцана Г.П. [47], Красовского В.Е., Прохорова Н.Л. [74, 90], Рябина И.А. [94, 95], Черкесова Г.Н. [95, 115], Проникова А.С. [88], Чернова В.Ю. [116], Шишмарева В.Ю. [125], Диллона Б., Сингха Ч. [66], Горского Л.К. [54], Финаева В.И. [120] и др.. Основные понятия теории надежности и методы аналитического расчета закреплены в стандартах ГОСТ 27.002-89 [55], ГОСТ 27.301-95 [56], ГОСТ Р 27.302-2009 [58], ГОСТ Р 51901.16-2005 [62]. В оценке надежности сложных технических систем нашла применение технология автоматизированного моделирования и расчета [42, 50, 107, 112, 136]. Автоматизированные системы оценки показателей надежности различаются уровнем теоретической разработки, методами расчета, качеством программной реализации, составом вычисляемых показателей надежности.

Существующие методы и средства расчета показателей надежности технических систем не позволяют учесть сложные алгоритмы функционирования УВС (например, [104]), критерии отказов и реконфигурации системы, и могут быть использованы только для оценки структурной надежности УВС, что приводит к необходимости развития методов и средств сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры УВС. При решении задачи перспективным является применение методов имитационного моделирования.

Традиционными способами повышения надежности УВС РКТ, разрабатываемых в «НПО автоматики», являются резервирование на уровне модулей и компонентов модулей, внедрение и развитие аппаратно-программных средств контроля резерва и восстановления работоспособности компонентов системы при сбоях. Увеличение кратности резервирования не всегда оправдано, так как возрастает суммарный поток отказов. Кроме того, введение резерва противоречит требованию минимизации аппаратных затрат САУ. Алгоритмы системы контроля резерва и восстановления компонентов сложны и в высокой степени связаны с функциональными задачами САУ, их реализация является достаточно трудоемким процессом, поэтому на этапе проектирования системы целесообразно научное обоснование алгоритмов функционирования УВС.

Целью диссертационной работы является повышение надежности управляющих вычислительных систем РКТ, разрабатываемых в «НПО автоматики».

Для достижения указанной цели сформулированы следующие **задачи**:

1) анализ архитектуры современных управляющих вычислительных систем РКТ и тенденций развития архитектуры;

2) анализ известных методов и методик оценки надежности УВС на этапе проектирования системы; выбор методики и критерия сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры УВС;

3) разработка метода оценки надежности системы, позволяющего учесть сложные алгоритмы функционирования системы в процессе работы, критерии отказов и восстановлений работоспособности ее компонентов при сбоях, реконфигурации системы; программная реализация метода и методики для проведения сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры;

4) анализ и выбор путей повышения и обеспечения функциональной надежности УВС РКТ, разрабатываемых в «НПО автоматики».

В качестве **объекта исследования** в диссертационной работе рассматриваются управляющие вычислительные системы, создаваемые в «НПО автоматики».

Предметом исследования являются:

- методы, средства и методики, применяемые для оценки функциональной надежности УВС и проведения сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры УВС на этапе проектирования системы;

- технические решения, применяемые для повышения надежности УВС САУ объектами РКТ.

Методы исследования основаны на теориях математической логики и вероятности, методах вычислительной математики, прикладной статистики, теории надежности. Как основные используются методы имитационного, статистического моделирования и вычислительных экспериментов.

Научная новизна работы определяется следующими результатами:

- разработана модификация метода статистического моделирования для оценки функциональной надежности УВС, позволяющая учитывать сложные алгоритмы функционирования УВС, не требующая аналитического описания всех возможных комбинаций состояний компонентов УВС;

- обоснована архитектура резервированного источника вторичного электропитания (ИВЭП) для применения в составе УВС;

- разработана модификация блока контроля трехканального модуля УВС;

- обоснована архитектура контроллера магистрали для специализированного вычислительного модуля;

- разработана методика анализа целостности сигналов модулей УВС с использованием ПО Ansys.

Основные положения, выносимые на защиту:

- модификация метода статистического моделирования для оценки функциональной надежности варианта архитектуры УВС;

- результаты сравнительного анализа надежности вариантов резервирования ИВЭП;

- модификация блока контроля трехканального модуля УВС, результаты сравнительного анализа надежности вариантов реализации блока контроля;

- результаты анализа вариантов реализации контроллера магистрали для специализированного вычислительного модуля.

Достоверность полученных результатов работы основывается на использовании известных принципов имитационного моделирования, положений теории надежности и теории вероятности, подтверждается результатами вычислительных экспериментов, демонстрирующих соответствие результатов моделирования результатам аналитических моделей и реальных экспериментов при одинаковых исходных данных.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии методов моделирования структурно-сложных технических систем со сложными алгоритмами функционирования.

Практическую значимость имеют результаты работы, предназначенные для использования в процессе проектирования архитектуры УВС (предложенные метод оценки надежности УВС и программное обеспечение на его основе, методика анализа целостности сигналов модулей УВС), технические решения, предназначенные для повышения и обеспечения надежности УВС.

Апробация работы. Результаты и положения диссертационной работы обсуждались на совещаниях и семинарах АО «НПО автоматики» (г. Екатеринбург). Основные результаты работы докладывались на международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы физики, математики, информатики» (г. Москва, 2012 г.), на четырех международных заочных научно-практических конференциях «Научная дискуссия: вопросы технических наук» (г. Москва, 2013, 2014 гг.), на международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: инновации в современном мире» (г. Москва, 2015 г.), на международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления» (г. Екатеринбург, 2014 г.), на VII научно-технической конференции молодых специалистов «Ракетно-космическая техника. Системы управления ракетных комплексов» (г. Екатеринбург, 2015 г.), на всероссийской молодежной научно-практической конференции «Космодром «Восточный» и перспективы развития российской космонавтики» (г. Благовещенск, 2015г.), на 18 всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем

«Стойкость 2015» (г. Лыткарино, 2015 г.), на II международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления» (г. Екатеринбург, 2015 г.).

По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе четыре в изданиях, рекомендованных ВАК. Получены в соавторстве патенты на изобретение: «Сбоеустойчивая вычислительная система» [36], «Моделирующий КОАП» [23], «Технологическая УВМ» [38]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [31].

Личным вкладом автора является разработка модификации метода статистического моделирования для оценки функциональной надежности УВС [17, 100, 101], разработка программного обеспечения [31, 35, 93], проведение научно-технических исследований [11, 12, 18, 19, 21, 24, 28, 33, 98, 99, 101 – 103], разработка модификации блока контроля [18, 36], разработка технологических связей [23, 38], разработка методики анализа целостности сигналов модуля УВС [98].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованной литературы из 138 наименований и шести приложений. Объем работы составляет 172 страницы.

Глава 1. Особенности разработки управляющих вычислительных систем ракетно-космической техники

1.1 Анализ тенденций развития управляющих вычислительных систем ракетно-космической техники

Вычислительные средства современных систем автоматического управления (САУ) объектов ракетно-космической техники (РКТ) прошли большой путь развития от аналоговых до мощных цифровых систем [30, 32, 68, 82, 117], обеспечивающих гарантированное надежное функционирования в жестких для радиоэлектронной аппаратуры условиях (широком диапазоне изменения температуры окружающей среды, при механических воздействиях в виде ударов и широкополосной вибрации, интенсивном воздействии ионизирующего и электромагнитного излучения и др.). Концепция построения систем управления выработывалась исходя из требований системного подхода к проектированию таких систем. [78; с. 12]

В аналоговых системах управления каждая функциональная задача решалась группой электронных или релейных схем. На смену им пришли их цифровые аналоги в виде цифровых дифференциальных анализаторов (ЦДА), реализованных на цифровых дискретных элементах (динамических триггерах и диодно-резисторной логике). ЦДА обладали несомненным достоинством, сохранившемся от аналоговых устройств, а именно, высоким быстродействием. При этом сохранили и основной недостаток, заключающийся в том, что любое изменение алгоритма задачи или введение новых задач требовало практически полной переработки аппаратуры САУ с соответствующим циклом отработки. Кроме того, для САУ космических аппаратов проявился еще один недостаток, заключающийся в неспособности схемных автоматов работать длительное время в экстремальных условиях (широком диапазоне изменения температуры окружающей среды, при механических воздействиях в виде ударов и широкополосной вибрации и полях ионизирующего излучения). Достаточно сложно в таких системах решалась зада-

ча повышения надежности и, в частности, обеспечения выполнения основного требования к САУ РКТ – обеспечения работы при возникновении любой одной возможной неисправности.

Радикальное устранение отмеченных недостатков стало возможным с переходом в середине 60-х годов XX века от схемной реализации функциональных задач к их реализации на бортовых цифровых вычислительных машинах (БЦВМ), в которых для повышения надежности широко стало применяться резервирование на уровне машин и их модулей (процессоров и запоминающих устройств). Для повышения производительности и расширения состава задач в 70-х годах XX века стали использовать параллельные вычисления на нескольких идентичных БЦВМ, объединяемых в бортовую цифровую вычислительную систему (БЦВС) с достаточно сложной внутренней логикой нейтрализации возникающих катастрофических и параметрических отказов компонентов системы, вызванных изменением температуры окружающей среды и действием ионизирующего излучения.[30]

На современном этапе развития бортовые управляющие вычислительные системы строятся как распределенные вычислительные системы, в которых вычислительные средства распределяются по подсистемам [8, 93]. Например, в состав цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей вводятся средства предварительной обработки информации, в состав подсистемы инерциальной навигации (в гиростабилизированную платформу (ГСП) или бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС)) вводятся специализированные вычислительные устройства. Распределение задач делает БЦВС и подсистемы функционально законченными, позволяет проводить их модернизацию без переработки САУ в целом.

Состав подсистем БЦВС меняется в зависимости от назначения САУ [37, 41, 64]. Базовыми подсистемами в САУ являются подсистемы инерциальной навигации [46], оптической и спутниковой коррекции, коррекции по геофизическим полям [26, 43, 44]. Особо можно выделить подсистему коммутационно-преобразовательной аппаратуры, которая, получив функциональную завершенность, может устанавливаться, как аппаратура автономного управления отдель-

ными агрегатами или компонентами изделия. Специализированные вычислительные устройства (СВУ), входящие в состав подсистем, как правило, существенно превосходят по производительности БЦВМ на заданном классе задач.

Пример структуры распределенной БЦВС показан на рисунке 1.1.1. Примером унифицированного магистрального канала, предназначенного для взаимодействия подсистем БЦВС, может быть мультиплексный канал последовательного обмена с фазоманипулированным кодированием (см. ГОСТ Р 52070-2003 [63] или MIL STD-1533 [133]).

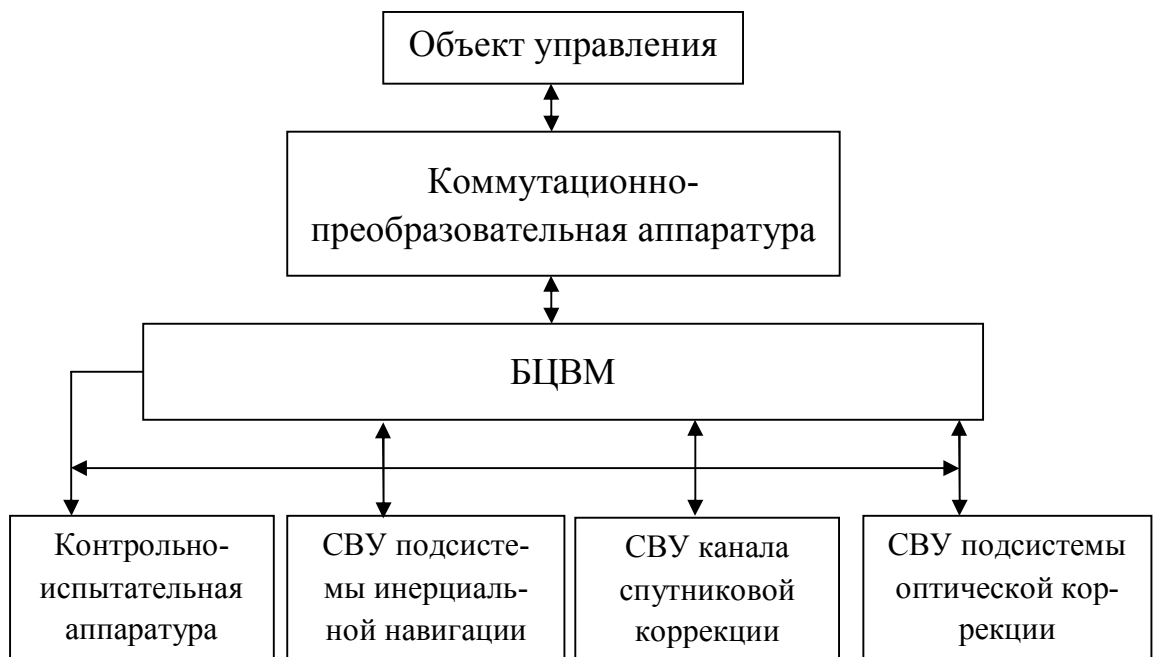


Рисунок 1.1.1 – Пример структуры распределенной БЦВС

Можно выделить следующие тенденции развития бортовых управляющих вычислительных систем ракетно-космической техники:

- повышение степени централизации управления [78; с. 24];
- повышение точности и скорости решения функциональных задач САУ за счет использования новых технологий, развития теоретических основ САУ и способов обработки информации, совершенствования технических средств моделирования сложных систем;
- снижение массы и габаритов, потребления электроэнергии за счет использования новых материалов, новых технологий изготовления;

– повышение надежности функционирования БЦВС и ее компонентов, повышение уровня адаптации к внешним воздействиям и внутренним состояниям системы, усложнение архитектуры систем и ее компонентов, придание ей необходимой гибкости и динамизма.

Ужесточение требований к точности решения функциональных задач САУ влечет усложнение архитектуры БЦВС и повышение «интеллекта» входящих в нее подсистем, существенное увеличение их производительности, которое при текущем состоянии разработки микроэлектронных компонентов и ближайших перспективах их развития возможно осуществить путем создания вычислителей со специализированной архитектурой, ориентированной на решение задач подсистем управления и коррекции параметров движения [10, 29, 38, 43, 53]. Использование специализированных вычислительных средств повышает автономность измерительных и исполнительных подсистем БЦВС, позволяет обеспечить решение большей совокупности задач в реальном масштабе времени и довести характеристики системы управления до уровня современных требований по производительности, точности, минимизации времени подготовки и надежности функционирования в экстремальных условиях. В тоже время это позволяет минимизировать объемно-массовые характеристики и энергопотребление системы.

Увеличение состава и сложности задач, решаемых БЦВС, требует все большей специализации вычислителей подсистем и БЦВМ для минимизации аппаратных затрат, оптимизации базовых алгоритмов и программ, рационального распределения задач на аппаратном и программном уровнях реализации. С другой стороны важным условием высокой надежности БЦВС является обеспечение серийной пригодности всех ее компонентов.

Успех разработки управляющих вычислительных систем (УВС) в значительной мере определяется уровнем развития микроэлектронных компонентов, на базе которых она строится. Если элементы обладают невысокой надежностью, меры, которые применяются для обеспечения надежности системы в целом, будут малоэффективны (задача развития микроэлектронных компонентов рассматривается в работах [16, 77]). Перспективным способом повышения производственной

надежности является применение радиационно-стойких специализированных больших интегральных схем (СБИС), элементы которых выполнены и объединены внутри или на поверхности общей подложки, электрически соединены между собой и заключены в общий корпус. Помимо высокой надежности собственных элементов в СБИС очень низкая интенсивность отказов связей между элементами, поэтому в интегральном исполнении радиоэлектронные узлы имеют надежность на несколько порядков выше надежности аналогичных устройств, выполненных на электровакуумных и полупроводниковых приборах. [67; с. 14]

Для создания современных УВС требуется применение СБИС, обладающих высоким быстродействием, помехоустойчивостью, надежностью и малым энергопотреблением, а также обеспечивающих возможность работы непосредственно от химических источников питания с широким диапазоном изменения питающих напряжений. При этом остаются жесткие требования к устойчивости аппаратуры к механическим воздействиям и климатическим условиям. Применяемые СБИС должны обладать большой степенью интеграции, простотой конструкции и технологичностью изготовления и обеспечивать возможность полной автоматизации проектирования и производства.

Альтернативой СБИС в различных применениях может стать программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) или «система на кристалле», построенная на платформе ПЛИС. Доступны высоконадежные решения, например, радиационно-стойкие матрицы со встроенным аппаратным мажоритированием каждого логического элемента по схеме 2 из 3 (семейство ПЛИС RTAX корпорации Actel). [87]

Одним из принципиальных моментов создания и применения УВС является то, что они должны обеспечивать работоспособность САУ при воздействии разнообразных негативных для радиоэлектронной аппаратуры факторов: больших механических нагрузок в виде ударов и широкополосной вибрации, широком диапазоне температур окружающей среды, жестких климатических условиях, тепловых, электромагнитных и ионизирующих излучений. Решение этой задачи ограничивает номенклатуру возможных для применения микроэлектронных компо-

нентов, приводит к необходимости развития и использования средств защиты от внешних воздействий, в том числе средств нейтрализации катастрофических и параметрических отказов в работе вычислительных средств. Неопределенность модели воздействия негативных факторов, непрерывное изменение требований к устойчивости к внешним воздействиям при проектировании конкретной САУ ставит задачу обеспечения высокого уровня динамичности и гибкости архитектуры БЦВС.

Проведенный анализ тенденций развития УВС показал, что при выборе архитектуры УВС целесообразно получить:

- функционально-модульную структуру, обеспечивающую простоту конфигурации, возможность изменения числа функциональных модулей в зависимости от назначения САУ для наращивания производительности и решения задач в реальном масштабе времени с необходимой точностью (гибкость архитектуры);
- требуемую надежность функционирования, адаптацию к внешним воздействиям, динамизм.

Повышенной гибкостью обладают самодиагностируемые вычислительные системы с параллельной обработкой информации [10], с перестраиваемой структурой [53, 76, 93]. Вопросы распределения ресурсов в вычислительных системах рассмотрены в работах [3, 11, 25, 53, 93].

1.2 Анализ архитектуры управляющих вычислительных систем

Управляющие вычислительные системы ракетно-космической техники, создаваемые в «НПО автоматики», представляют собой сложные технические системы, состоящие из большого числа специализированных вычислительных устройств с внутренним резервированием, выполняющие следующие функции:

- организация взаимодействия со смежными подсистемами (например, подсистемой инерциальной навигации, аппаратурой спутниковой навигации, подсистемой оптической коррекции, преобразовательной-коммутиционной аппаратурой,

автоматикой полезной нагрузки, подсистемой телеметрических измерений и др.) и проведение обработки информации подсистем и датчиков;

- решение функциональных задач управления объектом РКТ;
- выполнение самопроверок и тестирование смежных подсистем;
- организация использования резерва и проведение реконфигурации структуры в случае возникновения отказов в компонентах системы.

Возможность разбиения всего комплекса задач УВС на ряд независимых функциональных модулей, работающих самостоятельно, позволяет создавать УВС по магистрально-модульному принципу (методология модульного проектирования вычислительных систем приведена в работе [78]), когда к общесистемной магистрали подключается необходимое количество вычислительных модулей (ВМ) и модулей каналов магистрального обмена (МКО) (рисунок 1.2.1). [8] Управление взаимодействием модулей по магистрали и распределение задач между ними осуществляется системным модулем (СМ). Вычислительные модули обеспечивают выполнение функциональных вычислений, модули канала обмена самостоятельно организует и проводит прием/передачу информации по магистральному каналу межмодульного обмена (например, по ГОСТ Р 52070-2003). Системный модуль, кроме того, осуществляет контроль исправности модулей, подключенных к магистрали, перестраивает конфигурацию УВС при возникновении отказов в модулях (организация использования резерва).

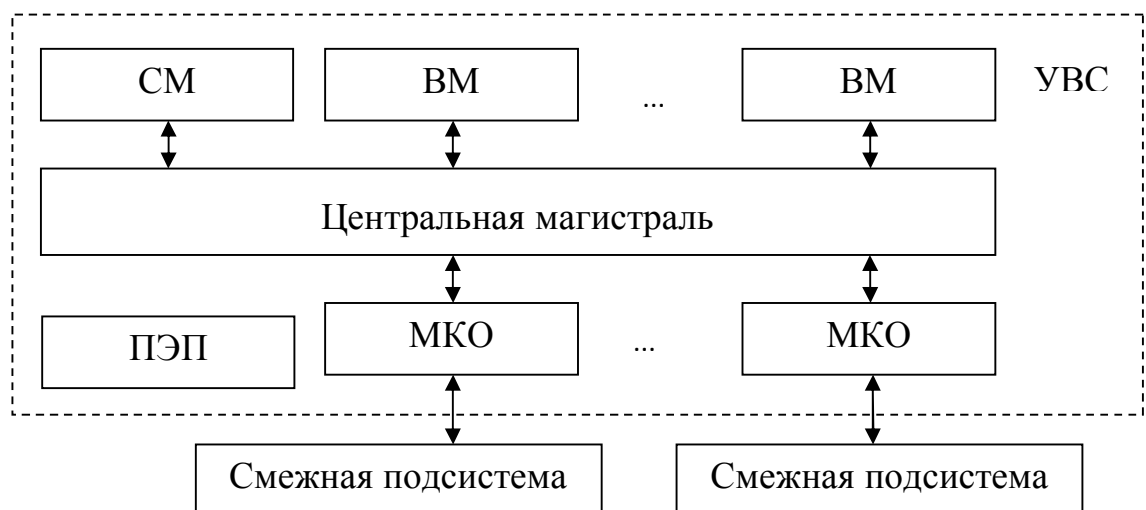


Рисунок 1.2.1 – Типовая структура магистрально-модульной системы

Количество вычислительных модулей определяется составом задач, требуемой производительностью и степенью резервирования. Количество модулей каналов обмена определяется составом периферийных подсистем, при этом модули, работающие на одно направление, как правило, дублируются.

Оптимальное распределение вычислительных задач с учетом их весомости и фактической исправности модулей для каждого участка работы УВС находится предварительно в процессе разработки программного обеспечения [9, 12, 75, 104]. Для решения этой сложной задачи многопараметрической оптимизации используется комплекс технологического программного обеспечения, описывающего работу УВС на поведенческом уровне.

Для повышения надежности УВС, построенной по магистрально-модульному принципу, реализуют горячее резервирование, для чего вычислительные модули объединяют в группы (пары и тройки), которые синхронно решают одни и те же задачи. Исправный модуль определяется путем периодического сравнения результатов решения циклических задач, проведенных модулями группы. В случае регистрации отказа основного вычислительного модуля, берутся расчетные данные резервного. [15, 32]

Каждое вычислительное устройство (вычислительный модуль, модуль канала обмена) работает независимо от другого на собственной частоте синхронизации. Системный модуль систематически контролирует работу функциональных модулей и может в случае снижения их быстродействия из-за деградации параметров послать команду в устройство синхронизации на изменение тактовой частоты, что обеспечивает адаптацию модулей системы к деградации параметров элементов и тем самым повышает функциональную надежность системы. [14]

Повышение надежности системного модуля обеспечивается следующими мероприятиями:

- снижение аппаратных затрат на реализацию модуля; в частности, разрядность модуля уменьшена до 16 вместо 32-х, как в вычислительном модуле, от которого требуются высокоточные вычисления;

– реализация системного модуля в виде троированного вычислителя с мажоритацией на уровне блоков (например, в [15]) или с коммутатором (например, в [34]).

Установка мажоритирующего узла в системный модуль обеспечивает нейтрализацию неисправности, возникающей в одном из его каналов при правильной работе других каналов. В то же время возникновение неисправности в одном из каналов приводит к снижению надежности дальнейшей работы модуля т.к. возникновение неисправности в любом из двух оставшихся исправных канале приводит к полной неработоспособности модуля. Введение между блоками памяти и процессора коммутатора, переключающего блоки по сигналам встроенных устройств оперативного контроля, частично решает задачу сохранения работоспособности модуля при возникновении двух неисправностей.

Для работы схем мажоритации и коммутатора, переключающего блоки в процессе работы, требуется синхронная работа всех каналов устройства, что в [34] обеспечивается введением единого генератора синхроимпульсов. При такой реализации резервирования отказ генератора приводит к отказу устройства и модуля в целом. Кроме того, наличие временного рассогласования одноименных сигналов разных каналов резервированного модуля требует снижение быстродействия с целью учета межканальных рассогласований, вызванных отличиями задержек элементов разных каналов. Более того, в процессе работы УВС под влиянием температуры, из-за воздействия внешнего ионизирующего излучения происходит деградация параметров электроизделий, учесть которую при проектировании невозможно. [36]

Одним из недостатков существующих вариантов реализации системного модуля является то, что любой сбой в работе канала воспринимается как неисправность. Целесообразно развитие схемы контроля каналов модуля с целью исключения ложного бракования канала.

В БЦВС семейства «Малахит-3»[8] вычислительные модули и модули канала обмена находятся в пассивном режиме, а системный модуль в активном, то есть любой обмен по магистрали инициирует системный модуль. Вычислитель-

ные модули и модули канала обмена имеют возможность затребовать магистраль, например, для сигнализации системному модулю о готовности данных расчета. Таким образом, в случае отказа центрального элемента системы (системного модуля), ни один из оставшихся исправных модулей БЦВС не может взять на себя задачи управления. Отказ системного модуля приводит к отказу системы в целом.

Отмеченный недостаток частично устранен в БЦВС семейства «Малахит-7» [8] за счет внедрения аппаратной возможности вычислительного модуля работать в активном режиме. Вычислительный модуль может взять на себя задачу организации работы функциональных модулей в случае отказа системного модуля, однако решить задачу организации резерва УВС не сможет в виду отсутствия необходимых ресурсов (отсутствия данных о перераспределении функциональных задач по подсистемам с учетом оставшихся модулей; отсутствия аппаратной возможности блокировки неисправного модуля и др.).

Магистраль УВС резервируется (троируется или дублируется). Дублирование магистрали оправдано, так как, согласно исследованиям [20], по сравнению с троированием дает незначительное увеличение оборудования в силу того, что контроль правильности передачи осуществляется не аппаратными, а программными средствами.

1.3 Анализ методов оценки надежности вариантов архитектуры управляющих вычислительных систем

1.3.1 Основные понятия и определения

Для решения задачи сравнительного анализа надежности управляющих вычислительных систем необходимо, в первую очередь, установить основные понятия и те показатели, численные значения которых определяют уровень надежности таких систем. В [88; с. 56] проведена оценка принятой в различных странах терминологии в области надежности машин (под машиной в [88] понимается устройство, выполняющее механические движения с целью преобразования энергии,

материалов, информации или для совершения какой-либо необходимой работы). Отмечается, что по содержанию и заложенным идеям основные понятия и определения весьма близки друг другу, но вместе с тем, термины, принятые национальными стандартами, обладают своими особенностями, связанными с нюансами в понимании отдельных определений и терминов, с языковой спецификой (например, [126, 131]).

В российском стандарте ГОСТ 27.002–89 [55] надежностью называется свойство объекта сохранять во времени процесса управления значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения. Понятие «надежность» в стандарте рассматривается в двух аспектах: за время непрерывной работы объекта (выделяется основной компонент надежности – безотказность) и за весь период его эксплуатации при установленной системе ремонта и технического обслуживания (долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость). [88; с. 57]

Основные понятия и показатели надежности управляющей вычислительной системы связаны с оценкой изменения во времени ее работоспособности. Работоспособность – это состояние системы, при котором значения всех параметров, характеризующих ее способность выполнять требуемые функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и конструкторской документации. [116] Поэтому в диссертационной работе понятие «надежность управляющей вычислительной системы» рассматривается как безотказность такой системы, то есть как свойство системы сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

При расчете показателей надежности большое значение имеет вид и характер возникающих и возможных отказов.

Отказ – это событие, которое заключается в нарушении работоспособности объекта. [55] Основными признаками, определяющими различные виды отказов, служат характер возникновения и протекания процессов, приводящих к отказу, последствия отказов и методы их устранения. [88; с. 58] С этой точки зрения можно выделить:

– постепенные (возникающие в результате протекания процесса старения, ухудшающего начальные параметры изделия) и внезапные отказы (возникающие в результате случайных внешних воздействий и сочетания неблагоприятных факторов, превышающих возможности изделия к их восприятию);

– параметрические (приводящие к тому, что параметры изделия выходят за допустимые пределы) и катастрофические отказы (приводящие к тому, что изделие не может выполнять требуемые функции);

– фактические и потенциальные отказы;

– допустимые (отказы, которые нельзя предотвратить, например, связанные с процессами старения) и недопустимые отказы (отказы, связанные с нарушением условий производства и эксплуатации, нарушением технических условий при изготовлении и сборке, неучтенными факторами в нормативных документах и др.).

Анализ принадлежности каждого отказа к той или иной классификации позволяет выбрать показатели надежности и модель их расчета, отражающую реальную ситуацию, в которой используется изделие. [88; с. 62]

Основными показателями надежности управляющей вычислительной системы являются:

– вероятность отказа системы $Q(t)$ – вероятность того, что в течение интервала времени работы $(0, t)$ возникнет отказ системы;

– вероятность безотказной работы $P(t)$ – вероятность того, что в течении интервала времени работы $(0, t)$ отказа системы не возникнет;

– среднее время безотказной работы системы T ;

– интенсивность отказов $\lambda(t)$ – условная вероятность отказа к моменту времени t , при условии, что до этого отказа не было. Она характеризует степень надежности объекта в данный момент времени, поэтому является более полной и точной характеристикой надежности;

– плотность распределения времени до отказа $f(t)$. [119]

Статистические определения показателей надежности приведены в [116; с. 12].

Все перечисленные показатели надежности могут быть выражены через вероятность отказа системы по следующим формулам:

$$P(t) = 1 - Q(t), T = \int_0^{\infty} (1 - Q(t)) dt, f(t) = Q'(t), \lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - Q(t)}. \quad (1.3.1.1)$$

Вероятность безотказной работы или однозначно связанная с ней вероятность отказа системы в заданном интервале времени является основной надежностной характеристикой УВС, задаваемой в техническом задании.

1.3.2 Анализ методов оценки показателей надежности технических систем

Рассмотрим аналитические методы, которые применяются для оценки показателей надежности сложных технических систем. Они различаются

– по способу соединения элементов в системе – есть методы при последовательном и параллельном соединении элементов (рассмотрены в работах [56, 66, 83, 86, 113, 118, 119, 125]), методы для систем с монотонной структурой (структурой, которая не сводится к параллельно-последовательным и последовательно-параллельным соединениям). При исследовании сложных систем с монотонной структурой применяют метод прямого перебора [119; с. 97] или матричный метод [116; с. 54], метод разложения относительно особого элемента [119; с. 99], метод минимальных путей и разрезов (рассмотрен в [66, 119]) и др.

– по признаку восстанавливаемости системы – есть методы расчета показателей надежности невосстанавливаемых систем (в работах [56, 66, 86, 119]) и восстанавливаемых (методы, основанные на марковских моделях (в работах [2, 47, 66, 83, 113, 119]), методы анализа деревьев неисправностей (в работах [58, 66]) и др.);

– по характеру отказов элементов системы – большинство методов учитывает независимость отказов элементов, однако это предположение на практике часто оказывается неверным. Например, зависимость элементов проявляется, если

на них одновременно оказывает влияние один и тот же внешний фактор. Чаще всего элементы системы являются зависимыми, причем корреляция положительна. [119; с. 42] При расчете показателей надежности системы с зависимыми элементами находят нижние и верхние границы показателей;

– в зависимости от вида закона распределения времени безотказной работы элементов системы – есть методы расчета при экспоненциальном, нормальном, вейбулловском и других законах распределения (в работе [118, 119]);

– в зависимости от режима работы системы – есть методы, учитывающие непрерывность действия системы, периодичность действия, одноразовое и многократное использование элементов системы;

– в зависимости от способа анализа системы – структурные и функциональные методы оценки показателей надежности (понятие функциональной надежности системы введено в работе [83; с. 169]). Структурная надежность системы обусловлена надежностью элементов системы и разветвленностью связей между ними. Расчет функциональной надежности – это определение показателей надежности выполнения системой заданных функций. Такие показатели надежности зависят от вида функции, структурной надежности и алгоритмов функционирования системы.

При расчете показателей надежности невосстанавливаемых систем с нагруженным резервом предполагают, что отказы элементов обнаруживаются мгновенно после их возникновения, и переключения на резерв осуществляется без прерывания работы системы. При этом считается, что переключатель абсолютно надежен, а индикация отказа достоверна. Кроме того, считается, что при переходе на резервный элемент не возникают какие-либо переходные режимы, нарушающие нормальное функционирование системы.

При расчете показателей надежности невосстанавливаемых систем с ненагруженным резервом предполагается, что резервные элементы, находящиеся в ненагруженном режиме, не отказывают, и с течением времени их вероятностно-временные характеристики не меняются, т.е. на место отказавшего основного элемента подключается каждый раз совершенно новый резервный элемент со

своими начальными характеристиками. Если указанные предположения неприемлемы для решения конкретной задачи, переходят к рассмотрению восстанавливаемого элемента без резервирования, у которого время восстановления равно времени переключения на резерв, а последний всегда исправен. [119]

При оценке надежности систем с высокой структурной сложностью возможно применение логико-вероятностного метода исследования (рассмотрен в работах [81, 95, 125]), метода построения графа состояний (в работе [125]). При наличии постепенных отказов в системе возможно применение метода преобразования схемы расчета надежности [66; с. 40], который состоит в последовательном упрощении участков схемы с последовательным и параллельным соединением элементов. Метод декомпозиции (метод, основанный на разложении сложной системы на простые подсистемы с применением теорем об условных вероятностях и условных распределениях [66; с. 41]) может быть использован для упрощения пространства состояний системы.

Построение деревьев неисправностей (правила построения определены в [58, 66]) для сложных технических систем может стать хорошим инструментом для анализа слабых мест системы, однако требует от специалиста глубокого понимания системы.

Если известно словесное описание структуры и принципа функционирования и восстановления работоспособности системы, то можно определить множество всех возможных состояний системы. Если известны интенсивности отказов и восстановления отдельных элементов системы, то можно построить граф переходов, вершинами которого будут возможные состояния системы, а ребрами – возможные переходы с интенсивностями, определяемыми соответствующими характеристиками безотказности элементов [125; с. 149]. На основании построенного графа переходов выписываются системы дифференциальных уравнений, решение которых позволит получить требуемый показатель надежности. Недостатками данного метода является необходимость определения всевозможных состояний системы и сложность решения дифференциальных уравнений, которыми описывается поведение реконфигурируемой системы.

В работе [88; с. 161] рассмотрен вопрос о правомерности применимости экспоненциального закона распределения для характеристики случайной величины, которой является время безотказной работы элемента сложной технической системы. Сделан вывод о том, что применение закона возможно при анализе и расчете надежности системы, которая обладает высокой безотказностью, а значит, и для рассматриваемых в диссертационной работе управляющих вычислительных систем.

Рассмотренные методы аналитического расчета показателей надежности технических систем могут быть использованы для оценки структурной надежности управляющих вычислительных систем без учета сложных алгоритмов функционирования систем, например алгоритмов перераспределения имеющихся ресурсов между задачами повышения надежности и производительности системы с учетом фактического состояния исправности и быстродействия входящих в систему модулей [104]. Применение аналитических методов также бывает затруднительно при решении задачи обоснования алгоритма функционирования компонента системы.

Перспективным является применение методов имитационного моделирования, в частности, методов статистического моделирования (Монте-Карло), идея которых заключается в том, что многократно воспроизводится формализованная схема, являющаяся описанием процессов функционирования системы, при этом моделируются случайные величины и находится статистическая оценка характеристики системы [105]. Имитационная модель может быть сколько угодно близкой реальной системе и применима там, где аналитический подход оказывается непригодным.

Применение метода имитационного моделирования для оценки надежности сложных технических систем рассмотрено в работах [2, 54, 73, 88, 112, 119].

Управляющие вычислительные системы представляют собой программно-аппаратные комплексы. В теории надежности самостоятельным направлением является надежность программного обеспечения, которая обусловлена наличием в программе разного рода ошибок. Под ошибкой понимается невыполнение про-

граммой заданных функций, она формируется, как правило, на этапе разработки программы. Проявление ошибки в программном обеспечении является его отказом. [116; с. 24]

Для оценки надежности программного обеспечения применяются различные методы и модели (рассмотрены в работах [66, 115, 116, 125]). Показателями надежности могут быть вероятность отсутствия ошибки на этапе основной работы системы, наработка до отказа и др. В диссертационной работе вопросы надежности программного обеспечения УВС в таком контексте не рассматриваются. В проведенных исследованиях предполагается, что программное и аппаратное обеспечение УВС отработано достаточно полно.

1.3.3 Анализ автоматизированных систем оценки показателей надежности сложных технических систем

В оценке надежности технических систем со сложными алгоритмами функционирования перспективным является применение технологии автоматизированного моделирования и расчета. Автоматизированные системы оценки показателей надежности систем позволяют определить уровень структурной надежности системы, провести сравнительный анализ надежности вариантов реализации и выбрать оптимальный вариант. [50]

Исследование варианта реализации системы с использованием технологии осуществляется в три этапа:

- постановка задачи – включает в себя разработку структурных схем вариантов системы, формализацию алгоритмов функционирования системы, условий возникновения отказов;
- построение математических моделей (логических, аналитических и статистических), позволяющих найти количественную оценку надежности системы;
- оценка показателей надежности системы, анализ полученных результатов и их применение.

Существующие автоматизированные системы оценки надежности технических систем различаются уровнем теоретической разработки, способами представления структурных схем, классами анализируемых объектов, методами автоматизированного моделирования и качеством программной реализации, а также составом вычисляемых показателей надежности. [107] Наибольшее распространение получили системы, теоретической основой которых являются модификации логико-вероятностного метода исследования, использующие в качестве средства построения моделей надежности деревья событий, деревья неисправностей, схем последовательно-параллельного соединения элементов, графов связности и схем функциональной целостности. Формализация условий возникновения отказов в системе и расчет надежности осуществляется с использованием аппарата математической логики. В логико-вероятностном методе исследования систем сложные процессы построения математических моделей и выполнения расчетов показателей надежности полностью алгоритмизированы. Поэтому их использование эффективно при оценке структурной надежности систем с высокой структурной сложностью.

В настоящее время на рынке существует большое количество программных комплексов (ПК) автоматизированного расчета надежности структурно сложных технических систем. Среди зарубежных наиболее распространенными являются программные продукты компании ANSYS Inc., ПК RELEX от компании Relex software Corporation, Risk Spectrum от Relcon AB, FRACAS от A.L.D. Group и др. Среди отечественных продуктов: ПК АСОНИКА-К от МИЭМ-ASKsoft, ПК АСМ от ОАО «СПИК СЗМА», ПК «Универсал» от ФГУП «ВНИИ УП МПС РФ» и др. [97, 110]

ПК Relex и Risk Spectrum позволяют провести логико-вероятностный анализ надежности сложных технических систем, оптимизацию техногенного риска и определение оптимальных параметров системы (числа резервных элементов, периодов профилактического обслуживания и др.). Вычисляются следующие показатели надежности: вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, интенсивность отказов системы, коэффициенты готовности, параметры потока

отказов, среднее число отказов, средняя наработка на отказ. В качестве средства построения надежностных моделей используются деревья событий и деревья отказов, аппарат математической логики. [136]

ANSYS Inc. предлагает несколько крупных программных продуктов для моделирования структурно-сложных технических систем: HFSS, Q3D Extractor, SIWave, Designer и др. Особенности инструментов моделирования являются:

- поддержка обширной библиотеки современных поставщиков радиоэлектронных компонентов и материалов;
- возможность проведения электромагнитного анализа;
- возможность проведения ресурсоемких высокопроизводительных расчетов с распараллеливанием и декомпозицией расчетных областей по вычислительным узлам. [50]

ПК FRACAS предоставляет средства анализа структурной надежности технических систем, основанные на методе статистического моделирования. Для каждого элемента системы возможно индивидуальное задание распределения интенсивности отказов и значений параметров распределения.

ПК АСМ является наиболее известным из отечественных автоматизированных систем. Он предоставляет средства задания структурно-логической модели системы, позволяет вычислить вероятность безотказной работы, среднюю наработку до отказа, стационарный и нестационарный коэффициенты готовности, среднюю наработку на отказ, среднее время восстановления, вероятности отказа восстанавливаемой, невосстанавливаемой и смешанной системы, а также значимость и вклад элементов системы в различные показатели надежности. Кроме этого ПК АСМ автоматически определяет кратчайшие пути надежного функционирования системы. [110]

ПК АСОНИКА-К представляет собой автоматизированную систему оценки надежности радиоэлектронных систем и выполняет следующие функции:

- расчёт показателей структурной надежности восстанавливаемых и невосстанавливаемых систем, состоящих из элементов, имеющих различного вида соединения, с учетом условий возникновения отказов;

– расчёт функций параметрической чувствительности показателей надёжности изделий к изменению коэффициентов математических моделей эксплуатационной интенсивности отказов и рабочих режимов работы системы;

– анализ результатов расчётов и выработка рекомендаций, направленных на обеспечение требуемого уровня надёжности системы. [42]

В работе [112] предложена модель реконфигурируемой системы, позволяющая учитывать смену законов распределения наработки до отказа при формировании временной диаграммы состояний системы, а также критерии отказов компонентов системы. Оценка показателей надёжности варианта реализации осуществляется методом имитационного моделирования. Разработана методика анализа проектных решений на основе предложенного метода, которая стала предметом реализации в виде подсистемы АСОНИКА-К-РЭС.

Существующие автоматизированные системы оценки надёжности технических систем могут быть использованы для оценки структурной надёжности рассматриваемых в работе управляющих вычислительных систем. Но для решения задачи обоснования алгоритма функционирования системы их применение затруднительно.

Выводы

Управляющие вычислительные системы ракетно-космической техники прошли большой путь развития от аналоговых до мощных цифровых вычислительных систем. Тенденцией развития является повышение надёжности функционирования УВС за счет развития средств нейтрализации отказов в работе вычислительных средств САУ, повышения уровня адаптации к внешним воздействиям, за счет усложнения архитектуры УВС. Современные системы строятся как распределенные системы, в которых задачи САУ распределены по подсистемам. Такое распределение делает подсистемы функционально законченными и позволяет проводить их модернизацию без переработки САУ в целом.

Управляющие вычислительные системы, разрабатываемые в «НПО автоматики», представляют собой сложные технические системы, состоящие из большого числа специализированных вычислительных устройств, построенные по магистрально-модульному принципу. Повышение надежности системы в целом осуществляется за счет горячего резервирования модулей и компонентов модулей, внедрения и развития средств контроля резерва и восстановления работоспособности компонентов системы при сбоях, за счет совершенствования технических решений и алгоритмов функционирования системы.

Проведен анализ известных методов, методик и программных средств, применяемых для оценки надежности структурно-сложных технических систем на этапе их проектирования. Существующие средства не позволяют учесть сложные алгоритмы функционирования системы.

Целью диссертационной работы является повышение функциональной надежности управляющих вычислительных систем, разрабатываемых в «НПО автоматики». Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) выбрать методику и критерий сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры УВС;
- 2) разработать метод оценки надежности УВС, позволяющий учесть сложные алгоритмы функционирования УВС в процессе работы, критерии отказов и восстановлений работоспособности компонентов системы при сбоях, не требующий описания всевозможных состояний компонентов системы;
- 3) разработать программное обеспечение для сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры УВС на основе выбранной методики и разработанного метода оценки надежности варианта;
- 4) провести анализ технических решений, применяемых для повышения и обеспечения надежности УВС, разрабатываемых в «НПО автоматики»;
- 5) разработать методы и средства для повышения надежности УВС.

Глава 2. Развитие методов и средств сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры управляющих вычислительных систем

2.1 Методика сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры управляющих вычислительных систем

Методика сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры вычислительных систем охватывает несколько этапов:

1) постановка задачи – анализ требований к системе, ее структурному и функциональному составу, выделение альтернативных вариантов реализации системы, разработка структурных схем вариантов;

2) построение математических моделей вариантов (логических, аналитических и/или статистических) – формализация алгоритмов функционирования вариантов в части возникновения отказов компонентов системы и реконфигураций, формализация условий возникновения отказов компонентов и системы в целом;

3) оценка показателей надежности вариантов, сравнительный анализ вариантов по критерию надежности, анализ полученных результатов и их применение.

Определимся с выбором критерия надежности вариантов архитектуры управляющих вычислительных систем ракетно-космической техники.

В 1967 г. по поручению Министерства общего машиностроения для сравнения БЦВС разных предприятий отрасли (НИАП, г. Москва, Электроприбор, г. Харьков и НИИА, г. Свердловск) группой ведущих специалистов этих предприятий (Сорокина В.И., Бестань Г.С., Антимирова В.М.) для сравнения БЦВС был предложен комплексный показатель качества K_k , учитывающий частные характеристики БЦВС:

$$K_k = F(P, M, Q), \quad (2.1.1)$$

где F – функционал, P – производительность, M – масса БЦВС, Q – вероятность отказа в интервале основной работы. [29] Так как характеристики БЦВС имеют разную размерность, было предложено перейти к относительным оценкам каждой характеристики с учетом ее весомости для конкретной САУ. С этой целью была

создана эфемерная – базовая БЦВС министерства, имеющая базовую производительность Π_{σ} , базовую массу M_{σ} , и базовую вероятность отказа Q_{σ} .

Для оценки производительности БЦВС в качестве критерия использовалось обратное значение времени решения навигационной задачи $1/T_{нз}$ в БЦВС типовой задачи РКТ (навигационной задачи расчета попадающей траектории и был согласован алгоритм этой задачи). Проводилось взаимное оценивание программистами предприятий времени решения ($T_{нз}$) этой задачи на БЦВС разных предприятий и устанавливалось согласованное значение производительности каждой конкретной БЦВС – Π_{κ} , устанавливалось конкретное значение массы – M_{κ} , и надежности – Q_{κ} .

Комплексный показатель качества K_{κ} для конкретной БЦВС рассчитывался по формуле исходя из знака характеристики. Считалось, что БЦВС, созданные предприятиями, не должны по каждой удельной характеристике уступать базовой. Формула вычисления K_{κ} приобрела вид:

$$K_{\kappa} = k_n \Pi_{\kappa}/\Pi_{\sigma} + k_m M_{\sigma}/M_{\kappa} + k_q Q_{\sigma}/Q_{\kappa} \quad (2.1.2)$$

где k_n , k_m и k_q – это весовые коэффициенты, устанавливаемые методом экспертных оценок. [29]

Если рассматривать только одну характеристику БЦВС – ее безотказность, комплексный показатель качества примет вид:

$$K_n = Q_{\sigma}/Q_{\kappa} \quad (2.1.3)$$

Данный показатель может быть использован в качестве критерия сравнения вариантов архитектуры УВС РКТ: если Q_1 – вероятность отказа первого варианта на интервале основной работы, Q_2 – вероятность отказа второго варианта и $K = Q_1/Q_2 > 1$, второй вариант более надежен.

Переход к относительной оценке в критерии сравнения вариантов целесообразно использовать в виду того, что решение о выборе варианта должно приниматься в условиях неопределенности относительно эксплуатационной интенсивности отказов компонентов системы, с учетом изменения длительности интервала основной работы системы. Переход к относительной оценке позволяет исключить ошибки, связанные с недостоверностью знаний об абсолютных значениях пара-

метров системы и выбрать область предпочтения варианта при изменении параметров систем. [5, 9, 20]

2.2 Модификация метода статистического моделирования для оценки надежности управляющих вычислительных систем

Разработана следующая модификация метода статистического моделирования, который использовался для оценки надежности невосстанавливаемого управляющего вычислительного комплекса в работе [5]. Многократно моделируется поведение системы на интервале основной работы, при этом имитируются отказы элементов системы, реакция системы на эти отказы, изменения, определенные заданными моментами времени. Система обязательно переводится в неработоспособное состояние. В каждом испытании находится вероятность отказа системы как произведение вероятностей событий, которые привели к отказу системы в целом. Если Q_l – вероятность отказа системы в l -м испытании, а N – число испытаний, то вероятность отказа системы определяется по формуле:

$$\bar{Q} = (\sum_{l=1}^N Q_l) / N. \quad (2.2.1)$$

Система состоит из n элементов: A_1, A_2, \dots, A_n , i -ый элемент ($\forall i \in \overline{1, n}$) характеризуется следующими параметрами:

- λ_i – интенсивность отказа элемента в интервале работы $[0, T_{раб}]$, где $T_{раб}$ – время функционирования системы;
- z_i – признак работоспособности элемента: значение 0 соответствует отказу элементу, 1 – исправности элемента.

Время безотказной работы каждого элемента системы подчиняется экспоненциальному закону распределения, поэтому вероятность возникновения отказа хотя бы одного элемента системы на интервале работы $[0, T]$ (q) и время возникновения этого отказа (τ) определяются по формулам:

$$q = 1 - \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot T \cdot z_i), \quad (2.2.2)$$

$$\tau = -\ln(\xi \cdot q + (1 - q)) / (\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot T \cdot z_i), \quad (2.2.3)$$

где ξ – равномерно распределенное число в интервале от 0 до 1. [5; с. 72]

Если определены следующие функции и процедуры, формализующие алгоритмы функционирования системы в части возникновения отказов ее элементов,:

– $s(A_1, A_2, \dots, A_n, T)$ – процедура изменения параметров модели в зависимости от текущего состояния элементов системы и оставшегося времени работы T ;

– $ts(A_1, A_2, \dots, A_n, T)$ – функция возвращает время, необходимое для совершения изменений в системе, которые будут сделаны функцией s при тех же значениях входных параметров;

– $r(A_1, A_2, \dots, A_n)$ – функция регистрации отказа системы: возвращает 1, если происходит отказ всей системы, 0 – иначе;

тогда вероятность отказа системы в l -м испытании Q_l определяется согласно следующему алгоритму.

1. Положить: $Q_l = 1$, $\theta = \infty$, $T = T_{раб}$, где θ – время возникновения изменений в системе, T – оставшийся интервал работы. Для $\forall i \in \overline{1, n}$ положить $z_i = 1$.

2. Сгенерировать ξ – равномерно распределенное число в интервале от 0 до 1. Рассчитать вероятность отказа хотя бы одного элемента системы (q) и время возникновения отказа (τ) на интервале работы $[0, T]$ по формулам (2.2.2), (2.2.3) соответственно.

3. Рассчитать $t = \min(\tau, \theta)$ – время возникновения очередного события в системе.

Если $t = \theta$, произвести изменения, вызвав процедуру $s(A_1, \dots, A_n, T)$. Рассчитать вероятность того, что за время θ не было отказа в системе:

$p = \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \theta \cdot z_i)$. Пересчитать: $Q_l = Q_l \cdot p$. Рассчитать оставшийся интервал работы: $T = T - t$. Рассчитать время реакции системы: $\theta = ts(A_1, \dots, A_n, T)$. Перейти на п. 4.

Если $t = \tau$ – имитировать отказ хотя бы одного элемента системы. Для этого найти статистическое место отказа – j -й элемент системы; для всех отказавших

элементов положить $z_j = 0$. Пересчитать: $Q_i = Q_i \cdot q$. Рассчитать оставшийся интервал работы: $T = T - t$. Рассчитать время реакции на отказ: $\theta = ts(A_1, \dots, A_n, T)$.

4. Если $\theta = 0$, произвести изменения в системе, вызвав $s(A_1, \dots, A_n, T)$. Рассчитать время реакции системы: $\theta = ts(A_1, \dots, A_n, T)$.

5. Если $\theta = 0$, перейти на п. 4.

6. Вызвать функцию регистрации отказа системы: если $r(A_1, A_2, \dots, A_n) = 1$ или T близко к нулю, стоп – вероятность отказа найдена. Иначе перейти на п. 2.

Возникновение случайного события с вероятностью β может быть промоделировано согласно известному алгоритму [120; с. 43]:

1. Сгенерировать ξ – случайное равномерно распределенное число в интервале от 0 до 1.

2. Если $\xi < \beta$, событие происходит, иначе событие не происходит.

Статистическое место отказа также может быть найдено согласно известному алгоритму [120; с. 44]:

1. Сгенерировать ξ – случайное равномерно распределенное число в интервале от 0 до 1. Определить $\lambda = \xi \cdot \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z_i \right)$. Положить $k = 1$.

2. Если $z_k = 0$, перейти на п. 4.

3. Если $\lambda \leq \sum_{i=1}^k (\lambda_i \cdot z_i)$, стоп: статическое место отказа – элемент с номером k .

4. Положить $k = k + 1$. Перейти на п. 2.

Независимые случайные величины, равномерно распределенные на интервале $[0, 1]$, могут быть получены с помощью программных генераторов случайных чисел, обзор которых достаточно хорошо представлен в [73]. В разделе 3.3 диссертационной работы исследован вопрос о применимости различных генераторов случайных чисел для оценки надежности структурно-сложных технических систем. Сделаны рекомендации по практическому применению генераторов случайных чисел.

При проведении вычислительного эксперимента неизбежна погрешность, которая обусловлена числом экспериментов. Для получения достоверной оценки

вероятности отказа варианта системы целесообразно проверять сходимость метода: число испытаний N целесообразно определить исходя из следующего условия: $|Q_1 - Q_2| < \varepsilon$, где Q_1 – оценка вероятности отказа при N испытаниях, Q_2 – оценка вероятности отказа при $10 \cdot N$ испытаниях, ε – достаточно малое число.

Достоинствами предложенного метода оценки вероятности отказа системы являются простота программной реализации, возможность учета сложных алгоритмов функционирования системы, критерий отказов и восстановлений работоспособности элементов системы в процессе работы. Метод не требует аналитического описания всех возможных комбинаций состояний компонентов системы: формализованным языком должны быть описаны только условия возникновения отказов элементов системы (условия изменений состояний элементов системы) и поведение системы при выполнении этих условий.

Проверка имитационной модели и метода оценки вероятности отказа УВС проводилась моделированием известных систем, оценка которых возможна аналитическими методами (резервированных систем, описанных в разделе 3.1 диссертационной работы, восстанавливаемых систем, систем с монотонной структурой). При моделировании использовались линейно-конгруэнтные генераторы случайных чисел (2.3.4). По результатам моделирования получены значения вероятности отказа с погрешностью не более 0.2% (приложение А). Величина погрешности обусловлена числом экспериментов. При моделировании УВС со сложной логикой функционирования, не поддающихся анализу аналитическими методами, были получены прогнозируемые результаты (например, результаты анализа систем, описанных в разделах 3.2, 3.3 диссертационной работы).

Проверка метода оценки вероятности отказа системы проведена также с помощью средств моделирующего комплекса отработки аппаратуры и программ (КОАП), в создании которого участвовал автор диссертационной работы. Получено совпадение результатов моделирования реальной вычислительной системы с экспериментальными данными на моделирующем КОАП (см. раздел 4.1.3 диссертационной работы).

2.3 Вопросы применения генераторов случайных чисел для моделирования сложных систем

Случайные числа распределений, требуемых для создания моделей, могут быть получены преобразованием независимых случайных величин, равномерного распределенных на интервале $[0, 1]$ (принято обозначать это распределение через $U(0, 1)$) [48].

Генератор случайных чисел должен обладать следующими свойствами:

- получаемые числа должны быть равномерно распределены на интервале $[0, 1]$ и не должны иметь корреляции друг с другом;
- генератор должен обладать быстродействием и не требовать больших ресурсов вычислителя;
- в генераторе должен быть предусмотрен простой способ получения отдельных потоков случайных чисел (поток – это часть последовательности случайных чисел, производимых генератором). Использование отдельных потоков для различных задач позволяет обеспечить сравнимость результатов моделирования.

Известно несколько алгоритмов формирования случайных величин, имеющих распределение $U(0,1)$ [73]. Линейные конгруэнтные генераторы (ЛКГ), предложенные Лемером, формируют последовательность целых чисел Z_1, Z_2, \dots , определенных рекурсивной формулой:

$$Z_i = (aZ_{i-1} + c) \bmod m, \quad (2.3.1)$$

где Z_i – остаток от деления $(aZ_{i-1} + c)$ на m ; m, a, c – неотрицательные числа, удовлетворяющие неравенствам $0 < m, a < m, c < m; Z_0 < m$. Искомые числа U_i , имеющие распределение $U(0,1)$, определяются формулой:

$$U_i = Z_i / m, \quad i = 1, 2, \dots \quad (2.3.2)$$

Значения Z_i , полученные по формуле (2.3.1), не являются случайными. Однако, подбирая параметры a, m, b, c и Z_0 , можно получить такое поведение величин Z_i , при котором соответствующие величины U_i представляются как независимые и равномерно распределенные случайные величины с распределением $U(0,$

1) [73]. В частности, в [73] рекомендован следующий ЛКГ для моделирования систем:

$$Z_i = (630360016 \cdot Z_{i-1}) \bmod (2^{31} - 1). \quad (2.3.3)$$

Меняя значения параметра Z_0 , получаем множество различных генераторов.

Для анализа был выбран ЛКГ

$$Z_i = (16807 \cdot Z_{i-1}) \bmod (2^{31} - 1). \quad (2.3.4)$$

Рассматриваемые значения параметра Z_0 : 1, 1973272912, 281629770, 20006270, 1280689831, 2096730329, 1933576050, 604901985, 1511192140, 1259851944, 824064364, 150493284, 242708531, 75253171, 913566091, 246780520, 1363774876, 1964472944, 1202299975, 233217322.

В [54] Горским Л.К. рекомендован алгоритм, блок-схема которого показана на рисунке 2.3.1. a и b – это параметры, U_i – величина, формируемая при i -м выполнении алгоритма. Начальные значения параметров: $a = 3.14159265$ и $b = 0.542101887$.

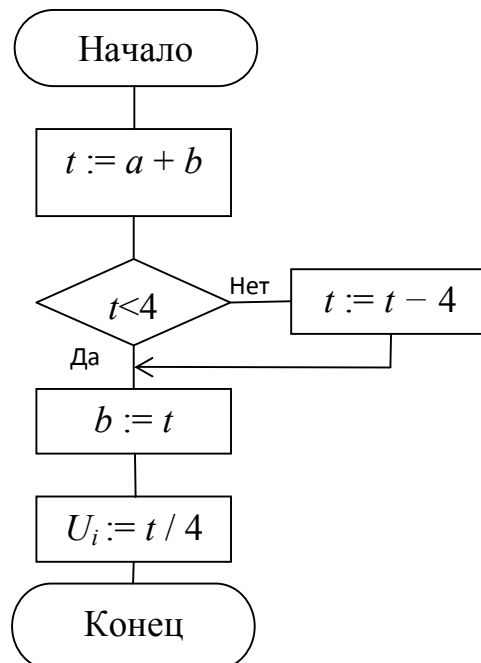


Рисунок 2.3.1 – Блок-схема алгоритма формирования случайных чисел

Перед использованием генераторов случайных чисел требуется проверить их качество.

Все выбранные для анализа генераторы не требуют больших вычислительных ресурсов и представляют способ получения отдельных потоков случайных величин. Все величины, формируемые ими, лежат в интервале $[0,1]$. Проверить, случайны ли они и удовлетворяют ли распределению $U(0,1)$ можно несколькими известными методами.

С помощью критерия «хи-квадрат» Пирсона проверяется гипотеза о равномерности распределения случайных величин [91]. Для этого интервал $[0, 1]$ делится на k непересекающихся интервалов одинаковой длины, формируется n случайных величин U_1, U_2, \dots, U_n и считается N_j – число U_i в интервале $[(j-1)/k, j/k]$. Значение критерия χ^2 вычисляется по формуле:

$$\chi^2 = \frac{k}{n} \sum_{j=1}^k (N_j - n/k)^2. \quad (2.3.5)$$

Гипотеза о равномерности распределения величин U_i на интервале $[0,1]$ опровергается на уровне доверительной вероятности α , если $\chi^2 > \chi_{k-1, \alpha}^2$, где $\chi_{k-1, \alpha}^2$ – критическая точка распределения «хи-квадрат» [27]. Критерий «хи-квадрат» достоверен, если $k \geq 3$ и $n/k \geq 5$. [73]

Проверим генераторы случайных чисел при $k = 3000$, $n = 300000$, $\alpha = 0,005$.

Значение χ^2 для генератора Горского Л.К. [54] равно 3038,42. Значение χ^2 для генератора Random библиотеки System Delphi 7 равно 3104,88. Результаты расчета χ^2 для ЛКГ (2.3.3) с различными Z_0 приведены в таблице 2.3.1. Результаты расчета χ^2 для ЛКГ (2.3.4) с различными Z_0 приведены в таблице 2.3.2.

Таблица 2.3.1 – Значение статистики χ^2 для ЛКГ (2.3.3)

Z_0	χ^2	Z_0	χ^2	Z_0	χ^2
1	2879,1	604901985	3158,2	913566091	2961,56
1973272912	3037,04	1511192140	3064,26	246780520	2897,34
281629770	2877,1	1259851944	2875,68	1363774876	2948,12
20006270	2892,06	824064364	3084,38	1964472944	3070,02
1280689831	2915,26	150493284	3046,2	1202299975	3044,24

Продолжение таблицы 2.3.1

Z_0	χ^2	Z_0	χ^2	Z_0	χ^2
2096730329	2893,7	242708531	3144,98	233217322	2915,68
1933576050	2913,92	75253171	2935,8		

Таблица 2.3.2 – Значение статистики χ^2 для ЛКГ (2.3.4)

Z_0	χ^2	Z_0	χ^2	Z_0	χ^2
1	2924,66	604901985	3058,86	913566091	2985,34
1973272912	3169,02	1511192140	2956,6	246780520	3003,7
281629770	2939,72	1259851944	2943,3	1363774876	3042,58
20006270	2983,3	824064364	3071,5	1964472944	3025,48
1280689831	3134,28	150493284	2920,78	1202299975	3088,04
2096730329	2969,38	242708531	3065,66	233217322	2996,92
1933576050	3030,52	75253171	2984,18		

Значение критической точки $\chi^2_{k-1,\alpha}$ при выбранных k и α равно 3202,244607. Таким образом, нулевая гипотеза о равномерности распределения формируемых генераторами величин не опровергается на уровне доверительной вероятности 0,005.

Проверка гипотезы о независимости и равномерности распределения случайных величин, формируемых генераторами, также осуществляется с помощью критерия серий. Это обобщенная проверка по критерию «хи-квадрат» для высших измерений [73]. Если значения U_i являются независимыми и имеют распределение $U(0,1)$, то непересекающиеся d -мерные кортежи $U_1 = (U_1, \dots, U_d)$, $U_2 = (U_{d+1}, \dots, U_{2d})$, ... должны представлять собой независимые и одинаково распределенные случайные векторы, равномерно распределенные в d -мерном единичном кубе $[0, 1]^d$.

Для проверки гипотезы интервал $[0, 1]$ делится на k интервалов одинаковой длины, формируется n случайных векторов: U_1, U_2, \dots, U_n (для этого потребуется

nd значений U_i) и считается $N_{j_1 j_2 \dots j_d}$ – число U_i , содержащих первый компонент в j_1 -м интервале, второй компонент – в j_2 -м интервале и т.д. Значение критерия $\chi^2(d)$ определяется формулой:

$$\chi^2(d) = \frac{k^d}{n} \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2=1}^k \dots \sum_{j_d=1}^k \left(N_{j_1 j_2 \dots j_d} - \frac{n}{k^d} \right)^2. \quad (2.3.6)$$

Гипотеза о независимости и равномерности распределения величин U_i опровергается на уровне доверительной вероятности α , если $\chi^2(d) > \chi_{k^d-1, \alpha}^2$, где $\chi_{k^d-1, \alpha}^2$ – критическая точка распределения «хи-квадрат». Критерий достоверен, если $k \geq 3$ и $n/k^d \geq 5$. [73].

Проверим нулевую гипотезу о том, что пары $(U_1, U_2), (U_3, U_4) \dots (U_{2n-1}, U_{2n})$, формируемые генераторами, являются независимыми и одинаково распределенными случайными величинами с распределением $U(0,1)$. Возьмем $k = 60$, $n = 300000$, $\alpha = 0,005$.

Значение $\chi^2(2)$ для генератора Горского Л.К. [54] получилось равным 3542,856. Значение χ^2 для генератора Random библиотеки System Delphi 7 - 3536,256. Результаты расчета $\chi^2(2)$ для ЛКГ (2.3.3) с различными Z_0 приведены в таблице 2.3.3 Результаты расчета $\chi^2(2)$ для ЛКГ (2.3.4) с различными Z_0 приведены в таблице 2.3.4.

Таблица 2.3.3 – Значение статистики $\chi^2(2)$ для ЛКГ (2.3.3)

Z_0	$\chi^2(2)$	Z_0	$\chi^2(2)$	Z_0	$\chi^2(2)$
1	3506,928	604901985	3743,28	913566091	3755,592
1973272912	3546,624	1511192140	3661,248	246780520	3787,056
281629770	3566,448	1259851944	3540,936	1363774876	3755,544
20006270	3520,968	824064364	3551,808	1964472944	3521,856
1280689831	3554,928	150493284	3656,928	1202299975	3534,864
2096730329	3640,128	242708531	3640,368	233217322	3477,912
1933576050	3616,272	75253171	3624,864		

Таблица 2.3.4 – Значение статистики $\chi^2(2)$ для ЛКГ (2.3.4)

Z_0	$\chi^2(2)$	Z_0	$\chi^2(2)$	Z_0	$\chi^2(2)$
1	3493,488	604901985	3650,208	913566091	3594,12
1973272912	3598,752	1511192140	3557,256	246780520	3631,608
281629770	3539,328	1259851944	3734,544	1363774876	3621,60
20006270	3564,72	824064364	3546,312	1964472944	3637,344
1280689831	3722,232	150493284	3592,032	1202299975	3646,056
2096730329	3552,648	242708531	3708,264	233217322	3660,048
1933576050	3537,936	75253171	3621,792		

Значение критической точки $\chi_{k^2-1,\alpha}^2$ при выбранных k и α равно 3821,29115. Таким образом, нулевая гипотеза о равномерности распределения пар величин не опровергается на уровне доверительной вероятности 0,005.

Результаты расчета значений критериев показали приемлемость использования всех выбранных для анализа генераторов.

Проверим качество генераторов принципиально другим способом, получив оценку параметра надежности некоторой системы и сравнив ее с результатом аналитического расчета. Для проверки возьмем трехканальную систему с переключением каналов (ПК) по результатам контроля выходной информации схемами контроля (СК), надежность которой исследована в разделе 2.3.

Аналитический расчет вероятности отказа системы выполнен, вероятность отказа системы Q определяется по формуле (2.3.4). Оценка вероятности отказа системы получена применением разработанной инженерной методики исследования. Параметры модели: число испытаний $N = 30000$, значения β меняются в диапазоне от 0.1 до 0.9 с шагом 0.1; значения λ взяты равными 0.05 и 0.1.

Максимальное по модулю расхождение между аналитическим значением вероятности отказа системы и значением, рассчитанным в модели (погрешность модели) с использованием генератора Горского Л.К. [54], составило $2.70399 \cdot 10^{-4}$, с использованием генератора Random библиотеки System Delphi 7 – $4.83549 \cdot 10^{-5}$.

Погрешность модели с использованием ЛКГ (2.3.3) и ЛКГ(2.3.4) с различными значениями Z_0 приведены в таблице 2.3.5 и таблице 2.3.6 соответственно.

Таблица 2.3.5 – Значение погрешности модели с ЛКГ (2.3.3)

Z_0	Погрешность	Z_0	Погрешность	Z_0	Погрешность
1	6,23688e-5	604901985	3,81912e-5	913566091	4,44715e-5
1973272912	1,99403e-5	1511192140	4,42572e-5	246780520	4,17871e-5
281629770	3,18687e-5	1259851944	4,93521e-5	1363774876	2,85984e-5
20006270	2,484e-5	824064364	4,98931e-5	1964472944	5,89203e-5
1280689831	3,78895e-5	150493284	4,16106e-5	1202299975	4,92647e-5
2096730329	4,19034e-5	242708531	4,193e-5	233217322	3,17165e-5
1933576050	4,44606e-5	75253171	4,70286e-5		

Таблица 2.3.6 – Значение погрешности модели с ЛКГ (2.3.4)

Z_0	Погрешность	Z_0	Погрешность	Z_0	Погрешность
1	5,08493e-5	604901985	5,08818e-5	913566091	4,50987e-5
1973272912	2,50219e-5	1511192140	5,18354e-5	246780520	5,25173e-5
281629770	8,96111e-5	1259851944	3,65042e-5	1363774876	5,16814e-5
20006270	3,44641e-5	824064364	3,99343e-5	1964472944	3,44103e-5
1280689831	1,79044e-5	150493284	3,73379e-5	1202299975	5,64213e-5
2096730329	7,93473e-5	242708531	7,75071e-5	233217322	3,78754e-5
1933576050	6,53105e-5	75253171	2,54778e-5		

На основании полученных данных погрешность модели с использованием ЛКГ (2.3.3) с различными значениями Z_0 составляет от $1.99403 \cdot 10^{-5}$ до $6.23688 \cdot 10^{-5}$, модели с использованием ЛКГ (2.3.4) – от $1.79044 \cdot 10^{-5}$ до $8.96111 \cdot 10^{-5}$. Наименьшую погрешность дает модель с использованием ЛКГ (2.3.4) с параметром $Z_0 = 1280689831$.

Для практических нужд необходимо, чтобы погрешность расчета вероятности отказа системы не превосходила величины 10^{-4} . Генератор Горского Л.К. [54] не удовлетворяет этому требованию. Детальный анализ показал, что причина скрывается в корреляции значений последовательно выбираемых случайных чисел.

Решение проблемы использования генератора Горского Л.К. [54] состоит в применении после каждой рабочей выборки случайного числа «холостой» выборки, т.е. выборки, значение которой не используется, или в чередовании генераторов: после обращения к генератору Горского Л.К. необходимо производить обращение к любому другому генератору, удовлетворяющему требованиям по равномерности.

2.4 Программное обеспечение для сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры управляющих вычислительных систем

На базе выбранной методики сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры УВС (см. раздел 2.1 диссертационной работы) и предложенного метода оценки надежности варианта (см. раздел 2.2 диссертационной работы) разработано программное обеспечение (ПО) [31], которое выполняет следующие функции:

- преобразование формальной модели УВС в программную;
- проверка модели на соответствие алгоритмам функционирования, критериям отказов и восстановления;
- оценка вероятности отказа системы в диапазоне значений параметров системы предложенным методом;
- сравнительный анализ надежности вариантов архитектуры УВС.

В состав программного обеспечения входят:

- средства задания формальной модели архитектуры УВС – включают в себя язык моделирования, объекты и классы объектов для хранения формальной модели УВС;

- средства компиляции формальной модели архитектуры УВС – предназначены для преобразования формальной модели УВС в программную, проведения типовых операций при проведении вычислительного эксперимента;
- средства проведения вычислительного эксперимента;
- средства верификации модели;
- средства представления результатов анализа;
- пользовательский графический интерфейс.

ПО разработано на объектно-ориентированном языке программирования Delphi и предназначено для работы под управлением операционной системы Windows XP/7/8.

Средства задания формальной модели системы

Исследуемый вариант архитектуры УВС представляется в виде формальной модели. Формализации подлежат алгоритмы функционирования системы при возникновении отказов компонентов, процедуры восстановлений и реконфигураций (действия, определенные моментом времени, в результате которых производится изменение состояний компонентов системы).

Для преобразования формальной модели архитектуры УВС в программную модель разработан специализированный язык описания УВС, в состав которого введены следующие понятия: переменная, действие, критерий отказа, критерий восстановления, условие-действие. Действием называется последовательность команд пользовательского языка, переменной – параметр системы. Пользовательский язык включает в себя операторы для определения состояния компонентов системы и значения переменных, выражения (которые могут быть вычислены), команды ветвлений и переходов. В языке моделирования определены правила задания выражений и действий.

Критерий отказа и критерий восстановления определяют действия при возникновении отказа в системе. В критерии отказа действие производится мгновенно (длительность действия не учитывается при моделировании). Критерий восстановления вызывается после критерия отказа, длительность действия критерия

восстановления учитывается при моделировании. Условие-действие определяет действие, которое необходимо совершить в определенный момент времени.

Переменные предназначены для использования внутри действий, задания интенсивностей отказов компонентов системы, определения условий выполнения критериев отказов и восстановлений. Они делятся на локальные и глобальные. Глобальные переменные характеризуются диапазоном значений, локальные переменные – начальным значением, типом данных (могут быть определены как целые, вещественные и случайные, равномерно распределенные в интервале от 0 до 1, числа). Значения глобальных переменных перебираются при оценке вероятности отказа исследуемого варианта архитектуры. Применение переменных системы при описании действий позволяет учесть не только текущее состояние системы, но и историю возникновения отказов и реконфигураций системы.

Компонент УВС определяется уникальным именем, с помощью которого возможно задать его состояние («работоспособен» или «отказал»). Каждый компонент системы характеризуется интенсивностью отказов, которая задается как выражение с участием локальных и глобальных переменных.

Правила задания выражений

В выражениях допускается использование следующих символов и обозначений:

- «0»... «9», «.» – для обозначения чисел;
- «+», «-», «*», «/» – для обозначения арифметических операций сложения, вычитания, умножения, деления соответственно;
- «(», «)» – скобки;
- «^» – возведение в степень;
- «OR», «AND» – логическое ИЛИ, И соответственно;
- if (X; Y; Z) – функция выбора значения в зависимости от условия, где X – это условие, Y – значение, если условие истинно, Z – значение, если условие ложно;
- ln(X) – взятие логарифма, где X – число или выражение;
- exp(X) – взятие экспоненты, где X – число или выражение;

– обозначения глобальных и локальных переменных, обозначения компонентов системы;

– next(X) – следующее значение случайной локальной переменной, где X – обозначение локальной переменной, определенной как случайное число.

Символы операций, числа могут отделяться друг от друга пробелами или знаками табуляции.

Описание условий

При описании условий допускается использовать:

- выражения;
- «<», «>», «=», «<=», «>=» – операторы сравнений;
- «OR», «AND» – логическое ИЛИ, И соответственно;
- «0» – для обозначения состояния «отказавший» компонента системы;
- «1» – для обозначения состояния «работоспособный»;
- «TIME» – для обозначения текущего момента времени в системе;
- «ALLSYSTEM» – для обозначения системы в целом.

Описание действий

Действия описываются последовательностью команд пользовательского языка и хранятся в виде текста. Каждая команда в тексте должна заканчиваться символом «перехода на новую строку».

Перечень команд пользовательского языка:

1. Команда присваивания значения.

Формат команды:

VAR = EXPRESSION,

где VAR – обозначение локальной переменной или компонента системы или слово «ALLSYSTEM» для обозначения системы в целом, EXPRESSION – выражение.

Если в качестве VAR задано обозначение компонента системы/системы в целом, команда используется для задания состояния компонента системы/системы в целом. Тогда в качестве значения выражения EXPRESSION может быть только «0» или «1». Если в качестве VAR задано обозначение локальной пе-

ременной, в качестве значения EXPRESSION может быть любое допустимое выражение.

2. Команды переходов: команда метки, команда переходов.

Формат команды метки:

LABEL : NAME_LABEL

Формат команды перехода:

GOTO : NAME_LABEL

где LABEL – непосредственно команда; NAME_LABEL – название метки, в виде строки без пробелов; GOTO – непосредственно команда.

При появлении команды GOTO программа продолжает выполняться с команды LABEL, метка которой совпадает с введенной в команде GOTO. Доступны переходы как вперед, так и назад. Запрещено командой GOTO ссылаться на метку, не введенную командой LABEL. Запрещается указывать две команды LABEL с одинаковыми метками.

3. Команды ветвлений.

Формат команд:

IF CONDITION

CMD1

ELSE

CMD2

ENDIF

где IF, ELSE, ENDIF – непосредственно команды; CONDITION – условие, которое проверяется; CMD1 – последовательность действий, которая выполняется, если условие CONDITION истинно; CMD2 – последовательность действий, которая выполняется, если условие CONDITION ложно.

4. Комментарии. Комментарии используются в качестве подсказок для пользователя, действия в комментариях не производятся. Разрешено использование однострочных и многострочных комментариев.

Формат:

«//» – однострочный комментарий,

«/* */» – многострочный комментарий.

Описание формальной модели УВС

Описание формальной модели УВС хранится в текстовом файле с расширением «*.ini». Файл имеет структурированный вид и выполнен как стандартный INI-файл. Пример файла приведен в приложении Б.

Секция «General» предназначена для хранения общей информации о варианте архитектуры УВС. Она характеризуется следующими полями:

- текстовое поле «Name» – название варианта архитектуры УВС;
- текстовое поле «SubName» – дополнительный комментарий к названию варианта, который может содержать, например, номер заказа на разработку УВС.

Секция «GlobalVar» предназначена для хранения информации о глобальной переменной варианта архитектуры УВС. Характеризуется следующими полями:

- целочисленное поле «Count» – количество глобальных переменных варианта системы;
- текстовое поле NameX (где X – число от 0 до Count -1) – обозначение глобальной переменной;
- текстовое поле SubNameX (где X – число от 0 до Count -1) – наименование глобальной переменной или некоторый комментарий, в котором отражено назначение переменной;
- численное поле MinX (где X – число от 0 до Count -1) – минимальное значение глобальной переменной;
- численное поле MaxX (где X – число от 0 до Count -1) – максимальное значение глобальной переменной;
- численное поле StepX (где X – число от 0 до Count -1) – шаг, с которым следует перебирать значения переменной при оценке надежности варианта архитектуры.

Секция «LocalVar» предназначена для хранения информации о локальной переменной варианта архитектуры УВС. Характеризуется следующими полями:

- целочисленное поле «Count» – количество локальных переменных варианта системы;

- текстовое поле NameX (где X – число от 0 до Count -1) – обозначение локальной переменной;

- текстовое поле SubNameX (где X – число от 0 до Count -1) – наименование локальной переменной или некоторый комментарий, в котором отражено назначение переменной;

- численное поле ValueX (где X – число от 0 до Count -1) – начальное значение локальной переменной;

- текстовое поле TypeX (где X – число от 0 до Count -1) – тип данных локальной переменной. Допускается использование следующих значений: «Integer» – целое число, «Float» – вещественное число, «Random» – случайное число (равномерно распределенное в интервале от 0 до 1).

Секция «Component» предназначена для хранения информации о структуре варианта архитектуры УВС. Характеризуется следующими полями:

- целочисленное поле «Count» – количество компонентов системы;

- текстовое поле NameX (где X – число от 0 до Count -1) – обозначение компонента системы;

- текстовое поле SubNameX (где X – число от 0 до Count -1) – наименование компонента или некоторый комментарий, в котором отражено назначение компонента;

- текстовое поле RateX (где X – число от 0 до Count-1) – интенсивность отказов компонента системы на всем интервале времени работы системы. Задается в виде выражения, в котором могут участвовать глобальные и локальные переменные.

Секция «ActionCriterion» предназначена для хранения информации об условиях-действиях. Характеризуется следующими полями:

- целочисленное поле «Count» – количество условий-действий;

- текстовое поле ConditionX (где X – число от 0 до Count -1) – условие;

- текстовое поле ActionX (где X – число от 0 до Count -1) – ссылка на секцию в файле описания модели УВС, которая содержит описание действия;

– текстовое поле SubNameX (где X – число от 0 до Count -1) – комментарий, в котором отражено назначение условия-действия.

Секция, предназначенная для хранения описания действия, должна характеризоваться следующими полями:

- целочисленное поле «Count» – количество строк описания действия;
- целочисленное поле «LineX» (где X – число от 0 до Count-1) – строка описания действия.

Секция «FailureCriterion» предназначена для хранения информации о критериях отказов варианта архитектуры УВС. Характеризуется следующими полями:

- целочисленное поле «Count» – количество критериев отказов;
- текстовое поле «ComponentX» (где X – число от 0 до Count-1) – обозначение компонента системы, отказ которого произошел;
- текстовое поле «ActionX» (где X – число от 0 до Count-1) – ссылка на секцию в файле описания модели УВС, которая содержит описание действия, которое следует выполнить;

– текстовое поле SubNameX (где X – число от 0 до Count -1) – комментарий, в котором отражено назначение критерия.

Секция «RepairCriterion» предназначена для хранения информации о критериях восстановлений варианта архитектуры УВС. Характеризуется следующими полями:

- целочисленное поле «Count» – количество критериев восстановлений;
- текстовое поле «ComponentX» (где X – число от 0 до Count-1) – обозначение компонента системы, отказ которого произошел (относительно которого запускается критерий);

– текстовое поле «ActionX» (где X – число от 0 до Count-1) – ссылка на секцию в файле описания модели УВС, которая содержит описание действия, которое следует выполнить для восстановления;

– численное поле «TimeNeedX» (где X – число от 0 до Count-1) – время, необходимое для выполнения процедуры восстановления. Задается относительно временного интервала работы в виде числа от 0 до 1;

– текстовое поле SubNameX (где X – число от 0 до Count -1) – комментарий, в котором отражено назначение критерия.

Реализация

Для работы с формализованным описанием системы разработаны следующие типы данных: TGlobalVar – структура для хранения информации о глобальной переменной системы; TLocalVar – структура для хранения информации о локальной переменной системы; TMyComponent – структура для хранения информации о компоненте системы; TActionCriterion – структура для хранения информации об условии-действии; TFailureCriterion – структура для хранения информации о критерии отказа системы; TRepairCriterion – структура для хранения информации о критерии восстановления системы; TVariant – структура для хранения информации о варианте архитектуры системы. Объекты TActionCriterion, TFailureCriterion, TRepairCriterion определяют вычислительные процедуры над состояниями компонентов системы, локальными и глобальными переменными.

Процесс анализа варианта архитектуры УВС с использованием разработанного ПО показан на рисунке 2.4.1.

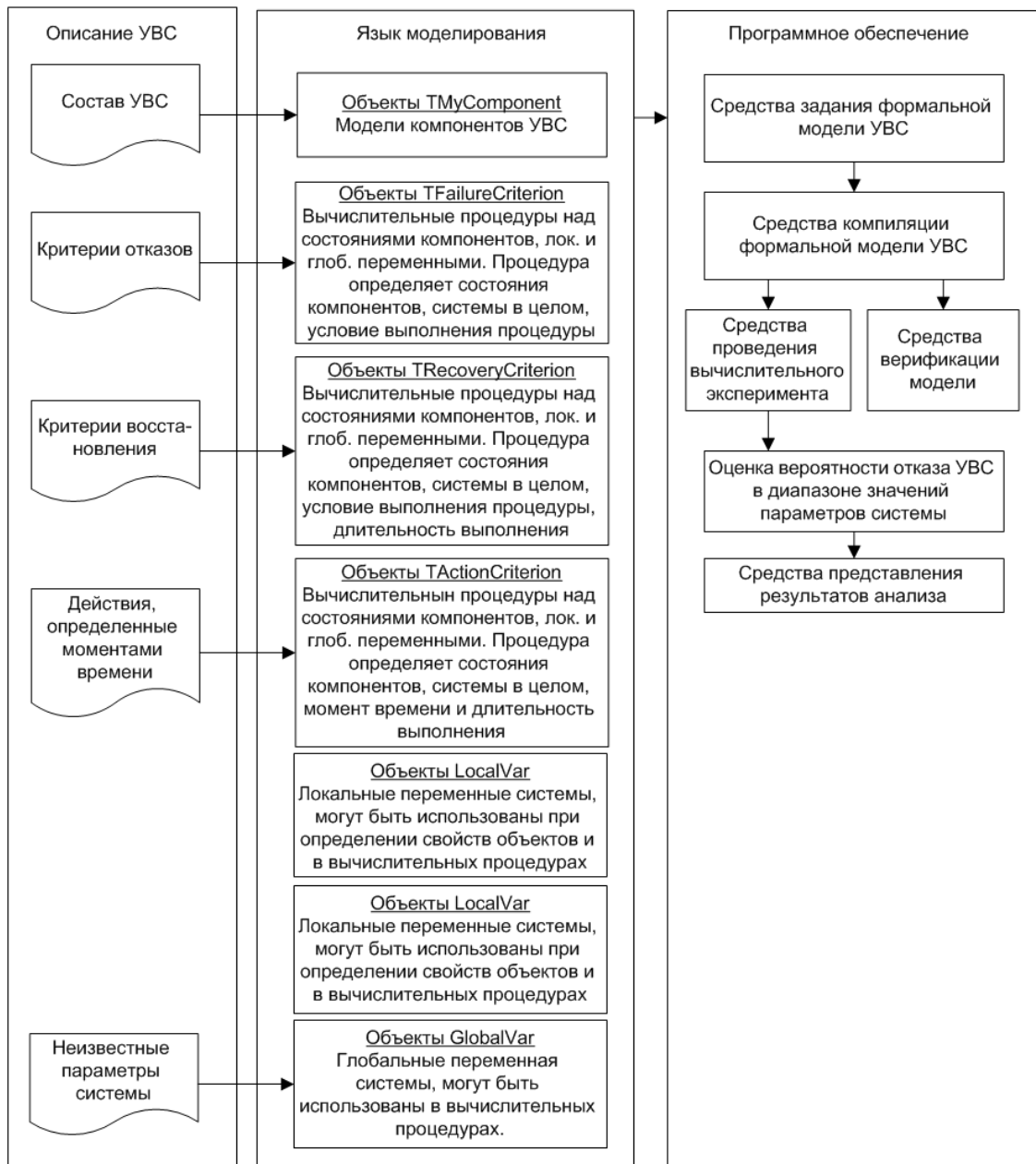


Рисунок 2.4.1 – Процесс анализа вариантов архитектуры УВС

Алгоритм вычислительного эксперимента

Для выполнения вычислительного эксперимента применена концепция дискретно-событийного моделирования, то есть функционирование системы представляется как набор событий, между которыми состояние системы остается неизменным. В процессе эксперимента имитируются отказы компонентов системы и реакции системы на отказы (возможно каскадное выполнение событий), проводятся процедуры восстановления с учетом времени и вероятности восстановления, проводятся изменения системы, определенные заданными условиями и мо-

ментами времени. Система обязательно переводится в нерабочее состояние. Вероятность отказа системы вычисляется как произведение вероятностей всех событий, произошедших в системе.

Алгоритм вычислительного эксперимента показан на рисунке 2.4.2.

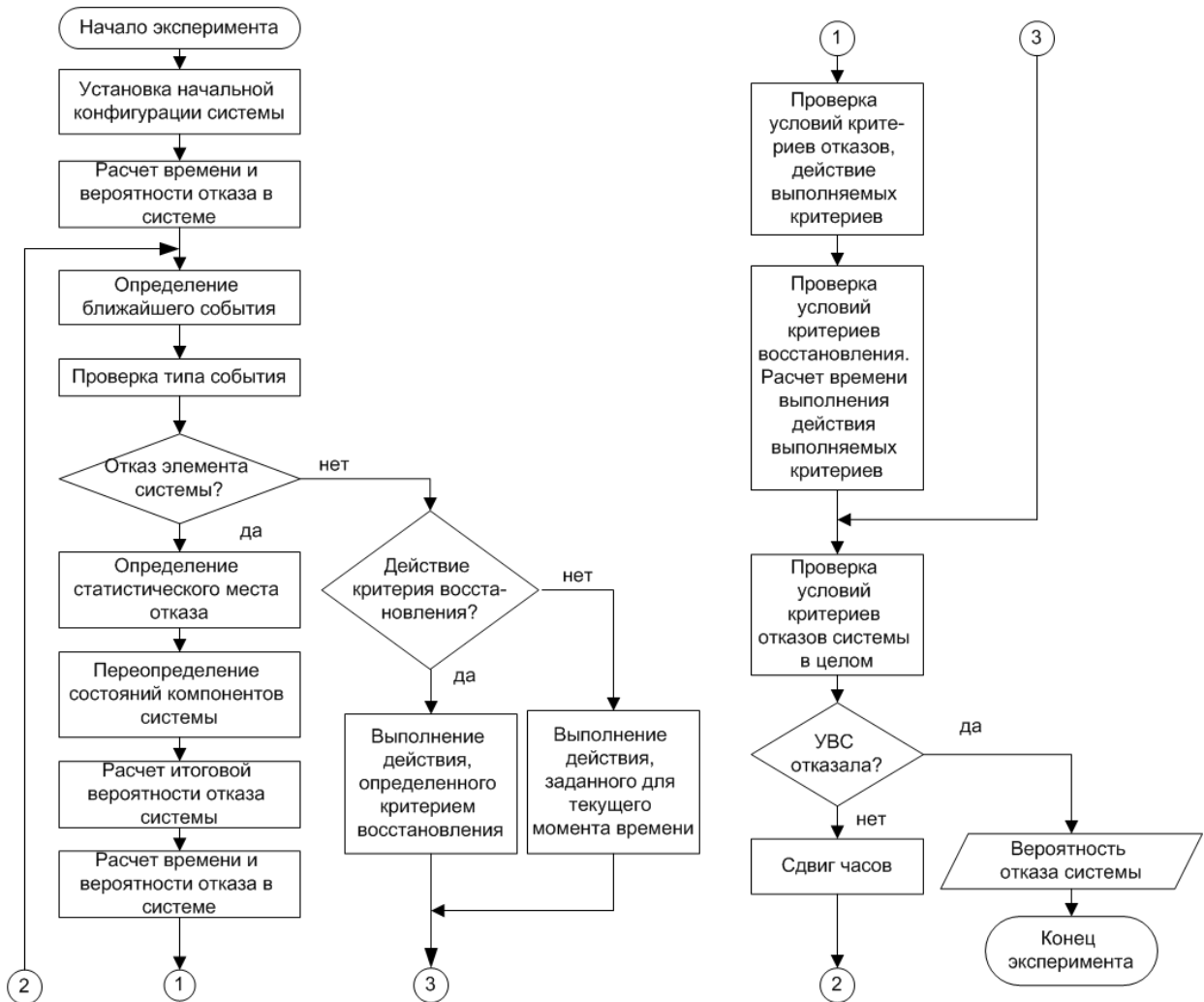


Рисунок 2.4.2 – Алгоритм вычислительного эксперимента

Средства верификации модели

Средства верификации модели, реализованные в программном обеспечении, позволяют проверить адекватность модели путем проведения управляемого эксперимента. В этом случае пользователь сам определяет последовательность событий в системе и контролирует состояние компонентов систем после каждого шага эксперимента. Если реакция системы на событие не соответствует ожидаемой,

пользователь может внести изменения в формальную модель и повторить процесс верификации модели.

Средства представления результатов анализа

Результаты анализа вариантов архитектуры УВС представляются в табличном виде. Заголовок таблицы формируется из названий глобальных переменных, оценок вероятности отказов систем и дисперсий оценок, отношений вероятностей отказа рассматриваемых вариантов архитектуры УВС к вероятности отказа базового варианта. Базовый вариант выбирается пользователем.

Отношение вероятностей отказов исследуемого и базового вариантов архитектуры УВС вычисляется относительно общих глобальных переменных. Общими называются те глобальные переменные, которые выполняют одинаковые функции в исследуемых вариантах архитектуры. Пользователя сам назначает глобальные переменные общими или это делается автоматически средствами ПО (в этом случае, общей становится глобальная переменная, обозначение которой присутствует во всех вариантах, диапазон значений переменной образуется как пересечение диапазонов глобальных переменных каждого варианта).

Решение о целесообразности использования варианта архитектуры УВС (выбор оптимального варианта) принимается на основании вычисленных отношений. Если отношение величин больше 1, исследуемый вариант системы выигрывает по надежности относительно базового.

Пример отображения результатов анализа показан на рисунке 2.4.3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2		l0	ksk	kotk	p	psc	Q1	Q2	Дисп. Q2	Q1/Q2	Q3	Дисп. Q3	Q1/Q3
3		0,1	0,1	0,1	0,904837	0,99005	0,03514117	0,03085	2,11E-06	1,139101	0,030848	2,14E-06	1,13916
4		0,1	0,1	0,3	0,904837	0,99005	0,03514117	0,023002	2,26E-06	1,527733	0,023072	2,27E-06	1,523131
5		0,1	0,1	0,5	0,904837	0,99005	0,03514117	0,016796	2,24E-06	2,092218	0,016934	2,31E-06	2,075193
6		0,1	0,2	0,1	0,904837	0,980199	0,04474168	0,040584	3,99E-06	1,102449	0,040621	3,98E-06	1,101455
7		0,1	0,2	0,3	0,904837	0,980199	0,04474168	0,032855	4,21E-06	1,361798	0,032575	4,13E-06	1,373505
8		0,1	0,2	0,5	0,904837	0,980199	0,04474168	0,02674	4,31E-06	1,673242	0,026818	4,36E-06	1,668347
9		0,1	0,3	0,1	0,904837	0,970446	0,05424666	0,049687	5,64E-06	1,091766	0,049717	5,62E-06	1,091116
10		0,1	0,3	0,3	0,904837	0,970446	0,05424666	0,042141	6,04E-06	1,287276	0,042168	6E-06	1,28643
11		0,1	0,3	0,5	0,904837	0,970446	0,05424666	0,036116	6,24E-06	1,501998	0,036474	6,31E-06	1,487254

Рисунок 2.4.3 – Пример отображения результатов анализа вариантов архитектуры системы

Интерфейс пользователя

Интерфейс пользователя ПО приведен в приложении В.

Тестирование программного обеспечения

Тестирование разработанного ПО проводилось на протяжении всей разработки ПО и сопровождения на разных уровнях. Уровень «модульного тестирования» позволил проверить функционирование отдельно взятого модуля программы, уровень «интеграционного тестирования» – межмодульное взаимодействие программы, уровень «системное тестирование» – работоспособность ПО в целом.

Тестирование работоспособности ПО в целом проводилось моделированием известных структур УВС, оценка надежности которых возможна аналитическими методами (резервированных структур, магистрально-модульных систем, систем с восстановлением). По результатам моделирования получены значения вероятности отказа, погрешность которых не превышает 0,2%. Величина погрешности обусловлена числом экспериментов.

Методика сравнительного анализа вариантов управляющих вычислительных систем с использованием разработанного ПО

Методика сравнительного анализа вариантов архитектуры УВС с использованием разработанного ПО приведена на рисунке 2.4.4. Разработчик на основании требований к функциональному составу УВС и ее структуре выделяет альтернативные варианты, описывает их с помощью разработанного языка моделирования и средствами ПО осуществляет верификацию модели. Если во время верификации выявляются отклонения от описания УВС, пользователь корректирует модель. Далее средствами ПО выполняется анализ вариантов архитектуры. Пользователь анализирует результаты и принимает решение о целесообразности использования того или иного варианта.

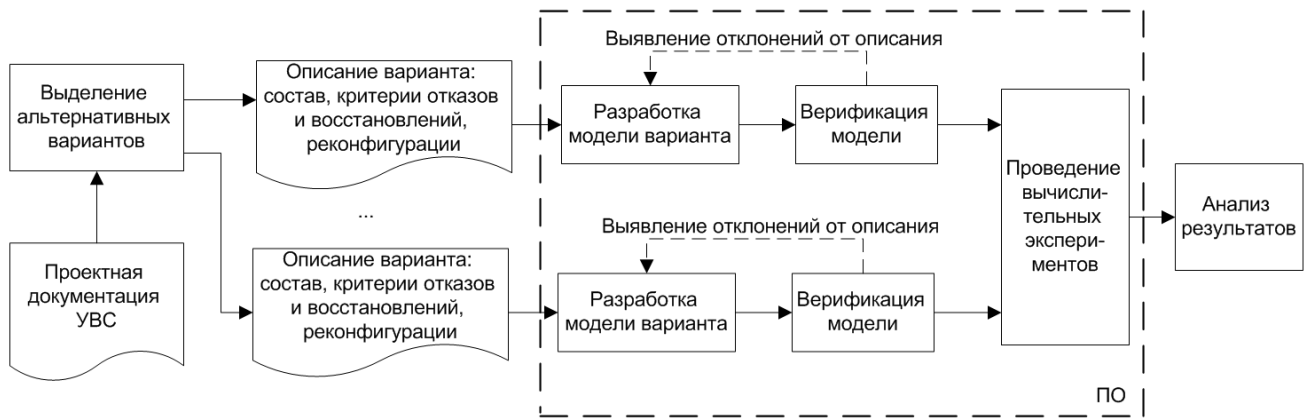


Рисунок 2.4.4 – Схема методики исследования вариантов архитектуры УВС

Выводы

1. Сравнительный анализ надежности вариантов архитектуры управляющих вычислительных систем ракетно-космической техники целесообразно проводить с использованием критерия, которым является отношение вероятностей отказов вариантов на интервале основной работы системы. Переход к относительной оценке позволяет исключить ошибки, связанные с недостоверностью знаний об абсолютных значениях параметров системы и выбрать область предпочтения варианта при изменении параметров систем.

2. Предложена модификация метода статистического моделирования для оценки надежности управляющих вычислительных систем, позволяющая учесть сложные алгоритмы функционирования системы, критерии отказов и восстановлений работоспособности компонентов системы при сбоях, не требующая описания всевозможных состояний системы. Достоверность метода подтверждена совпадением результатов моделирования с аналитическим расчетом тестовых задач и экспериментальными данными, полученными на моделирующем комплексе обработки аппаратуры и программ.

3. На основе предложенного метода и выбранной методики анализа разработано программное обеспечение для исследования надежности систем и обоснования выбора варианта реализации по критерию надежности. Оригинальность

разработанного ПО подтверждается полученным свидетельством о регистрации программы для ЭВМ [31].

4. Случайные числа требуемых распределений могут быть получены преобразованием независимых случайных величин, равномерно распределенных на интервале $[0, 1]$. При проведении вычислительного эксперимента для оценки надежности сложной технической системы по результатам проведенного исследования рекомендовано использовать линейно-конгруэнтные генераторы Лемера (2.3.4) с параметром $Z_0 = 1280689831$.

Глава 3. Повышение надежности управляющих вычислительных систем ракетно-космической техники

3.1 Анализ вариантов резервирования с минимальным уровнем аппаратурной избыточности

Спецификой управляющей вычислительной системы, предназначенной для ракетно-космической техники, являются жесткие ограничения на массу, габариты, стоимость и энергопотребление ее аппаратуры. Введение любого резерва противоречит требованию минимизации аппаратных затрат. Увеличение кратности резервирования для повышения надежности системы не всегда оправдано, так как возрастает суммарный поток отказов: к отказам основных элементов добавляются отказы резервных. Поэтому стоит задача выбора рационального варианта резервирования модулей системы и компонентов модулей с минимальным уровнем аппаратурной избыточности.

Рассмотрены следующие варианты резервирования, которые имеют минимальный уровень аппаратурной избыточности, и применяются для решения задачи повышения надежности систем, создаваемых в «НПО автоматики»:

- троированная система с узлом мажоритации (УМ);
- дублированная система со схемой контроля (СК), в состав которой входят средства контроля и переключатель каналов;
- троированная система со схемой контроля (рисунок 3.1.1).

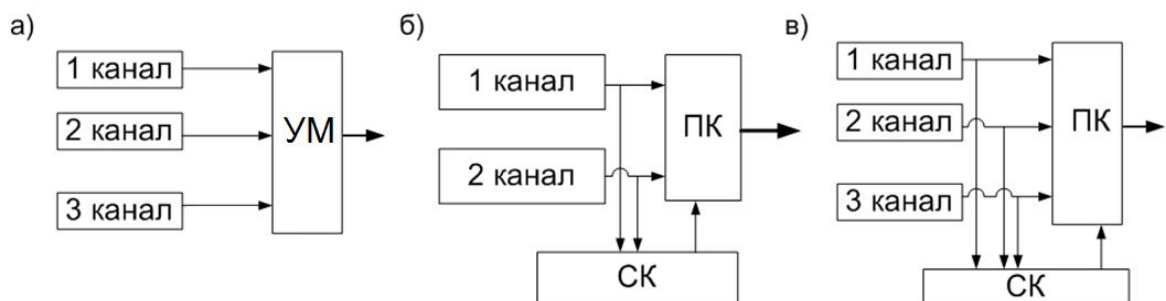


Рисунок 3.1.1 – Структурные схемы вариантов системы:

- а) троированная система с УМ; б) дублированная система с ПК и СК;
- в) троированная система с ПК и СК.

Каждый вариант обеспечивает выполнение основного формального требования к надежности вычислительной системы – сохранение работоспособности при возникновении одной возможной неисправности.

Логика работы троированной системы с мажоритацией следующая. Три канала начинают работать одновременно, синхронно, выполняя одну и ту же программу. Решение об исправности канала принимается по результатам сравнения информации, поступающей со всех трех каналов логическими схемами (реализуется принцип «2 из 3») [39]. В случае отказа одного канала система продолжает работу до тех пор, пока совпадает информация, поступающая с двух исправных каналов. Как только произошло несовпадение информации последних двух исправных каналов, регистрируется отказ системы.

Логика работы системы со схемой контроля следующая. Три канала начинают работать одновременно, синхронно, выполняя одну и ту же программу. Переключатель каналов передает на выход информацию от одного канала, признанного исправным. Исправность канала определяется средствами контроля. По результатам сравнения выходной информации средства контроля с вероятностью 1 определяют первый отказавший канал, если два другие исправны. Если отказали два из трех каналов, средства контроля определяют третий исправный канал с конечной вероятностью β средствами строенного аппаратного контроля или функциональными проверками. Отказ системы происходит, если отказали три канала системы или если переключатель каналов передает информацию с неисправного канала.

Узел мажоритации и переключатель каналов реализованы, например, в [39]. В качестве средств контроля могут выступать встроенные в канал средства аппаратного оперативного контроля (например, средства контроля по mod 3) или средства программно-логического контроля с использованием сторожевого таймера (например, [15]).

Проведен сравнительный анализ надежности вариантов систем. Для получения количественных результатов принят диапазон значений суммарной интенсивности отказов одного канала λ равным $(0.1...0.9)$ час⁻¹, время работы $T = 1$ час,

что достаточно хорошо согласуется с реальными данными, полученными в «НПО автоматики» [65, 84, 85]. Интенсивность отказов схемы контроля: $\lambda_{CK} = k_{CK} \cdot \lambda$, интенсивность отказов узла мажоритарии: $\lambda_{VM} = k_{VM} \cdot \lambda$. Диапазоны значений k_{CK} и k_{VM} приняты для исследования равными (0.1...0.3), что также согласуется с реальными данными. Принятие этих значений допустимо, так как при переходе к относительным оценкам ошибка, связанная с неточностью знания реальной интенсивности отказов, устраняется [20]. Значения β рассматриваются в диапазоне (0.2...0.8), что реально можно получить при практической реализации при приемлемых затратах дополнительного оборудования в части ограничений на массу и габариты вычислительной системы. [65]

Время безотказной работы аппаратуры в силу большого количества входящих в нее элементов подчиняется экспоненциальному закону распределения [49]. Вероятность безотказной работы одного канала системы в интервале работы $[0, t]$ может быть найдена по формуле:

$$p(t) = \exp(-\lambda t). \quad (3.1.1)$$

Вероятность безотказной работы УМ, равна:

$$p_{VM}(t) = \exp(-k_{VM} \cdot \lambda t). \quad (3.1.2)$$

Вероятность безотказной работы схемы контроля равна:

$$p_{CK}(t) = \exp(-k_{CK} \cdot \lambda t). \quad (3.1.3)$$

Вероятности отказа систем могут быть найдены аналитическими методами: методом перебора [119; с. 97] или матричным методом [116; с. 54].

Вероятность отказа системы с мажоритарией вычисляется по формуле:

$$Q_1(t) = 1 - p_{VM} (3 \cdot (1 - p(t))p^2(t) + p^3(t)) \quad (3.1.4)$$

Вероятность отказа дублированной системы со схемой контроля вычисляется по формуле:

$$Q_2(t) = 1 - p_{CK} (2 \cdot \beta \cdot (1 - p(t))p(t) + p^2(t)) \quad (3.1.5)$$

Вероятность отказа троированной системы со схемой контроля вычисляется по формуле:

$$Q_3(t) = 1 - p_{CK} (3\beta \cdot (1 - p(t))^2 p(t) + 3p^2(t)(1 - p(t)) + p^3(t)) \quad (3.1.6)$$

На рисунках 3.1.2 – 3.1.4 приведены графики относительного изменения вероятности отказа систем с различными значениями вероятности обнаружения отказа ($\beta = 0.2, 0.5, 0.8$), интенсивностей отказов схемы контроля ($k_{CK} = 0.1, 0.2, 0.3$) и узла мажоритации ($k_{УМ} = 0.1, 0.2, 0.3$) вариантов со схемой контроля. Через Q на графиках обозначена вероятность отказа рассматриваемого варианта резервирования. В качестве базового значения вероятности отказа ($Q_{\text{баз}}$) принята оценка вероятности отказа нерезервированной вычислительной системы (системы, состоящей из одного канала).

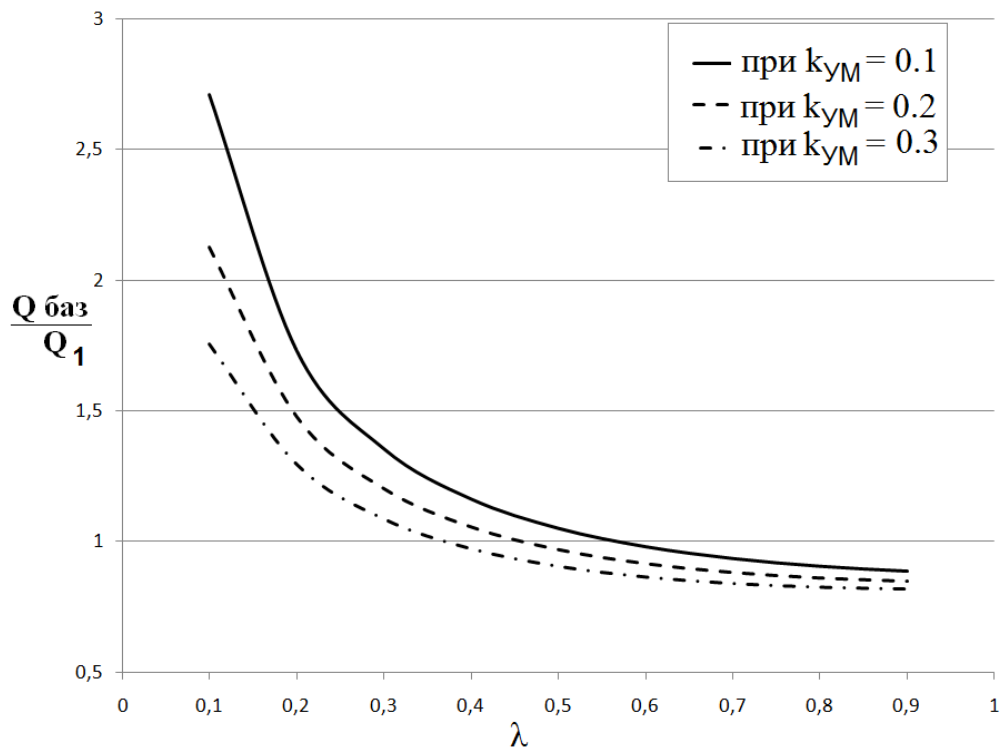


Рисунок 3.1.2 – Относительное изменение вероятностей отказов троированного варианта с мажоритацией

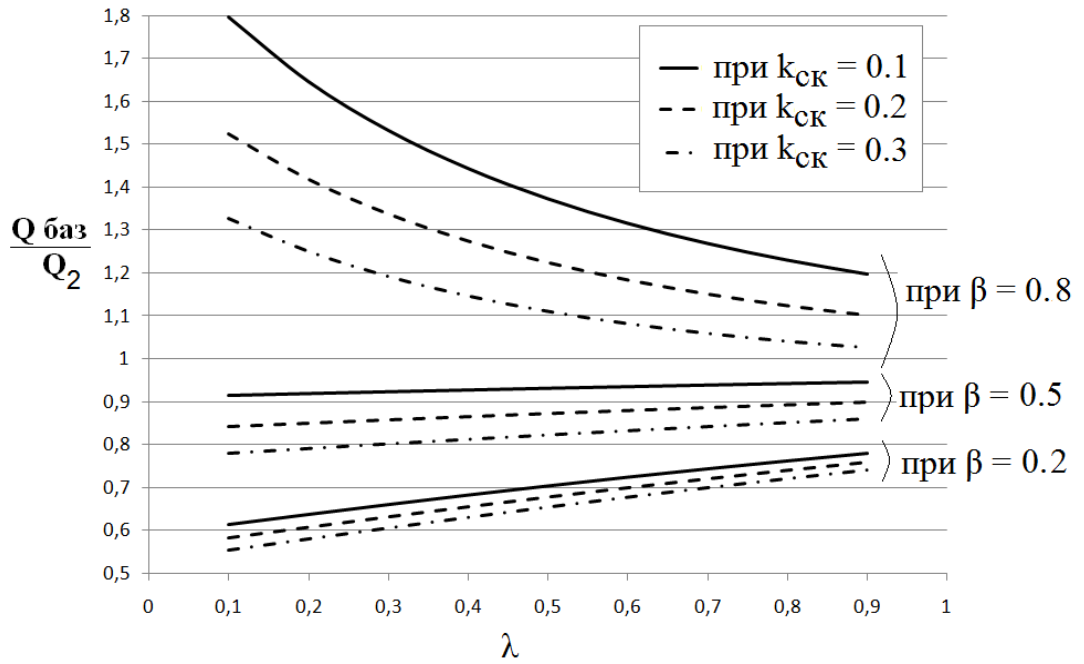


Рисунок 3.1.3 – Относительное изменение вероятностей отказов дублированного варианта

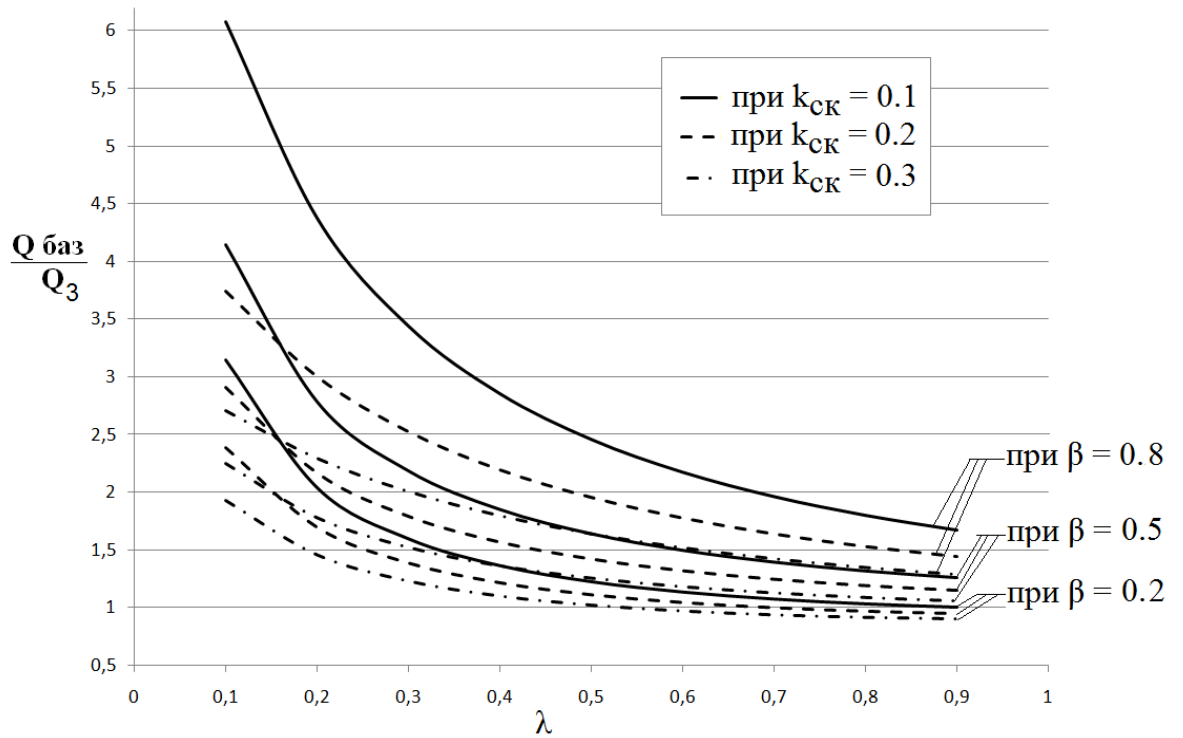


Рисунок 3.1.4 – Относительное изменение вероятностей отказов троированного варианта со схемой контроля

Из графиков видно, что при невысокой эффективности контрольного оборудования ($\beta < 0.8$) дублированный вариант проигрывает по надежности нерезервированному варианту и уступает по надежности при всех значениях рассматриваемых параметров троированному варианту со схемой контроля.

Троированный вариант с мажоритацией проигрывает по надежности нерезервированному варианту при высокой интенсивности отказов канала ($\lambda > 0.55$) и уступает по надежности троированному варианту со схемой контроля при всех значениях рассматриваемых параметров.

Троированный вариант со схемой контроля проигрывает по надежности нерезервированному варианту при высокой интенсивности отказов канала ($\lambda > 0.6$) и крайне низкой эффективности контрольного оборудования ($\beta < 0.2$). Применение троированного варианта со схемой контроля целесообразно, если обеспечена эффективность контрольного оборудования на уровне $\beta = 0.6$, что реально можно получить при разработке системы.

По результатам сравнения вариантов для практической реализации вычислительной системы можно рекомендовать трехканальный вариант со средствами контроля отказов и переключателем каналов. Решение по выбору варианта резервирования устойчиво к изменению интенсивности отказов в реально возможных диапазонах.

3.2 Повышение надежности управляющих вычислительных систем резервированием источника вторичного электропитания

Для повышения надежности управляющих вычислительных систем реализуется резервирование на уровне модулей и компонентов модулей с использованием принципа мажоритации «2 из 3». Наличие узлов мажоритации при построении аппаратуры на основе КМОП элементов требует строго идентичных номиналов напряжения питания разных каналов резерва, так как при отклонении питания одного из каналов его выходные сигналы элементами мажоритации двух других каналов воспринимаются с разными логическими уровнями и каналы и информа-

ция в каналах резерва становится различной, что может привести к «развалу» мажоритированных узлов.

Задача обеспечения надежным идентичным питанием трехканальных цифровых вычислительных устройств может решаться различными путями. В частности в САУ, создаваемых в «НПО автоматики», используется запитка БЦВС от отвода химического источника тока, что одновременно решает и задачу обеспечения радиационной стойкости источника питания БЦВС к ионизирующим излучениям космического пространства. Однако этот вариант, несмотря на его очевидные достоинства, имеет существенный недостаток, заключающийся в общем внутреннем сопротивлении источника тока для цифровой аппаратуры и сильно-точной коммутации. [21] При работе последней возникают мощные коммутационные помехи, нарушающие работу цифровой аппаратуры, поэтому для питания аппаратуры коммутации используют вторичные источники электропитания (ИВЭП), реализуемые, как правило, как статические преобразователи.

Необходимость обеспечения надежности ИВЭП привела к решению задачи повышения их надежности путем резервирования, что достаточно сложно, так как при работе, по крайней мере, двух источников на общую нагрузку возможно в случае повышения напряжения питания на выходе одного из источников «подавление» им другого и, как следствие, отказ одного или обоих источников.

Задача резервирования ИВЭП решена в изобретении «Резервированный источник тока» [22]. Однако для практического применения предложенного решения необходимо исследование вариантов возможной приборной реализации ИВЭП и проведение сравнительного анализа надежности вариантов с целью выбора оптимального решения. Сравнительный анализ надежности вариантов целесообразно проводить при различных потоках отказов и соотношениях интенсивностей катастрофических отказов (вызванных старением, отказами комплектующих элементов, производственными дефектами, не выявленными на этапе изготовления, дефектами, возникшими в процессе работы из-за действия температуры, индуцированного проникающего ионизирующего излучения, действия тяжелых заряженных частиц космического пространства и др. факторами) и парамет-

рических отказов (вызванных деградацией параметров элементов из-за температуры, дозовых факторов ионизирующего излучения и др. факторами).

Рассмотрим следующие варианты резервирования ИВЭП, основанные на практических проработках приборной реализации:

- дублированная система со схемой контроля и переключателем каналов;
- троированная система со схемой контроля и схемой отключения канала, выходное напряжение которого существенно (десятки мВ) отклоняется от рабочего номинала из-за катастрофических отказов элементов канала;
- троированная система со схемой контроля, схемой отключения канала и схемой нейтрализации параметрического отказа, приводящего к небольшим (единицы мВ) отклонениям выходного напряжения канала. Схема нейтрализации отказа является по сути сумматором напряжений каналов.

Структурные схемы вариантов резервирования ИВЭП приведены на рисунке 3.2.1.

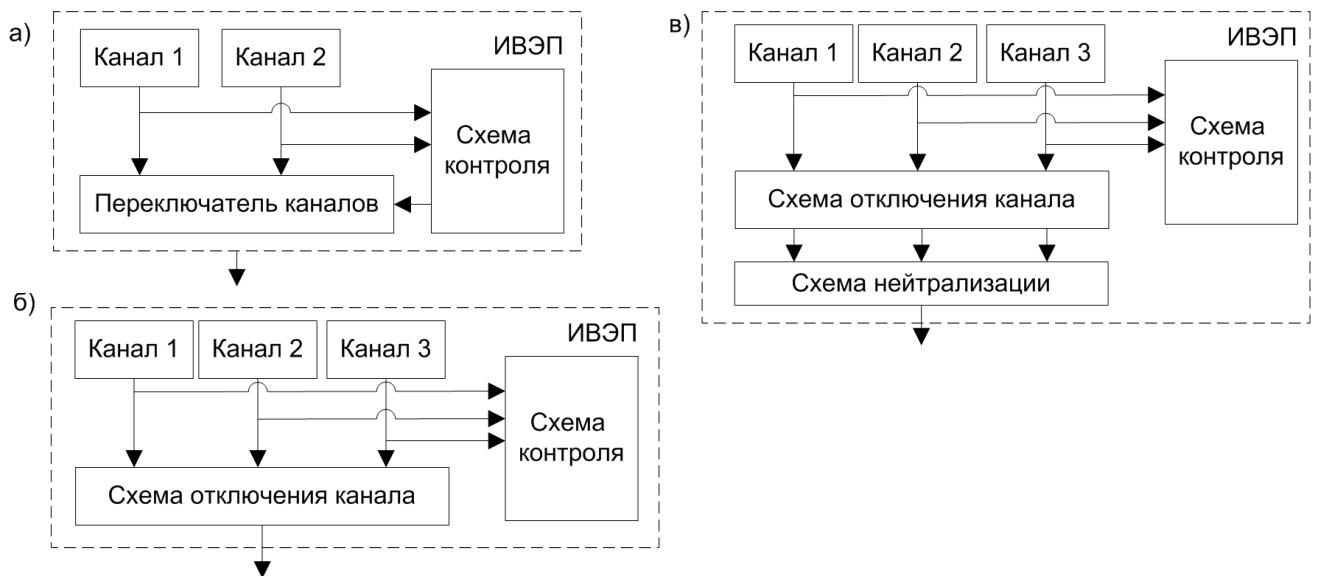


Рисунок 3.2.1 – Структурные схемы ИВЭП: а) дублированный вариант; б) троированный вариант; в) троированный вариант со схемой нейтрализации отказа

Схема контроля в дублированном варианте с вероятностью β определяет отказавший канал и обеспечивает переключение канала по результатам работы.

Схема контроля в троированном варианте с вероятностью 1 определяет первый отказавший канал, с вероятностью β – второй и обеспечивает переключение канала по результатам работы. Схема нейтрализации отказа с вероятностью γ обеспечивает нейтрализацию параметрического отказа канала, если два других канала исправны.

Относительный вес параметрических отказов в общем потоке отказов определяется по формуле:

$$K = \lambda_{\text{пар}} / (\lambda_{\text{пар}} + \lambda_{\text{кат}}), \quad (3.2.1)$$

где $\lambda_{\text{пар}}$ – интенсивность параметрических отказов, $\lambda_{\text{кат}}$ – интенсивность катастрофических отказов.

Для получения количественных результатов примем диапазон значений суммарной интенсивности отказов одного канала $\lambda = \lambda_{\text{пар}} + \lambda_{\text{кат}}$ равным (0.1...0.9) час⁻¹, время работы $T = 1$ час, что достаточно близко соответствует реальности по данным эксплуатации систем управления, созданных в «НПО автоматики» ([84, 85]). Интенсивность отказов средств контроля (схема контроля совместно со схемой отключения канала) обозначим через $\lambda_{\text{СК}} = k_{\text{СК}} \cdot \lambda$, интенсивность отказов схемы нейтрализации отказа – через $\lambda_{\text{СН}} = k_{\text{СН}} \cdot \lambda$. Диапазон значений $k_{\text{СК}}$ и $k_{\text{СН}}$ примем для исследования равным (0.1...0.3). Принятие этих значений допустимо, так как при переходе к относительным оценкам ошибка, связанная с неточностью знания реальной интенсивности отказов, устраняется. Значения β будем рассматривать в диапазоне (0.2...0.8), значения γ – (0.5...0.8), что реально можно получить при практической реализации при приемлемых затратах дополнительного оборудования в части ограничений на массу и габариты источника питания.

Вероятность отказа дублированного варианта может быть определена по формуле (3.1.4), вероятность отказа троированного варианта без схемы нейтрализации отказа – по формуле (3.1.5). Вероятность отказа троированной системы со схемой нейтрализации отказа определим методом, предложенным в разделе 2.2 диссертационной работы.

На рисунках 3.2.2, 3.2.3 приведены графики относительного изменения вероятности отказа с различными значениями вероятности обнаружения отказа ($\beta = 0.2, 0.5, 0.8$) и интенсивности отказов схемы контроля ($k_{СК} = 0.1, 0.2, 0.3$) дублированного варианта и троированного варианта без схемы нейтрализации отказа. На рисунках 3.2.4, 3.2.5 приведены графики относительного изменения вероятности отказа троированной системы со схемой нейтрализации отказа при различных значениях доли параметрических отказов ($K = 0.1, 0.3, 0.5$), вероятности обнаружения отказа ($\beta = 0.2, 0.5, 0.8$) и вероятности нейтрализации параметрического отказа канала ($\gamma = 0.5, 0.8$). Через Q на графиках обозначена вероятность отказа рассматриваемого варианта резервирования. В качестве базового значения вероятности отказа ($Q_{\text{баз}}$) принята оценка вероятности отказа нерезервированного ИВЭП.

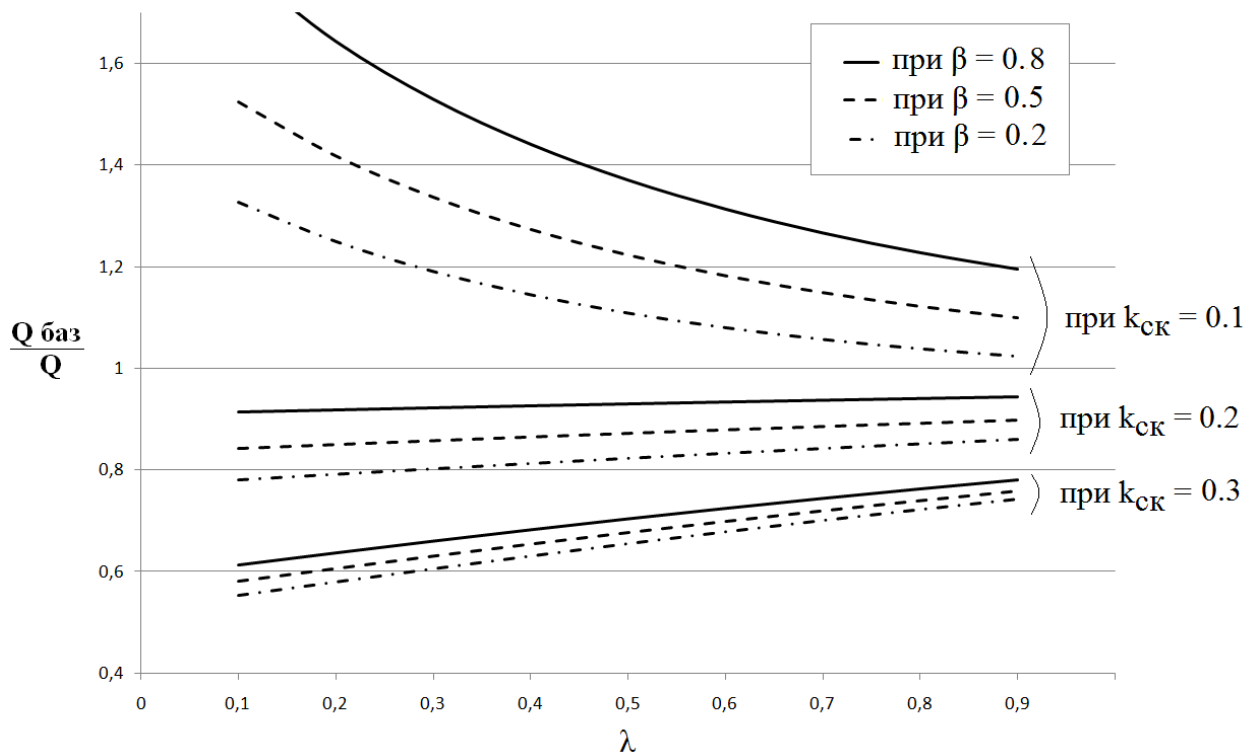


Рисунок 3.2.2 – Относительное изменение вероятностей отказов дублированного варианта

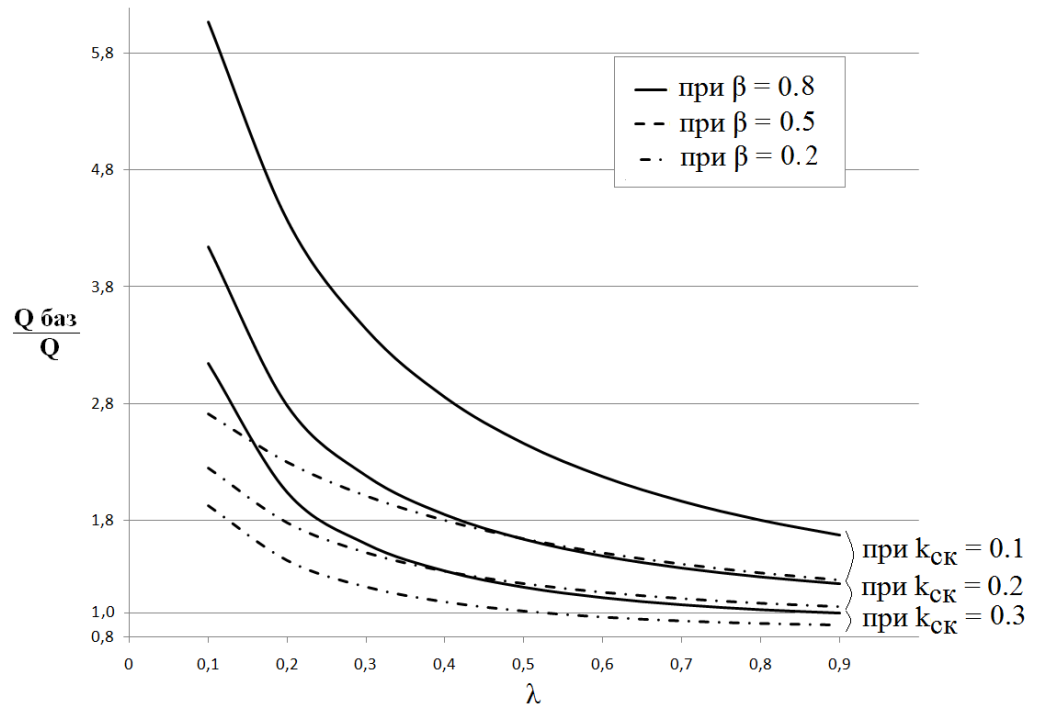


Рисунок 3.2.3 – Относительное изменение вероятностей отказов трюированного варианта без схемы нейтрализации отказов

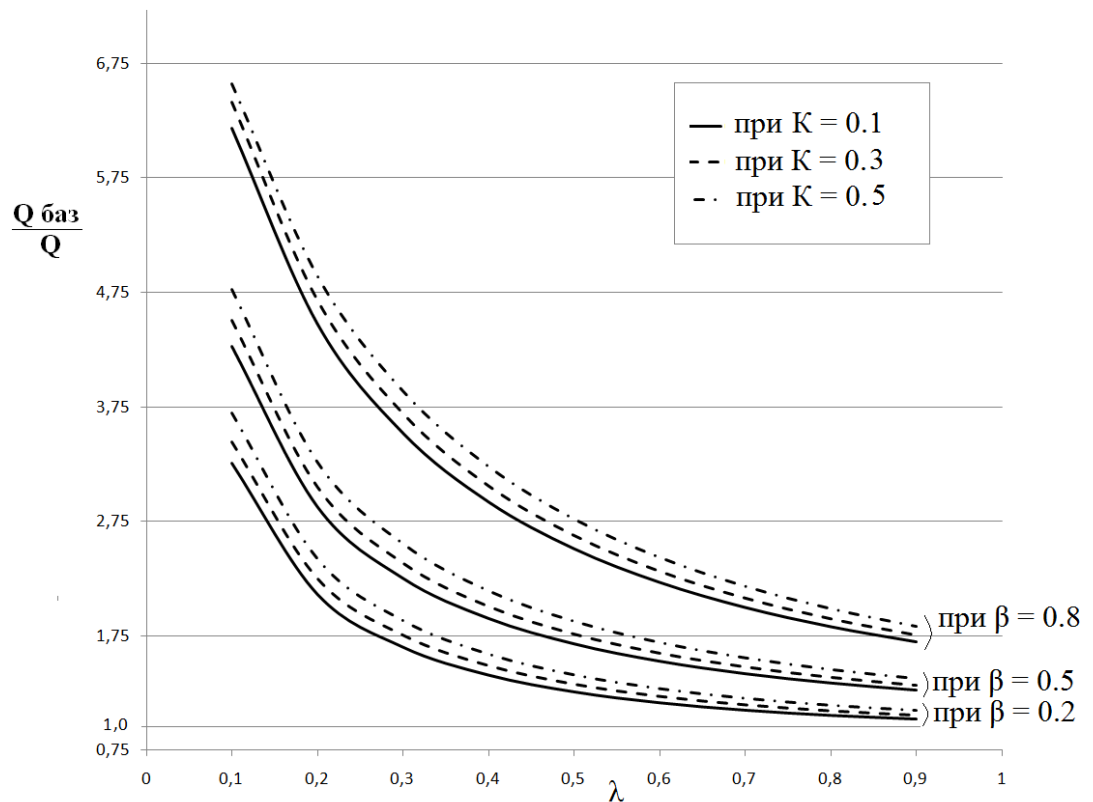


Рисунок 3.2.4 – Относительное изменение вероятностей отказов трюированного варианта со схемой нейтрализации при $\gamma = 0.5$, $k_{\text{СК}} = 0.1$, $k_{\text{СН}} = 0.3$

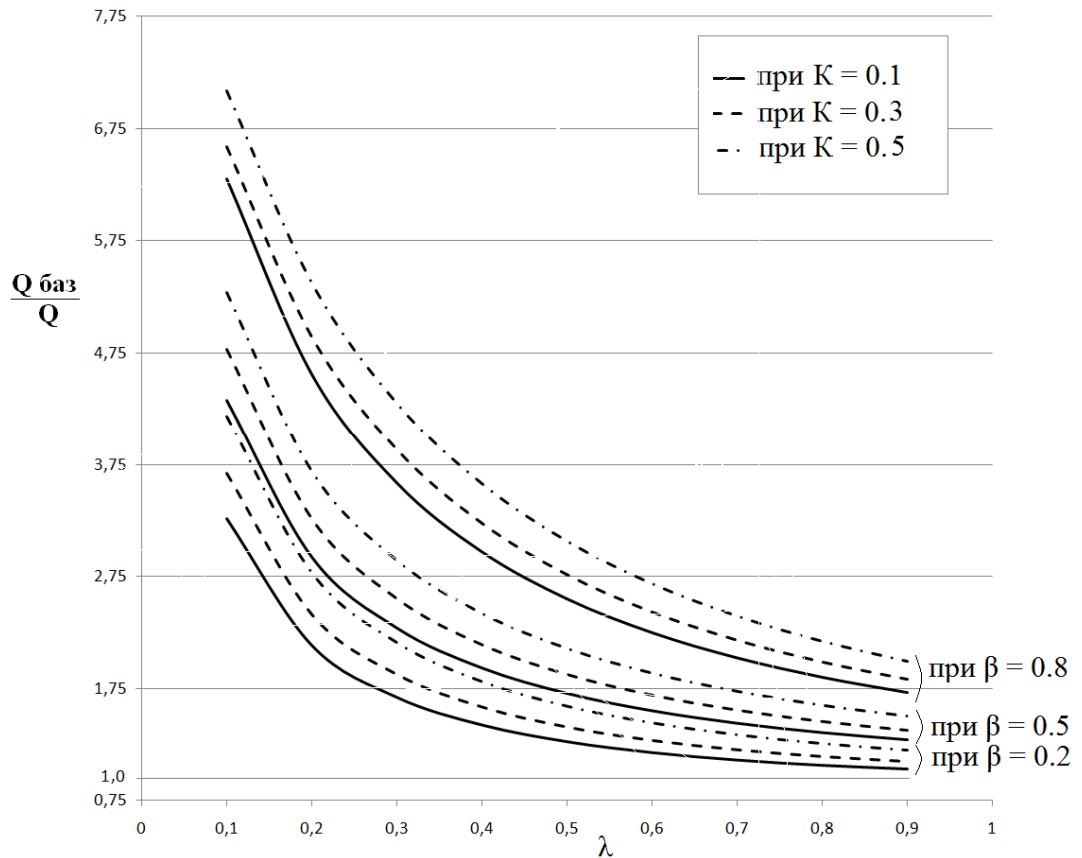


Рисунок 3.2.5 – Относительное изменение вероятностей отказов троированного варианта со схемой нейтрализации отказа при $\gamma = 0.8$, $k_{CK} = 0.1$, $k_{CH} = 0.3$

Анализ результатов исследования показывает, что при невысокой интенсивности отказов контрольного оборудования ($k_{CK} \geq 0.2$) дублированный вариант проигрывает по надежности нерезервированному и троированному варианту резервирования. Изменение надежности для троированного варианта со схемой нейтрализации отказа связано с относительной долей параметрических отказов в общем потоке отказов: при одинаковой суммарной интенсивности отказов эффективность резервирования со схемой нейтрализации отказа тем выше, чем меньше относительный вес катастрофических отказов в общем потоке отказов.

По результатам сравнения вариантов для практической реализации ИВЭП для аппаратуры САУ рекомендован трехканальный вариант со средствами контроля катастрофических и параметрических отказов, схемой отключения канала и схемой нейтрализации отказа, устанавливаемой на выходе после устройства отключения неисправного канала.

Реализация схем отключения канала и нейтрализации отказа требует установки дополнительного к основному (собственно, источнику питания) функционала. В связи с этим проведено рассмотрение приборной реализации рекомендуемого варианта резервирования ИВЭП и оценка возможных затрат на реализацию [21]. Сделан вывод о соответствии варианта требованиям к аппаратуре в части ограничений на массу, габариты и стоимость.

3.3 Повышение надежности системного модуля бортовой цифровой вычислительной системы модификацией блока контроля

В магистрально-модульной УВС исправный модуль определяется путем периодического сравнения результатов решения циклических задач, проведенных модулями группы. Системный модуль в силу ограничений на массу, габариты и энергопотребление САУ может быть выполнен как трехканальная вычислительная система, содержащая в каждом канале вычислительное устройство, информационный выход которого подключен к блоку контроля, предназначенному для определения неисправного канала (рисунок 3.3.1).

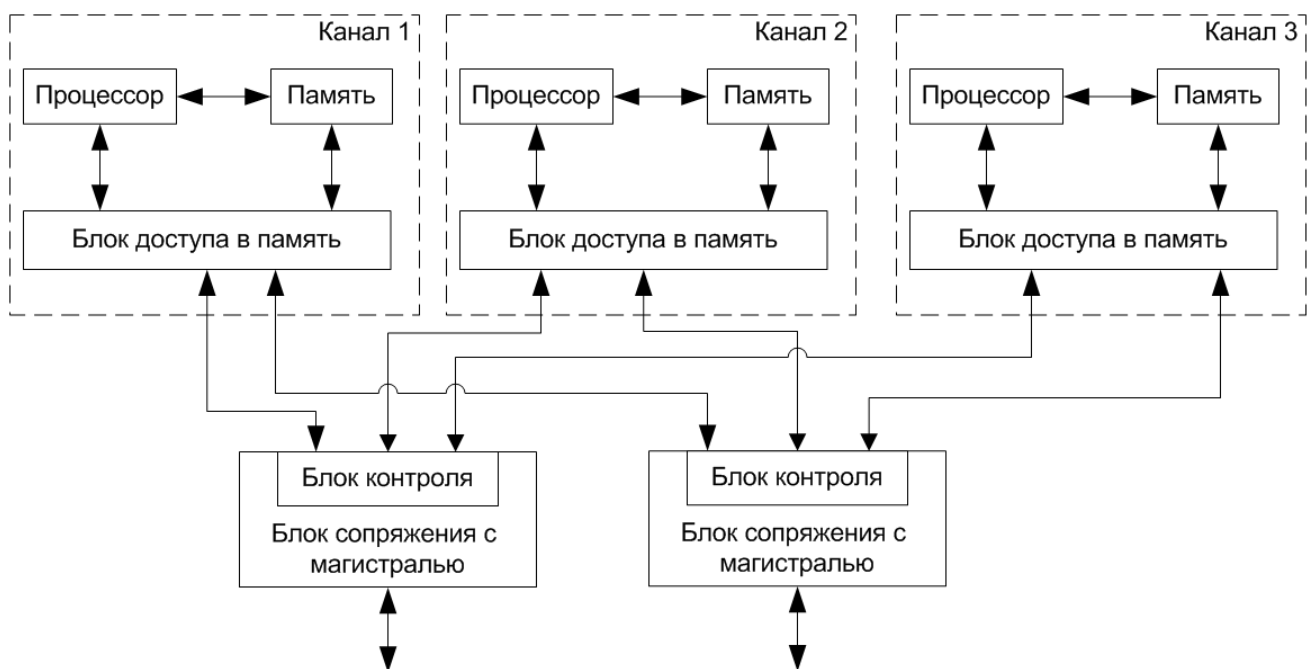


Рисунок 3.3.1 – Структура системного модуля

Специалистами «НПО автоматики» предложен ряд решений по реализации такого контроля [14, 15, 34]. Рассмотрим блок контроля, применяемый в составе системного модуля БЦВС ракетносителя «Союз-2».

Блок контроля системного модуля содержит три буферных регистра, входы которых подключены к информационным выходам каналов, три схемы совпадения, обеспечивающие сравнение данных, триггеры неисправностей (ТН) для хранения признака неисправности канала и контрольную группу логических элементов (КГ). Выход каждого буферного регистра подключен к входам двух схем совпадения так, чтобы обеспечивалось попарное сравнение данных. Выход каждой схемы совпадения подключен к соответствующему триггеру неисправности. Выходы всех ТН подключены к КГ, выходы которой являются выходами блока. Структурная схема блока контроля приведена на рисунке 3.3.2.

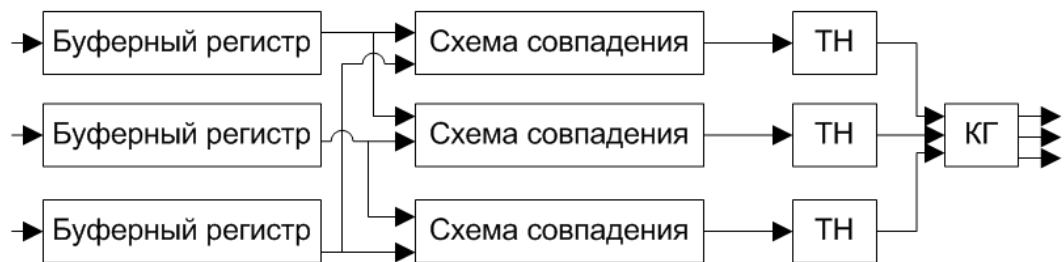


Рисунок 3.3.2 – Структура блока контроля

Блок контроля фиксирует отказ, возникающий в одном из каналов системного модуля при правильной работе двух других каналов. При фиксации отказа выставляется признак неисправности канала, канал бракуется и работа с ним не ведется. Возможно восстановление канала посредством перекачки информации в отказавший канал из двух исправных каналов, однако эта процедура требует прекращения процесса управления на время перекачки данных и не дает гарантии восстановления работоспособности отказавшего канала.

Компоненты канала (процессор, память, блок доступа в память и др.) в приборной реализации модуля выполнены на основе радиационно-стойкой элементной базы. При работе в экстремальных условиях возможно искажение данных на

локальных шинах модуля, которое существующий блок контроля воспримет как неисправность, а не однократный сбой канала.

С целью повышения диагностичности автором диссертационной работы предложена модификация блока контроля, суть которой в том, что каналу «разрешено» ошибаться некоторое пороговое число раз ($N_{\text{порог}}$). В существующий вариант блока контроля введены счетчики и триггеры сбоев. Если по результатам работы схемы совпадения сформирован признак несравнения данных, увеличивается значение счетчика сбоев канала. Если значение счетчика станет равным $N_{\text{порог}}$, формируется признак неисправности канала. Начальное значение счетчика сбоев – ноль.

В предложенной схеме предполагается, что первые $N_{\text{порог}}$ отказы являются сбоями, а не неисправностями. Это допущение обосновано тем, что выдача данных из канала осуществляется достаточно часто и если в канале действительно неисправность, счетчик сбоев достаточно быстро достигнет значения $N_{\text{порог}}$ и сформируется признак неисправности канала.

Следует отметить также, что в приборной реализации модуля введение счетчиков и триггеров сбоев не потребует дополнительных аппаратных затрат на реализацию блока контроля. Блок контроля выполнен на базе программируемой логической интегральной схемы.

Структурная схема модификации блока контроля приведена на рисунке 3.3.3. Блок контроля содержит три буферных регистра, входы которых подключены к информационным выходам каналов модуля, три схемы совпадения, три счетчика сбоев (СБ), триггеры сбоев (ТС) и триггеры неисправностей, элементы «И» (И) и группу контрольных логических элементов (КГ). Выход каждого буферного регистра подключен к входам двух схем совпадения так, чтобы обеспечивалось попарное сравнение данных. Выход каждой схемы совпадения подключен к первому входу соответствующей каждой схеме элемента «И» и к входу счетчика сбоев, выход которого подключен к входу соответствующему каждому счетчику триггера сбоев, выход которого подключен ко второму входу соответствующему каждому триггеру элемента «И», подключенного выходами к триггерам

неисправностей, выходы которых подключены к группе контрольных логических элементов, выходы которой являются выходами блока.

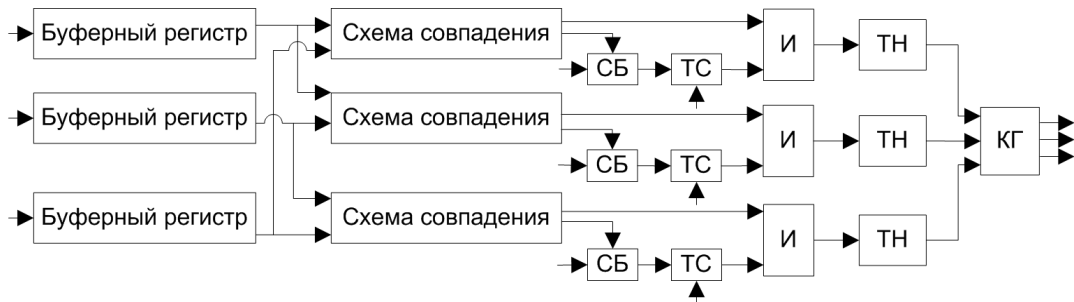


Рисунок 3.3.3 – Структура модификации блока контроля

Для оценки целесообразности введения предложенной модификации требуется провести сравнительную оценку надежности модуля с разными вариантами реализации блока контроля. Воспользуемся методикой анализа, предложенной в разделе 2.1 диссертационной работы.

Найдем вероятность отказа модуля с существующим блоком контроля (Q_1) методом аналитического расчета. Обозначим через λ интенсивность отказов в канале, $\lambda_{БК}$ – интенсивность отказов блока контроля. Время безотказной работы канала подчиняется экспоненциальному закону распределения, поэтому вероятность безотказной работы канала равна

$$p = \exp(-\lambda \cdot T_{раб}), \quad (3.3.1)$$

где $T_{раб}$ – время основной работы модуля.

Вероятность безотказной работы блока контроля равна

$$p_{БК} = \exp(-\lambda_{БК} \cdot T_{раб}). \quad (3.3.2)$$

Каналы модуля идентичны, работают синхронно друг с другом, поэтому вероятность отказа модуля на интервале работы $[0, T_{раб}]$ равна:

$$Q_1 = 1 - p_{БК}(p^3 + 3p^2(1 - p)). \quad (3.3.3)$$

Вероятность отказа модуля с модификацией блока контроля (Q_2) определим методом имитационного моделирования, представленным в разделе 2.2 диссертационной работы.

Система состоит из $n = 4$ элементов: A_1, A_2, \dots, A_n . A_1 соответствует блоку контроля, A_2, A_3, A_4 – каналам системы. Каждый i -ый элемент ($\forall i \in \overline{1, n}$) характеризуется следующими параметрами:

- λ_i – интенсивность отказа элемента в интервале работы $[0, T_{\text{раб}}]$;
- z_i – признак работоспособности элемента: значение 0 соответствует отказу элемента, 1 – его исправности.

Параметры модели для оценки надежности:

- T – оставшееся время работы системы;
- q – вероятность возникновения отказа хотя бы одного элемента системы на оставшемся интервале работы;
- τ – момент времени возникновения отказа хотя бы одного элемента системы на оставшемся интервале работы.

В связи с тем, что каналы модуля идентичны и работают синхронно друг с другом, $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda$. Вероятность q и момент времени τ вычисляются по формулам (2.2.3) и (2.2.4) соответственно.

Разделим общий поток отказов канала модуля на поток сбоев и неисправностей. Интенсивность отказов канала λ будет определяться тогда как $\lambda = \lambda_{\text{сб}} + \lambda_n$, где $\lambda_{\text{сб}}$ – интенсивность сбоев канала, λ_n – интенсивность неисправностей канала. Любой отказ в блоке контроля модуля приводит к отказу системы в целом.

Относительный вес сбоев в общем потоке отказов канала модуля определяется по формуле:

$$K = \lambda_{\text{сб}} / (\lambda_{\text{сб}} + \lambda_n). \quad (3.3.4)$$

Обозначим через N_i значение счетчика сбоев i -го канала.

Вероятность отказа модуля в l -м испытании Q_l находится согласно следующему алгоритму.

1. Положить $Q_l = 1$, $T = T_{\text{раб}}$. Для $\forall i \in \overline{1, n}$ положить $z_i = 1$. Положить $N_2 = 0$, $N_3 = 0$, $N_4 = 0$.

2. Сгенерировать ξ – равномерно распределенное число в интервале от 0 до 1. Рассчитать вероятность q и момент времени τ на интервале работы $[0, T]$ по формулам (2.2.3), (2.2.4) соответственно. Положить $Q_i = Q_i \cdot q$.

3. Найти статистическое место отказа – j -й элемент системы.

Если $j = 1$, произошел отказ блока контроля, а, значит, отказ модуля в целом. Стоп.

Если $j \neq 1$, определить тип отказа. Если отказ – это неисправность, положить $z_j = 0$. Если отказ – это сбой, положить $N_{j-1} = N_{j-1} + 1$. Если $N_{j-1} = N_{\text{порог}}$, положить $z_j = 0$.

Рассчитать оставшийся интервал работы: $T = T - \tau$.

4. Если $z_2 + z_3 + z_4 = 1$ (остался исправным один канал модуля), стоп. Иначе перейти на п. 2.

Тип отказа определяется согласно следующему алгоритму:

1. Моделировать возникновение сбоя с вероятностью K (см. раздел 2.2 диссертационной работы).

2. Если событие возникло – считать отказ сбоем. Если событие не возникло, считать отказ неисправностью.

Для получения количественных результатов примем диапазон значений суммарной интенсивности отказов одного канала равным $(0.1...0.9)$ час⁻¹, время работы $T_{\text{раб}} = 1$ час, что достаточно близко соответствует реальности по данным эксплуатации систем управления, созданных в «НПО автоматики. Интенсивность отказов блока контроля обозначим $\lambda_{БК} = k_{БК} \cdot \lambda$. Диапазон значений $k_{БК}$ примем для исследования равным $(0.1...0.3)$.

Рассмотрим также влияние порогового числа сбоев на изменение вероятности отказа модуля при изменении доли сбоев в общем потоке отказов.

На рисунках 3.3.4, 3.3.5 приведены графики относительного изменения вероятности отказа модуля с различными значениями интенсивности отказов блока контроля ($k_{БК} = 0.1, 0.2, 0.3$) и доли параметрических отказов ($K = 0.1, 0.3, 0.5$). Из графиков видно, что существующий вариант блока контроля проигрывает по надежности предложенной модификации блока при всех значениях рассматриваемых

мых параметров. Для приборной реализации системного модуля целесообразно использовать вариант блока контроля с счетчиками сбоев.

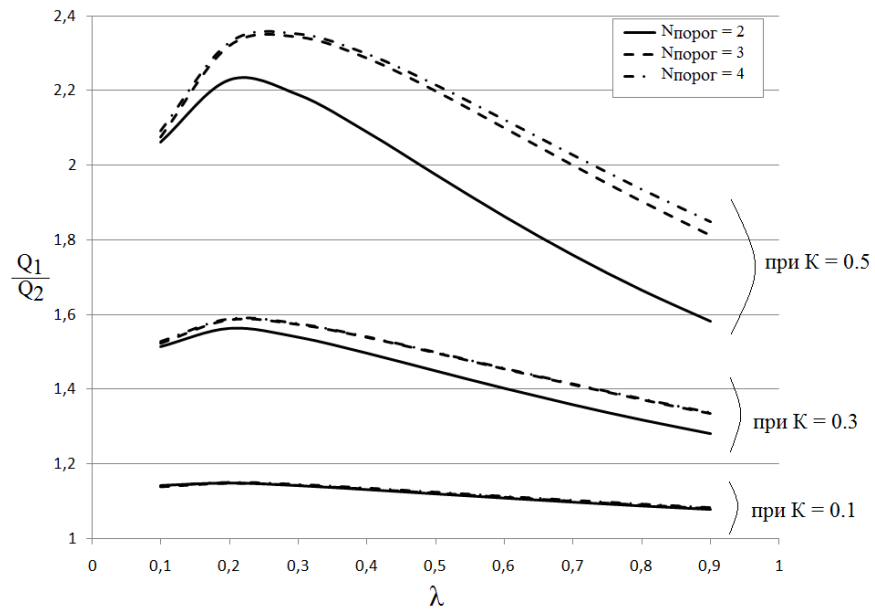


Рисунок 3.3.4 – Относительное изменение вероятностей отказов вариантов при $k_{CK} = 0.1$

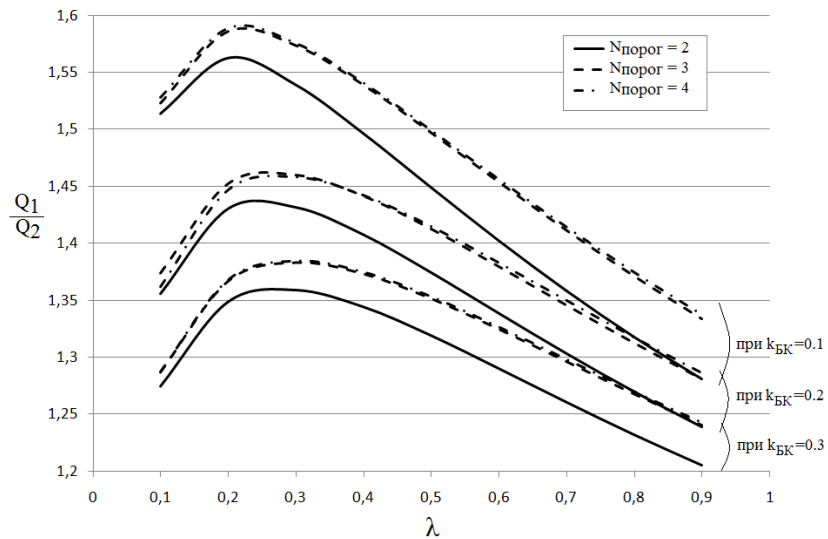


Рисунок 3.3.5 – Относительное изменение вероятностей отказов вариантов при $K = 0.3$

Предложенная модификация блока контроля стала частью изобретения «Сбоеустойчивая вычислительная система» [36].

3.4 Повышение надежности управляющей вычислительной системы совершенствованием технических решений

3.4.1 Апробация технологии SpaceWire модулем управляющей вычислительной системы

Одним из принципиальных моментов создания систем управления для ракетно-космической техники является необходимость разработки и внедрения новых технических решений, предназначенных для повышения надежности систем. Одной из перспективных и развиваемых технологий сегодня является технология SpaceWire [128], предназначенная для организации межмодульных соединений, которая разрабатывалась в соответствие с такими требованиями аэрокосмического применения, как высокие скорости передачи информации (2 – 400 Мбит/с), малые задержки доставки сообщений, устойчивость к отказам и сбоям, низкое энергопотребление, компактная реализация в СБИС, поддержка систем реального времени и системных функций бортовых комплексов. SpaceWire внедрена как базовая Европейским космическим агентством ESA, космическими агентствами NASA (США), JAXA (Япония). [124]

Стандарт SpaceWire выделяет шесть уровней протокола:

- физический уровень – определяет физические разъемы и кабели, технические требования по обеспечению электромагнитной совместимости;
- сигнальный уровень – определяет кодирование сигналов, уровни напряжений, скорость передачи данных и др.;
- символьный уровень – определяет структуру данных и команд для передачи по линиям связи;
- уровень обмена – обеспечивает установление и управление соединением точка-точка, включая инициализацию канала связи, управления потоком данных, перезапуск соединения, обнаружение ошибок и сбоев;
- пакетный уровень – определяет порядок передачи данных в виде пакетов;

– сетевой уровень – определяет архитектуру сети SpaceWire, маршрутизацию пакетов в сетевых узлах. [128]

Контроллер SpaceWire входит в состав процессоров ОАО НПЦ «ЭЛВИС» серии «Мультикор» [79, 106], реализация контроллера охватывает уровни SpaceWire от сигнального до сетевого. Применение такого процессора в составе модуля управляющей вычислительной системы сводит задачу поддержки интерфейса SpaceWire к задачам компоновки разъемов SpaceWire и программной реализации алгоритмов взаимодействия по интерфейсу. [103]

Рассмотрим модуль связи, являющийся компонентом вычислительной системы [15]. В его состав входят процессор, запоминающее устройство для хранения данных, формирователь синхроимпульсов для формирования управляющих сигналов компонентам модуля, блок связи с магистралью (БСМ) для сопряжения модуля с магистралью БЦВС «Малахит» [8], кодирующе-декодирующее устройство и приемо-передающее устройство (ППУ) канала связи по интерфейсу ГОСТ Р 52070-2003 [63]. Структурная схема модуля приведена на рисунке 3.4.1.1.

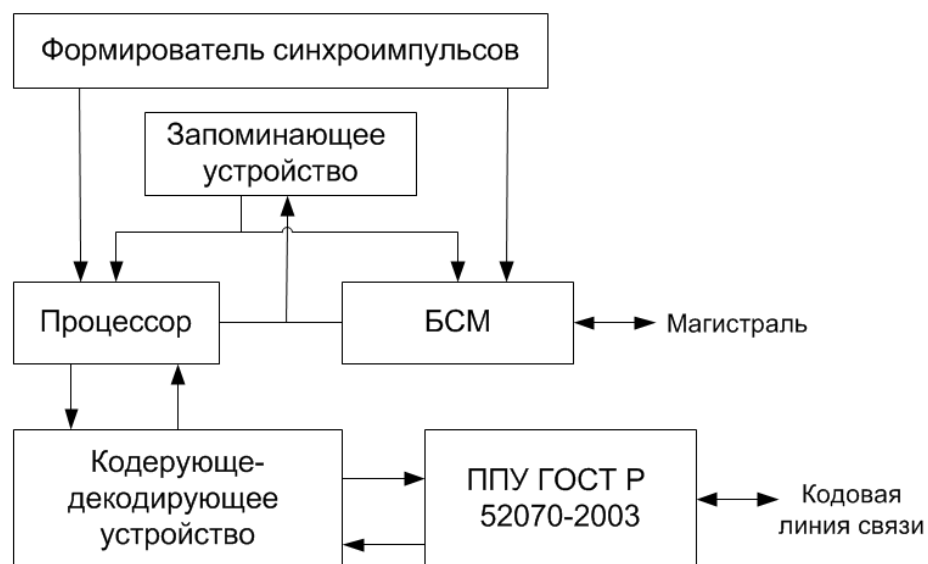


Рисунок 3.4.1.1 – Структурная схема модуля

В качестве процессора модуля связи может быть использован процессор 1892ВМ8Я ОАО НПЦ «ЭЛВИС» [79]. Кроме поддержки SpaceWire, он отвечает основным требованиям, предъявляемым к вычислительным модулям БЦВС для

реализации высокоточных вычислений: наличие 32-битной шины адреса/данных, кэша команд, сопроцессора арифметики в формате с плавающей точкой, двух ядер. Производительность процессора – не менее 80 млн операций/сек при тактовой частоте 80 МГц. Поэтому модуль связи, имеющий в составе процессор 1892ВМ8Я, может быть использован в качестве вычислительного модуля управляющей вычислительной системы, построенной по магистрально-модульному принципу. Для отличия от других модулей связи модуль с процессором 1892ВМ8Я называется специализированным вычислительным модулем (СВМ).

Специалистами «НПО автоматики» на основании требований к СВМ проведено рассмотрение приборной реализации модуля. Автор диссертационной работы принял непосредственное участие в запуске модуля, разработал программное обеспечение для проверки его работоспособности в процессе наладки, автономной и комплексной проверки перед выпуском. При решении задачи обоснования архитектуры СВМ на этапе проектирования модуля возникла задача выбора оптимального варианта архитектуры блока сопряжения с магистралью, решением которой также занимался автор диссертационной работы.

Блок сопряжения с магистралью СВМ выполнен на основе ПЛИС [80], имеющий в составе встроенное кодирующе-декодирующее устройство интерфейса ГОСТ Р 52070-2003. Для сопряжения процессора и запоминающих устройств с магистралью в состав блока должен быть введен контроллер магистрали, представляющий собой программно-аппаратную модель, реализованную на базе ПЛИС. Задача разработки контроллера достаточно сложна в виду невозможности останова процессора извне во время его штатной работы, ограниченности ресурсов ПЛИС, специфичности интерфейса магистрали и требует проработки вариантов реализации контроллера и выбора оптимального варианта. Критерием оптимальности является обеспечение стабильности передачи данных по магистрали при минимальных затратах ресурсов ПЛИС.

Рассмотрим решение этой задачи.

3.4.2 Контроллер магистрали повышенной функциональной надежности

Требования к контроллеру магистрали

Магистраль БЦВС семейства «Малахит» является 16-разрядной параллельной [20]. Каждый обмен, осуществляемый контроллером магистрали, должен состоять из заголовка пакета и информационной части. Скорость обмена по магистрали фиксированная: выдача слова данных осуществляется за 500 нс, заголовок пакета отделяется от информационной части паузой, составляющей 4,5 мкс.

Должны быть обеспечены прием и передача данных из/в магистраль в/из внутренней памяти процессора и запоминающего устройства, в состав которого входят оперативные запоминающие устройства (ОЗУ) и постоянные запоминающие устройства (ПЗУ). Размер массива в обмене – не более 32К слов.

Взаимодействие контроллера магистрали с процессором модуля

В состав процессора 1892ВМ8Я входят следующие функциональные узлы: центральный процессор на основе RISC-ядра и сопроцессора арифметики в формате с плавающей точкой (CPU), цифровой сигнальный процессор (DSP), шина обмена данными CPU с регистрами устройств (CPU Data Bus, CDB), коммутатор (AXI Swith), память DSP (области XRAM, YRAM, PRAM), оперативная память центрального процессора (CRAM), контроллер прямого доступа в память (Direct Memory Access, DMA), порт внешней памяти (MPORT), асинхронный последовательный порт (UART), контроллеры канала SpaceWire (SWIC), многофункциональные буферизированные последовательные порты (MFBSP), контроллер прерываний (ICTR), интервальный таймер (IT), сторожевой таймер (WDT), таймер реального времени (RTT), умножитель частоты на основе PLL, встроенные средства отладки программ (On chip debugger, OnCD), отладочный порт (JTAG) [79]. Структурная схема процессора приведена на рисунке 3.4.2.1.

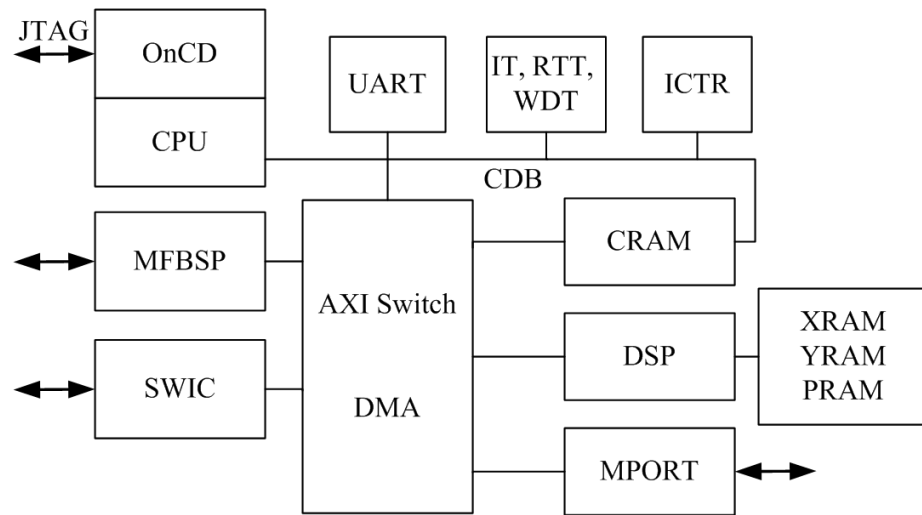


Рисунок 3.4.2.1 – Структурная схема процессора

ОЗУ, ПЗУ подключаются к процессору через порт внешней памяти MPORT. БСМ к процессору может быть подключен через MPORT или через последовательный порт MFBSP.

Возможны два варианта взаимодействия процессора с контроллером магистрали:

- посредством контроллера прямого доступа в память (DMA);
- посредством записи/чтения данных в/из выделенной области памяти в БСМ до/после проведения обмена.

В первом случае работа процессора будет приостановлена на время перекачки данных из памяти в БСМ. Коммутатор (AXI Switch), встроенный в процессор, гарантирует исключение конфликтов (под конфликтом понимается одновременное обращение в область памяти со стороны БСМ и процессора): работа процессора приостанавливается на время передачи управления DMA-контроллеру.

Во втором случае разработчик алгоритмов работы СВМ должен обеспечить перекачку данных из памяти процессора в память БСМ перед/после окончания обмена. При такой реализации возрастает фактическая длительность обмена, что становится критическим при реализации задачи обмена пакетами в цикле решения функциональной задачи модуля. Кроме того, разработчик алгоритмов работы СВМ должен самостоятельно разрешать возможные конфликты, возникающие при обращении к одной и той же области памяти со стороны процессора и БСМ.

Таким образом, целесообразно использование контроллера DMA.

Контроллер DMA процессора серии «Мультикор» имеет 4 канала обмена данными посредством портов MFBSP (MFBSP_Ch0 – MFBSP_Ch3) и 4 канала обмена данными между двумя областями памяти (MemCh0 – MemCh3). Передача данных осуществляется 64 или 32-разрядными словами.

Для минимизации времени проведения обмена целесообразно использовать каналы MemCh DMA, то есть БСМ должна быть подключена к процессору посредством порта внешней памяти MPORT. Каналы MemCh должны быть настроены на работу по внешним запросам, то есть для инициализации канала необходимо наличие сигнала nDMAR (см. [79; с. 156]). Данный сигнал должна формировать контроллер магистрали по готовности данных в режиме приема массива данных со стороны магистрали и по требованию выдачи данных в магистраль в режиме выдачи массива данных.

При реализации контроллера магистрали необходимо учитывать, что приоритет процессора выше, чем у контроллера DMA. Коммутатор AXI Switch передаст управление контроллеру DMA после того, как процессор выполнит одну из следующих операций: чтение или запись одного слова данных, выборка команды из внешней памяти (длительность выборки до трех тактов процессора), процедура Refill (загрузка из внешней памяти 4 команд при работе из кэшируемой области). Каналы DMA за один цикл занятия коммутатора передают пачку данных, размер которой может задаваться разработчиком алгоритмов от 1 до 16 слов.

В контроллере магистрали должны быть определены регистры DDMA0, DDMA1, доступные на запись и чтение соответственно. Канал DMA MemCh0 должен быть настроен на передачу данных из памяти процессора в регистр DDMA0, канал DMA MemCh1 – на передачу данных из регистра DDMA1 в память процессора.

Диаграммы взаимодействия контроллера магистрали и процессора показаны на рисунке 3.4.2.2. Через t_{DMA} обозначено время, через которое коммутатор AXI Switch передает управление DMA-контроллеру после формирования nDMAR, через t_{PLIS} – время обращения к ПЛИС, t_{ZU} – время обращения к запоми-

нающему устройству (ОЗУ или ПЗУ). Через k_{RD} обозначено количество слов в пачке данных, передаваемой за одно предоставление доступа DMA-контроллеру, в режиме передачи массива данных из магистрали в память СБМ, k_{WR} – количество слов в пачке данных в режиме передачи массива данных из памяти СБМ в магистраль. RD – сигнал разрешения чтения данных, WR – сигнал разрешения записи данных, формируемые процессором. Если взаимодействие осуществляется с внутренней памятью процессора, стробы сигналов WR при приеме массива и RD при передаче массива не формируются, t_{ZU} равно времени обращения во внутреннюю память.

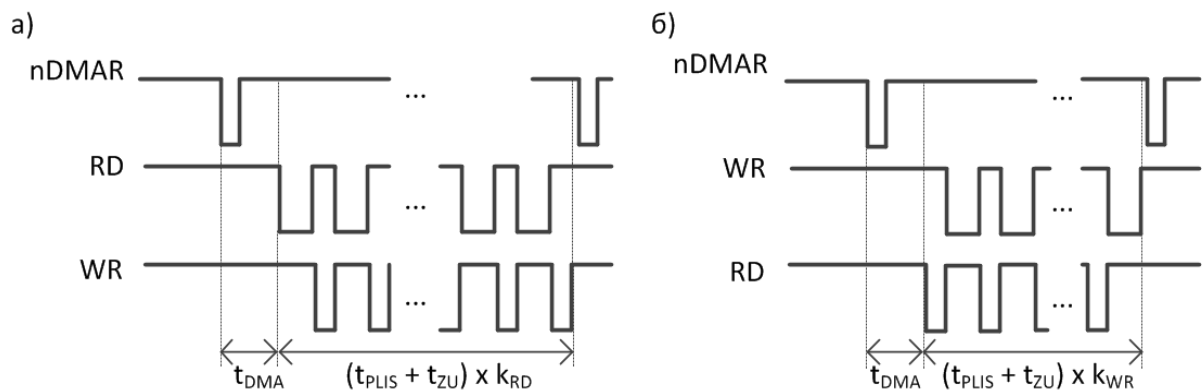


Рисунок 3.4.2.2 – Диаграммы взаимодействия контроллера магистрали и процессора: а) в режиме приема массива из магистрали; б) в режиме передачи массива в магистраль

Внешняя память процессора подключается через MPORT, следовательно время доступа к ней на чтение – не менее 2 тактов процессора, на запись – не менее 3 [79; с. 176]. Время доступа к памяти зависит также от выбора микросхемы. Для ОЗУ 1645РУ4У время выборки данных составляет 10 нс [109], для ПЗУ 1636РУ2У – 65 нс [108]. Это время должно быть увеличено с учетом возможного времени спада и возрастания фронта сигнала до 30 нс для ОЗУ и 82 нс для ПЗУ. Время доступа к ПЛИС БСМ зависит от используемых алгоритмов фильтрации сигналов. По результатам обработки алгоритмов специалистами «НПО автоматики», время доступа к ПЛИС должно быть не менее 200 нс.

Стоит задача выбора оптимального варианта контроллера магистрали с минимальными затратами на ресурсы. Критерием оптимальности является обеспечение стабильной передачи 32 К слов по системной магистрали в режиме выдачи и приема массива информации.

Контроллер магистрали с минимальными затратами на ресурсы

Контроллер магистрали с минимальными затратами на ресурсы работает следующим образом. Регистры DDMA0, DDMA1 являются 16-разрядными. Каналы MemCh DMA настроены на передачу 32-разрядных слов (старшие 16 разрядов слов игнорируются). В режиме проведения обмена контроллер магистрали обеспечивает выдачу сигнала nDMAR каждые 500 нс. После выдачи сигнала контролируется запись/чтение в регистр DDMA0/DDMA1 и осуществляется выдачу данных в магистраль/память процессора. Схема работы контроллера магистрали показана на рисунке 3.4.2.3.

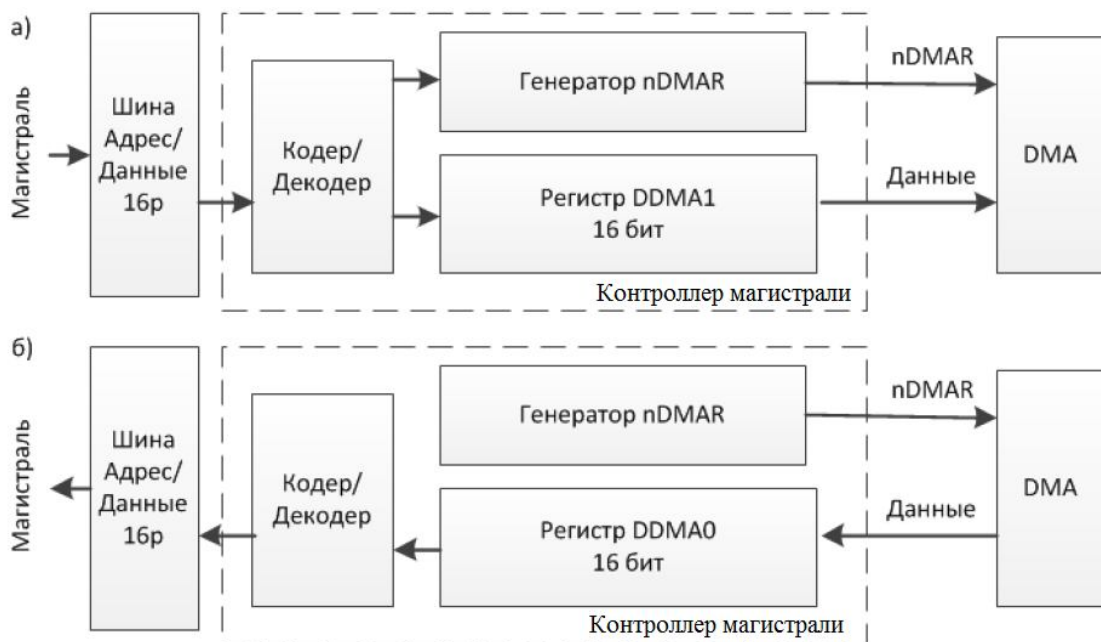


Рисунок 3.4.2.3 – Схема работы контроллера магистрали: а) в режиме приема массива из магистрали; б) в режиме выдачи массива в магистраль

Разработанная схема опробована на практике. Оказалось невозможным проведение обменов по магистрали в режиме выполнения программы из внешней памяти или с использованием кэша процессора: процессор не успевает заби-

рать/выдавать данные каждые 500 нс. Невозможно проведение обменов с внешней памятью. Сделан вывод о непригодности такого варианта реализации контроллера магистрали для СВМ.

Каналы MemCh DMA могут быть настроены на обмен 64-разрядными словами. Если регистры DDMA0, DDMA1 станут 32-разрядными, при такой настройке каналов MemCh будет обеспечена перекачка двух слов данных за одно предоставления прямого доступа в память. Контроллер магистрали должен будет обеспечивать выдачу сигнала nDMAR один раз в мкс.

Разработанная схема контроллера магистрали опробована на практике. Стабильность обменов по магистрали гарантируется при следующих условиях:

- выполнение программы из внутренней памяти процессора (CRAM, XRAM, YRAM) или из внешнего ОЗУ в режиме работы без кэша процессора, при этом прием/выдача данных осуществляется в/из внутренней памяти процессора, ограничение на длину пакета – не более 1024 слова;

- выполнение программы из внутренней памяти процессора (CRAM, XRAM, YRAM) в режиме работы с кэшем процессора, при этом прием/выдача данных осуществляется в/из внутренней памяти процессора; ограничение на длину пакета – не более 32 слов.

Сделан вывод о непригодности такого варианта реализации контроллера магистрали в СВМ.

Контроллер магистрали с внутренним буфером

Целесообразно использование внутреннего буфера в ПЛИС для временного хранения данных, принимаемых/передаваемых из/по магистрали, который позволит нивелировать задержки на прием и передачу данных, возникающие в результате того, что коммутатор AXI Switch не сразу передает управление DMA-контроллеру. В виду ограниченности ресурсов ПЛИС целесообразно сделать буфер кольцевым, а в процессе обмена непрерывно контролировать загруженность буфера. Если в процессе обмена буфер будет переполнен, должен сформироваться признак сбоя обмена.

В контроллере магистрали должны быть реализованы два независимых потока. Первый поток отвечает за взаимодействие с системной магистралью и имеет более высокий приоритет. В режиме приема массива из магистрали поток складывает принятые из магистрали данные в буфер. В режиме передачи массива в магистраль поток контроллера магистрали выдает данные из буфера в магистраль каждые 500 нс.

Второй поток контроллера магистрали отвечает за взаимодействие с процессором. В режиме приема массива поток генерирует сигнал nDMAR по готовности данных для выдачи в память СВМ. Выдача очередного сигнала nDMAR осуществляется после окончания выдачи данных в память и готовности следующей пачки данных для выдачи. В режиме передачи массива в магистраль поток контроллера магистрали начинает запрашивать данные из памяти СВМ сразу же после выдачи заголовка пакета в магистраль, выдача данных осуществляется через 4,5 мкс после выдачи заголовка пакета. Выдача очередного сигнала nDMAR осуществляется после окончания передачи данных из памяти процессора в буфер и при наличии места в буфере для следующей пачки данных.

Схема работы контроллера магистрали в режиме приема массива из магистрали показана на рисунке 3.4.2.4, в режиме передачи массива – на рисунке 3.4.2.5. Через k_{RD} обозначено количество слов в пачке данных, передаваемых за одно предоставление доступа DMA-контроллеру, в режиме передачи массива данных из магистрали в память СВМ, k_{WR} – количество слов в пачке данных в режиме передачи массива данных из памяти СВМ в магистраль, N_{RD} – размер циклического буфера в режиме приема массива, N_{WR} – размер циклического буфера в режиме передачи массива.

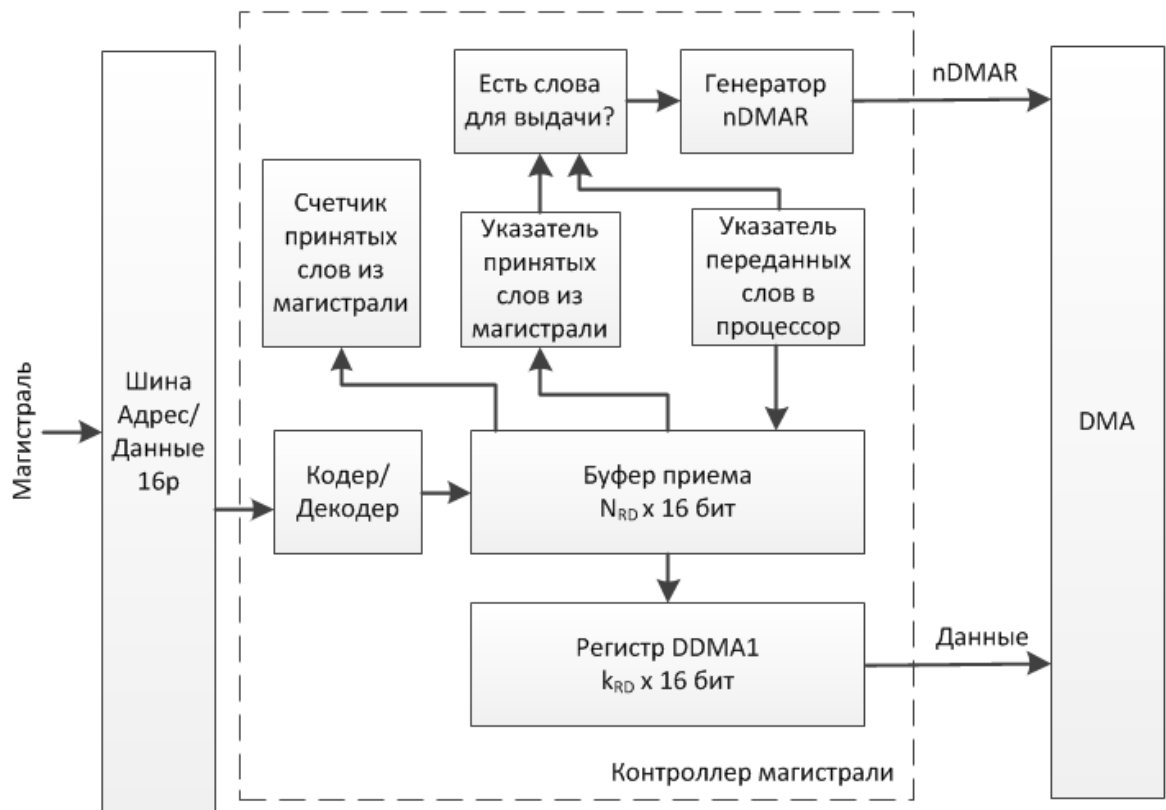


Рисунок 3.4.2.4 – Схема работы контроллера магистральной в режиме приема массива из магистральной

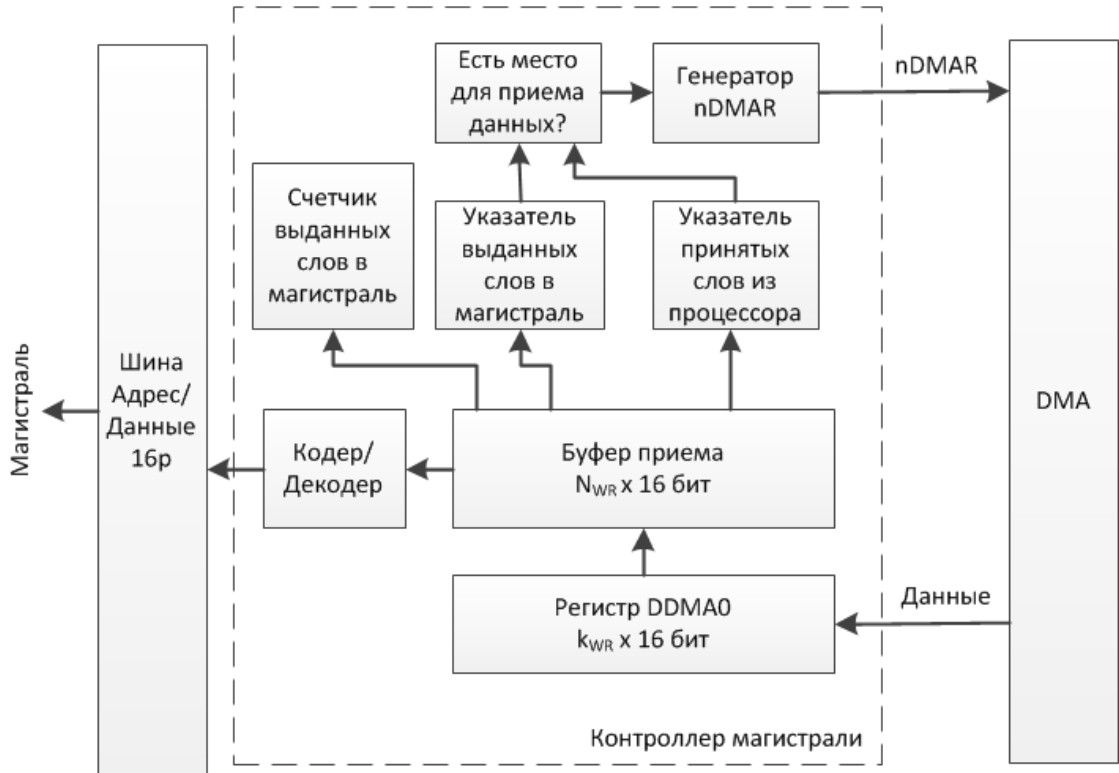


Рисунок 3.4.2.5 – Схема работы контроллера магистральной в режиме передачи массива в магистраль

Требуется определить оптимальные значения параметров k_{RD} , k_{WR} , N_{RD} , N_{WR} . Критерием оптимальности является стабильность обменов по магистрали при передаче 32К слов при выполнении алгоритма из любой области памяти СВМ.

Особенностью разработки программ для процессора «Мультикор» в «НПО автоматики» является то, что они разрабатываются на языке программирования C++. Запись и чтение в область памяти компилятором gcc преобразовывается в последовательности команд, представленные в таблице 3.4.2.1. Через t_{CPU} обозначено время обращения к области выполнения программы, t_{ZU_R} – время обращения к переменной R , t_{ZU_temp} – время обращения к переменной $temp$.

Таблица 3.4.2.1 – Запись и чтение ячейки памяти

Код на C++	Дизассемблерный код	Длительность выполнения, тактов
<i>//R – переменная в области памяти по адресу 0xb500108</i> R = 0x12345678	lui v0,v0,0x1234 ori v0,v0,0x5678 lui at, 0xb500 sw vo,264(at)	$t_{CPU} + 1$ $t_{CPU} + 1$ $t_{CPU} + 1$ $t_{CPU} + 1 + t_{ZU_R}$
unsigned int temp; temp = R	lui v0,0xb500 lw v0,264(v0) nop... sw vo,16(s8)	$t_{CPU} + 1$ $t_{CPU} + 1 + t_{ZU_R}$ $t_{CPU} + 1 + t_{ZU_temp}$

Разработана модель взаимодействия контроллера магистрали и процессора в режиме приема и передачи массива. Модель реализует диаграммы взаимодействия контроллера магистрали и процессора, показанные на рисунке 3.4.2.2. Приняты следующие допущения:

– программа, выполняющаяся процессором, построена следующим образом: непрерывно чередуются обращения к памяти СВМ на чтение и на запись, в любой момент времени возможно обращение в любую область памяти СВМ;

- момент формирования nDMAR относительно времени выполнения программы процессора является случайной величиной;
- сигнал nDMAR формируется после фиксации факта обмена контроллером DMA через время, равное одному такту ПЛИС.

Условием возникновения сбоя является переполнение внутреннего буфера ПЛИС в режиме приема массива данных и отсутствие данных для выдачи в буфере в режиме передачи массива данных.

Для реализации модели разработано программное обеспечение, интерфейс которого показан на рисунке 3.4.2.6.

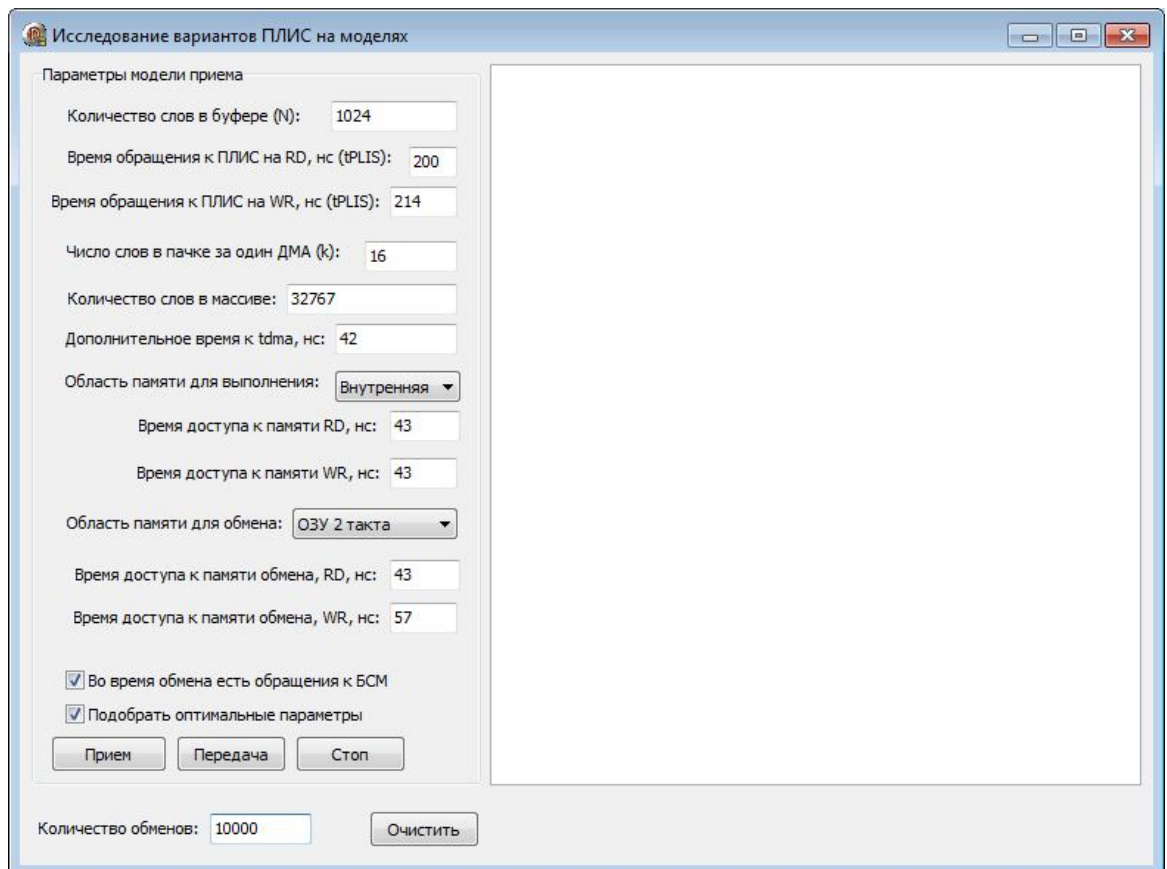


Рисунок 3.4.2.6 – Программа для реализации модели

Результаты моделирования показывают, что стабильная передача 32К слов может быть гарантирована в случае обменов с внутренней памятью СВМ при выполнении из любой области памяти, если значения параметров контроллера магистрали: $N_{RD} \geq 512$, $k_{RD} = 16$, $N_{WR} \geq 512$, $k_{WR} = 16$. В случае выполнения алгоритма

функционирования СВМ из внутренней памяти процессора и проведения обменов с внутренней памятью значения параметров контроллера магистрали могут быть оптимизированы до $N_{RD} = 512$, $k_{RD} = 4$, $N_{WR} = 512$, $k_{WR} = 4$.

Одновременные прием и передача массива по магистрали запрещены, поэтому для сокращения ресурсов ПЛИС целесообразно использовать один буфер для приема и передачи массива. Параметр «количество слов в пачке данных» целесообразно сделать настраиваемым.

Варианты реализации контроллера магистрали с параметрами $N_{RD} = 8, 16, 64, 128, 256, 512, 1024$, $k_{RD} = 2, 4, 8, 16$ опробованы на практике. Проведено оценочное программирование СВМ, оценка показывает достаточность размера буфера в 512 слов при любом ожидаемом поведении процессора, если количество слов в пачке данных, передаваемых за одно предоставление доступа DMA-контроллеру, равно 16.

Оптимальные значения параметров контроллера магистрали зависят от области выполнения программы и выбранной области памяти для обмена. Целесообразна архитектура контроллера с изменяемыми параметрами

Выводы

1. Традиционным способом повышения надежности управляющих вычислительных систем РКТ является резервирование на уровне модулей и компонентов модулей. Введение резерва противоречит требованию минимизации аппаратных затрат, поэтому стоит задача выбора рационального варианта резервирования с минимальным уровнем аппаратной избыточности. Исследованы варианты резервирования, основанные на практических проработках приборной реализации вычислительных систем, создаваемых в «НПО автоматики». По результатам сравнения вариантов рекомендован трехканальный вариант со средствами контроля резерва и переключателем каналов.

2. Надежное питание вычислительных устройств может быть обеспечено резервированием ИВЭП. Проведенный в работе анализ надежности вариантов ре-

зервирования ИВЭП показал, что целесообразен трехканальный вариант со средствами контроля резерва, устройством отключения канала с катастрофическим отказом и схемой нейтрализации параметрического отказа.

3. Для повышения диагностичности блок контроля, входящий в состав трехканального системного модуля БЦВС ракетносителя «Союз-2», целесообразно доработать. Введение в его состав счетчиков и триггеров сбоев позволит избежать ложного бракования канала модуля при сбое на локальных шинах.

4. Проведена апробация технологии SpaceWire модулем БЦВС, в которой принял участие автор диссертационной работы. Поддержка технологии требует разработки специализированного контроллера магистрали, осуществляющего сопряжение процессора модуля с магистралью. Задача разработки контроллера достаточно сложна ввиду невозможности останова процессора извне во время его штатной работы, специфичности интерфейса магистрали, ограниченности ресурсов ПЛИС, на базе которой реализуется контроллер, и требует проработки вариантов реализации контроллера и выбора оптимального варианта.

В работе предложены варианты архитектуры контроллера магистрали, проведено исследование и выбран оптимальный вариант. Критерием оптимальности является обеспечение стабильной передачи данных при минимальных затратах ресурсов ПЛИС. Предложенный вариант стал предметом реализации.

Глава 4. Вопросы обеспечения надежности управляющих вычислительных систем ракетно-космической техники

4.1 Обеспечение полноты отработки алгоритмов функционирования управляющих вычислительных систем

4.1.1 Отработка программного и аппаратного обеспечения управляющих вычислительных систем

Одним из этапов разработки управляющих вычислительных систем РКТ является этап разработки и отработки аппаратного и программного обеспечения системы. От полноты отработки в значительной степени зависит надежность УВС.

Подтверждение корректной работы программного обеспечения УВС САУ объектами РКТ для различных наборов входных параметров и состава обрабатываемой информации является достаточно трудоемким процессом. Особенно сложна верификация программ при создании систем реального времени, обеспечивающих решение задач самоконтроля исправности компонентов САУ, нейтрализации отказов, возникающих в работе вычислительных средств, распределения ресурсов для выполнения целевых задач САУ.

В работах [68, 70] проводится анализ подходов к отработке аппаратного и программного обеспечения, используемых американскими специалистами для ЭВМ общего назначения [114], сотрудниками «НПО «Электромашина» (г. Челябинск) для электронных блоков [40], сотрудниками «КБ «Арсенал», (г. Санкт-Петербург) для бортовой аппаратуры [72], сотрудниками Саратовского технического университета [1] для бортовых вычислительных систем. Отмечается неэффективность применения предложенных решений для отработки программного обеспечения УВС реального времени. В работах специалистов МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва) [75, 78], «ЦАГИ» (г. Жуковский) [121] задача отработки про-

граммного обеспечения для управляющих вычислительных систем решена достаточно полно.

Отработка аппаратного и программного обеспечения УВС с возможностью имитации неправильной работы аппаратуры САУ в «НПО автоматики» осуществляется посредством моделирующего комплекса отработки аппаратуры и программ (КОАП) [23], в создании которого участвовал автор диссертационной работы. Данный комплекс реализует следующие принципы отработки:

1) все смежные подсистемы САУ заменяются на их программно-аппаратные модели (имитаторы);

2) режимы работы и отработка взаимодействия подсистем УВС со смежными подсистемами САУ проводятся по положительным и отрицательным ветвям функционирования САУ, при этом регистрируется взаимодействие по линиям связи УВС с имитаторами (посредством регистраторов) и осуществляется контроль работы подсистем УВС на соответствие исходным данным.

КОАП содержит моделирующую ЭВМ с устройством отображения, на которое выводится информация о текущем состоянии объекта управления и управляющие воздействия на него, имитаторы подсистем САУ, регистраторы, ИВЭП, вычислительную систему с обрабатываемым программным обеспечением, выходы которой в реальной САУ подключены к входам объекта управления, а в моделирующем комплексе – к входам моделирующей ЭВМ и регистраторов. Вычислительная система является технологической: в ее состав введены технологические средства в виде формирователей синхроимпульсов (ФСИ) для синхронизации работы компонентов системы, синхронизатора, буферных усилителей для выдачи состояния внутренних связей и магистралей на внешние шины. Введение технологических средств не влияет на работу штатной программы.

Управление технологическими средствами осуществляется посредством пульта управления и управляющей ЭВМ. Управление ИВЭП обеспечивает изменение номинала выходного напряжения и имитацию изменения быстродействия элементов из-за набора дозы от ионизирующего излучения, что позволяет проверить работоспособность штатной аппаратуры и программного обеспечения в диа-

пазоне изменения напряжения питания и быстродействия для выявления неустойчивых дефектов. Организация отработки программного и аппаратного обеспечения УВС на КОАП ведется в соответствии со стандартом предприятия СТО 551.21.008-2008 [111].

Использование в составе моделирующего КОАП штатной аппаратуры не допускает внесение внутренних отказов в аппаратуру и не обеспечивает доступ к внутренней памяти системы (регистрам, запоминающим устройствам). Для решения этой задачи в составе комплекса отработки используют вместо штатной аппаратуры ее аналог (по отношению к программному обеспечению), в состав которого внедрены технологические средства, обеспечивающие доступ к компонентам системы и проведение режимов работы с имитацией отказов в работе вычислительных средств САУ. Примером такой системы является технологическая управляющая вычислительная машина [38], в создании которой принял участие автор диссертационной работы.

Моделирующий КОАП обеспечивает внесение сбоев и неисправностей в процессе отработки программного обеспечения в любой модуль вычислительной системы в заданные моменты времени от момента подачи питания на КОАП или от момента запуска модуля, в момент фиксации кодировки на магистрали, на шине адреса модуля (программное обеспечение модуля, как правило, организовано повторяющимися циклами и адрес обращения к памяти в процессе выполнения программы встречается многократно) или вручную. Возможно внесение следующих неисправностей: искажение ячейки памяти или значения регистра, установка в «1» или «0» линии на магистрали на выходе модуля (имитация неисправности магистрали по типу «залипание бита»).

Возможность задания момента внесения сбоя или неисправности в процессе отработки программного обеспечения вычислительной системы позволяет моделировать отказы аппаратуры с заданной интенсивностью отказов.

4.1.2 Проверка метода оценки надежности на моделирующем комплексе обработки аппаратуры и программ

Проверка метода оценки вероятности отказа системы, предложенного в разделе 2.2 диссертационной работы, может быть проведена путем сравнения результатов моделирования вычислительной системы с экспериментальными данными, полученными на моделирующем КОАП. Для этого посредством пульта управления комплексом необходимо имитировать отказы в работе компонентов вычислительной системы, входящей в состав комплекса, так, чтобы время безотказной работы компонента системы должно подчиняться экспоненциальному закону распределения.

Пусть ξ – случайная величина, равномерно распределенная на интервале $[0, 1]$. Случайная величина X с функцией распределения $F(X)$ может быть получена по формуле: $X = F^{-1}(\xi)$, где F^{-1} – функция, обратная к $F(X)$. [49; с. 347].

Если время безотказной работы компонента системы подчиняется экспоненциальному закону распределения, момент времени отказа компонента системы (τ) определяется по формуле

$$\tau = - \ln(1 - \xi) / \lambda, \quad (4.1.2.1)$$

где λ – заданная интенсивность отказов компонента системы, так как функция $G(\xi) = - \ln(1 - \xi) / \lambda$ является функцией, обратной к $G^{-1}(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$.

Методика проведения эксперимента

Перед проведением эксперимента необходимо убедиться в безотказности компонентов системы, на базе которой проводится эксперимент. В процессе испытаний, согласно [61; с. 11], необходимо осуществлять прерывистый с малыми интервалами мониторинг технического состояния системы. Это гарантирует, что поток отказов компонентов системы обусловлен только внесенными с пульта управления комплекса неисправностями.

Перед проведением эксперимента необходимо четко определить критерий отказа системы в целом, признаки и механизм определения работоспособности компонентов системы. Проверка работоспособности компонента может осущест-

вляться чтением диагностической информации из памяти модуля, опросом регистров модуля, наличием кодировки на линии магистрали.

Пусть n – число компонентов системы. Предложен следующий алгоритм проведения эксперимента.

1. Для $\forall i \in \overline{1, n}$ задать λ_i – интенсивность отказа компонента системы, вычислить время возникновения отказа компонента системы τ_i согласно (4.1.2.1):

$$\tau_i = -\ln(1 - \xi_i) / \lambda_i, \quad (4.1.2.2)$$

где ξ_i – случайные числа, равномерно распределенные на интервале $[0, 1]$. При генерации ξ_i необходимо использовать независимые потоки чисел.

2. Рассчитать время события в системе: $T = \min(\tau_i, T_{\text{раб}})$ для $\forall i \in \overline{1, n}$.

Если $T = T_{\text{раб}}$, где $T_{\text{раб}}$ – длительность работы системы, остановить эксперимент.

Если $T = \tau_j$, где j – номер компонента системы, задать в пульт управления комплексом время останова системы, запустить систему, дождаться останова. Имитировать посредством технологических средств комплекса отказ j -го компонента системы. Рассчитать время возникновения следующего отказа j -го компонента системы (τ_j) по формуле (4.1.2.2). Пересчитать $\tau_j = T + \tau_j$.

3. Проверить признаки работоспособности компонентов системы, определить признак работоспособности системы в целом. Если отказ системы или $T = T_{\text{раб}}$, завершить работу с комплексом, зарегистрировать состояние системы. Иначе перейти на п. 2.

Предложенный алгоритм эксперимента не противоречит процедуре имитации работы системы, предложенной в [119; с. 184].

Вероятность отказа системы (Q) может быть найдена по формуле:

$$Q = N_q / N, \quad (4.1.2.3)$$

где N – число экспериментов, N_q – число регистраций неисправных состояний системы [61; с. 16].

Описание вычислительной системы

Вычислительная система, входящая в состав моделирующего КОАП, состоящая из двух специализированных вычислительных модулей (см. раздел 3.4 диссертационной работы), подключенных к дублированной системной магистрали. Первый модуль (СВМ1) в системе выполняет следующие функции: подготовка данных для расчета и выдача их по магистрали во второй модуль (СВМ2). Для контроля целостности данные охвачены контрольной суммой. СВМ2 принимает данные по магистрали, проверяет их целостность, обрабатывает и выдает в видео-порт. Обмен информацией в один момент времени возможен только по одному каналу магистрали. Выбор рабочего канала магистрали осуществляет СВМ1 (он является в системе ведущим). СВМ2 всегда настроен на прием данных по обоим каналам и обрабатывает данные независимо от того, по какой магистрали они пришли.

Каждый модуль имеет регистр состояния для синхронизации работы модулей, доступный на чтение со стороны магистрали. Запись в регистр осуществляется со стороны процессора. При чтении регистра состояния со стороны магистрали, его значение обнуляется.

СВМ2 выставляет в регистр признак готовности к обмену после каждой настройки канала на прием данных, и признак ошибки обмена, в случае нарушения целостности данных или диаграммы обмена. СВМ1 перед выдачей в магистраль контролирует значение регистра состояния СВМ2, при наличии признака ошибки в обмене, повторяет обмен, но не более двух раз. В случае, если после повтора сообщения признак ошибки обмена остался, СВМ1 бракует выбранный канал магистрали и переходит на резервный канал.

В состав СВМ1 входят два оперативных запоминающих устройства (ОЗУ1 и ОЗУ2) для хранения данных расчета и их контрольной суммы. Перед выдачей в магистраль СВМ1 проверяет целостность данных ОЗУ путем расчета и сравнения контрольной суммы с эталоном. Если целостность одного из ОЗУ нарушена, СВМ1 делает попытку восстановления данных путем копирования данных с исправного ОЗУ.

Время работы системы – 1 сек. Время восстановления ОЗУ около 300 мкс. Алгоритмы работы модулей системы приведены в приложении Г.

В процессе работы вносятся следующие неисправности: искажение ячейки памяти ОЗУ1, ОЗУ2 СВМ1, неисправность первого, второго каналов магистрали. Система считается отказавшей, если забракованы оба канала магистрали, нарушена целостность данных в обоих ОЗУ.

Проведение эксперимента

Алгоритмы работы СВМ1 и СВМ2 отработаны на моделирующем КОАП. Проведено 400 тыс. обменов по обоим каналам магистрали без сбоев в работе в системе. Таким образом, гарантируется, что отказы в работе системы при проведении эксперимента будут обусловлены только отказами, внесенными через пульт управления комплекса. Проведено 1000 испытаний на КОАП с различными значениями интенсивностей отказов ОЗУ1, ОЗУ2 и каналов магистрали. Определены вероятности отказа системы по формуле (4.1.2.3). Экспериментальные данные приведены в приложении Г.

Проведена оценка вероятностей отказа системы с использованием метода, предложенного в разделе 2.2 диссертационной работы (см. приложение Г). По результатам моделирования получены значения вероятности отказа с погрешностью не более 0.8%.

4.2 Применение технологии моделирования плат для анализа целостности сигналов модуля управляющих вычислительных систем

Излучение элементов цепей печатной платы и положение цепей на плате оказывают влияние на распространение сигналов платы. Возможны следующие нарушения целостности цифровых сигналов модуля: нарушения амплитуды, колебания, спады вершин, искажения фронтов, нестабильность фронтов (возникает, когда в цифровом сигнале происходят малые смещения фронтов от цикла к циклу), отражения (могут появиться вследствие неправильного согласования и неудачной топологии печатной платы), перекрёстные помехи (возникают, когда

длинные проводники проходят рядом, что приводит к связи между ними через взаимную ёмкость и индуктивность). Целесообразно проведение анализа целостности сигналов модулей БЦВС на этапе проектирования модулей.

Технологии моделирования плат и электромагнитного анализа в настоящее время достаточно развиты: программное обеспечение Ansys (пакеты программ Ansys SIware, Ansys Designer) предоставляет большой набор инструментов для проведения анализа. Однако общая методика анализа целостности цифровых сигналов отсутствует и в «НПО автоматики» не применяется.

Предложена методика анализа целостности сигналов с применением программного обеспечения Ansys. Применение методики рассмотрено на примере сигналов блока сопряжения с магистралью вычислительного модуля БЦВС. Состав сигналов приведен в таблице 4.2.1.

Таблица 4.2.1 – Состав сигналов блока сопряжения с магистралью

Сигнал	Направление	Кол-во	Описание
SHZ	О	1	Сигнал синхронизации данных
PUS	О	1	Признак управляющего слова
1AD[15..0]	О	16	Выход совмещенной шины адрес/данные

4.2.1 Методика анализа с применением программного обеспечения Ansys на примере вычислительного модуля

Особенностью разработки модулей управляющей вычислительной системы в «НПО автоматики» является то, что топология платы создается посредством программного обеспечения Altium Designer, в которой предоставлена возможность экспорта данных топологий в формат, поддерживаемый Ansys.

Методика анализа целостности сигналов модуля включает следующие этапы.

1. Импорт топологии в Ansys SIware.

Открыть топологию модуля в Altium Designer, сохранить проект в формате ODB++ Design. Запустить Ansys SIware, создать новый проект, выбрать разделы меню File-> Fabrication Outputs -> ODB++ Files. В появившемся окне выбрать папку с проектом топологии и нажать на кнопку Import. В открывшемся окне выбрать анализируемые сигналы (PUS, SHZ, 1AD0, ..., 1AD15) и линии заземления (GND). Топология блока сопряжения с магистралью вычислительного модуля в программе Ansys SIware появится на экране (рисунок 4.2.1.1).

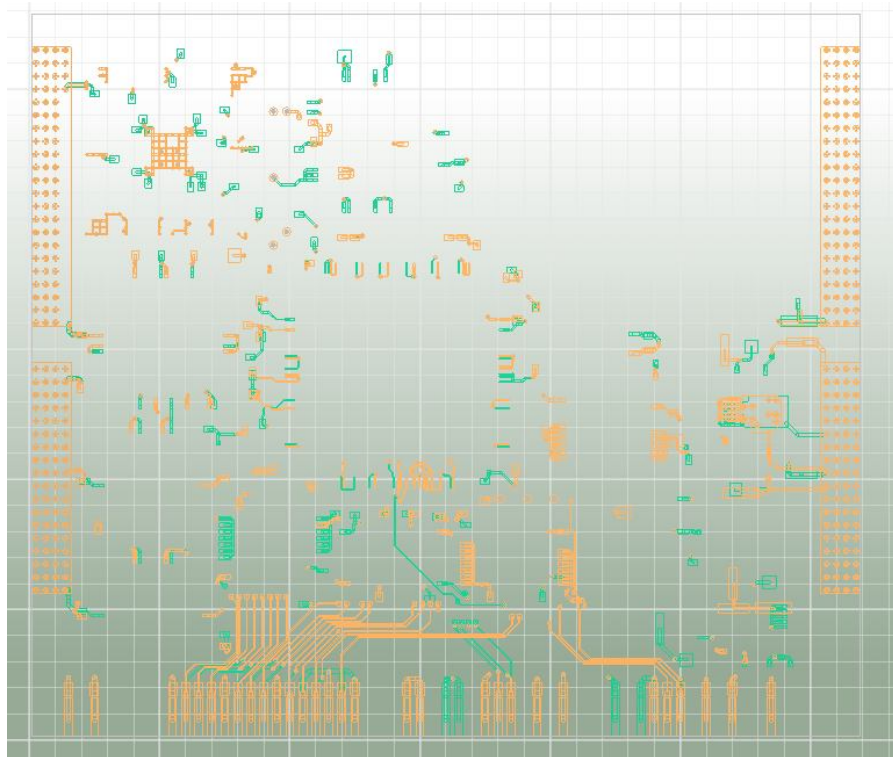


Рисунок 4.2.1.1 – Топология вычислительного модуля в Ansys SIware

2. Анализ топологии.

После импорта топологии необходимо проверить параметры слоев. Они должны соответствовать заданным в топологии-оригинале. С целью сокращения временных затрат на проведение анализа необходимо выполнить предварительную обработку топологии: удаление объектов, влияние которых минимально; выполнение логических объединений объектов, которые выполняют одинаковые функции.

Плата модуля состоит из 6 слоев, которые отделены друг от друга слоями-диэлектриками. Сигналы, которые будут проанализированы расположены в верхнем слое топологии (слое top). В среднем слое (mid2) расположены линии заземления (GND) (рисунок 4.2.1.2).

Для сокращения времени расчета при анализе сигналов можно удалить три нижних слоя, считая их влияние на распространение сигналов минимальным. После обработки останутся следующие слои платы: top, mid1 и mid2.

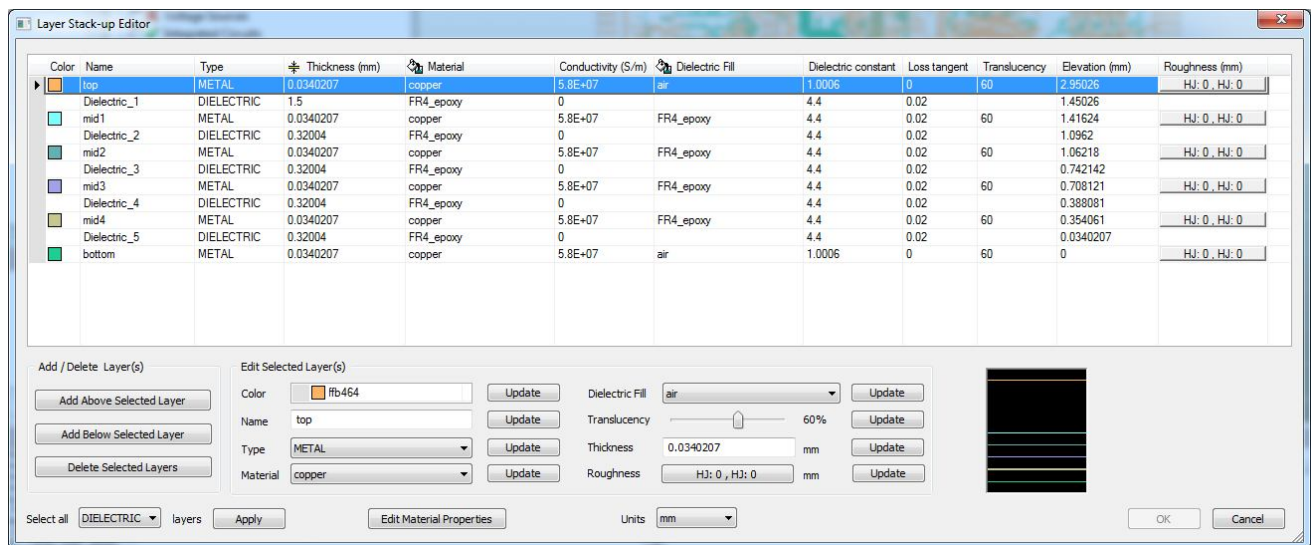


Рисунок 4.2.1.2 – Информация о слоях платы

Линии, соответствующие выходным сигналам блока сопряжения с магистралью, расположены близко друг к другу в нижней части платы и занимают около 20% всего пространства. Для сокращения времени расчета при анализе сигналов можно вырезать область линий и анализировать только ее. Чтобы вырезать область платы необходимо выбрать раздел меню Tools->Clip Design, выделить нужную область и подтвердить вырезание.

Слой mid2 представляет собой металлизированную сетку сигналов GND. Каждая линия сетки импортировалась как отдельный объект, что затрудняет анализ сигналов. Для сокращения времени расчета целесообразно сделать сетку одним объектом. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

- выделить все объекты слоя mid2 (нажатие правой кнопкой мыши-> Select By Rectangle, выделить все линии);
- преобразовать все объекты trace в planes на слое mid2 (нажатие правой кнопкой мыши -> Convert -> Traces to Planes);
- выполнить логическое объединение объектов (нажатие правой кнопкой мыши -> Boolean -> Unite).

3. Назначение портов.

Для анализа сигналов необходимо назначить точки входа и выхода сигналов – порты.

На импортированной плате отсутствуют компоненты, поэтому для портов необходимо предварительно создать контактные площадки (pins). Для этого необходимо на линии сигнала выделить контактную площадку, соответствующую точке входа сигнала (нажатие правой кнопки мыши -> Select By Clicking, выделить площадку; линия сигнала при этом должна быть не активна). Далее необходимо задать модель контактной площадки, выбрав разделы меню Edit -> Solderball Model. В открывшемся окне задать следующие параметры контакта: тип: Simple, материал: идеальный проводник (res), размеры площадки: минимальные. Аналогично необходимо задать модель контактной площадки для точки выхода сигнала.

После этого для всех анализируемых линий задать свойства контактных площадок. Для этого выбрать площадку (нажатием правой кнопки мыши -> Select By Clicking), открыть окно свойств (нажатием правой кнопки мыши -> Properties), задать значения параметров площадки (слои, тип упаковки, группа пинов, к которой относится контакт). Должны быть созданы следующие группы контактных площадок: точки входа сигналов (PIN), точки выхода сигналов (POUT), точки заземления (PGND).

После того как определены все контактных площадки (все точки входа и выхода сигналов) создать порты. Для этого выбрать разделы меню Circuit Elements -> Generate On Components. В появившемся окне создать порты, соответствующие входам и выходам сигналов.

Созданные порты отобразятся в перечне компонентов и на экране (рисунок 4.2.1.3).

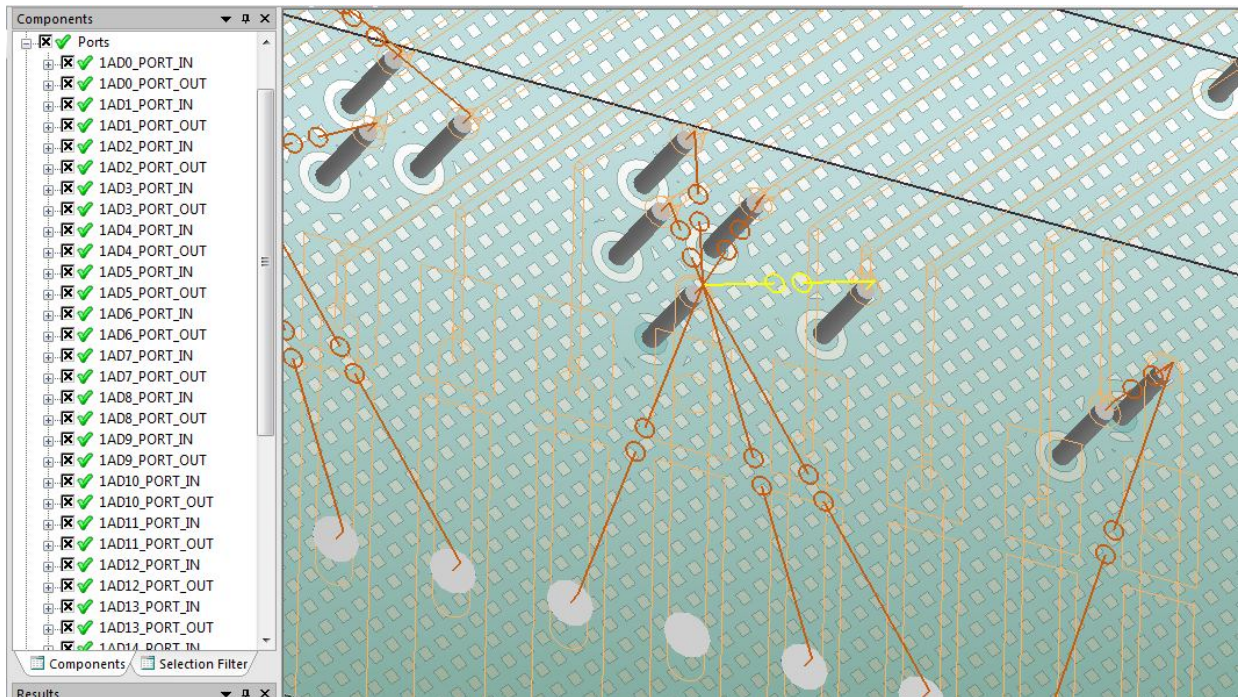


Рисунок 4.2.1.3 – Отображение портов на экране

4. Анализ данных.

Перед анализом данных необходимо задать параметры анализа. Для этого выбрать разделы меню SIware -> Options, задать параметры в соответствии с рисунком 4.2.1.4. Выполнить проверку модели, выбрав разделы меню Tools -> Validation Check. Если результат проверки положителен, запустить анализ данных, выбрав разделы меню Simulation -> SIware -> Compute S-, Y-, Z- parameters..., задать параметры анализа в появившемся окне и запустить анализ. Если результат проверки отрицательный, изменить параметры анализа.

Результаты анализа отображаются в области Results. Необходимо экспортировать данные расчетов в формате Touchstone File (нажатием правой кнопки мыши в окне Results, раздел меню Export Touchstone File).

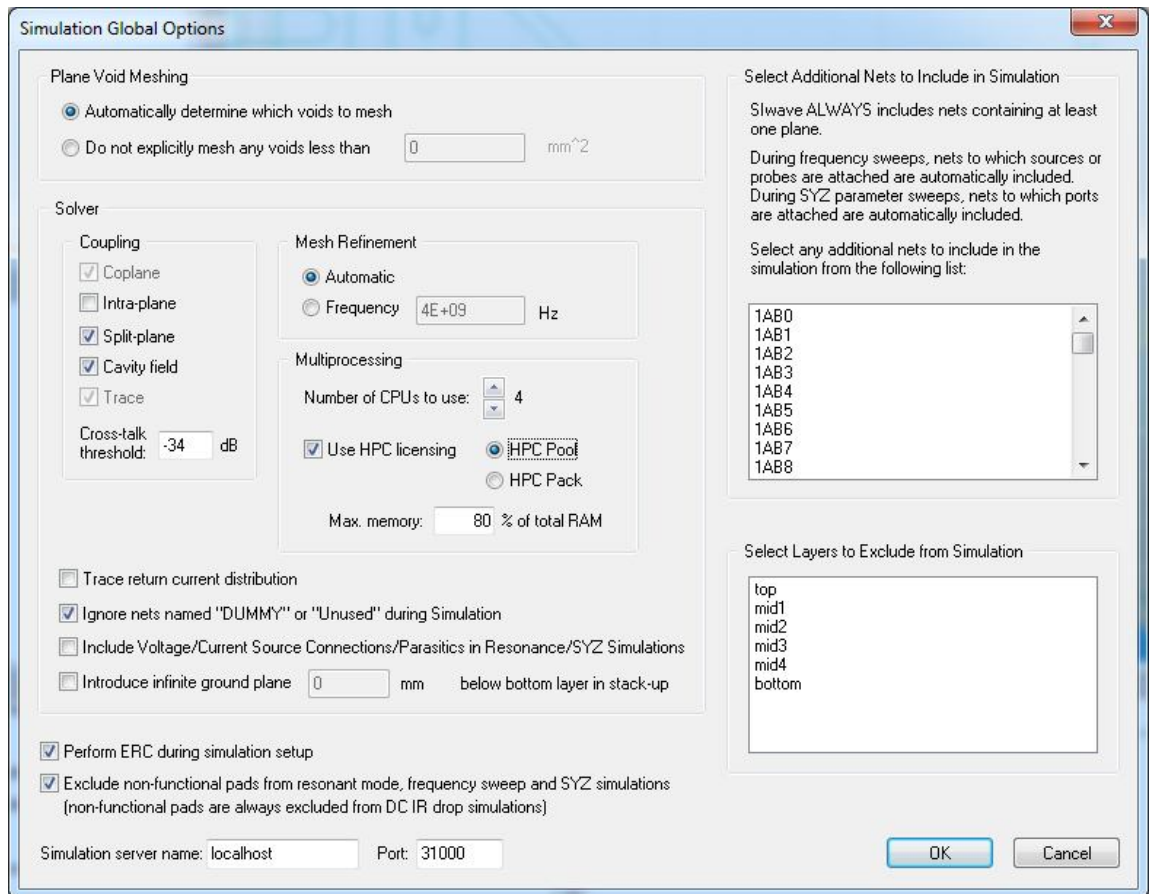


Рисунок 4.2.1.4 – Параметры анализа

5. Анализ сигналов в Ansys Designer.

Запустить программу Ansys Designer, создать пустой проект, вставить в него дизайн контура (Project -> Insert Circuit Design). Импортировать модель вычислительного модуля, выбрав разделы меню Project -> Add Model -> Add Nport Model. В открывшемся окне выбрать файл модели и подтвердить выбор.

После этого перетащить модель на рабочую поверхность, добавить элементы EYESOURCE и EYEPROBE, резисторы и заземления по каждому на сигнал, составить схему для анализа сигналов в соответствии с рисунком 4.2.1.5. Элемент EYESOURCE подключается к порту X_PORT_IN, элемент EYEPROBE – к порту X_PORT_OUT, где X - название сигнала.

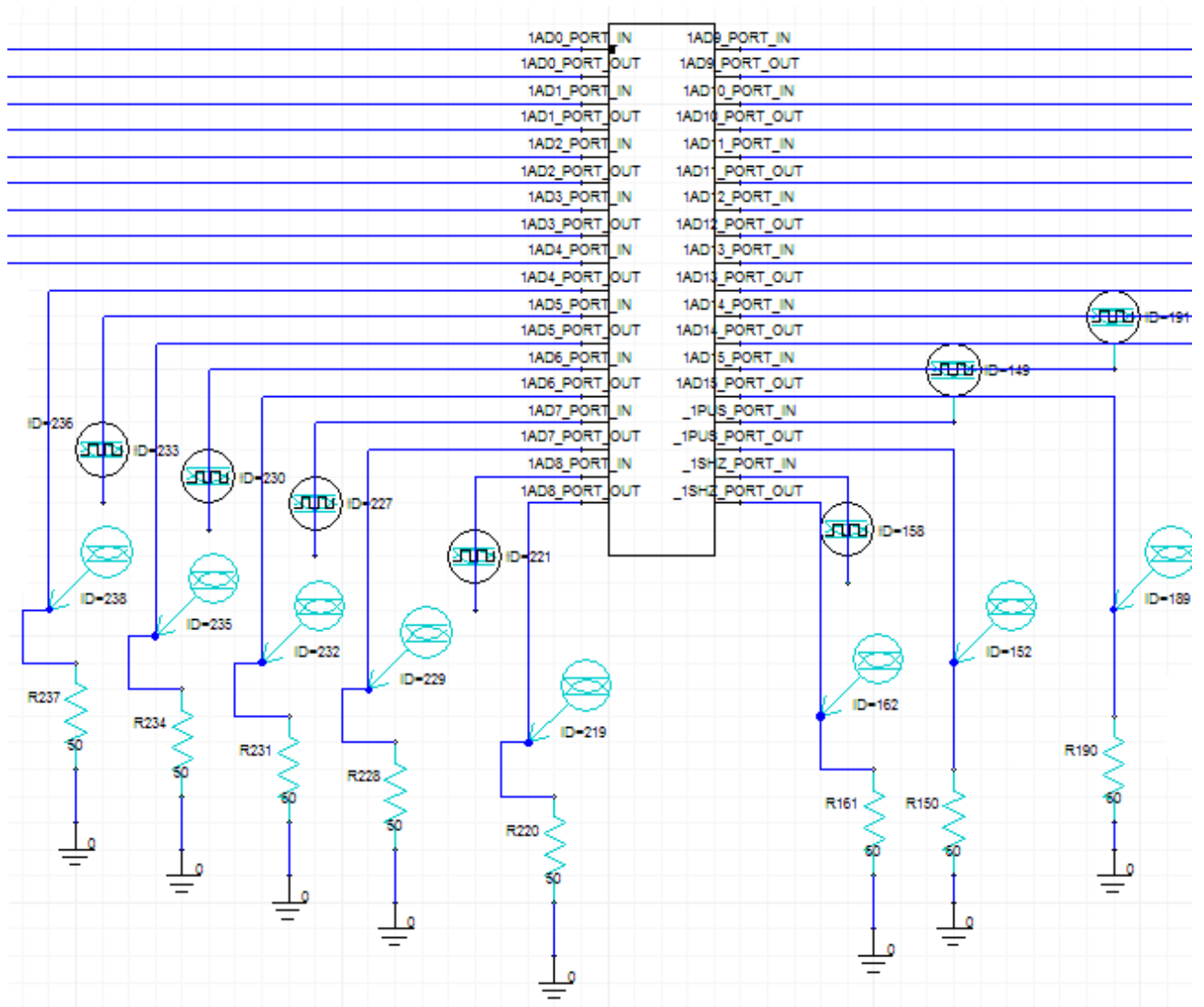


Рисунок 4.2.1.5 – Схема для анализа сигналов

Для каждого сигнала блока сопряжения с магистралью задать последовательность битов (см. таблицу Д.1) и длительность бита в соответствии с диаграммой обмена по системной магистрали в параметрах элементов EYESOURCE (рисунок 4.2.1.6).

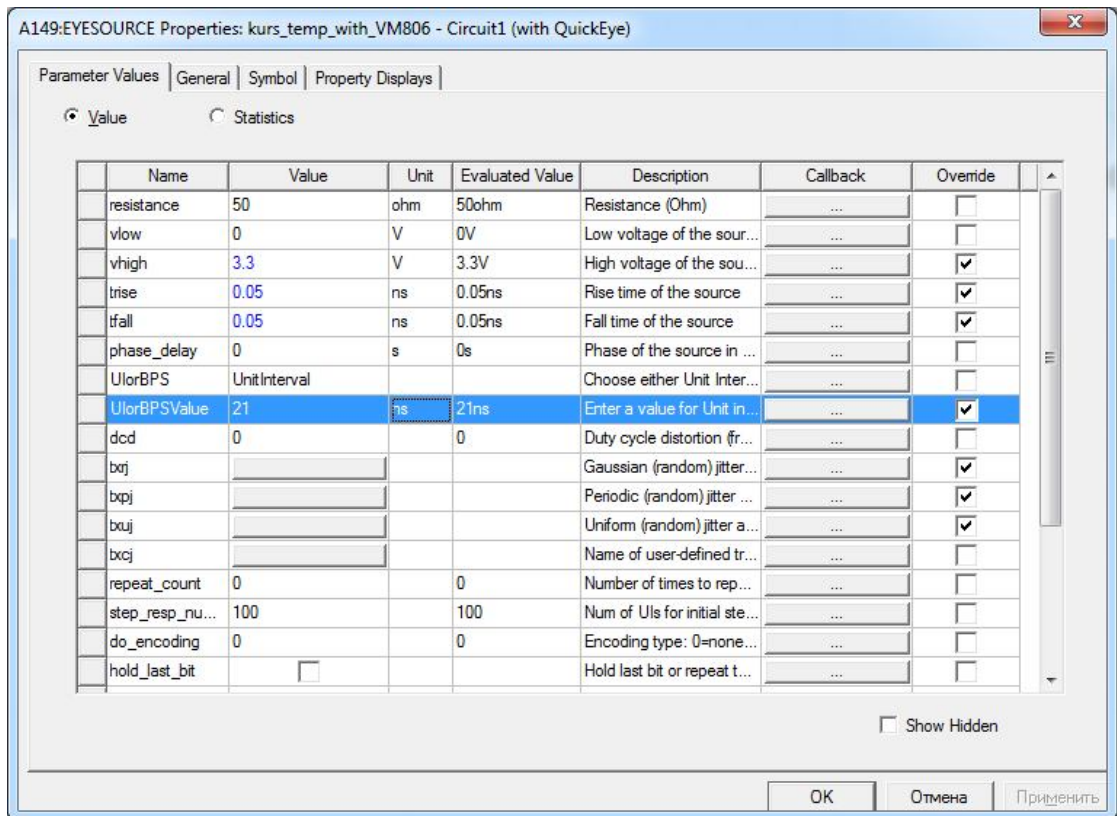


Рисунок 4.2.1.6 – Параметры элемента EYESOURCE

Для анализа формы сигналы выбрать разделы меню Analyze -> Add Nexxim Solution Setup -> Transient Analysis. В появившемся окне задать длительность обмена (для рассматриваемого модуля она равна 4500 нс). Для анализа электромагнитных колебаний выбрать разделы меню Analyze -> Add Nexxim Solution Setup -> QuickEye Analysis. Для анализа вероятностных характеристик – разделы меню Analyze -> Add Nexxim Solution Setup -> VerifEye Analysis. Запустить анализ.

Результаты расчетов отобразятся в дереве проекта. Для анализа сигналов выбрать разделы меню Results -> Create Standard Report -> Rectangular Plot.

4.2.2 Анализ результатов моделирования сигналов модуля

На рисунке 4.2.2.1 приведены графики зависимости коэффициента отражения сигналов от частоты. На рисунке 4.2.2.2 приведены графики зависимости коэффициентов передачи от частоты. Анализ данных показывает, что с ростом частоты передача сигнала ухудшается.

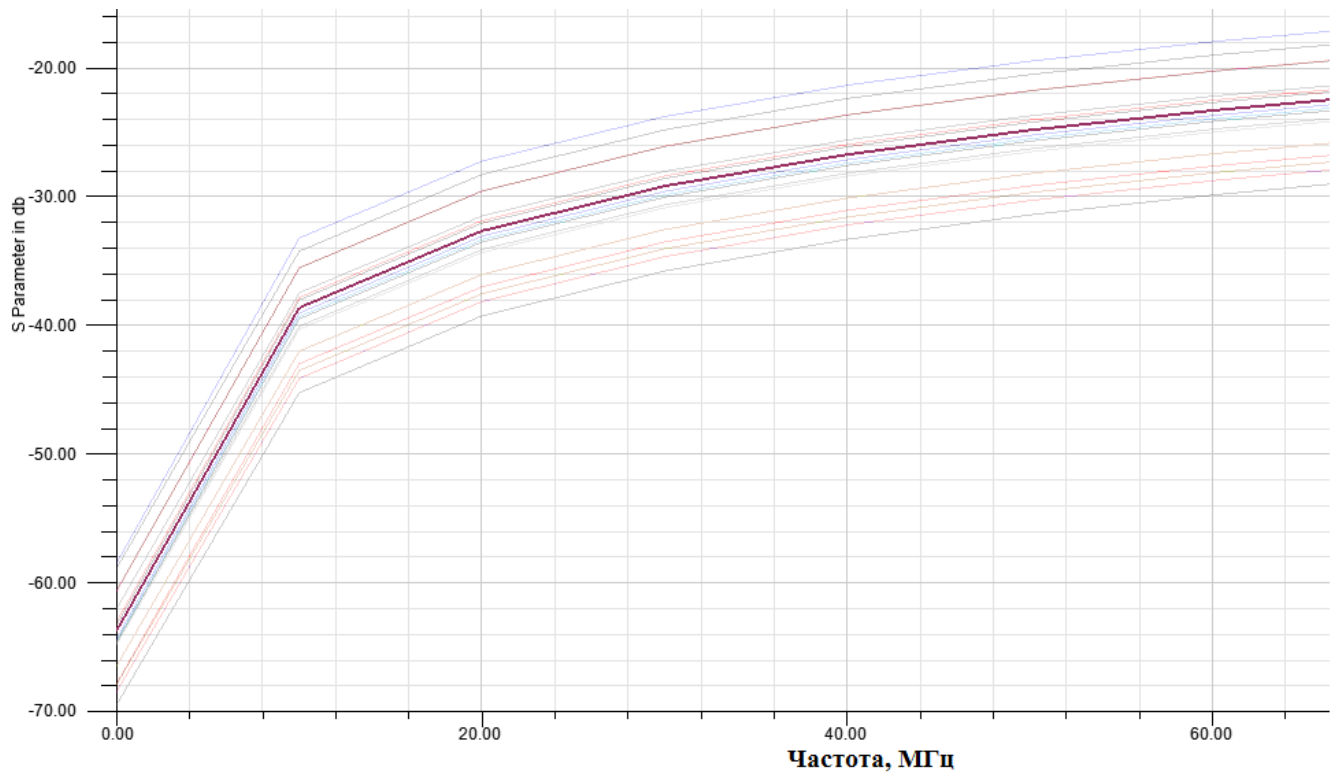


Рисунок 4.2.2.1 – Коэффициенты отражения сигналов

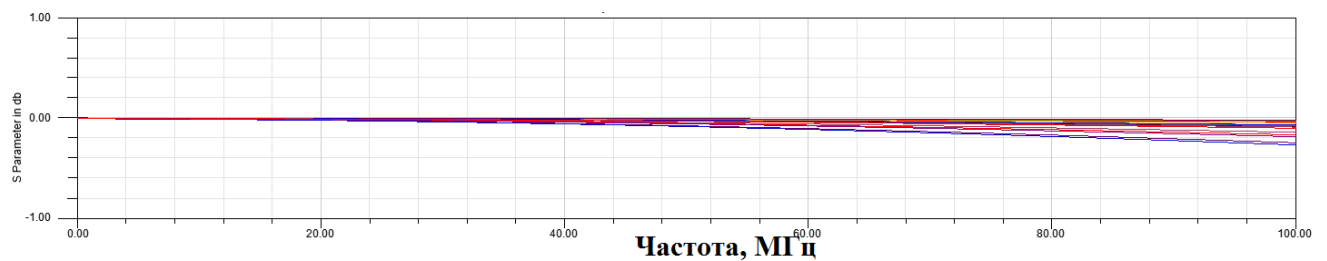


Рисунок 4.2.2.2 – Коэффициенты передачи сигналов

Для каждого сигнала построена диаграмма электромагнитных колебаний и форма сигнала (пример для сигнала SHZ показан на рисунке 4.2.2.3). Результаты моделирования показывают наличие перекрестных помех при прохождении сигналов. Амплитуда помехи не превышает величины 0.5В при уровне сигнала 3.3В, что не влияет на качество распознавания сигнала.

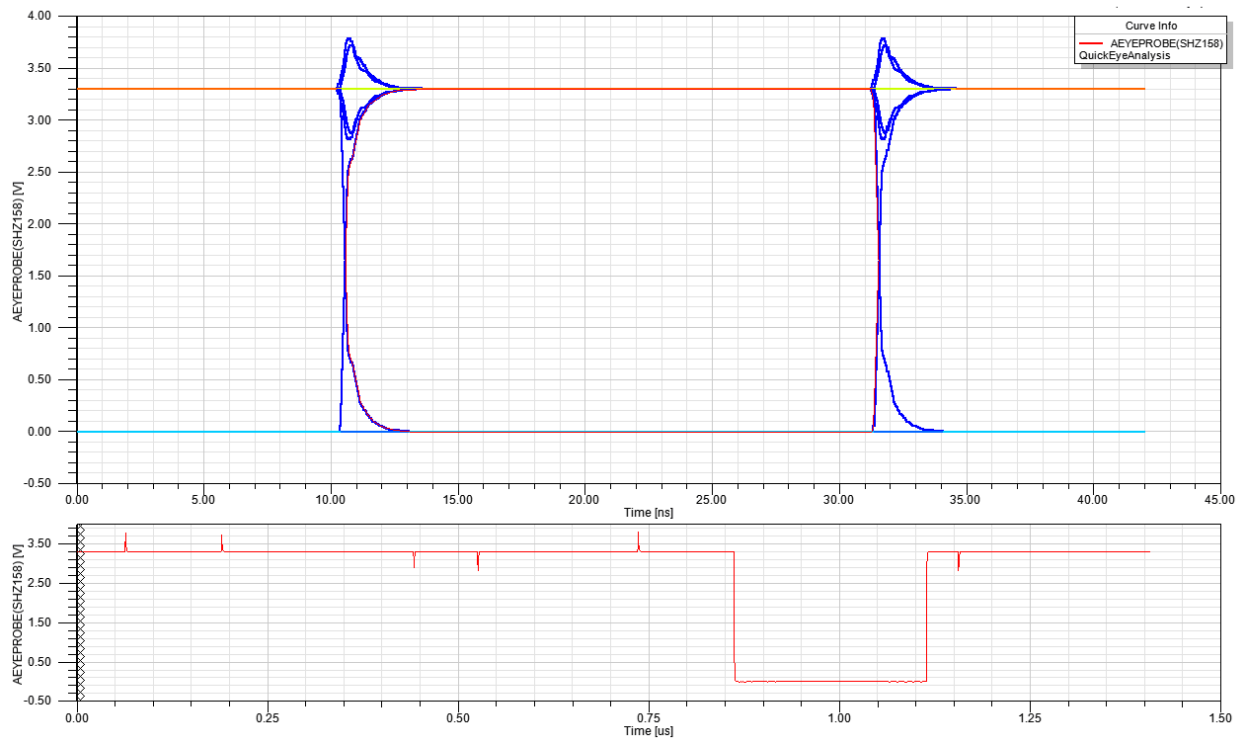


Рисунок 4.2.2.3 – Форма и диаграмма электромагнитных колебаний сигнала SHZ

Проведен анализ целостности выходных сигналов реального модуля посредством осциллографа. Для этого вычислительный модель установлен в кросс-плату, являющейся частью моделирующего КОАП [23]. Посредством канала технологического доступа загружена программа, осуществляющая циклическую выдачу данных в магистраль, и запущена на выполнение. Величины перекрестных помех на линиях не превосходит значения 0,5 В, что соответствует экспериментальным данным и подтверждает качество разработанной методики анализа целостности сигналов.

4.3 Обеспечение достоверности передачи информации по магистрали

В работе [20] проведено исследование вариантов резервирования магистральных связей в вычислительной системе, обоснован выбор 16-разрядной параллельной магистрали в качестве интерфейса межмодульного взаимодействия БЦВС семейства «Малахит» [8]. Троированный вариант магистрали используется

в БЦВС семейства «Малахит-3» [30], дублированный вариант – в БЦВС семейства «Малахит-7». [8]

Одним из самых распространенных механизмов проверки достоверности принятых по магистрали сообщений является расчет и проверка контрольной суммы сообщения. Контрольная сумма – это код, полученный согласно заданному алгоритму, который добавляется в начало или в конец сообщения и передается вместе с ним. Известно множество алгоритмов расчета контрольной суммы: расчет арифметической суммы (прямой, инверсной), *xor*-суммы (суммы по исключяющему ИЛИ), избыточного циклического кода (CRC) [137], алгоритм Adler [129, 134], FNV, Murmur и др. [129]

В работе [138] исследован вопрос о выборе оптимального алгоритма расчета контрольной суммы по критерию эффективности обнаружения ошибки при передаче сообщений. Сделан вывод о том, что вероятность необнаружения ошибки зависит от типа алгоритма, длины сообщения и самих данных.

При выборе алгоритма расчета контрольной суммы по магистрали целесообразно использовать следующие критерии:

- эффективность обнаружения ошибок при передаче данных;
- время расчета контрольной суммы;
- объем памяти программы и данных для расчета.

Искажения данных при передаче по магистрали могут быть обусловлены действием ионизирующего, электромагнитного излучения и, в этом случае, представляют собой сбои магистрали. Можно предполагать тогда, что изменения разрядов в словах сообщения происходят случайно и независимо друг от друга, и для расчета вероятности необнаружения ошибки при передаче (P_1) воспользоваться методикой расчета, приведенной в [138]:

1. С помощью генераторов случайных чисел сформировать массив различных случайных сообщений, для каждого сообщения вычислить его контрольную сумму;

2. Проимитировать все случайные 1-разрядные, 2-разрядные, 3-разрядные и т.д. искажения при передаче сообщения вместе с его контрольной суммой, вычис-

ляя каждый раз контрольную сумму искаженного сообщения и сравнивая ее с принятой. Совпадение вычисленной и принятой контрольных сумм означает, что искажение данных при передаче не было обнаружено. P_1 определяется как отношение необнаруженных случаев искажения сообщений к общему числу передач.

Искажения данных при передаче по магистрали могут быть обусловлены также неисправностью элемента магистрали, в результате которого происходит «залипание бита». Для расчета вероятности необнаружения ошибки при передаче (P_2) при наличии неисправностей такого рода можно воспользоваться методикой, приведенной выше с имитацией групповых искажений.

Проведено исследование следующих алгоритмов расчета контрольной суммы сообщений, которые применялись в различных задачах БЦВС: расчет 16-разрядной арифметической суммы, расчет 32-разрядной арифметической суммы, расчет XOR-суммы, расчет избыточного циклического кода CRC-16, CRC-32. Все алгоритмы с вероятностью 1 обнаруживают 1-разрядные сбои. Алгоритмы CRC с вероятностью 1 обнаруживает 2-разрядные сбои и потому более надежен. Результаты расчета P_1 в случае 2-х разрядных сбоев для арифметических сумм и xor-суммы приведены на рисунке 4.3.1. N – длина сообщения в словах без учета размера контрольной суммы. Результаты расчета P_1 не противоречат результатам исследования в [138].

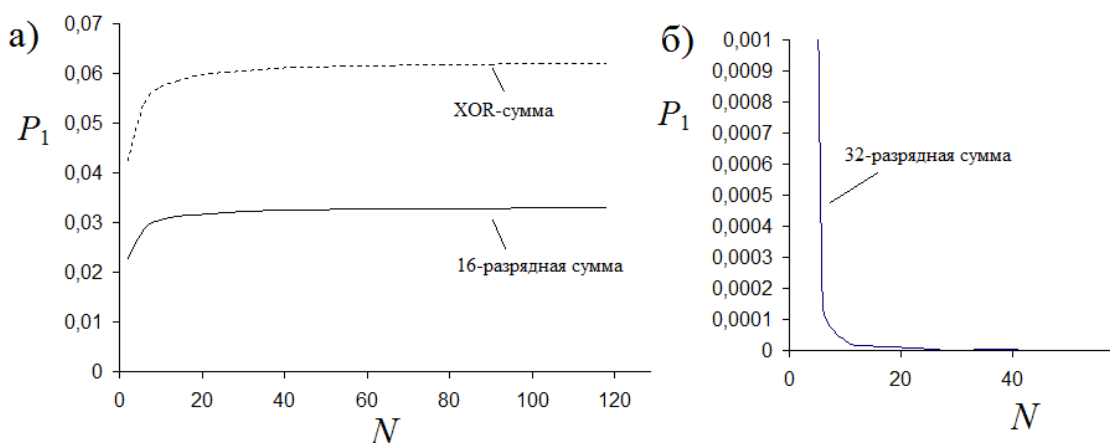


Рисунок 4.3.1 – Результаты расчета P_1 в случае 2-разрядных искажений

Результаты расчета P_2 для 1-разрядных, 2-разрядных и 3-разрядных искажений приведены на рисунках 4.3.2, 4.3.3 и 4.3.4 соответственно.

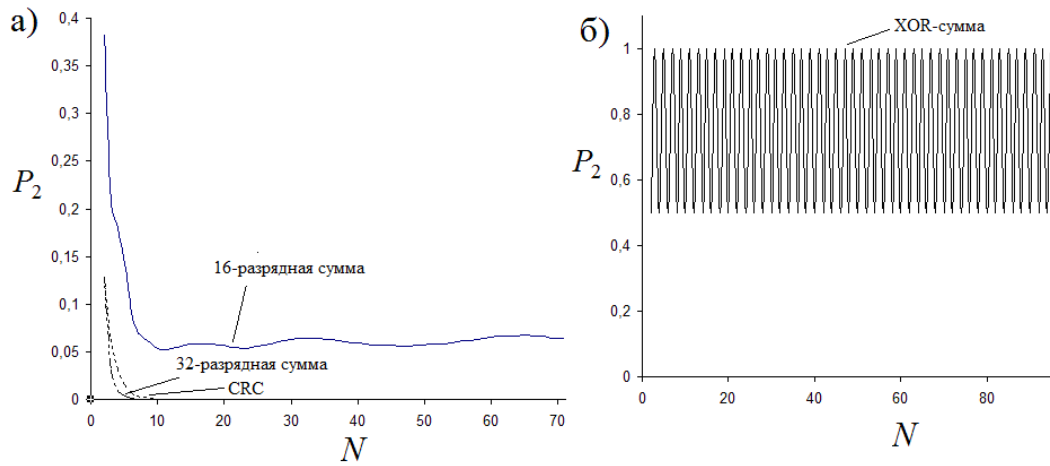


Рисунок 4.3.2 – Результаты расчета P_2 в случае 1-разрядных искажений

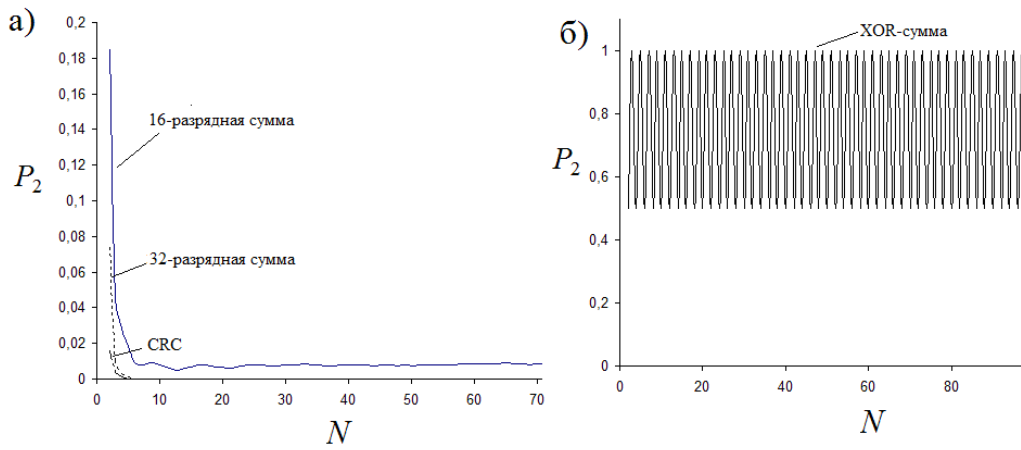


Рисунок 4.3.3 – Результаты расчета P_2 в случае 2-разрядных искажений

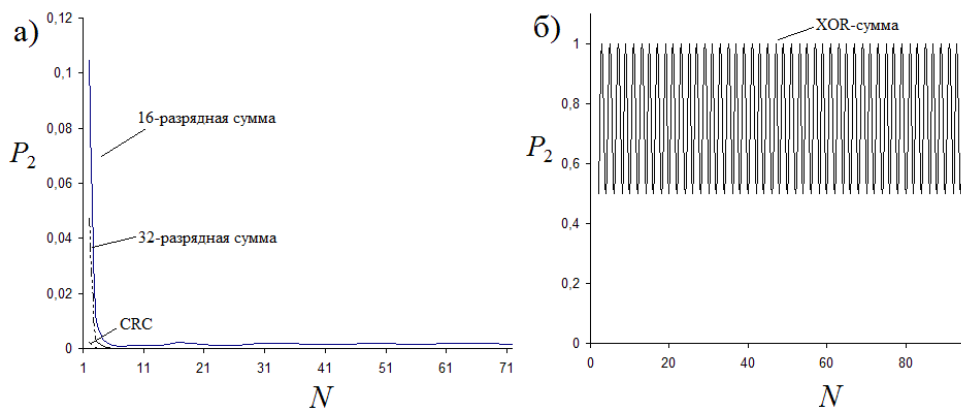


Рисунок 4.3.4 – Результаты расчета P_2 в случае 3-разрядных искажений

Результаты исследования показывают, что в случае однократных сбоев при передачи сообщений по магистрали вероятность необнаружения ошибки при использовании алгоритма расчета 32-разрядной арифметической суммы стремится к нулю и порядка 10^{-5} при $N = 20$. В случае групповых искажений сообщения, обусловленных неисправностью линии магистрали, алгоритм расчета 32-разрядной арифметической суммы практически не уступает по эффективности алгоритмам CRC. Эффективность обнаружения ошибок алгоритмами XOR-суммы и 16-разрядной арифметической суммы значительно ниже.

Оценим ресурсы, необходимые для реализации этих алгоритмов для решения задачи обеспечения достоверности передачи данных по магистрали модулем БЦВС с процессором 1892ВМ8Я [79]. Время расчета определим при выполнении алгоритма из кэшируемой внутренней памяти процессора при работе процессора с частотой 72МГц. Длина сообщения, передаваемого по магистрали, – 960 слов.

Требуемые для реализации алгоритмов ресурсы приведены в таблице 4.3.1.

Таблица 4.3.1 – Ресурсы, необходимые для расчета контрольной суммы

Алгоритм	Объем данных, байт	Объем программы, байт	Время расчета, мкс
CRC-16	400h	19Ch	1079,85012
CRC-32	800h	172h	976,231
32-разр. арифм. сумма	0	D4h	426.92104

Время расчета алгоритма может быть критическим при решении задачи обеспечения циклической выдачи данных в режиме основной работы модуля. Поэтому целесообразно отдать предпочтение алгоритму с наименьшим временем расчета.

По результатам проведенного исследования для решения задачи обеспечения достоверности передачи данных по магистрали рекомендовано использовать алгоритм расчета 32-разрядной арифметической контрольной суммы. Рекоменда-

ция по выбору алгоритма учтена в программных средствах обеспечения требований по надежности ввода информации в БЦВС темы «Союз-2» [52].

4.4 Оценка целесообразности восстановления вычислительных модулей в полете

Наибольшие трудности при реализации программно-аппаратных средств контроля резерва и восстановления (СКРВ), применяемых в составе БЦВС, создаваемых в «НПО автоматики», вызывает восстановление сбившегося вычислительного модуля в полете. Проведенный анализ СКРВ БЦВС ракетносителя «Союз-2» показал:

1) для восстановления работоспособности сбившегося вычислительного модуля требуется прекращение процесса управления изделием на время «перекачки» информации из исправного модуля в сбившийся. До завершения процесса восстановления и повторной попытки включения его в вычислительный процесс определить тип отказа (сбой или неисправность) модуля невозможно;

2) реализация восстановления отказавшего модуля не дает гарантии восстановления работоспособности модуля;

3) реализация восстановления отказавшего модуля требует существенных затрат трудоемкости на разработку и отработку аппаратуры и программ СКРВ, что само по себе является проблемой из-за сложности алгоритмов СКРВ и высокой степени связи их с функциональными задачами управления;

4) по опыту эксплуатации аппаратуры систем управления, созданных в «НПО автоматики», начиная с первых систем изделий 4К-18 и 4К-75, сбой и неисправности вычислительного модуля в полете маловероятны (интенсивность отказов в полете имеет порядок 10^{-5} час⁻¹);

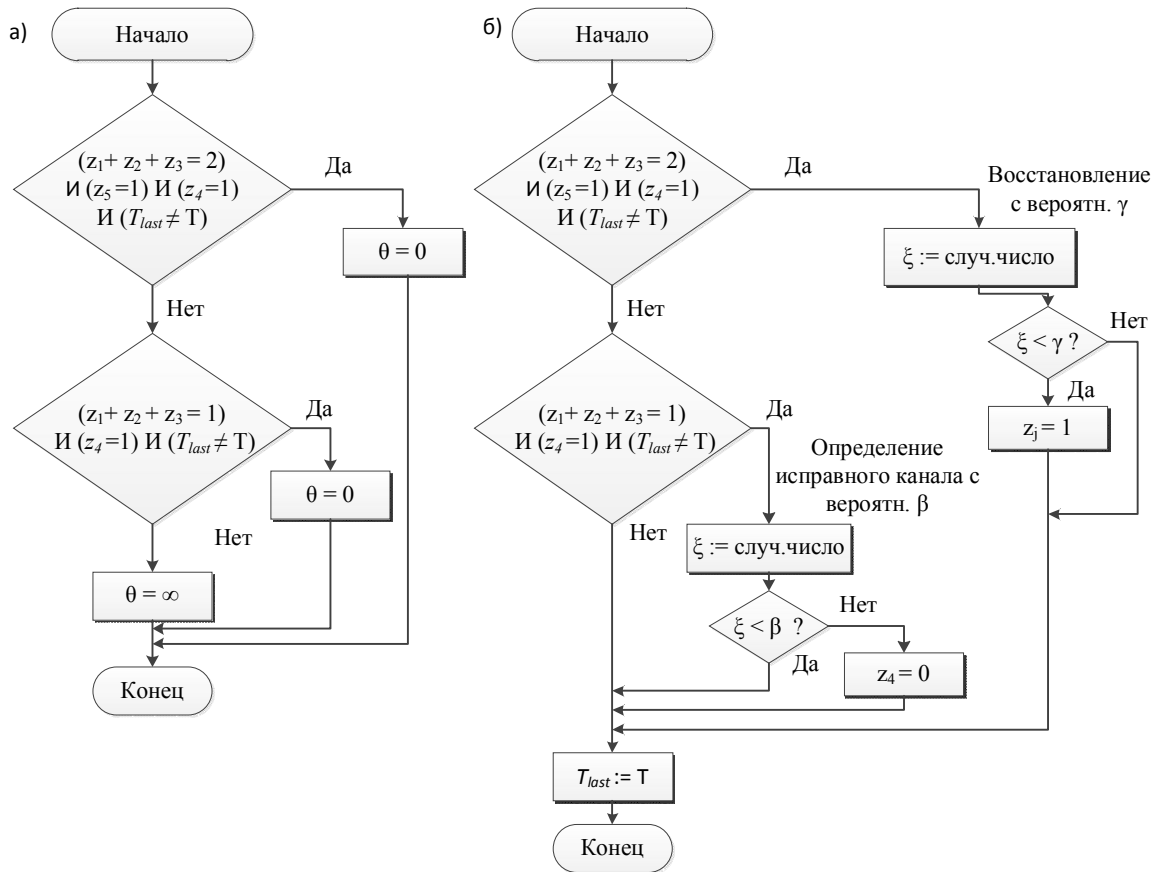
5) при отказе одного или двух вычислительных модулей БЦВС способна обеспечить продолжение процесса управления посредством одного вычислительного модуля без восстановления ранее сбившихся модулей.

Целесообразно провести сравнительный анализ надежности вариантов БЦВС с возможностью восстановления вычислительного модуля во время полета, и без. Для этого воспользуемся методикой, представленной в разделе 2.1 диссертационной работы. Рассмотрим две системы, состоящие из трех модулей, работающих синхронно и независимо друг от друга, решающих одну и ту же задачу на заданном интервале работы. Средства контроля, входящие в состав обеих систем, с вероятностью 1 определяют первый отказавший модуль и с вероятностью β – второй. Средства восстановления, входящие в состав второй системы, обеспечивают восстановление отказавшего ВМ при наличии двух исправных ВМ с вероятностью γ .

Вероятность отказа первой системы (обозначим через Q_1) может быть вычислена по формуле (3.1.6). Вероятность отказа второй системы найдем с помощью метода, предложенного в разделе 2.2 диссертационной работы. При моделировании примем следующие допущения: время восстановления мало по отношению к времени основной работы, средства восстановления на период восстановления работают исправно.

Вторая система состоит из $n = 5$ элементов: A_1, A_2, \dots, A_n . Элементы A_1, A_2, A_3 соответствуют каналам системы (первой, второй и третий модуль соответственно), A_4 – средствам контроля, A_5 – средствам восстановления. Интенсивности отказов элементов системы примем равными: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda$, $\lambda_4 = k_{CK}\lambda$, $\lambda_5 = k_{CB}\lambda$, где λ, k_{CK}, k_{CB} – неизвестные параметры системы.

Блок-схемы алгоритма изменения параметров модели в зависимости от текущего состояния элементов системы и оставшегося времени работы T (процедура $s(A_1, A_2, \dots, A_n, T)$) и алгоритма определения времени, необходимого для совершения изменений в системе (функция $t(A_1, A_2, \dots, A_n, T)$), показаны на рисунке 4.4.1. Переменная T_{last} в алгоритмах является глобальной и предназначена для сохранения времени последнего изменения в системе.

Рисунок 4.4.1 – Блок-схема алгоритмов: а) t ; б) s

Функция регистрации отказа системы $r(A_1, A_2, \dots, A_n)$ возвращает значение 1 (отказ системы), если $(z_4=0)$ ИЛИ $(z_5=0)$ ИЛИ $(z_1 + z_2 + z_3=0)$.

На основании отчетов по испытаниям [84, 85] специалистами «НПО автоматики» проведен расчет интенсивностей отказов вычислительных модулей различных БЦВС по методике [119; с. 307]. Интенсивность отказов вычислительного модуля лежит в диапазоне от $1,733700 \cdot 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ до $2,980193 \cdot 10^{-5} \text{ час}^{-1}$.

Эффективность контроля (β) примем равной 0.95, что достаточно близко к реальной, полученной по результатам оценок полноты контроля [65]. Вероятность восстановления отказавшего модуля (γ) проанализируем в диапазоне от 0.5 до 0.8, что реально достижимо для проектируемой системы. Интенсивность отказов средств контроля примем равной $k_{CK} = 0.1$, интенсивность отказов средств восстановления – $k_{CB} = 0.1$, что реально для проектируемых БЦВС.

Время основной работы БЦВС (полета) – 10 минут.

По результатам расчета отношение вероятностей отказов вариантов систем находится в диапазоне от 1,03 до 1,07 при всех значениях рассматриваемых параметров. Восстановление работы отказавшего ВМ БЦВС в полете нецелесообразно.

Выводы

1. Задача отработки аппаратного и программного обеспечения управляющих вычислительных систем может быть достаточно полно решена посредством моделирующего комплекса, в создании которого участвовал автор диссертационной работы. Комплекс позволяет вносить сбои и неисправности в процессе отработки в любой момент времени от начала запуска системы. Предложена методика проведения эксперимента на моделирующем комплексе для проверки метода оценки вероятности отказа системы, предложенного в разделе 2.2 диссертационной работы. По результатам эксперимента с реальной вычислительной системой получены значения вероятности отказа с погрешностью не более 0.8%.

2. На этапе проектирования модуля системы целесообразно проводить анализ целостности его сигналов, что возможно с использованием технологии моделирования плат и электромагнитного анализа, которые в настоящее время достаточно развиты. Предложена методика анализа целостности цифровых сигналов модуля посредством программного обеспечения Ansys (пакетов программ Ansys SIware, Ansys Designer). Методика позволяет оценить величину перекрестных помех на линиях связи. Достоверность методики подтверждена совпадением результатов моделирования с экспериментальной оценкой величины перекрестных помех на линиях связи вычислительного модуля БЦВС.

3. Задача обеспечения достоверности передачи информации по системной магистрали может быть эффективно решена применением алгоритма расчета контрольной суммы сообщения. Проведен сравнительный анализ алгоритмов расчета для параллельной 16-разрядной магистрали с учетом того, что на магистрали воз-

можно неисправность типа «залипание бита». Рекомендован алгоритм расчета 32-разрядной арифметической суммы.

4. Проведена оценка целесообразности восстановления вычислительного модуля БЦВС для ракетносителя «Союз-2» в полете. По результатам анализа сделан вывод о нецелесообразности реализации алгоритма восстановления модуля.

Заключение

1. Проведенный в работе анализ архитектуры УВС РКТ и тенденций развития архитектуры показал, что повышение надежности таких систем целесообразно проводить путем резервирования, внедрения и развития аппаратно-программных средств контроля резерва и восстановления работоспособности компонентов системы при сбоях, путем внедрения новых технических решений. Решение задачи сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры УВС на стадии раннего проектирования системы требует разработки методики анализа, учитывающей сложные алгоритмы функционирования таких систем.

2. В работе обоснован выбор методики сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры УВС. Предложена модификация метода статистического моделирования для оценки надежности таких систем, позволяющая учесть алгоритмы функционирования, критерии отказов и восстановлений работоспособности компонентов системы при сбоях, не требующая описания всевозможных состояний системы. Достоверность метода подтверждена совпадением результатов моделирования с аналитическим расчетом тестовых задач и экспериментальными данными, полученными на моделирующем комплексе отработки аппаратуры и программ. На основе предложенного метода и методики анализа разработано программное обеспечение для исследования надежности системы и обоснования выбора варианта реализации по критерию надежности.

3. Проведенный в работе анализ надежности вариантов резервирования источников вторичного электропитания показал, что целесообразен трехканальный вариант со средствами контроля резерва, устройством отключения канала с катастрофическим отказом и схемой нейтрализации параметрического отказа.

4. Проведенный в работе анализ архитектуры трехканального системного модуля БЦВС ракетносителя «Союз-2» показал, что в блок контроля модуля целесообразно введение счетчиков и признаков сбоев для избежания ложного бракования канала модуля при наличии сбоев на локальных шинах модуля.

5. Проведена апробация технологии SpaceWire модулем БЦВС, в которой принял участие автор диссертационной работы. Поддержка технологии требует разработки специализированного контроллера магистрали, осуществляющего сопряжение процессора модуля с магистралью БЦВС семейства «Малахит». В работе предложена и обоснована архитектура контроллера, которая стала предметом реализации.

6. Предложена методика анализа целостности цифровых сигналов модулей БЦВС с использованием программного обеспечения Ansys. Методика позволяет оценить величину перекрестных помех на линиях связи, обусловленных излучением элементов платы.

7. Основные результаты диссертационной работы нашли практическое применение в процессе проектирования БЦВС семейства «Малахит», создаваемых в «НПО автоматики».

Список сокращений и условных обозначений

БИНС	Бесплатформенная инерциальная навигационная система
БК	Блок контроля
БЦВМ	Бортовая цифровая вычислительная машина
БЦВС	Бортовая цифровая вычислительная система
ВМ	Вычислительный модуль
ГСП	Гиросtabilизированная платформа
ИВЭП	Источник вторичного электропитания
КОАП	Комплекс обработки аппаратуры и программ
ЛКГ	Линейно-конгруэнтный генератор
МКО	Модуль канала обмена
НПО	Научно-производственное объединение
ПК	Переключатель каналов
ПЛИС	Программируемая логическая интегральная схема
ПО	Программное обеспечение
РКТ	Ракетно-космическая техника
РЭА	Радиоэлектронная аппаратура
САУ	Система автоматического управления
СБИС	Специализированная большая интегральная схема
СВМ	Специализированный вычислительный модуль
СВУ	Специализированное вычислительное устройство
СКРВ	Средства контроля резерва и восстановления
СМ	Системный модуль
ТН	Триггер неисправностей
КГ	Контрольная группа
ЦДА	Цифровой дифференциальный анализатор
УВС	Управляющая вычислительная система
УМ	Узел мажоритации

ФСИ	Формирователь синхроимпульсов
CDB	CPU Data Bus
DMA	Direct Memory Access
OnCD	On chip debugger

Список литературы

1. Абакумов, А.В. Полунатурное моделирование внешней среды для обработки систем управления [Электронный ресурс] / А.В. Абакумов, Е.В. Блескина, А.Г. Шкаев // Саратовский государственный технический университет. – Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/textsts/rus/stat/st404/html>.
2. Авен, О.И. Оценка качества и оптимизация вычислительных систем / О.И. Авен, Н.Н. Гурин, Я.А. Коган. – М.: Наука, Главная ред. физико-математической литературы, 1982. – 464 с.
3. Авен, О.И., Коган Я.А. Управление вычислительным процессом в ЭВМ (Алгоритмы и модели). – М.: Энергия, 1978. – 240 с.
4. Антимиров, В.М. Автоматизация проектирования базового программного обеспечения бортовых вычислительных комплексов систем управления нового поколения / В.М. Антимиров, В.Н. Ачкасов, В.П. Крюков// Интеллектуализация управления в социальных и экономических системах: сб. науч. тр. Воронеж. гос. техн. ун-та. – Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. – С. 45-51.
5. Антимиров, В.М. Алгоритм сравнительной оценки надежности вариантов вычислительных комплексов для систем управления космических летательных аппаратов / В.М. Антимиров, В.Н. Ачкасов // Вестник Самарского аэрокосмического ун-та. – Самара, 2005. – №17. – С.71-76.
6. Антимиров, В.М. Анализ состояния и тенденции развития управляющих вычислительных комплексов двойного назначения для систем нового поколения / В.М. Антимиров // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. Сер. «САПР и системы автоматизации производства»: сб. науч. тр. – Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. – Вып. 3.5(2). – С.6-9.
7. Антимиров, В.М. Архитектура вычислительных комплексов для бортовых систем управления нового поколения / В.М. Антимиров, В.Н. Ачкасов, П.Р. Машевич // Системы управления и информационные технологии. – 2005. – №5(20). – С.41-45.

8. Антимиров, В.М. Бортовые цифровые вычислительные системы семейства «Малахит» для работы в экстремальных условиях / В.М. Антимиров, А.Б. Уманский, Л.Н. Шалимов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – Самара: Самарский гос. аэрокосм. ун-т, 2013. – №4 (42). – С. 19–27.

9. Антимиров, В.М. Вопросы построения адаптивных бортовых управляющих вычислительных комплексов / В.М. Антимиров, В.Н. Ачкасов // Системы управления и информационные технологии. – 2005. – № 5(21). – С.15-19.

10. Антимиров, В.М. Вопросы построения адаптивных специализированных вычислителей для задач навигации по картам местности / В.М. Антимиров // Материалы XIV межотраслевой НТК памяти Н.Н. Острякова / ЦНИИ «РУМБ». – Ленинград, 1985. – С. 164 – 169.

11. Антимиров, В.М. Вопросы применения генераторов случайных чисел для исследования сложных систем и структуры материалов методом статистического моделирования (Монте-Карло) / В.М. Антимиров, Г.А. Смелчакова, В.А. Светлаков // Моделирование систем и процессов. – Воронеж: Воронежский гос. лесотех. университет им. Г.Ф. Морозова, 2012. – №2 – С. 16–19.

11. Антимиров, В.М. Вопросы распределения ресурсов в управляющей вычислительной системе / В.М. Антимиров // Материалы XXIII конференции памяти Н.Н. Острякова. – С-Пб: ЦНИИ «Электроприбор, 2001. – С.15-20.

12. Антимиров, В.М. Выбор генератора случайных чисел для оценки параметров надежности систем методом статистического моделирования / В.М. Антимиров, Г.А. Смелчакова // Моделирование систем и процессов. – Воронеж: Воронежский гос. лесотех. университет им. Г.Ф. Морозова, 2012. – №3 – С. 10–13.

13. Антимиров, В.М. Выбор оптимального варианта архитектуры управляющей вычислительной системы / В.М. Антимиров, Г.А. Смелчакова // Моделирование систем и процессов. – Воронеж: Воронежский гос. лесотех. университет им. Г.Ф. Морозова, 2012. – №2 – С. 11–15.

14. Антимиров, В.М. Вычислительная система / В.М. Антимиров. – АС № 747326.

15. Антимиров, В.М. Вычислительная система : пат. 2444053 Рос. Федерация : МПК G 06 F 15/00 / В.М. Антимиров, Я.В. Антимиров, И.В. Кружаев, А.С. Наронов, А.В. Франк ; заявитель и патентообладатель: ФГУП «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова». – № 2010133014/08 ; заявл. 05.08.2010 ; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 6.

16. Антимиров, В.М. Задачи развития микроэлектронных компонентов для построения управляющих вычислительных комплексов и методологии их проектирования и изготовления / В.М. Антимиров, Ю.К. Фортинский // Вестник Воронеж. гос. тех. ун-та. Сер. «САПР и системы автоматизации производства»: сб. науч. тр. – Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. – Вып. 3.5(3). – С. 44-49.

17. Антимиров, В.М. Инженерная методика исследования и выбора оптимального варианта архитектуры управляющей вычислительной системы в условиях неопределенности относительно интенсивности отказов / В.М. Антимиров, Г.А. Смелчакова // Естественные и технические науки. – М.: Спутник+, 2014. – №4(72) – С. 125–132.

18. Антимиров, В.М. Исследование вариантов реализации контроля для модулей БЦВС / В.М. Антимиров, Г.А. Смелчакова // Естественные и технические науки. – М.: Спутник+, 2014. – №5(73) – С. 115–120.

19. Антимиров, В.М. Исследование вариантов резервирования источников вторичного электропитания на стадии проектирования / В.М. Антимиров, Г.А. Смелчакова, В.А. Светлаков // Научная дискуссия: вопросы технических наук: сборник статей по материалам XXV международной заочной научно-практической конференции. — М., Изд. «Международный центр науки и образования», 2014. — № 8 (20) — С. 11-16.

20. Антимиров, В.М. Исследование вариантов резервирования магистральных связей в вычислительной системе / В.М. Антимиров, В.Н. Ачкасов, П.Р. Машевич // Информационные технологии моделирования и управления, 2005. – С. 238–243.

21. Антимиров, В.М. Исследование путей оптимального резервирования источника вторичного электропитания и выбор варианта реализации / В.М. Анти-

миров, Г.А. Смельчакова, В.А. Светлаков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – выпуск 3. – Лыткарино: ФГУП НИИП, 2014. – С. 42–46.

22. Антимиров, В. М. Резервированный источник тока : пат. 2512890 Рос. Федерация : МПК Н 03 М 1/36 / В.М. Антимиров, А.С. Вдовин, А.А. Кузеванов, И.Г. Пронькин, В.А. Светлаков ; заявитель и патентообладатель: ФГУП «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова». – № 2013110101/07 ; заявл. 06.03.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10.

23. Антимиров, В.М. Моделирующий КОАП : пат. 2516703 Рос. Федерация : МПК G 06 F 15/00, МПК G 06 F 9/44 / В.М. Антимиров, А.В. Журавлев, И.В. Шашмурин, В.И. Петухов, Г.А. Смельчакова, С.П. Литвиненко ; заявитель и патентообладатель: ФГУП «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова». – № 2013103929/08 ; заявл. 29.01.2013 ; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.

24. Антимиров, В.М. Направления реализации радиационно-стойких источников вторичного электропитания / В.М. Антимиров, В.Г. Бельцов, Г.А. Смельчакова, М.Б. Трапезников, Л.Н. Шалимов // Тезисы докладов 18 Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем «Стойкость 2015» – г. Лыткарино: ФГУП «НИИП», 2015. – С. 258-259.

25. Антимиров, В.М. Организация распределенных ресурсов в управляющем вычислительном комплексе / В.М. Антимиров // Проблемы управления движением и навигацией: сб. науч. тр. – М.: АН СССР, 1987. – Вып. 22. – С. 17–24.

26. Антимиров, В.М. Особенности реализации подсистемы обработки геофизических полей и оптической навигации, как автономных вычислительных модулей / В.М. Антимиров, В.Н. Ачкасов // Полет. – 2005. – №6. – С. 55–60.

27. Антимиров, В.М. Особенности реализации современных вычислительных комплексов для бортовых систем управления / В.М. Антимиров, В.Н. Ачкасов, П.Р. Машевич // Космонавтика и ракетостроение. – 2005. – №18. – С.45-51.

28. Антимиров, В.М. Оценка целесообразности восстановления модулей БЦВС во время работы на этапе проектирования БЦВС / В.М. Антимиров, Г.А. Смельчакова // Научная дискуссия: вопросы технических наук : сборник статей по

материалам XXVI-XXVII международной заочной научно-практической конференции. – М., Изд. «Международный центр науки и образования», 2014. – № 9-10 (21) – С. 6-10.

29. Антимиров, В.М. Повышение надежности управляющих вычислительных комплексов / В.М. Антимиров // Интеллектуализация управления в социальных и экономических системах: сб. науч. тр. Воронеж. гос. техн. ун-та. – Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. – С. 5-11.

30. Антимиров, В.М. Поколения ЦВС / В.М. Антимиров, М.Б. Трапезников // Вопросы атомной науки и техники. Научно-технический сборник. – М.: ФГУП НИИП, 2012. – Вып. 2. – С. 38 – 48.

31. Антимиров, В.М. Программа оценки надежности технических систем и выбора оптимального варианта методом статистического моделирования : св-во о регистрации программы для ЭВМ № 2014612257 Рос. Федерация / В.М. Антимиров, Г.А. Смелычакова, А.В. Журавлев ; заявитель и правообладатель: ФГУП «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова» – № 2013662024 ; заявл. 24.12.2013; опубл. 20.03.2014.

32. Антимиров, В.М. Развитие бортовых вычислительных средств / В.М. Антимиров, В.И. Борисов, А.К. Леонтьев // Сборник РКТ. – Екатеринбург: ФГУП «НПО автоматики», 2009. – сер. X1, вып. 2. – с. 24–35.

33. Антимиров, В.М. Расчет способности восстановления работы вычислительных модулей бортовых вычислительных комплексов в полете / Антимиров В.М., Смелычакова Г.А., Яцук Г.Е., Борисов В.И., Зелизко Д.И. // Моделирование систем и процессов. – Воронеж: Воронежский гос. лесотех. университет им. Г.Ф. Морозова, 2013. – № 4. – С. 5–7.

34. Антимиров, В.М. Резервированное вычислительное устройство / В.М. Антимиров, Т.В. Коробейщикова. – АС № 1200292.

35. Антимиров, В.М. Решение задачи обоснования архитектуры бортовой цифровой вычислительной системы / В.М. Антимиров, Г.А. Смелычакова, А.С. Пентин // Естественные и технические науки. – М.: Спутник+, 2014. – №6(74) – С. 100-106.

36. Антимиров, В.М. Сбоеустойчивая вычислительная система : пат. 2541839 Рос. Федерация : МПК G 06 F 15/00, МПК G 06 F 15/16 / В.М. Антимиров, Я.В. Антимиров, А.Ю. Вагин, А.С. Вдовин, Г.А. Смельчакова, В.В. Язева ; заявитель и патентообладатель: ФГУП «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова». – № 2013130119/08 ; заявл. 01.07.2013 ; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5.

37. Антимиров, В.М. Современные вычислительные комплексы двойного назначения систем управления нового поколения: монография / В.М. Антимиров, В.Е. Межов, В.К. Зольников. – Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2006. – 246 с.

38. Антимиров, В.М. Технологическая УВМ : пат. 2563139 Рос. Федерация : МПК G 06 F 15/16, МПК G 06 F 11/30 / В.М. Антимиров, Я.В. Антимиров, А.С. Вдовин, А.В. Журавлев, В.И. Петухов, Г.А. Смельчакова, И.В. Шашмулин ; заявитель и патентообладатель: ФГУП «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова». – № 2013116173/08 ; заявл. 09.04.2013 ; опубл. 20.09.2015, Бюл. № 26.

39. Антимиров, В.М. Устройство контроля / В.М. Антимиров. – АС СССР №71816 от 24.07.72.

40. Антонов, М.М. Универсальный автоматизированный стенд проверки печатных узлов и электронных блоков / М.М. Антонов, В.Г. Солодкин // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2012: Сборник трудов XI международной практической конференции Москва 6-7 декабря 2012 г. – М.: ДМК Пресс, 2012. – с. 90-95.

41. Апанасенко, В.М. Морские ракетно-ядерные системы вооружения / В.М. Апанасенко, Р.А. Рухадзе. – М.: МО «Выхино-Жулебино», 2003. – 328 с.

42. АСОНИКА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://asonika-online.ru/uploads/images/ShortInfo_ASONIKA.pdf

43. Белоглазов, И.Н. Основы навигации по геофизическим полям / И.Н. Белоглазов, Г.И. Джанджгава., Г.П. Чигин ; Наука – М., 1985. – 251с.

44. Бессонов, А.А. Спутниковые навигационные системы: учеб. пособие / А.А. Бессонов, В.Я. Мамаев. – СПб: ГУАП, 2006. – 36 с.

45. Бортовые ЭВМ для ракетно-космических, авиационных и мобильных систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.argon.ru/?q=node/42>

46. Бранец, В.Н. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.Н. Бранец, И.П. Шмыглевский. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. – 280 с.
47. Буцан, Г.П. Аналитические методы в теории надежности. Сб. научн. тр. / под ред. Г.П. Буцана. – Киев: ин-т математики АН УССР, 1985. – 137 с.
48. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов / Е.С. Вентцель. – М.: Высш. шк., 2001. – 575с.
49. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Учеб. пособие для втузов. / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.
50. Геттих, А. Современные инструменты проектирования микроэлектронных схем и систем на кристалле [Электронный ресурс] / А. Геттих // ANSYS Advantage. Русская редакция. – 2012. – №18. – Режим доступа: <http://www.ansysolutions.ru/index.php?id=73#18ema1>.
51. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
52. Голованов, С.А. Программно-алгоритмические средства обеспечения требований по надежности ввода информации в бортовую вычислительную систему ракеты носителя «Союз-2» / С.А. Голованов, А.Б. Уманский. // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления». Сборник докладов / Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. – С. 166 - 173.
53. Головкин, Б.А. Параллельные вычислительные системы / Б.А. Головкин. – М.: Наука, Главная ред. физико-математической литературы, 1980. – 520 с.
54. Горский, Л.К. Статистические алгоритмы исследования надежности / Л.К. Горский. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1970. – 400 с.
55. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 40 с.

56. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 19 с.

57. ГОСТ 27.002–83. Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции. – М.: Стандартиформ, – 36 с.

58. ГОСТ Р 27.302-2009. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей. – М.: Стандартиформ, 2012. – 27 с.

59. ГОСТ Р 27.403-2009. Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы. – М.: Стандартиформ, 2011. – 15 с.

60. ГОСТ Р 51901.14-2007 (МЭК 61078:2006). Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы. – М.: Стандартиформ, 2008. – 28 с.

61. ГОСТ Р 27.607-2013. Надежность в технике. Управление надежностью. Условия проведения испытаний на безотказность и статистические критерии и методы оценки их результатов. – М.: Стандартиформ, 2015. – 50 с.

62. ГОСТ Р 51901.16-2005 (МЭК 61164:1995). Менеджмент риска. Повышение надежности. Статистические критерии и методы оценки. – М.: Стандартиформ, 2005. – 24 с.

63. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 24 с.

64. Гурский, Б.Г. Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов сухопутных войск / Б.Г. Гурский. – М.: МГТУ им Н.Э.Баумана, 2001. – 328 с.

65. Деменев, П.А. Разработка технологического процесса создания моделей и тестов цифровых устройств в среде NCLAUNCH. Дипломный проект. 140.306 000000 503 ПЗ. / П.А. Деменев. – Екатеринбург, УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – 120 с.

66. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.

67. Дмитриевский, Е.С. Конструкторско-технологическое обеспечение эксплуатационной надежности средств управления воздушным движением с позиции их проектирования и технического обслуживания: Учеб. пособие / Е.С. Дмитриевский. – СПб.:СПбГУАП, 2001. – с. 88.

68. Дуняшин, А.Б. Шесть океанов по килем. Рассказ об ученых, инженерах, рабочих Научно-производственного объединения автоматики – создателях систем управления ракетно-космических комплексов / А.Б. Дуняшин. – Екатеринбург: Изд. дом «Пакрус», 2004. – 336 с.

69. Журавлев, А.В. Анализ направлений развития комплексов отработки аппаратуры и программ / А.В. Журавлев, И.В. Шашмурин // Ракетно-космическая техника. Сер. XI. Системы управления ракетных комплексов. – вып. 1 – Екатеринбург: ФГУП «НПО автоматики», 2012. – С. 107-115.

70. Журавлев, А.В. Основные направления развития комплексов отработки аппаратуры и программ: программный комплекс централизованного управления / А.В. Журавлев, И.В. Шашмурин // Сборник докладов Молодежной научно-технической конференции-2012, посвященной 65-летию ОАО «ГРЦ Макеева». – II ч. – Миасс: ОАО «ГРЦ Макеева», 2012. – С. 60-66.

71. Интегрированная среда разработки и отладки программ MS Studio. Инструменты RISCORE32. Система команд. – ОАО НПЦ "Элвис", 2006. – 178 с.

72. Карасёв, А.А. О разработке методики испытаний бортовой аппаратуры в составе автоматического космического аппарата / А.А. Карасёв, И.И. Чупринский // Актуальные проблемы ракетно-космической техники («III Козловские чтения»). Сборник трудов – Самара: ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2013, – С. 324-326.

73. Кельтон, В. Имитационное моделирование. Классика CS / В. Кельтон, А. Лоу. – 3-е изд. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2004. – 847 с.

74. Красовский, В.Е. Надежность управляющих ЭВМ : уч. пособие / В.Е. Красовский, Н.Л. Прохоров, Ю.Д. Тювин; МИРЭА.–М.: 2002. – 132 с.

75. Кульба, В.В. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / В.В. Кульба, Е.А. Микрин, Б.В.

Павлов, В.Н. Платонов; под ред. Е.А. Микрина; Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова РАН. – М.: Наука, 2006. – 579 с.

76. Леонтьев, А.С. Проблемы применимости многоканальных вычислительных структур для систем управления космическими аппаратами / А.С. Леонтьев // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления». Сборник докладов / Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. – С. 159 - 165.

77. Машевич, П.Р. Современная методика и средства автоматизации проектирования микроэлектронных компонентов / П.Р. Машевич, В.Н. Ачкасов, В.М. Антимиров, Ю.К. Фортинский // Информационные ресурсы России. – 2005. – № 156. – С. 26-29.

78. Микрин, Е.А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения / Е.А. Микрин – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 336 с.

79. Микросхема интегральная 1892ВМ8Я. Руководство пользователя. – М.: ОАО НПЦ «ЭЛВИС», 2014. – 294 с.

80. Микросхемы интегральные 5576ХС1Т, 5576ХС1Т1. Инструкция по программированию. ГПКФ.431262.001Д4. – ОАО «КТЦ» Электроника», 2007. – 71 с.

81. Нозик, А.А. Автоматизированные системы управления. Надежность и безопасность. Автоматизированное структурно-логическое моделирование и расчет надежности и безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами и оборудованием на стадии проектирования. Методические рекомендации / под общ. ред. А.А. Нозика – Санкт-Петербург: ОАО «СПИК СЗМА», 2003. – 35 с.

82. Носкин, Г. Первые БЦВМ космического применения и кое-что из постоянной памяти / Г. Носкин. – СПб.: Реноме, 2011. – 264 с.

83. Острейковский, В.А. Теория надежности: Уч. для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высш. шк., 2003. – 463с.

84. Отчет ЛОИ С-13111-01М №Т-11399. – Екатеринбург, ОАО «НПО автоматики», 2011. – 28 с.
85. Отчет С-13111-02 №Т-11954. – Екатеринбург, ОАО «НПО автоматики», 2011. – 32 с.
86. Половко, А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 560с.
87. Попович, А. Перспективная платформа для построения бортовых вычислительно-управляющих систем [Электронный ресурс] / А. Попович // Компоненты и технологии. – №8. – 2008. – С. 168-170. – Режим доступа: http://kite.ru/assets/files/pdf/2008_08_168.pdf
88. Проников, А.С. Параметрическая надежность машин / А.С. Проников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
89. Прохоров, Н.Л. Отказоустойчивые вычислительные комплексы. Испытания и эксплуатация: метод. указания по выполнению практических занятий / Н.Л. Прохоров, А.Н. Шкамарда, В.Е. Красовский; МИРЭА. – М.: 2000.– 57 с.
90. Прохоров, Н.Л. Роль критериев в выборе направлений развития вычислительных средств в специфических условиях России / Л.Н. Прохоров, Г.Г. Рябов, Д.А. Фатеев // Экономика и производство. – 2001.– №2.– С. 19-25.
91. Р 50.1.033-2001. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть 1. Критерии типа хи-квадрат. – М.: Стандартиформ, 2006. – 90 с.
92. Ракетно-космический комплекс СССР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://famhist.ru/famhist/chertok/000aef55.htm>
93. Русанов, В.Н. Самодиагностируемая резервируемая бортовая вычислительная система / В.Н. Русанов, Н.В. Сильянов, А.Ю. Киселев, С.В. Пряничников. // Аэрокосмическое приборостроение. 2014. – Вып.2. – С.16-27.
94. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.

95. Рябинин, И.А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И.А. Рябинин, Г.Н. Черкесов. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.

96. Смелъчакова, Г.А. Автоматизированная система оценки надежности управляющих вычислительных систем в условиях неопределенности относительно реального потока отказов / Г.А. Смелъчакова, В.М. Антимиров // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления». Сборник докладов. – Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. – С. 32 - 39.

97. Смелъчакова, Г.А. Автоматизированные системы оценки надежности структурно-сложных технических систем / Г.А. Смелъчакова // «Научная дискуссия: вопросы технических наук»: материалы VIII международной заочной научно-практической конференции. (04 апреля 2013 г.) — М.: Изд. «Международный центр науки и образования», 2013. — С. 53-57

98. Смелъчакова, Г.А. Анализ целостности выходных сигналов цифрового вычислительного модуля на этапе проектирования модуля / Г.А. Смелъчакова // Научная дискуссия: инновации в современном мире. сборник статей по материалам XLI международной заочной научно-практической конференции. – М.: Изд. «Интернаука», 2015. – № 9 (40) – С. 20 - 28.

99. Смелъчакова, Г.А. Выбор оптимального варианта расчета контрольной суммы сообщения при передаче по магистральной / Г.А. Смелъчакова // Научная дискуссия: вопросы технических наук: сборник статей по материалам XIII—XIV международной заочной научно-практической конференции. — М., Изд. «Международный центр науки и образования», 2013. — № 8—9 (11) — С. 19 – 23.

100. Смелъчакова, Г.А. Методика проектного исследования надежности и выбора оптимального по критерию надежности варианта архитектуры управляющей вычислительной системы в условиях неопределенности относительно реального потока отказов компонентов системы / Г.А. Смелъчакова, В.М. Антимиров // Космодром «Восточный» и перспективы развития российской космонавтики»: те-

зисы докладов Всероссийской молодёжной научно-практической конференции (05-06 июня 2015 г., г. Благовещенск). – Самара: СГАУ, 2015. – С. 206-207.

101. Смелъчакова, Г.А. Методика проектных исследований надежности вариантов архитектуры управляющих вычислительных систем в условиях неопределенности относительно реального потока отказов / Г.А. Смелъчакова, В.М. Антимиров // Ракетно-космическая техника: сборник VII научно-технической конференции молодых специалистов. Сер. XI. Системы управления ракетных комплексов. – Ч. 2.– Екатеринбург: АО «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова», 2015. – С. 208-222.

102. Смелъчакова, Г.А. Исследование вариантов реализации контроллера системной магистрали для специализированного вычислительного модуля и выбор варианта реализации // Г.А. Смелъчакова, В.В. Язева, А.Ю. Кирилин, А.В. Овчинников // 2я Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления». Сборник докладов. – Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2016. – С. 62-70.

103. Смелъчакова, Г.А. Исследование интерфейса SpaceWire в качестве интерфейса межмодульного обмена в системах реального времени / Г.А. Смелъчакова, А.Ю. Вагин // Научная дискуссия: вопросы физики, математики, информатики: материалы III международной заочной научно-практической конференции. (22 октября 2012 г.) – М.: Изд. «Международный центр науки и образования», 2012. – с. 88 - 95.

104. Сарапулов, А.В. Эффективность перераспределения задач бортовой вычислительной системы для повышения надежности систем автоматического управления подвижными объектами. / А.В. Сарапулов, А.Б. Уманский // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления». Сборник докладов. – Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015. – С. 231 - 238.

105. Соболев, И.М. Численные методы Монте-Карло / И.М. Соболев. – М.: Наука, 1973. – 312 с.
106. Солохина, Т. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределенных комплексов / Т. Солохина, Я. Петричкович, Ю. Шейнин // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – №1 – 2007. – с. 38-49.
107. Соснин, П.И. Архитектурное моделирование автоматизированных систем: учебное пособие / П.И. Соснин. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 147 с.
108. Спецификация 1636PP2У, К1636PP2У. ТСКЯ.431214.002СП. – ЗАО «ПКК Миландр», 2009. – 34 с.
109. Спецификация 1645РУ4АУ, 1645РУ4БУ, К1645РУ4АУ, К1645РУ4БУ. ТСКЯ.431223.005СП. – ЗАО «ПКК Миландр», 2009. – 22 с.
110. Строгонов, А. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем [Электронный ресурс] / А. Строгонов, В. Жаднов, С. Полесский. // Компоненты и технологии. – 2007. – №7 – С. 183-190. – Режим доступа: http://www.kit-e.ru/articles/device/2007_5_183.php.
111. СТО 551.21.008-2008 Стандарт организации. Система качества. Комплекс отработки аппаратуры и программ. Основные положения. – Екатеринбург: ФГУП «НПО автоматики им. Академика Н.А. Семихатова», 2008.
112. Тихменев, А.Н. Метод имитационного моделирования для проектной оценки показателей безотказности структурно-сложной радиоэлектронной аппаратуры: Автореферат дис. канд. техн. наук. – Волгоград: Волгоградский гос. тех. ун-т, 2013. – 18 с.
113. Труханов, В.М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытания опытных образцов / В.М. Труханов. – М.: Машиностроение, 2003. – 320 с.
114. Тэллес, М. Наука отладки / М. Тэллес, Ю. Хсих. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2003. – 556 с.
115. Черкесов, Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. Учебное пособие / Г.Н. Черкесов. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.

116. Чернов, В.Ю. Надежность авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов: Учеб. пособие / В.Ю.Чернов, В.Г. Никитин, Ю.П. Иванов. – Спб.: СПбГУАП, 2004. – 96 с.

117. Черток Б.Е. Космонавтика XXI века / под ред. Б.Е. Чертока – М.: Изд-во «РТСофт», 2010. – 864 с.

118. Чулков, Н.А. Надежность технических систем и техногенный риск: учебное пособие / Н.А. Чулков, А.Н. Деренок. – Томск: изд-во Томского политехнического ун-та, 2012. – 150 с.

119. Ушакова, И.А. Надежность технических систем. Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин; под общ. ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985 – 608 с.

120. Финаев, В.И. Моделирование при проектировании информационно-управляющих систем: Учебное пособие. / В.И. Финаев. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002 – 118 с.

121. Халецкий, Л.В. Автоматизация отработки рулевых приводов летательных аппаратов / Л.В. Халецкий, В.Я. Потетенькин, Г.С. Берко, А.И. Стеблинкин, А.В. Скрябин // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2012: Сборник трудов XI международной практической конференции, Москва 6-7 декабря 2012 г. – М.: ДМК Пресс, 2012. – С. 58-60.

122. Ханевский, Д.А. Особенности организации режима ввода программ для бортовой аппаратуры системы управления ракеты-носителя Союз-2 на базе цифровой вычислительной системы Малахит-7 / Д.А. Ханевский, А.Б. Уманский, Г.Е. Яцук, С.А. Голованов // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сб. науч. тр. 2014. – С.30-32.

123. Хетагуров, Я.А. Практические методы построения надежных цифровых систем. Проектирование, производство, эксплуатация. – М.: Высшая школа, 2008. – 160 с.

124. Шейнин, Ю. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределенных комплексов / Ю. Шейнин, Т. Солохина, Я. Петричкович // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – №5 – 2006. – с. 64-75.

125. Шишмарев, В.Ю. Надежность технических систем: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.Ю. Шишмарев. – М.: Академия, 2010. – 304 с.
126. Carter, A.D.S Mechanical Reliability / A.D.S. Carter. – 2-nd ed. – London: Macimillan, 1986.
127. Command & Data Handling Systems [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ruag.com/space/products/digital-electronics-for-satellites-launchers/data-handling-systems>.
128. ECSS-E-50-12A. SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. – European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2003. – p. 124.
129. Fletcher, J. G. An arithmetic checksum for serial transmissions. IEEE Transactions on Communications, COM-30(1):247–252, Jan. 1982.
130. General Purpose Hash Function Algorithms [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.partow.net/programming/hashfunctions/#RSHashFunction>
131. Ireson, W.G. Handbook of Reliability engineering and managment / W.G. Ireson, C.F. Coombs. – New York: Mc Crow-Hill. – 1988. – 816 p.
132. Longden, L. Designing A Single Board Computer For Space Using The Most Advanced Processor and Mitigation Technologies / L. Longden, C. Thibodeau, R. Hillman, P. Layton, M. Dowd. // Maxwell Technologies: white paper. 7 p.
133. MIL-STD-1533 / 1760. 5V Monolithic Dual Transceivers. – Holt Integrated circuits inc., 2014. – 10 p.
134. Nakassis, A. Fletcher’s error detection algorithm: How to implement it efficiently and how to avoid the most commonpitfalls. Computer Communication Review, 18(5):63–88, Oct. 1988.
135. On-Board Computer System Architecture [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.sysgo.com/fileadmin/user_upload/PDF/OBCSA_EN_Final.pdf
136. Risk Spectrum [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.riskspectrum.com/en/risk>.
137. Ross, N. Williams. A painless guide to CRC error detection algorithms. — Режим доступа. — URL: ftp://www.internode.net.au/clients/rocksoft/papers/crc_v3.txt

138. Maxino, Teresa C. The effectiveness of checksums for embedded control networks / Teresa C. Maxino, Philip J. Koopman. IEEE Transactions on dependable and secure computing, vol 6, no. 1, 2009. – c. 59-72.

Приложение А

(обязательное)

Результаты расчета вероятностей отказа систем

В таблице А.1 приведены результаты расчета для трехканальной системы с узлом мажоритации (см. раздел 3.1 диссертационной работы), в таблице А.2 – для трехканальной системы с переключателем каналов и средствами контроля в случае идеально работающих средств контроля. Через Q_1 обозначена вероятность отказа системы, полученная методом аналитического расчета, через Q_2 – вероятность отказа системы, полученная методом статистического моделирования, предложенного в разделе 2.2 диссертационной работы. Через λ в таблице А.1 обозначена интенсивность отказов каналов, k – отношение интенсивности отказов узла мажоритации к интенсивности отказов канала. Через λ в таблице А.2 обозначена интенсивность отказов каналов, β – эффективность контроля. Число испытаний при моделировании равно 10000.

Таблица А.1 – Результаты расчета вероятностей отказа трехканальной системы с узлом мажоритации

λ , час ⁻¹	k	Q_1	Q_2	Погрешность измерений, %
0.1	0.1	0.03514117	0.0351458	0.013175429
	0.2	0.04474168	0.0446959	0.1023207
	0.3	0.05424666	0.0541749	0.132284642
0.2	0.1	0.1047484	0.1047948	0.044296619
	0.2	0.12247558	0.1224708	0.003902819
	0.3	0.13985173	0.1398638	0.008630569
0.3	0.1	0.191332	0.1912912	0.02132419
	0.2	0.2152317	0.2152071	0.011429543
	0.3	0.238425	0.2384675	0.017825312

Таблица А.2 – Результаты расчета вероятностей отказа трехканальной системы с переключателем каналов и средствами контроля

λ , час ⁻¹	β	Q_1	Q_2	Погрешность измерений, %
0.05	0.1	0.00622492928608	0.00622963091771	0.075529077
	0.2	0.00554615982993	0.00555084044573	0.084393814
	0.3	0.00486739037377	0.00487131587825	0.080649058
	0.4	0.00418862091761	0.00419495358558	0.151187422
	0.5	0.00350985146146	0.00351679979069	0.197966475
	0.6	0.00283108200530	0.00283298837862	0.06733727
	0.7	0.00215231254915	0.00215572153624	0.158387177
	0.8	0.00147354309299	0.00147361469866	0.004859422
	0.9	0.00079477363683	0.00079699616828	0.279643328
0.1	0.1	0.02298594236098	0.02300261622614	0.072539402
	0.2	0.02052770259246	0.02054490030526	0.083778069
	0.3	0.01806946282395	0.01808408528682	0.080923617
	0.4	0.01561122305543	0.01563481259293	0.151106274
	0.5	0.01315298328692	0.01317823695501	0.191999545
	0.6	0.01069474351841	0.01070174498199	0.0654664
	0.7	0.00823650374989	0.00824942022166	0.156819837
	0.8	0.00577826398138	0.00577892930364	0.011514224
	0.9	0.00332002421286	0.00332899281355	0.270136605

Приложение Б
(справочное)

Пример файла с описанием формальной модели УВС

```
[General]
Name=3-х канальная система
SubName=УВС со средствами контроля и восстановления, которые работают идеально
[GlobalVar]
Count=3
Name0=L
SubName0=Интенсивность отказа одного канала
Min0=0,1
Max0=0,9
Step0=0,1
Name1=beta
SubName1=Вероятность обнаружения отказа в канале
Min1=0,5
Max1=0,9
Step1=0,2
Name2=gamma
SubName2=Вероятность восстановления системы, если 2 канала исправны
Min2=0,5
Max2=0,8
Step2=0,1
[LocalVar]
Count=1
Name0=n
SubName0=Используется для генерации случайных чисел
Val0=0
Type0=Random
Name1=N2
SubName1=Количество сбоев канала 2
Val1=0
Type1=Integer
Name2=N3
SubName2=Количество сбоев канала 3
Val2=0
Type2=Integer
[Component]
Count=3
Name0=K1
```

SubName0=Канал 1
 Rate0=L
 Name1=K2
 SubName1=Канал 2
 Rate1=L
 Name2=K3
 SubName2=Канал 3
 Rate2=L
 [ActionCriterion]
 Count=0
 [FailureCriterion]
 Count=3
 Component0=K1
 SubName0=Отказ первого канала
 Action0=FailureCriterion_Action_0
 Component1=K2
 SubName1=Отказ второго канала
 Action1=FailureCriterion_Action_1
 Component2=K3
 SubName2=Отказ третьего канала
 Action2=FailureCriterion_Action_2
 [RepairCriterion]
 Count=3
 Component0=K1
 SubName0=восстановление первого канала
 TimeNeed0=0
 Action0=RepairCriterion_Action_0
 Component1=K2
 SubName1=Восстановление второго канала
 TimeNeed1=0
 Action1=RepairCriterion_Action_1
 Component2=K3
 SubName2=Восстановление третьего канала
 TimeNeed2=0
 Action2=RepairCriterion_Action_2
 [FailureCriterion_Action_0]
 Count=18
 Line0>//если два канала исправны
 Line1>//определяем отказ с вероятностью 1
 Line2=IF (K2=1)AND(K3=1)
 Line3=K1=0
 Line4=ELSE
 Line5>//отказ канала определяется с вероятностью beta
 Line6=n = next(n)
 Line7=IF n<beta


```

Line8=K1 = 0
Line9=ELSE
Line10=ALLSYSTEM = 0
Line11=ENDIF
Line12=ENDIF
Line13=//проверяем условие отказа системы
Line14=IF (K2=1)AND(K3=0)AND(K1=0)
Line15=ALLSYSTEM = 0
Line16=ELSE
Line17=ENDIF
[FailureCriterion_Action_1]
Count=18
Line0=//если два канала исправны
Line1=//определяем отказ с вероятностью 1
Line2=IF (K1=1)AND(K3=1)
Line3=K2=0
Line4=ELSE
Line5=//отказ канала определяется с вероятностью betta
Line6=n = next(n)
Line7=IF n<betta
Line8=K2 = 0
Line9=ELSE
Line10=ALLSYSTEM = 0
Line11=ENDIF
Line12=ENDIF
Line13=//проверяем условие отказа системы
Line14=IF (K2=1)AND(K3=0)AND(K1=0)
Line15=ALLSYSTEM = 0
Line16=ELSE
Line17=ENDIF
[FailureCriterion_Action_2]
Count=18
Line0=//если два канала исправны
Line1=//определяем отказ с вероятностью 1
Line2=IF (K1=1)AND(K2=1)
Line3=K3=0
Line4=ELSE
Line5=//отказ канала определяется с вероятностью betta
Line6=n = next(n)
Line7=IF n<betta
Line8=K3 = 0
Line9=ELSE
Line10=ALLSYSTEM = 0
Line11=ENDIF
Line12=ENDIF

```

```

Line13=//проверяем условие отказа системы
Line14=IF (K2=1)AND(K3=0)AND(K1=0)
Line15=ALLSYSTEM = 0
Line16=ELSE
Line17=ENDIF
[RepairCriterion_Action_0]
Count=10
Line0=//восстановление возможно,если два канала исправны
Line1=//с вероятностью гамма
Line2=IF (K2=1)AND(K3=1)
Line3=n=next(n)
Line4=IF n<gamma
Line5=K1=1
Line6=ELSE
Line7=ENDIF
Line8=ELSE
Line9=ENDIF
[RepairCriterion_Action_1]
Count=10
Line0=//восстановление возможно,если два канала исправны
Line1=//с вероятностью гамма
Line2=IF (K1=1)AND(K3=1)
Line3=n=next(n)
Line4=IF n<gamma
Line5=K2=1
Line6=ELSE
Line7=ENDIF
Line8=ELSE
Line9=ENDIF
[RepairCriterion_Action_2]
Count=10
Line0=//восстановление возможно,если два канала исправны
Line1=//с вероятностью гамма
Line2=IF (K2=1)AND(K1=1)
Line3=n=next(n)
Line4=IF n<gamma
Line5=K3=1
Line6=ELSE
Line7=ENDIF
Line8=ELSE
Line9=ENDIF

```

Приложение В (обязательное)

Интерфейс пользователя программного обеспечения

При запуске программного обеспечения (ПО) загружается основное окно, показанное на рисунке В.1. Окно состоит из нескольких областей: области результатов операций (нижняя часть окна), области с деревом вариантов (в верхней правой части окна) и области с информацией о выбранном варианте.

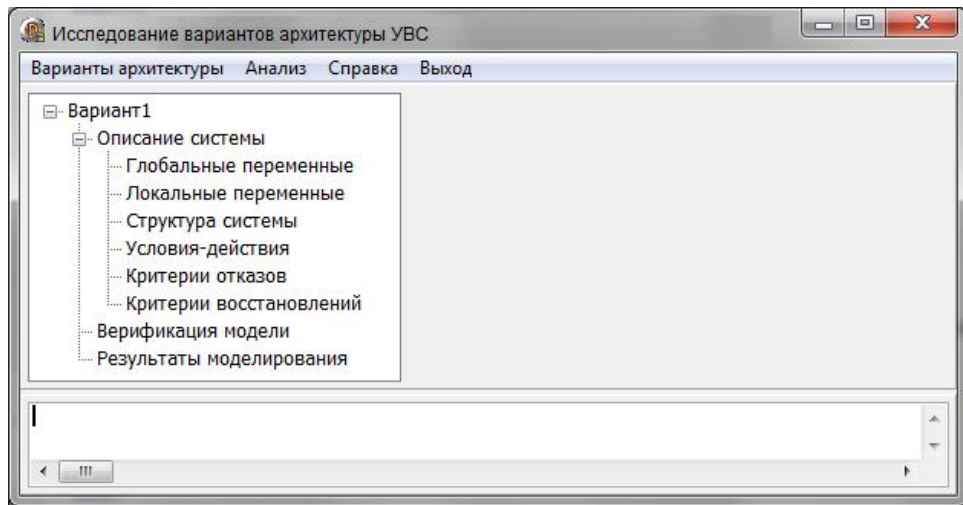


Рисунок В.1 – Основное окно ПО

Системное меню

Системное меню ПО включает в себя следующие разделы: «Варианты архитектуры» (предоставляет средства для работы с вариантами архитектуры системы), «Анализ» (предоставляет средства анализа вариантов системы), «Справка» (предоставляет справку по работе с ПО), «Выход» – предназначен для завершения работы с ПО. Системное меню ПО при выборе раздела «Варианты архитектуры» показано на рисунке В.2.

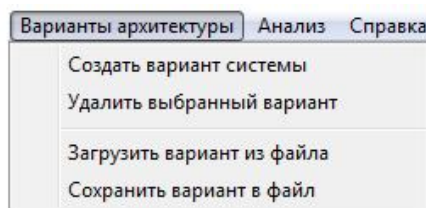


Рисунок В.2 – Меню при выборе раздела «Варианты архитектуры»

Раздел меню «Создать вариант системы» предназначен для создания нового варианта системы. Созданный вариант добавляется в дерево вариантов системы. Раздел меню «Удалить выбранный вариант» предназначен для удаления выбранного варианта из списка вариантов системы. Раздел меню «Загрузить вариант из файла» предназначен для загрузки варианта системы из файла описания модели, раздел меню «Сохранить вариант в файл» – для сохранения варианта в файл описания модели.

Системное меню ПО при выборе раздела «Анализ» показано на рисунке В.3.

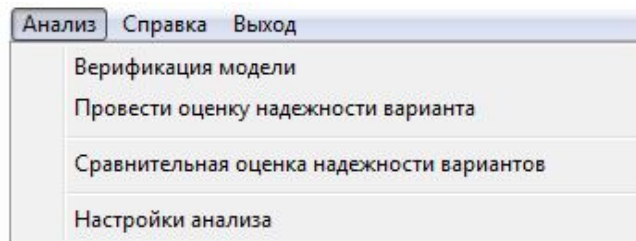


Рисунок В.3 – Меню при выборе раздела «Анализ»

Раздел меню «Верификация модели» предназначен для верификации модели, раздел меню «Провести оценку надежности варианта» – для оценки надежности выбранного варианта системы, «Сравнительная оценка надежности вариантов» – для проведения сравнительной оценки надежности вариантов системы, «Настройки анализа» – для задания параметров анализа.

Системное меню ПО при выборе раздела «Справка» показано на рисунке В.4.

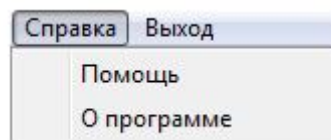


Рисунок В.4 – Меню при выборе раздела «Справка»

Раздел меню «Помощь» предназначен для загрузки руководства пользователя программным обеспечением, раздел меню «О программе» – о выводе информации о ПО.

Отображение информации о выбранном варианте системы

Информация о выбранном варианте архитектуры системы отображается в основном окне ПО (рисунок В.5) при выборе поля «Описание системы» в дереве вариантов. Поле «Название системы» предназначено для ввода названия варианта системы, поле «Описание системы» – для описания системы. Название системы отображается в дереве проектов.

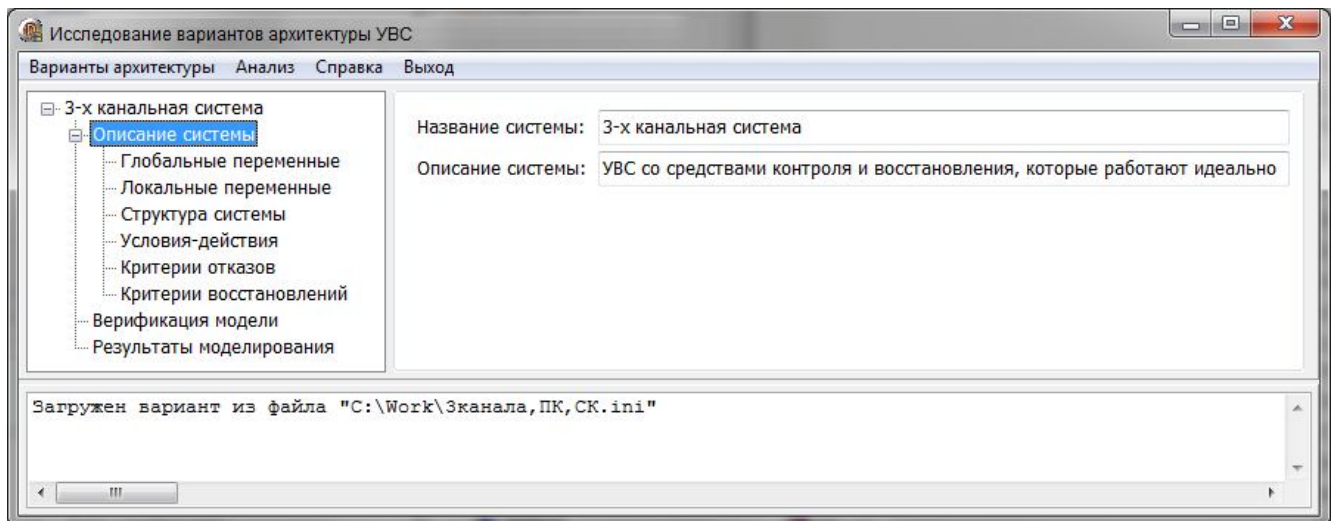


Рисунок В.5 – Отображение информации о выбранном варианте

Отображение глобальных переменных системы

Перечень глобальных переменных отображается в основном окне ПО в виде таблицы (рисунок В.6) при выборе поля «Глобальные переменные» в дереве вариантов.

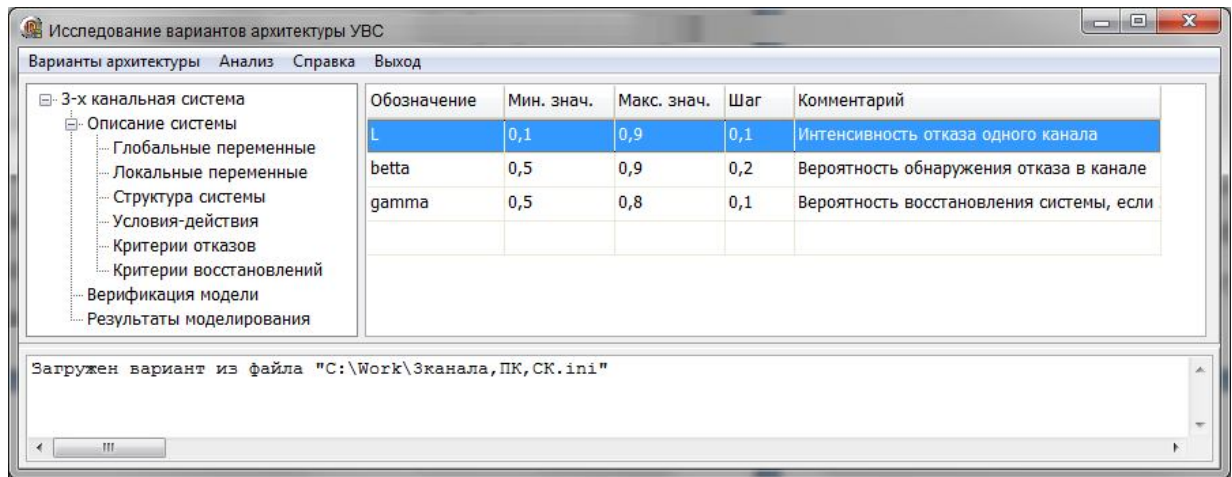


Рисунок В.6 – Пример задания глобальных переменных ПО

При выборе переменной в таблице двойным щелчком мыши появляется окно со свойствами переменной (рисунок В.7). Кнопка «Да» предназначена для сохранения свойств переменной, «Отмена» – для отмены действия над переменной, «Удалить переменную» – для удаления переменной из списка переменных. Поле «Обозначение переменной» предназначено для ввода обозначения переменной, поля «Минимальное значение», «Максимальное значение», «Шаг» – для задания диапазона значений переменной и шага, с которым будут перебираться значения при анализе варианта. Поле «Комментарий» предназначено для задания комментария к переменной.

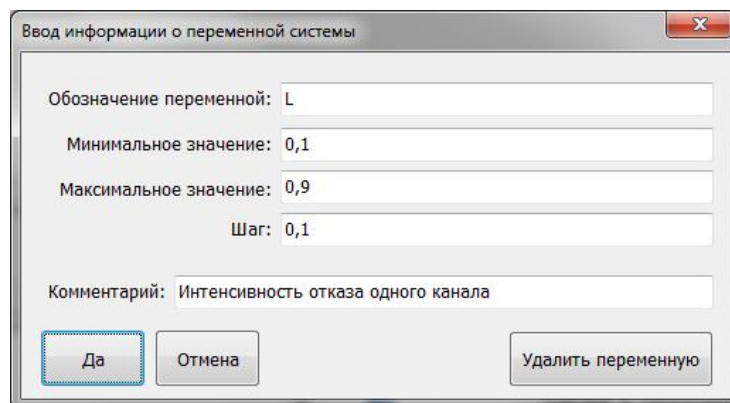


Рисунок В.7 – Окно свойств глобальной переменной системы

Добавление переменной в список переменных системы осуществляется двойным щелчком мыши по пустой строке таблицы. При добавлении/изменении свойств переменной осуществляется контроль следующих ограничений:

- отсутствие резервированного слова в качестве обозначения переменной: «ALLSYSTEM», «TIME», «NEXT»;
- уникальность имен переменных в пределах списка глобальных и локальных переменных, обозначений компонентов системы;
- отсутствие символов «пробел», знака табуляции, символов арифметических действий в названии переменной.

Задание локальных переменных

Перечень локальных переменных отображается в основном окне ПО в виде таблицы (рисунок В.8) при выборе поля «Локальные переменные» в дереве вариантов.

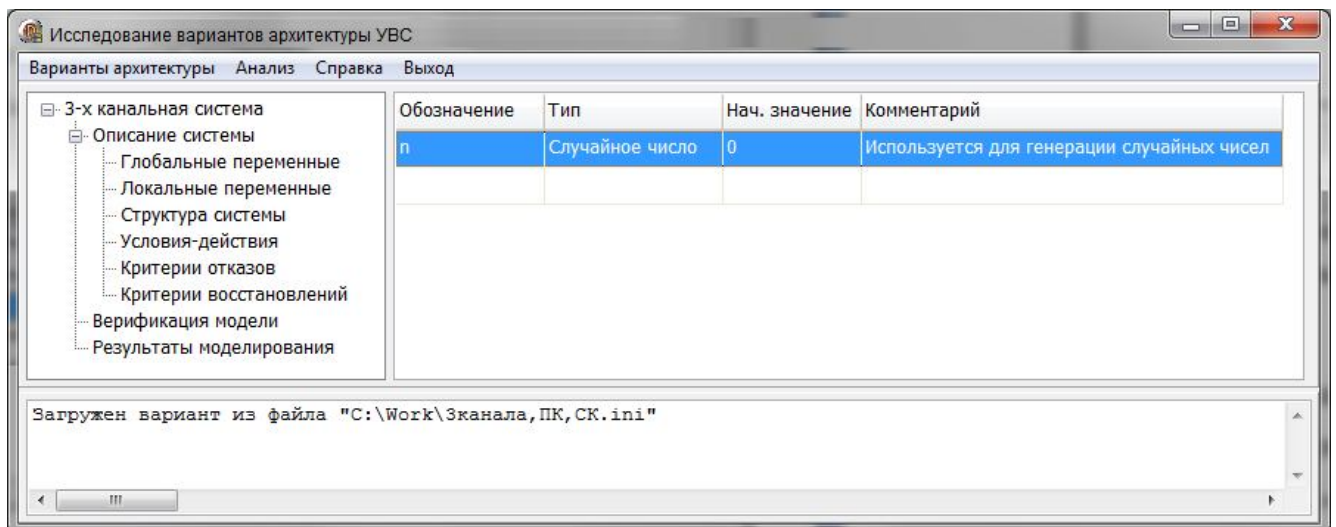


Рисунок В.8 – Пример задания локальных переменных ПО

При выборе переменной в таблице двойным щелчком мыши появляется окно со свойствами переменной (рисунок В.9). Кнопка «Да» предназначена для сохранения свойств переменной, «Отмена» – для отмены действия над переменной, «Удалить переменную» – для удаления переменной из списка переменных. Поле «Обозначение переменной» предназначено для ввода обозначения переменной, поле «Начальное значение» – для задания начального значения переменной, поле «Тип переменной» – для задания типа переменной, «Комментарий» – для задания комментария к переменной.

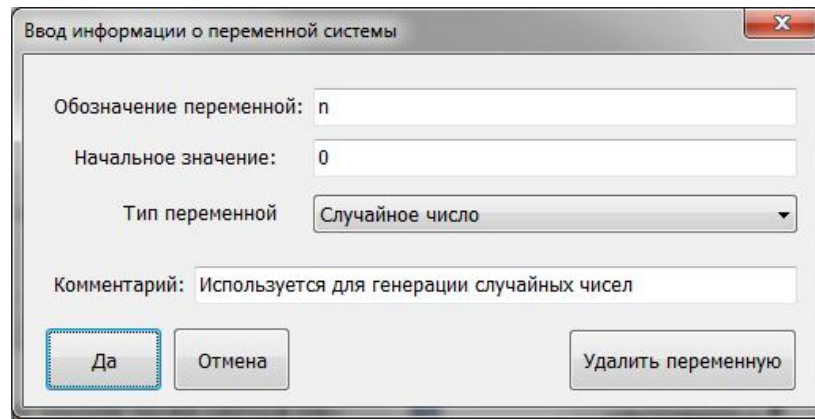


Рисунок В.9 – Окно свойств локальной переменной системы

Добавление переменной в список переменных системы осуществляется двойным щелчком мыши по пустой строке таблицы. При добавлении/изменении свойств переменной осуществляется контроль следующих ограничений:

- отсутствие резервированного слова в качестве обозначения переменной: «ALLSYSTEM», «TIME», «NEXT»;
- уникальность имен переменных в пределах списка глобальных и локальных переменных, обозначений компонентов системы;
- отсутствие символов «пробел», знака табуляции, символов арифметических действий в названии переменной.

Описание структуры варианта УВС

Перечень компонентов системы отображается в основном окне ПО в виде таблицы (рисунок В.10) при выборе поля «Структура системы» в дереве вариантов.

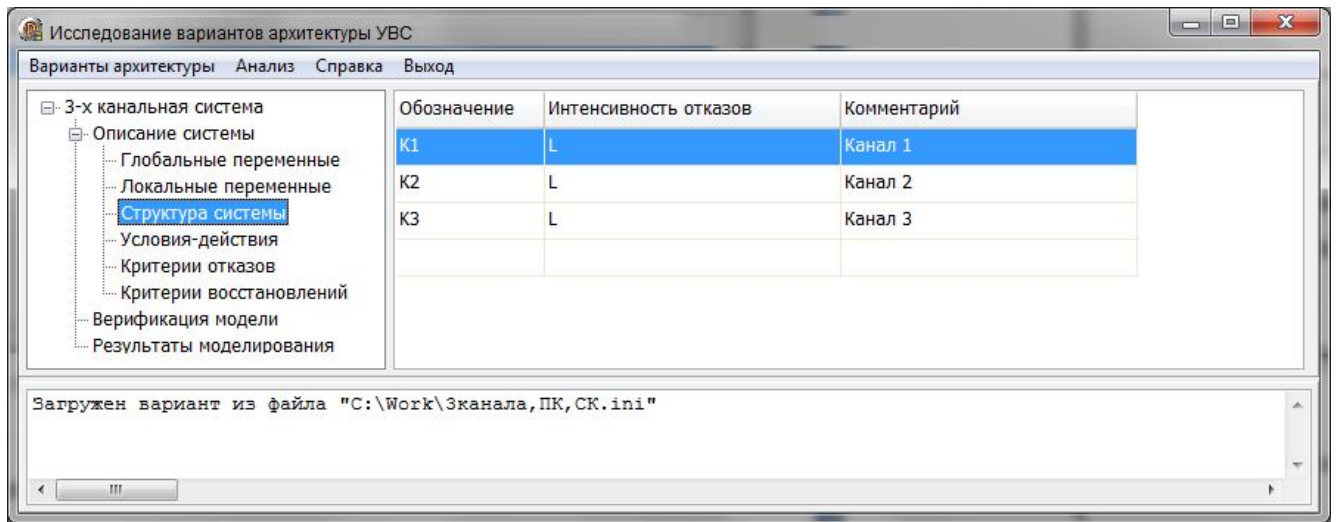


Рисунок В.10 – Отображение перечня компонентов системы

При выборе компонента в таблице двойным щелчком мыши появляется окно со свойствами компонента (рисунок В.11). Кнопка «Да» предназначена для сохранения свойств компонента, «Отмена» – для отмены действия над выбранным компонентом, «Удалить компонент» – для удаления компонента из списка компонентов, кнопка «?» для получения справочной информации. Поле «Обозначение компонента» предназначено для ввода обозначения компонента, поле «Интенсивность отказов компонента» – для задания интенсивности отказов компонента.

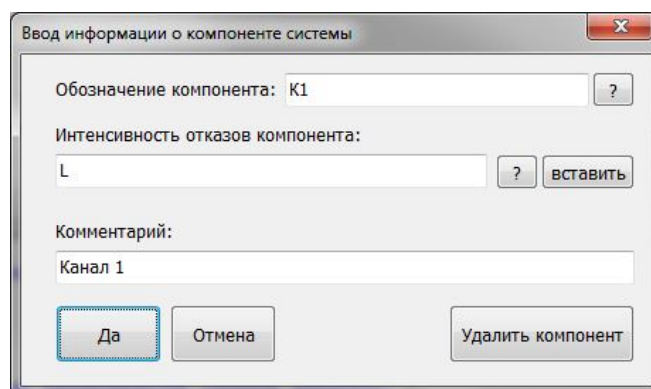


Рисунок В.11 – Окно свойств компонента системы

В качестве интенсивности отказов компонента допускается использовать выражение с участием глобальных и локальных переменных. Для вставки обозначения переменной предназначена кнопка «вставить».

Добавление компонента в список компонентов системы осуществляется двойным щелчком мыши по пустой строке таблицы со списком компонентов. При добавлении/изменении свойств компонента осуществляется контроль следующих ограничений:

- уникальность имен компонентов в пределах списка глобальных и локальных переменных, обозначений компонентов системы;
- отсутствие символов «пробел», знака табуляции, символов арифметических действий в обозначении компонента;
- правильность задания выражения для определения интенсивности отказов компонента.

Задание критериев отказов

Список критериев отказов системы отображается в основном окне ПО в виде таблицы (рисунок В.12) при выборе поля «Критерии отказов» в дереве вариантов.

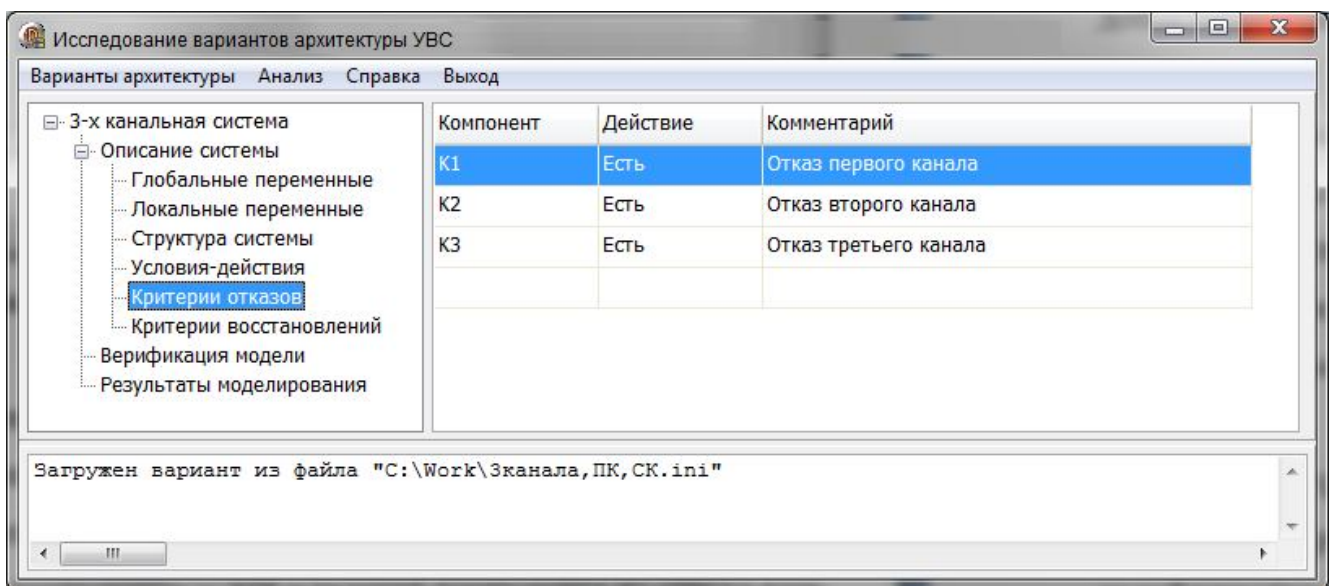


Рисунок В.12 – Пример отображения перечня критериев отказов

При выборе критерия в таблице двойным щелчком мыши появляется окно со свойствами критерия (рисунок В.13). Кнопка «Да» предназначена для сохранения описания критерия, «Отмена» – для отмены действия над выбранным критерием, «Удалить критерий» – для удаления критерия из списка критериев отказов, кнопка «?» – для получения справочной информации, кнопка «выбрать» – для выбора обозначения компонента из списка обозначений компонентов. Поле «Обозначение компонента» предназначено для ввода обозначения компонента, поле «Комментарий» – для задания комментария к критерию, поле «Действие» – для задания действия в случае возникновения отказа в выбранном компоненте системы.

Добавление критерия в список критериев отказов системы осуществляется двойным щелчком мыши по пустой строке таблицы со списком критериев. При добавлении/изменении описания критерия осуществляется контроль следующих ограничений:

- правильность задания обозначения компонента системы;
- правильность задания действия.

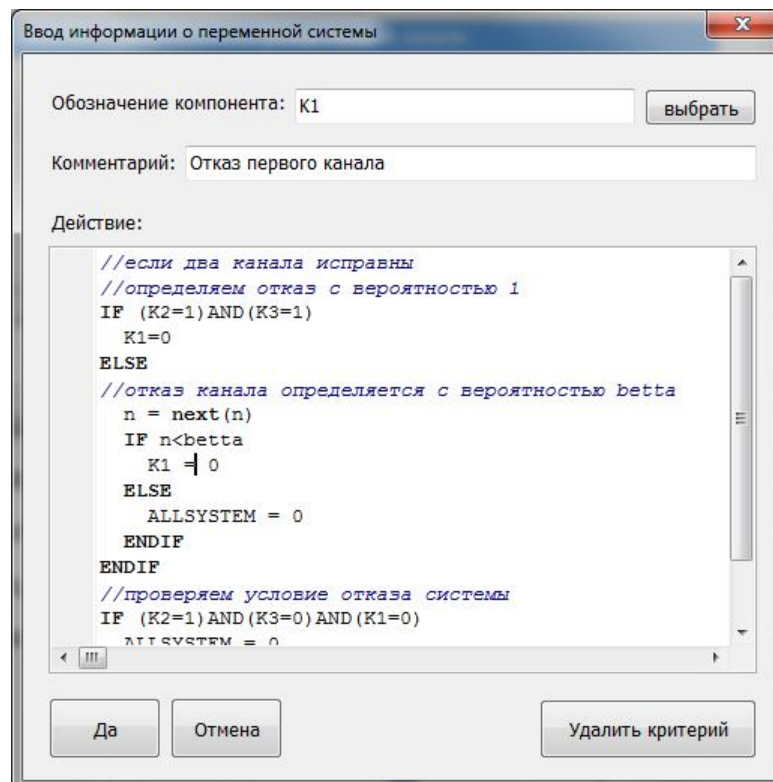


Рисунок В.13 – Пример задания критерия отказа

Задание критерия восстановления

Список критериев восстановлений системы отображается в основном окне ПО в виде таблицы (рисунок В.14) при выборе поля «Критерии восстановлений» в дереве вариантов.

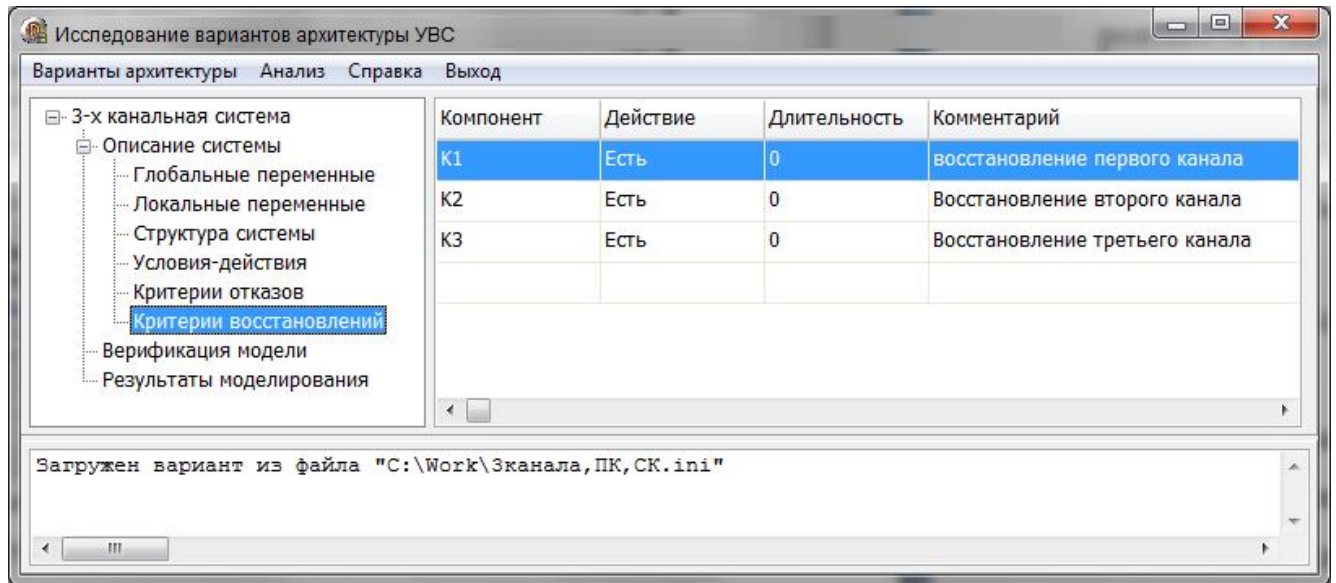


Рисунок В.14 – Пример отображения перечня критериев восстановлений

При выборе критерия в таблице двойным щелчком мыши появляется окно со свойствами критерия (рисунок В.15). Кнопка «Да» предназначена для сохранения описания критерия, «Отмена» – для отмены действия над выбранным критерием, «Удалить критерий» – для удаления критерия из списка критериев восстановления, кнопка «выбрать» – для выбора обозначения компонента из списка обозначений компонентов. Поле «Обозначение компонента» предназначено для ввода обозначения компонента, поле «Длительность выполнения процедуры восстановления» – для задания длительности выполнения процедуры восстановления, поле «Комментарий» – для задания комментария к критерию, поле «Действие» – для задания действия в случае возникновения отказа в выбранном компоненте системы.

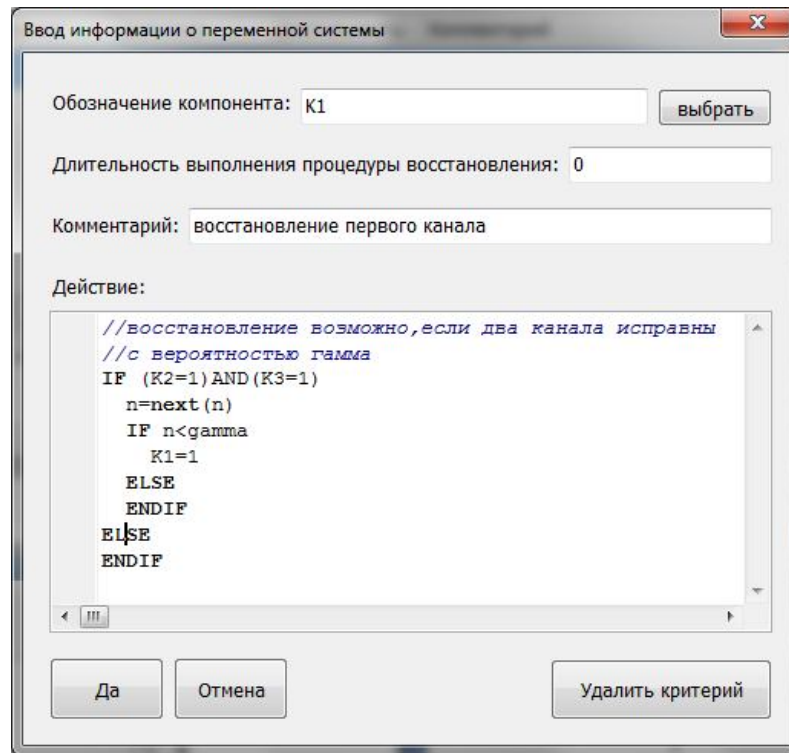


Рисунок В.15 – Пример задания критерия восстановления

Добавление критерия в список критериев восстановлений системы осуществляется двойным щелчком мыши по пустой строке таблицы со списком критериев. При добавлении/изменении описания критерия осуществляется контроль следующих ограничений:

- правильность задания обозначения компонента системы;
- правильность задания длительности выполнения процедуры восстановления;
- правильность задания действия.

Длительность выполнения процедуры восстановления задается относительно времени основной работы и представляет собой число от 0 до 1.

Задание условий-действий

Список условий-действий системы отображается в основном окне ПО в виде таблицы (рисунок В.16) при выборе поля «Условия-действия» в дереве вариантов.

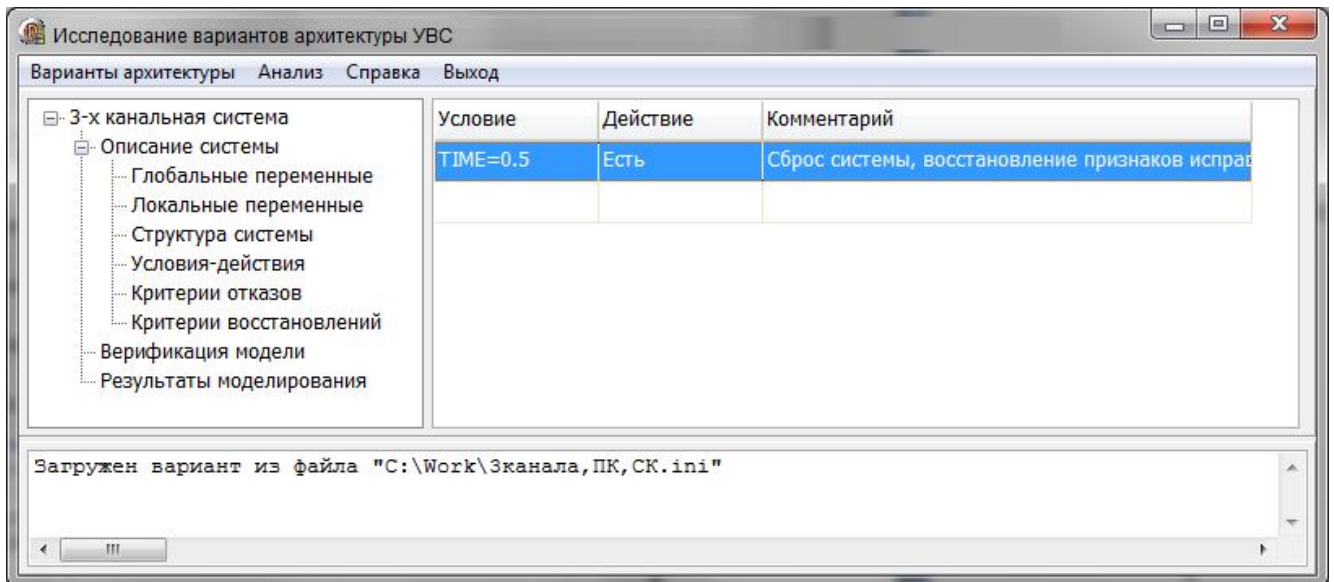


Рисунок В.16 – Пример отображения перечня условий действий

При выборе условия-действия в таблице двойным щелчком мыши появляется окно с описанием условия-действия (рисунок В.17). Кнопка «Да» предназначена для сохранения описания, «Отмена» – для отмены действия над выбранным условием-действием, «Удалить условие» – для удаления условия-действия из списка условий-действий. Поле «Условие» предназначено для ввода условия, поле «Комментарий» – для задания комментария к условию-действию, поле «Действие» – для задания действия в случае выполнения условия.

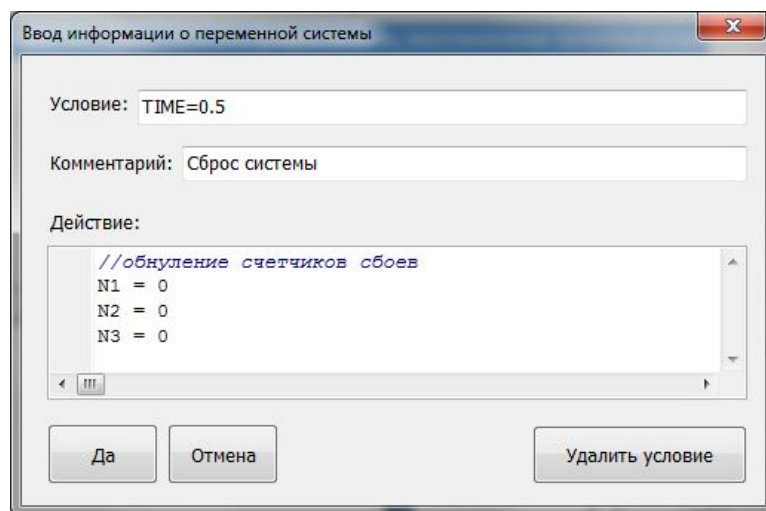


Рисунок В.17 – Пример задания условия-действия

Добавление условия-действия в список условий-действий системы осуществляется двойным щелчком мыши по пустой строке таблицы со списком условий-действий. При добавлении/изменении описания условия-действия осуществляется контроль следующих ограничений:

- правильность задания условия: оно должно представлять собой выражение вида «TIME=X» или «(TIME=X1)AND(TIME=X2)AND...», где X, X1, X2 – числа от 0 до 1;
- правильность задания действия.

Верификация модели

Процесс верификации модели отображается в основном окне ПО при выборе поля «Верификация модели» в дереве вариантов системы. Вкладка «Верификация модели» предназначена для проверки формального описания модели системы, вкладка «Параметры эксперимента» – для задания параметров управляемого эксперимента.

Вкладка «Верификация модели» показана на рисунке В.18. При нажатии на кнопку «Верификация модели» запускается процесс верификации модели. Результаты проверки отображаются в нижней части экрана.

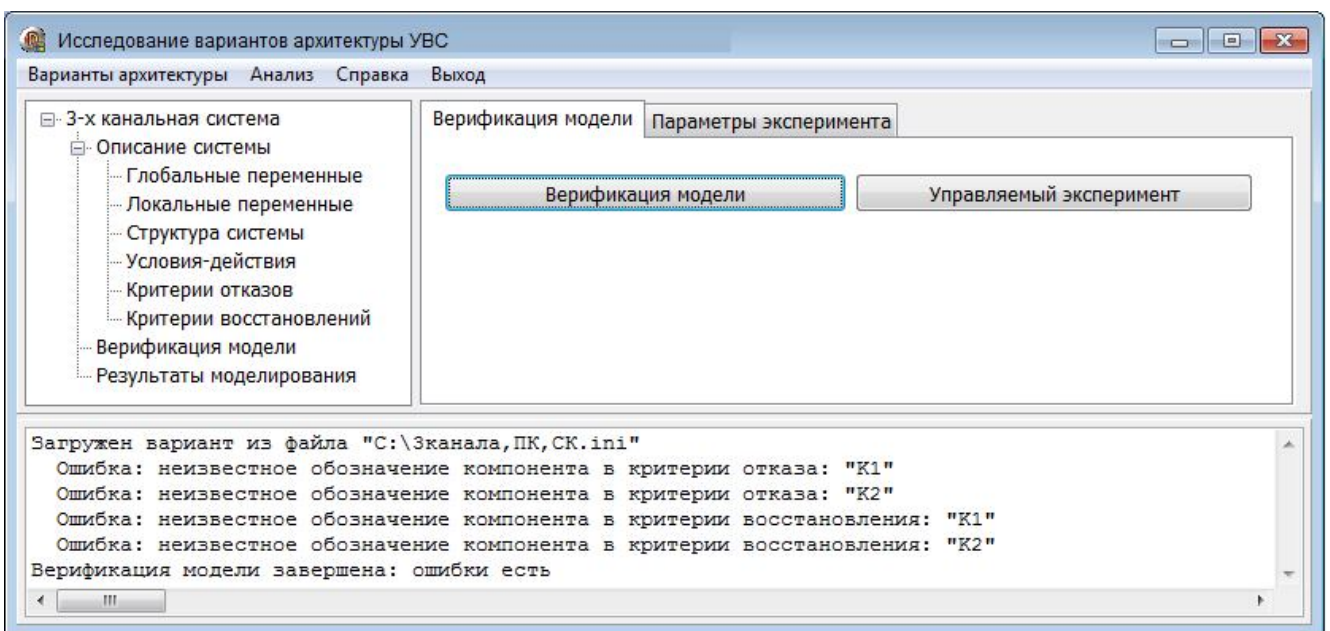


Рисунок В.18 – Отображение окна ПО в режиме верификации модели

При нажатии на кнопку «Управляемый эксперимент» запускается режим управляемого эксперимента (рисунок В.19). На экране отображается состояние компонентов системы, значения локальных и глобальных переменных, текущий исполняемый критерий. Кнопка «Следующий шаг» предназначена для перехода к следующему действию в исполняемом критерии, кнопка «Следующий останов» – для перехода к следующему проверяемому критерию.

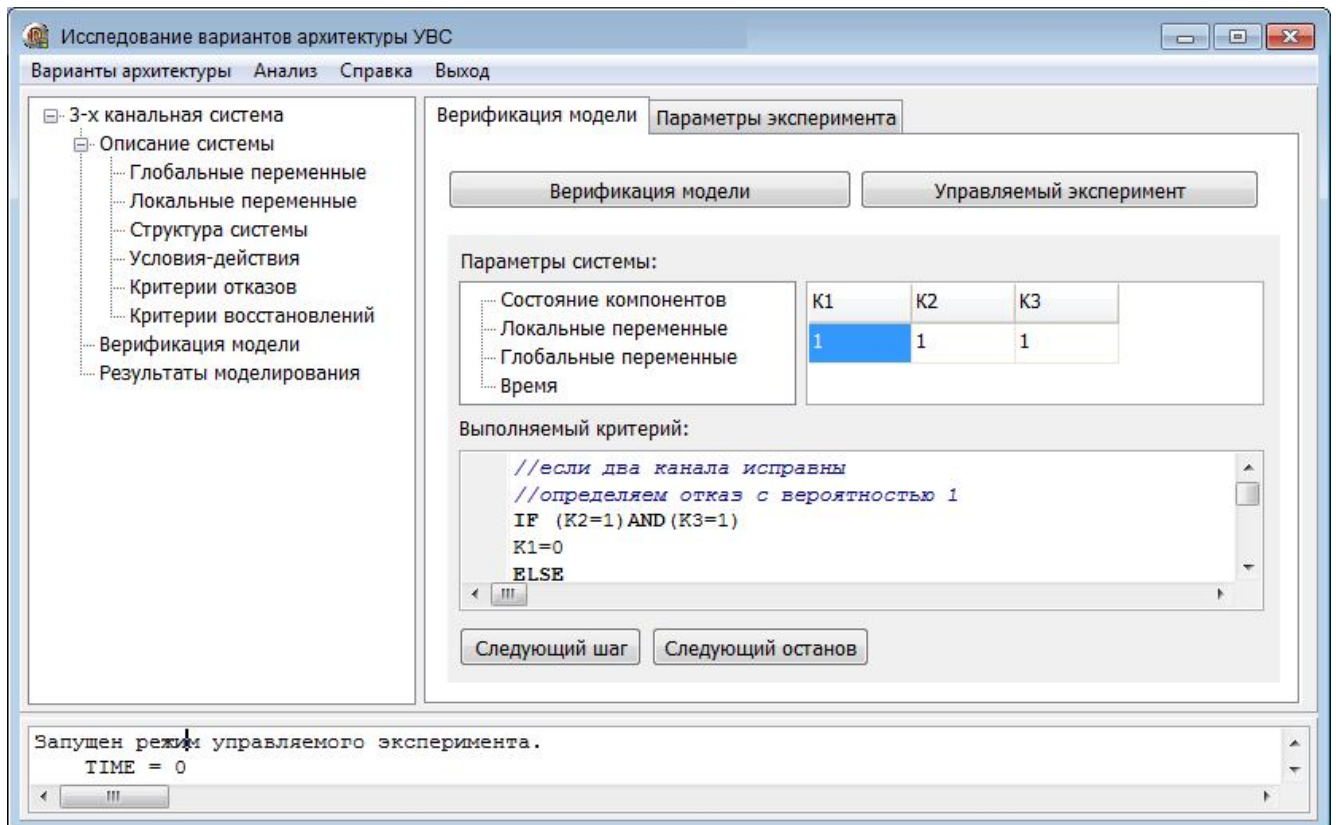


Рисунок В.19 – Режим управляемого эксперимента

Вкладка «Параметры эксперимента» показана на рисунке В.20. В соответствующих окнах вводятся значения переменных системы, состояния компонентов системы, выбираются критерии, выполнение которых будет проверяться.

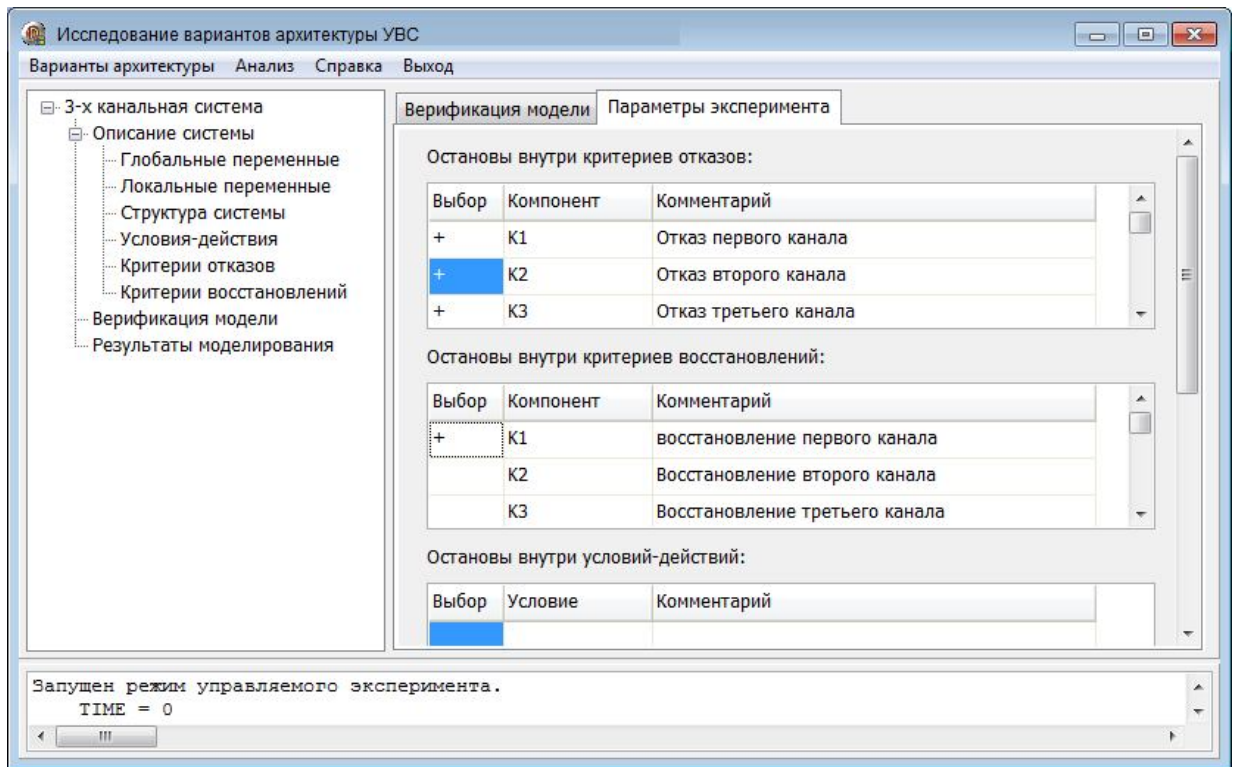


Рисунок В.20 – Вкладка «Параметры эксперимента»

Отображение результатов моделирования

Вычислительный эксперимент запускается при выборе поля «Результаты моделирования» в дереве вариантов системы основного окна ПО или при выборе раздела меню «Провести оценку надежности вариантов» в системно меню ПО. Состояние эксперимента отображается в нижней части экрана. По окончании эксперимента формируется отчет в формате Excel с результатами расчетов.

Для проведения сравнительной оценки надежности вариантов предназначен раздел системного меню «Сравнительная оценка надежности вариантов». При выборе раздела появляется диалоговое окно выбора базового варианта и запускается вычислительный эксперимент. По окончании эксперимента формируется отчет в формате Excel с результатами расчетов.

Приложение Г
(обязательное)

Экспериментальные данные

Алгоритмы работы CBM1 и CBM2

```

#define TEST_COUNT 60000
#define WORDS_COUNT 0x400
#define SM_BUF 0xb8400000
#define SM_STATUS_NOTREADY 0x0
#define SM_STATUS_READY_RECEIVE 0x2
#define SM_STATUS_READY_TRANSMIT 0x4
#define SM_STATUS_ERROR_RECEIVE 0x8
unsigned int SM_OZU[2];

void fill_sm_buf_0()
{
    unsigned int i;
    unsigned int *adr;
    for(i = 0; i<WORDS_COUNT; ++i)
    {
        adr = (unsigned int *)(SM_BUF + i*4);
        *adr = 0;
    }
}

void fill_sm_OZU_data(unsigned int data,unsigned int nom)
{
    unsigned int i,ks = 0;
    unsigned int *adr;
    for(i = 0; i<WORDS_COUNT-2; ++i)
    {
        adr = (unsigned int *)(SM_OZU[nom] + i*4);
        *adr = data + i;
        ks = ks + data + i;
    }
    adr = (unsigned int *)(SM_OZU[nom] + (WORDS_COUNT-1)*4);
    *adr = ks >> 16;
    adr = (unsigned int *)(SM_OZU[nom] + WORDS_COUNT*4);
    *adr = ks & 0xFFFF;
}

unsigned int iter;

```

```

unsigned int test_SVM2()
{
    unsigned int res,i,err = 0;
    res = 0;
    //основной цикл работы
    for(iter = 0; iter<TEST_COUNT; ++iter)
    {
        //очистка массива
        fill_sm_buf_0();
        //выставление состояния
        if (err == 0)
        {
            M_RS1 = SM_STATUS_NOTREADY;
            M_RS2 = SM_STATUS_NOTREADY;
        }
        else
        {
            M_RS1 = SM_STATUS_ERROR_RECEIVE;
            M_RS2 = SM_STATUS_ERROR_RECEIVE;
        }
        //настройка канала на прием данных
        Init_DMA_MemCh_for_SM1(SM_BUF,WORDS_COUNT);
        Init_DMA_MemCh_for_SM2(SM_BUF,WORDS_COUNT);
        //ожидание окончания приема
        while ((M_RF1 & 0x10)==0) asm("nop");
        while ((M_RF2 & 0x10)==0) asm("nop");
        //проверка флагов ошибок
        if ((M_RF1 & 0x6)!=0) err = 1;
        if ((M_RF2 & 0x6)!=0) err = 1;
        //проверка целостности данных
        err = err + check_buf_data();
        //обработка данных
        if (err == 0)
            modify_data();
    }
    return 0;
}

```

```

unsigned int test_SVM1()
{
    unsigned int res,i,temp,sd;
    unsigned int nom = 0,nOZU = 0, bNeed = 1;
    unsigned int tm_start;
    res = 0;
    iter = 0;

```

```

tm_start = get_time_mks();
while(iter<TEST_COUNT)
{
    //выбор рабочего канала магистрали
    SM_change_nom(nom);
    //расчет данных в ОЗУ
    fill_sm_OZU_data(0xABC+iter,0); //ОЗУ0
    fill_sm_OZU_data(0xABC+iter,1); //ОЗУ1
    //проверка регистра состояния
    if (bNeed)
    {
        sd = 0;
        while(sd == 0) SM_read_word(&sd);
        if (sd & SM_STATUS_READY_RECEIVE) !=
SM_STATUS_READY_RECEIVE)
            SM_read_word(&sd);
    }
    //проверка целостности данных перед выдачей
    if (check_OZU(0) == 0)
    {
        nOZU = 0;
        if (check_OZU(1) != 0) restore_OZU(0,1);
    }
    else
    if (check_OZU(1) == 0)
    {
        nOZU = 1;
        restore_OZU(1,0);
    }
    else
        return ERROR_BAD_OZU; //отказ системы
    //выдача данных не ранее 2 мс
    while (get_time_mks()-tm_start<2*1000) asm("nop");
    SM_transmit_mass(SM_BUF[nOZU],WORDS_COUNT);
    tm_start = get_time_mks();
    //ожидание окончания обмена
    while (((*M_RF) & 0x10)==0)  asm("nop");
    //проверка ошибок передачи
    bNeed = 1;
    if (((*M_RF) & 0x6)!=0)
    {
        nom++; //смена канала магистрали
        bNeed = 0;
    }
    //проверка регистра состояния СВМ2

```

```

sd = 0;
while(sd == 0) SM_read_word(&sd);
if ((sd & SM_STATUS_ERROR_RECEIVE) ==
SM_STATUS_ERROR_RECEIVE)
{
    if (bNeed) nom++;
    bNeed = 0;
}
else
{
    if (bNeed == 0) nom++;
    bNeed = 1;
    iter++;
}
if (nom>1) return ERROR_BAD_EXCHANGE;
}
return 0;
}

```

//--- основная процедура

```

main()
{
    unsigned int ret;
    //настройка адресов ОЗУ
    SM_OZU[0] = 0xb8400000;
    SM_OZU[1] = 0xb8420000;
    //определение номера модуля на магистрали
    if ( (M_RF_RM1 & 0xF) == 0x1)
        ret = test_SVM1();
    else
    if ((M_RF_RM1 & 0xF) == 0x2)
        ret = test_SVM2();
    while (1)
    {
        asm("nop");
    }
}

```

Модель УВС

[General]

Name=проверка на КОАП

SubName=Взаимодействие двух СВМ

[GlobalVar]

Count=2

Name0=Lozu
 SubName0=Интенсивность отказов ОЗУ
 Min0=0,5
 Max0=0,9
 Step0=0,1
 Name1=Lsm
 SubName1=Интенсивность отказов канала магистрали
 Min1=0,5
 Max1=0,9
 Step1=0,1
 [LocalVar]
 Count=0
 [Component]
 Count=4
 Name0=OZU1
 SubName0=
 Rate0=Lozu
 Name1=OZU2
 SubName1=
 Rate1=Lozu
 Name2=M1
 SubName2=
 Rate2=Lsm
 Name3=M2
 SubName3=
 Rate3=Lsm
 [ActionCriterion]
 Count=0
 [FailureCriterion]
 Count=4
 Component0=OZU1
 SubName0=
 Action0=FailureCriterion_Action_0
 Component1=OZU2
 SubName1=
 Action1=FailureCriterion_Action_1
 Component2=M1
 SubName2=
 Action2=FailureCriterion_Action_2
 Component3=M2
 SubName3=
 Action3=FailureCriterion_Action_3
 [RepairCriterion]
 Count=2
 Component0=OZU1

```

SubName0=
TimeNeed0=0,0003
Action0=RepairCriterion_Action_0
Component1=OZU2
SubName1=
TimeNeed1=0,0003
Action1=RepairCriterion_Action_1
[FailureCriterion_Action_0]
Count=3
Line0=IF OZU1=0 AND OZU2=0
Line1=ALLSYSTEM = 0
Line2=ENDIF
[FailureCriterion_Action_1]
Count=3
Line0=IF OZU1=0 AND OZU2=0
Line1=ALLSYSTEM = 0
Line2=ENDIF
[FailureCriterion_Action_2]
Count=3
Line0=IF M1=0 AND M2=0
Line1=ALLSYSTEM = 0
Line2=ENDIF
[FailureCriterion_Action_3]
Count=3
Line0=IF M1=0 AND M2=0
Line1=ALLSYSTEM = 0
Line2=ENDIF
[RepairCriterion_Action_0]
Count=3
Line0=IF OZU2=1
Line1=OZU1 = 1
Line2=ENDIF
[RepairCriterion_Action_1]
Count=3
Line0=IF OZU1=1
Line1=OZU2 = 1
Line2=ENDIF

```

Данные расчетов

Данные расчетов и экспериментальных исследований приведены в таблице Г.1. Через Q_1 обозначена вероятность отказа системы, определенная по формуле (4.1.3.2), через Q_2 – вероятность отказа системы, полученная методом статистиче-

ского моделирования, предложенного в разделе 2.2 диссертационной работы. Через $\lambda_{\text{ОЗУ}}$ в таблице Г.1 обозначена интенсивность отказов ОЗУ СВМ1, через $\lambda_{\text{М}}$ – интенсивность отказов канала магистрالی.

Таблица Г.1 – Данные расчетов и экспериментальных исследований

$\lambda_{\text{ОЗУ}}, \text{с}^{-1}$	$\lambda_{\text{М}}, \text{с}^{-1}$	Q_1	Q_2	Погрешность измерений	Погрешность измерений, %
0.5	0.5	0.15475	0.156052941	0.001303	0.841965
0.5	0.6	0.20428	0.204165716	0.000114	0.055945
0.5	0.7	0.25504	0.254990676	4.93E-05	0.01934
0.5	0.8	0.30393	0.304343268	0.000413	0.135975
0.5	0.9	0.35281	0.352577492	0.000233	0.065902
0.6	0.5	0.15486	0.156075686	0.001216	0.785022
0.6	0.6	0.20432	0.20481134	0.000491	0.240476
0.6	0.7	0.25501	0.254847308	0.000163	0.063798
0.6	0.8	0.30401	0.304738	0.000728	0.239466
0.6	0.9	0.35285	0.353176913	0.000327	0.092649
0.7	0.5	0.15493	0.156409823	0.00148	0.955156
0.7	0.6	0.20441	0.204233943	0.000176	0.086129
0.7	0.7	0.25509	0.254222562	0.000867	0.340052
0.7	0.8	0.30409	0.304126008	3.6E-05	0.011841
0.7	0.9	0.35291	0.353719569	0.00081	0.229398
0.8	0.5	0.15497	0.155624537	0.000655	0.422364
0.8	0.6	0.20465	0.204687128	3.71E-05	0.018142
0.8	0.7	0.25526	0.255630842	0.000371	0.14528
0.8	0.8	0.30416	0.303924695	0.000235	0.077362
0.8	0.9	0.35306	0.353989403	0.000929	0.263242
0.9	0.5	0.15493	0.1555374	0.000607	0.392048
0.9	0.6	0.2046	0.20363014	0.00097	0.474027

Продолжение таблицы Г.1

$\lambda_{\text{ОЗУ}}, \text{с}^{-1}$	$\lambda_{\text{М}}, \text{с}^{-1}$	Q_1	Q_2	Погрешность измерений	Погрешность измерений, %
0.9	0.7	0.25533	0.254442411	0.000888	0.347624
0.9	0.8	0.30431	0.303797085	0.000513	0.16855
0.9	0.9	0.35314	0.353837172	0.000697	0.197421

Приложение Е
(обязательное)

Акт об использовании результатов диссертационного исследования



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ АВТОМАТИКИ
имени академика Н.А.Семихатова

Мамина-Сибиряка ул., д.145, г. Екатеринбург, 620075, тел.:(343) 355-95-25, факс:263-76-26. E-mail: avt@npoa.ru
ОКПО 07533030 ОГРН 1146685026509, ИНН 6685066917 / КПП 668501001. Телетайп 221276 MEZON RU.



УТВЕРЖДАЮ

Первый зам. Ген. директора по науке

М.Б. Трапезников

АКТ

об использовании результатов диссертационного исследования

Смельчаковой Галины Александровны на тему «Повышение надежности управляющих вычислительных систем ракетно-космической техники» по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)».

В рамках выполнения диссертационной работы Смельчакова Г.А. предложила метод оценки функциональной надежности управляющей вычислительной системы (УВС), учитывающий сложные алгоритмы функционирования системы, критерии отказов и восстановления в процессе работы, не требующий аналитического описания всех возможных комбинаций состояний компонентов УВС. Предложенный метод и методика сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры УВС применяется специалистами АО «НПО автоматики» при проектировании создаваемых бортовых цифровых вычислительных систем (БЦВС).

Применение разработанных средств позволяет также обосновать архитектуру резервированного источника тока (патент на изобретение РФ №

2512890), сбоеустойчивой вычислительной системы (патент на изобретение РФ № 2541839), реализация которых заложена в разрабатываемую конструкторскую документацию.

Смельчакова Г.А. принимает непосредственное участие в разработке БЦВС, используемых в нескольких системах автоматического управления объектами ракетно-космической техники. Выполняет функции ведущего программиста специализированного вычислительного модуля. Является соавтором изобретений «Моделирующий КОАП» (патент на изобретение РФ № 2516703), «Технологическая УВМ» (патент на изобретение РФ № 2563139), позволяющие в полном объеме отработать программное и аппаратное обеспечение УВС.

Начальник НТК-300

Хохряков В.А.

Начальник отдела 332

Антимиров Я.В.

Главный научный сотрудник

Антимиров В.М.