

На правах рукописи



Смельчакова Галина Александровна

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ УПРАВЛЯЮЩИХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ
ТЕХНИКИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обра-
ботка информации (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинск - 2016

Диссертационная работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Шестаков Александр Леонидович

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Куликов Геннадий Григорьевич;

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник АО «НИИ точных приборов», РОСКОСМОС

Сафронов Виктор Валентинович

Ведущая организация: - АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», РОСКОСМОС.

Защита диссертации состоится 10 октября 2016 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, зал заседаний диссертационных советов №1 (ауд. 1001 главного корпуса).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), а также на сайте <http://www.susu.ac.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет, тел. (351) 267-91-23

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В.Н. Любицын

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, преобразовательно-коммутационной 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, 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., Чертока Б.Е., Микрина Е.А., Авена О.И., Когана Я.А., Кульба В.В., Павлова Б.В., Платонова В.Н., Антимилова В.М., Головкина Б.А., Гурского Б.Г. и др. Разработка таких систем ведется в АО «НПО автоматики» (г. Екатеринбург) с 60-х годов XX века, создано несколько поколений бортовых цифровых вычислительных систем (БЦВС) и аппаратуры для корабельных систем управления. Для сохранения ведущих позиций предприятия по созданию управляющих вычислительных систем необходима постоянная разработка и внедрение новых технических решений, не уступающих по своему техническому уровню разработкам отечественных и зарубежных компаний. Внедрение новых решений требует проработки вариантов реализации и сравнительного анализа их надежности, который целесообразно проводить на этапе раннего проектирования системы, что позволяет также получить обоснованную оценку целесообразности внедрения выбранного 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., Гнеденко Б.В., Соловьева А.Д., Острейковского В.А., Половко А.М., Гурова С.В., Буцана Г.П., Прохорова Н.Л., Рябинина И.А., Черкесова Г.Н., Проникова А.С., Чернова В.Ю., Шишмарева В.Ю.,

Диллона Б., Сингха Ч., Горского Л.К, Финаева В.И. и др.. Основные понятия теории надежности и методы аналитического расчета закреплены в стандартах ГОСТ 27.002-89, ГОСТ 27.301-95, ГОСТ Р 27.302-2009, ГОСТ Р 51901.16-2005. В оценке надежности сложных технических систем нашла применение технология автоматизированного моделирования систем и расчета показателей надежности. Автоматизированные системы оценки надежности различаются уровнем теоретической разработки, методами расчета, качеством программной реализации, составом вычисляемых показателей надежности.

Для существующих методов и средств расчета показателей надежности технических систем учёт сложных алгоритмов функционирования УВС, в том числе критериев отказов, реконфигураций системы является проблемным вопросом при использовании на практике, что приводит к необходимости развития методов и средств сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры УВС. При решении задачи сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры системы перспективным является применение методов статистического моделирования.

Традиционными способами повышения надежности сложных технических систем, 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 вероятность увеличения суммарного потока 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 научно-техническое обоснование алгоритмов функционирования УВС проводить целесообразно.

Целью диссертационной работы является повышение надежности УВС РКТ, разрабатываемых в «НПО автоматики».

Для достижения цели сформулированы следующие **задачи**:

- 1) анализ архитектуры современных управляющих вычислительных систем РКТ и ее тенденций развития;
- 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 сложной технической системы, позволяющего учесть алгоритмы функционирования системы (критерии отказов, восстановления работоспособности компонентов системы при сбоях, реконфигурации системы); программная реализация метода и

методики для проведения сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры;

4) анализ и выбор путей повышения и обеспечения надежности систем, 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 надежности системы, позволяющая учесть сложные алгоритмы функционирования УВС, не требующая аналитического описания всех возможных комбинаций состояний компонентов системы;

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

– разработана модификация блока контроля трехканального модуля БЦВС;

– обоснована архитектура контроллера магистрали для специализированного вычислительного модуля (СВМ);

– разработана методика анализа целостности сигналов модулей УВС с использованием программного обеспечения 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, по-

ложений 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» [6], «Моделирующий КОАП» [7], «Технологическая УВМ» [8]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [9].

Личным вкладом автора является разработка модификации метода статистического моделирования для оценки функциональной надежности УВС [1, 20, 21], разработка программного обеспечения [3, 8, 16], проведение научно-технических исследований [4, 9 – 12, 13 – 15, 18, 19, 21 – 23],

разработка модификации блока контроля [2, 5], разработка технологических средств [6, 7], разработка методики анализа целостности сигналов модуля УВС [18]. Автор работы принимает непосредственное участие в разработке бортовых цифровых вычислительных систем, используемых в составе нескольких САУ объектами РКТ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного содержания, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 138 наименования, и шести приложений. Объем работы составляет 172 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена практическая направленность результатов работы. Сформулированы цель и задачи работы. Обозначен объект и предмет исследования. Отмечены новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимость. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ состояния и определены направления развития УВС САУ объектами РКТ, разрабатываемые в АО «НПО автоматики», исследованы принципы их функционирования и требования, предъявляемые к архитектуре УВС для решения целевых задач САУ. Проведен анализ известных методов и методик оценки надежности УВС на этапе проектирования системы.

УВС РКТ прошли большой путь развития от аналоговых до мощных цифровых вычислительных систем. Тенденцией их развития является повышение надежности функционирования за счет развития средств нейтрализации отказов в работе вычислительных средств САУ, повышения уровня адаптации к внешним воздействиям, усложнения их архитектуры. Современные УВС 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.

УВС РКТ, создаваемые в «НПО автоматики», представляют собой сложные технические системы, состоящие из большого числа специализированных вычислительных устройств. Возможность разбиения комплекса задач УВС на ряд независимых функциональных модулей позволяет строить их по магистрально-модульному принципу, когда к общесистемной магистрали подключается необходимое количество вычислительных модулей и модулей каналов обмена. Управление взаимодействием модулей, контроль исправности модулей и распределение задач между ними осуществляет системный модуль. Вычислительные модули обеспечивают вы-

полнение функциональных вычислений, модули канала обмена организуют обмен информацией со смежными подсистемами. Количество вычислительных модулей определяется составом задач, требуемой производительностью и степенью резервирования, количество модулей канала обмена – составом периферийных подсистем, при этом модули, работающие на одно направление, как правило, дублируются.

Для повышения надежности УВС реализуют горячее резервирование: вычислительные модули объединяют в группы, которые синхронно решают одни и те же задачи. Исправный модуль определяется путем периодического сравнения результатов решения циклических задач, проведенных модулями группы. Системный модуль реализуется в виде троированного вычислителя с мажоритацией на уровне блоков или с коммутатором, переключающим блоки по сигналам встроенных устройств оперативного контроля. Оптимальное распределение вычислительных задач с учетом их весовости и фактической исправности модулей для каждого участка работы УВС находится предварительно в процессе разработки программного обеспечения.

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 УВС (например, алгоритмы перераспределения функциональных задач модулей в случае возникновения отказов в работе вычислительных средств), ставят задачу развития методов и средств сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры УВС.

Во **второй главе** обоснован выбор методики сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры УВС, разработана модификация метода статистического моделирования для оценки функциональной надежности УВС. Рассмотрены вопросы применения генераторов случайных чисел для моделирования сложных систем. Приведено описание программного обеспечения (ПО) для проведения сравнительного анализа надежности вариантов архитектуры УВС.

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

Предложена следующая модификация метода статистического моделирования, который использовался для оценки надежности невозстанавливаемой системы. 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 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:

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

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 известным формулам:

$$q = 1 - \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot T \cdot z_i), \quad (2)$$

$$\tau = -\ln(\xi \cdot q + (1 - q)) / (\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot T \cdot z_i), \quad (3)$$

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

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), (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: $Q_i = Q_i \cdot p$. 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:

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:

1. Сгенерировать ξ – случайное равномерно распределенное число в интервале от 0 до 1. Определить $\lambda = \xi \cdot (\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z_i)$. 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: 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 посредством генераторов случайных чисел. Исследован вопрос о применимости различных генераторов для оценки надежности структурно-сложных технических систем.

Проверка предложенного метода оценки вероятности отказа системы проводилась путем сравнения результатов моделирования систем с результатами аналитического расчета. По результатам моделирования получены

значения вероятности отказа с погрешностью не более 0.2%. При моделировании УВС со сложной логикой функционирования, не поддающихся анализу аналитическими методами, были получены прогнозируемые результаты. Достоверность метода подтверждена также совпадением результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на моделирующем комплексе обработки аппаратуры и программ (КОАП).

На основе предложенного метода и выбранной методики анализа вариантов архитектуры УВС разработано программное обеспечение (ПО) для исследования надежности систем и обоснования выбора варианта реализации по критерию надежности. В состав ПО входят средства задания формальной модели УВС, средства верификации модели, средства проведения вычислительного эксперимента, средства представления результатов анализа, средства графического пользовательского интерфейса.

В третьей главе проведен анализ технических решений, предназначенных для повышения надежности УВС, создаваемых в НПО автоматики». Проведен сравнительный анализ надежности вариантов резервирования ИВЭП. Предложена модификация блока контроля трехканального модуля системы, проведен сравнительный анализ надежности вариантов реализации блока контроля модуля. Рассмотрена задача обоснования архитектуры контроллера магистрали для СВМ.

Введение резерва в состав УВС противоречит требованию минимизации аппаратных затрат, поэтому стоит задача выбора рационального варианта резервирования компонентов УВС с минимальным уровнем аппаратурной избыточности. Проведен сравнительный анализ надежности вариантов резервирования компонентов УВС, основанных на практических проработках приборной реализации в «НПО автоматики». Сделан вывод о целесообразности трехканального варианта с коммутатором, переключающим каналы по сигналам встроенных средств оперативного контроля.

Задача обеспечения надежным питанием вычислительных устройств может решаться различными путями. В системах, создаваемых в «НПО автоматики», используются ИВЭП, реализуемые как статические преобразователи. Необходимость обеспечения надежности ИВЭП привела к решению задачи повышения их надежности путем резервирования.

В работе проведен сравнительный анализ надежности следующих вариантов резервирования ИВЭП при различных потоках отказов и соотношениях интенсивностей катастрофических и параметрических отказов:

- дублированной системы со схемой контроля и переключателем каналов;
- троированной системы со схемой контроля и схемой отключения канала, выходное напряжение которого существенно отклоняется от рабочего номинала из-за катастрофических отказов элементов канала;

– троированной системы со схемой контроля, схемой отключения канала и схемой нейтрализации параметрического отказа, приводящего к небольшим отклонениям выходного напряжения канала.

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:

$$K = \lambda_{\text{пар}} / (\lambda_{\text{пар}} + \lambda_{\text{кат}}), \quad (4)$$

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

Для получения количественных результатов принят 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». Интенсивность отказов средств контроля (схема контроля совместно со схемой отключения канала): $\lambda_{\text{СК}} = k_{\text{СК}} \cdot \lambda$, интенсивность отказов схемы нейтрализации отказа: $\lambda_{\text{СН}} = k_{\text{СН}} \cdot \lambda$. Диапазон значений $k_{\text{СК}}$ и $k_{\text{СН}}$ принят 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 рассмотрены в диапазоне (0.2...0.8), значения γ – в диапазоне (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.

Вероятности отказа дублированного и троированного варианта без схемы нейтрализации отказа определены аналитическим методом. Вероятность отказа троированной системы со схемой нейтрализации отказа определена предложенным в работе методом оценки надежности УВС.

На рисунках 1, 2 приведены графики относительного изменения вероятности отказа с различными значениями вероятности обнаружения отказа ($\beta = 0.2, 0.5, 0.8$) и интенсивности отказов схемы контроля ($k_{\text{СК}} = 0.1, 0.2, 0.3$) дублированного варианта и троированного варианта без схемы нейтрализации отказа. На рисунке 3 приведены графики относительного изменения вероятности отказа троированного варианта с схемой нейтрализации при различных значениях доли параметрических отказов (K), вероятности обнаружения отказа (β) при уровне $\gamma = 0.5$, $k_{\text{СК}} = 0.1$, $k_{\text{СН}} = 0.3$. Че-

рез Q на графиках обозначена вероятность отказа варианта резервирования. В качестве базового значения вероятности отказа ($Q_{\text{баз}}$) принята оценка вероятности отказа нерезервированного ИВЭП.

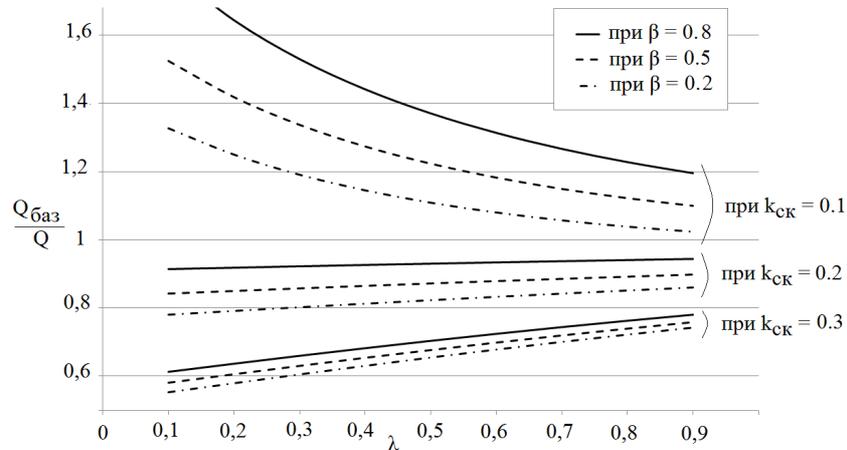


Рисунок 1 – Относительное изменение вероятностей отказов дублированного варианта

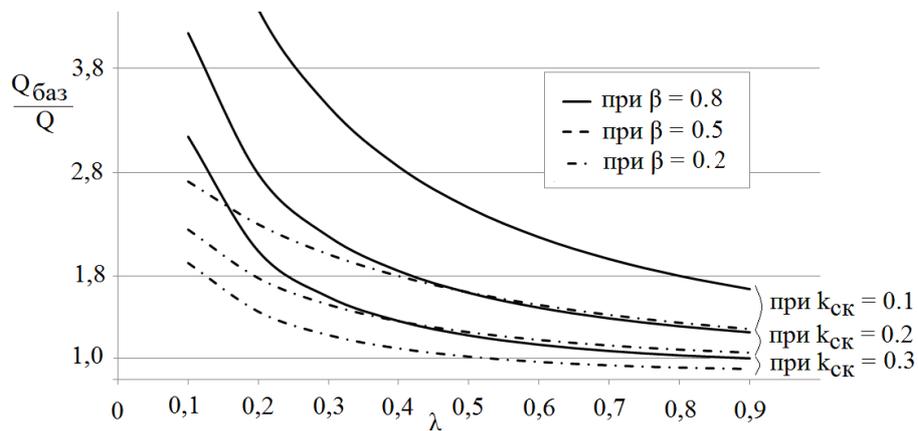


Рисунок 2 – Относительное изменение вероятностей отказов троированного варианта без схемы нейтрализации отказов

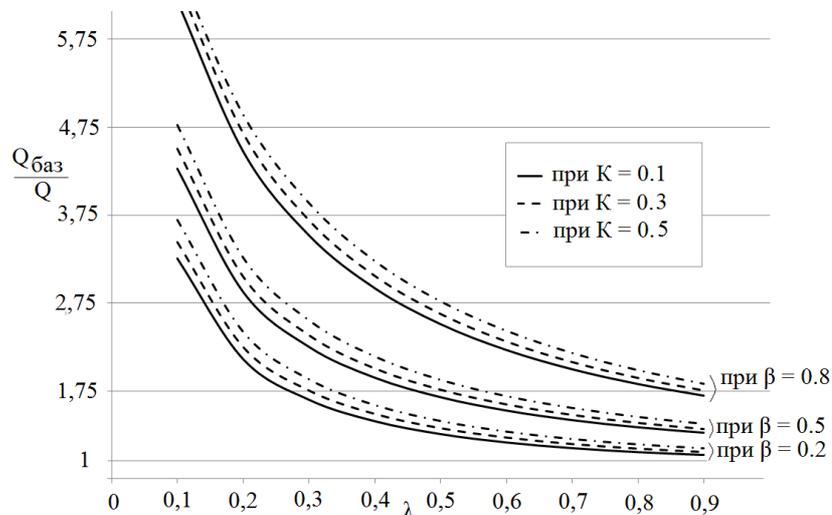


Рисунок 3 – Относительное изменение вероятностей отказов троированного варианта со схемой нейтрализации при $\gamma = 0,5$, $k_{\text{СК}} = 0,1$, $k_{\text{СН}} = 0,3$

По результатам сравнения вариантов для практической реализации ИВЭП рекомендован трехканальный вариант со средствами контроля катастрофических и параметрических отказов, схемой отключения канала и схемой нейтрализации отказа. Проведено рассмотрение приборной реализации рекомендуемого варианта и оценка возможных затрат на реализацию. Сделан вывод о соответствии варианта требованиям к аппаратуре в части ограничений на массу, габариты и стоимость.

Системный модуль УВС в силу ограничений на массу и габариты 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. Специалистами «НПО автоматики» предложен ряд решений по реализации такого контроля. В работе рассмотрен блок контроля системного модуля БЦВС ракетносителя «Союз-2», который содержит три буферных регистра, входы которых подключены к информационным выходам каналов, три схемы совпадения, обеспечивающие попарное сравнение данных, триггеры неисправностей (ТН) для хранения признака неисправности канала и контрольную группу логических элементов (КГ) (рисунок 4).

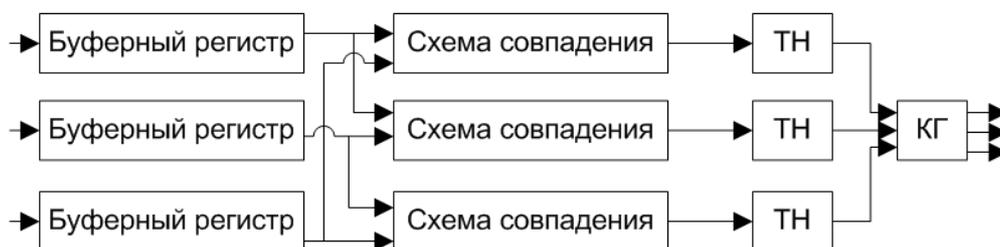


Рисунок 4 – Структура блока контроля

Блок контроля фиксирует отказ, возникающий в одном из каналов модуля при правильной работе двух других каналов. При этом 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.

Блок контроля в приборной реализации модуля выполнен на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), компоненты канала модуля – на основе радиационно-стойкой элементной базы. При работе в экстремальных условиях возможно искажение данных на локальных шинах модуля, которое блок трактует как неисправность, а не однократный сбой канала, и это является недостатком блока. Предложена модификация блока контроля, суть которой в том, что каналу «разрешено» ошибаться некоторое пороговое число раз ($N_{\text{порог}}$). В существующий вари-

ант блока контроля введены счетчики и триггеры сбоя. Если по результатам работы схемы совпадения сформирован признак несравнения данных, увеличивается значение счетчика сбоя канала. Если значение счетчика станет равным $N_{\text{порог}}$, формируется признак неисправности канала. Начальное значение счетчика сбоя – ноль.

Предположение, что первые $N_{\text{порог}}$ отказы являются сбоями, а не неисправностями может быть оправдано тем, что выдача данных из канала осуществляется достаточно часто и если в канале действительно неисправность, счетчик сбоя достаточно быстро достигнет значения $N_{\text{порог}}$ и сформируется признак неисправности канала. Следует отметить, что в приборной реализации модуля введение счетчиков и триггеров сбоя не потребует дополнительных аппаратных затрат на реализацию блока контроля.

Структурная схема модификации блока контроля приведена на рисунке 5. Она содержит три буферных регистра, входы которых подключены к информационным выходам каналов модуля, три схемы совпадения, три счетчика сбоя (СБ), триггеры сбоя (ТС) и триггеры неисправностей, элементы «И» (И) и группу контрольных логических элементов (КГ).

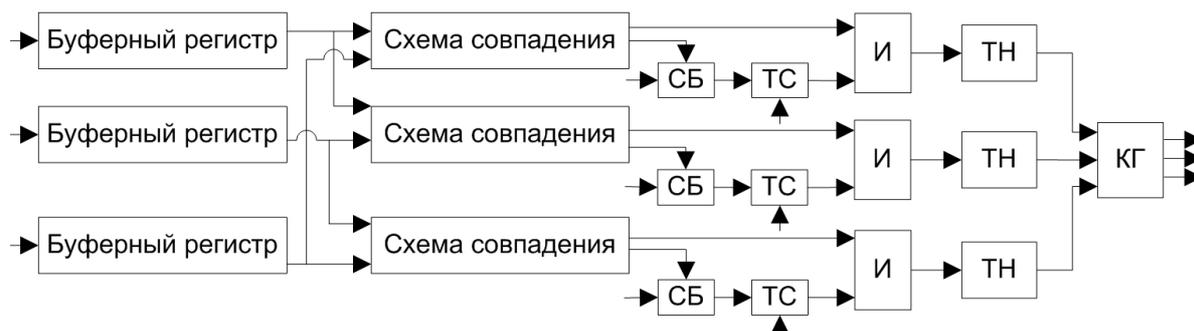


Рисунок 5 – Структура модификации блока контроля

Для оценки целесообразности введения предложенной модификации проведена сравнительная оценка надежности модулей с существующим и предложенным блоком контроля. Вероятность отказа первого модуля определена методом аналитического расчета, вероятность отказа второго – предложенным в работе методом оценки надежности УВС. Для получения количественных результатов принят диапазон значений суммарной интенсивности отказов одного канала равным $(0.1...0.9)$ час⁻¹, время работы $T_{\text{раб}} = 1$ час. Интенсивность отказов блока контроля: $\lambda_{\text{БК}} = k_{\text{БК}} \cdot \lambda$. Диапазон значений $k_{\text{БК}}$ принят для исследования равным $(0.1...0.3)$.

На рисунке 6 приведены графики относительного изменения вероятности отказа модуля с различными значениями доли сбоя в общем потоке отказов, определенной по формуле (4) ($K = 0.1, 0.3, 0.5$). 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.

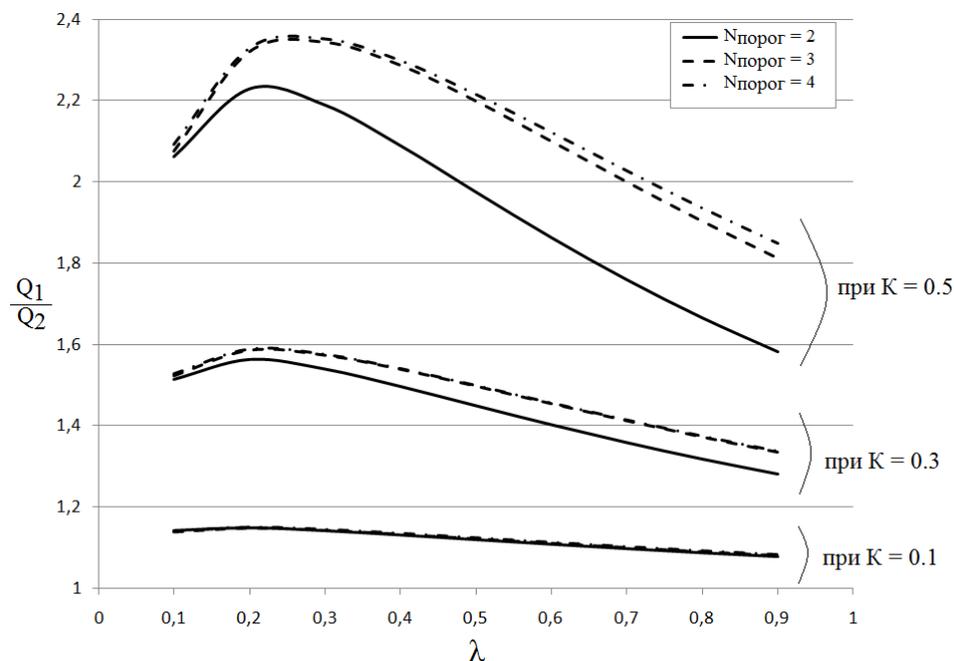


Рисунок 6 – Относительное изменение вероятностей отказов вариантов при $k_{БК} = 0.1$

Предложенная модификация блока контроля стала частью изобретения «Сбоеустойчивая вычислительная система» [5].

Одним из принципиальных моментов создания УВС РКТ является необходимость разработки и внедрения новых технических решений, предназначенных для повышения надежности систем. Одной из перспективных технологий сегодня является технология SpaceWire, предназначенная для организации межмодульных соединений бортовых систем. Контроллер SpaceWire входит в состав процессоров ОАО НПЦ «ЭЛВИС» серии «Мультикор», реализация контроллера охватывает уровни SpaceWire от сигнального до сетевого.

Рассмотрена архитектура специализированного вычислительного модуля (СВМ) с процессором 1892ВМ8Я, структурная схема которого показана на рисунке 7. В состав модуля входят запоминающее устройство (ЗУ), формирователь синхроимпульсов, блок связи с магистралью (БСМ), кодирующе-декодирующее устройство и приемо-передающее устройство (ППУ) канала связи. БСМ обеспечивает сопряжение модуля с магистралью БЦВС семейства «Малахит» и выполнен на основе ПЛИС.

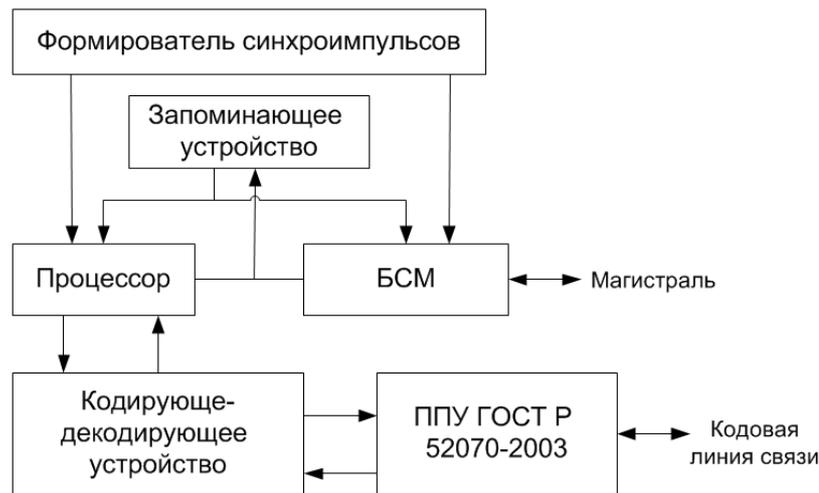


Рисунок 7 – Структурная схема модуля

На этапе проектирования СВМ возникла задача обоснования архитектуры контроллера магистрали, входящего в состав БСМ, который осуществляет сопряжение процессора, ЗУ с магистралью. Контроллер магистрали представляет 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. Решением данной задачи занимался автор работы.

Проработаны варианты реализации контроллера магистрали с минимальными затратами на ресурсы ПЛИС. Проведено моделирование диаграмм взаимодействия контроллера и процессора в режиме обмена данными по магистрали при выполнении программы СВМ из различных областей памяти, в режимах с использованием кэша процессора и без. По результатам исследования рекомендован вариант архитектуры контроллера с циклическим буфером. Методом имитационного моделирования определены оптимальные значения параметров контроллера (размер буфера, количество слов при передаче данных за одно предоставление прямого доступа в память и др.). Предложенное техническое решение опробовано на практике. Результаты экспериментов подтверждают данные моделирования. Рекомендованный вариант контроллера стал предметом реализации.

В четвертой главе рассмотрены вопросы обеспечения надежности УВС РКТ. Рассмотрены подходы применяемые к обработке программного и аппаратного обеспечения УВС, проведена проверка предложенного метода оценки надежности УВС на моделирующем КОАП. Предложена методика анализа целостности сигналов модуля посредством ПО Ansys. Обоснован выбор алгоритма расчета контрольной суммы при передаче

данных по параллельной 16-разрядной магистрали. Проведена оценка целесообразности восстановления вычислительных модулей БЦВС для ракетносителя «Союз-2» в полете.

Надежное функционирование УВС может быть гарантировано только при обеспечении полноты отработки ее программного и аппаратного обеспечения. Моделирующий КОАП [6], в создании которого участвовал автор работы, реализует следующие принципы отработки: замена всех смежных подсистем САУ на их программно-аппаратные модели (имитаторами), проведение режимов работы системы и отработка взаимодействия подсистем УВС со смежными подсистемами САУ по положительным и отрицательным ветвям функционирования САУ, регистрация взаимодействия по линиям связи УВС с имитаторами.

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 вместо штатной аппаратуры используют 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 [7]. 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, что позволяет моделировать отказы аппаратуры с заданной интенсивностью отказов и проверить предложенный в работе метод оценки надежности УВС путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на КОАП.

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

$$\tau = -\ln(1 - \xi) / \lambda, \quad (5)$$

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

Перед проведением эксперимента необходимо убедиться в безотказности компонентов системы, на базе которой проводится эксперимент. В процессе испытаний, согласно ГОСТ Р 27.607-2013, необходимо осуществлять прерывистый с малыми интервалами мониторинг технического со-

стояния системы. Это гарантирует, что поток отказов компонентов системы обусловлен только внесенными с пульта управления комплекса неисправностями. Перед проведением эксперимента необходимо определить критерий отказа системы в целом, признаки и механизм определения работоспособности компонентов системы. Проверка работоспособности компонента может осуществляться 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 (5):

$$\tau_i = -\ln(1 - \xi_i) / \lambda_i, \quad (6)$$

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: $T = \min(\tau_i, T_{раб})$ для $\forall i \in \overline{1, n}$, где $T_{раб}$ – длительность работы системы.

Если $T = T_{раб}$, 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 (6). Пересчитать $\tau_j = T + \tau_j$.

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

Вероятность отказа системы (Q) может быть найдена по известной формуле: $Q = N_q / N$, где N – число экспериментов, N_q – число регистраций неисправных состояний системы.

Согласно приведенной методики определена вероятность отказа системы на моделирующем КОАП при различных интенсивностях отказов компонентов системы. По результатам моделирования получены значения вероятности отказа этой же системы с погрешностью не более 0.8%.

На этапе проектирования УВС целесообразно проводить анализ целостности цифровых сигналов модулей системы. Технологии моделирования плат и электромагнитного анализа в настоящее время достаточно развиты: Ansys Inc. предоставляет большой набор инструментов для проведения анализа. Однако общая методика анализа целостности цифровых сигналов отсутствовала и в «НПО автоматики» не применялась.

В работе предложена методика анализа целостности цифровых сигналов, которая реализуется посредством ПО Ansys (программ Ansys SIware, Ansys Designer) и охватывает следующие этапы:

1. Импорт топологии платы в Ansys SIware.
2. Анализ топологии, обработка данных. Выполнение электромагнитного анализа средствами Ansys SIware.
3. Экспорт модели модуля в Ansys Designer. Интеграция модели в предложенную схему подключения с элементами EYESOURCE и EYEPROBE. Выполнение анализа средствами Ansys Designer.

Предложенная методика позволяет оценить величину перекрестных помех на линиях платы, обусловленную излучением элементов цепей платы. Качество методики подтверждается сравнением результатов моделирования вычислительного модуля БЦВС с экспериментальными данными, полученными на реальном модуле.

В **заключении** приведены основные выводы и результаты, полученные в ходе выполнения работы.

В **приложениях** приведены результаты расчета тестовых задач (прил. А) и экспериментальные данные, полученные на моделирующем КОАП, (прил. Г) для проверки предложенного метода оценки надежности УВС, пример описания формальной модели УВС (прил. Б), интерфейс ПО для сравнительного анализа надежности вариантов УВС (прил. В), последовательности бит для моделирования сигналов модуля УВС (прил. Д), акт об использовании результатов диссертационного исследования (прил. Е).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

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 восстановления 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, получен-

ными на моделирующем комплексе обработки 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».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. 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. Смельчакова // Естественные и технические науки. – М.: Спутник+, 2014. – №4(72) – С. 125–132. – ISSN 1684-2626.

2. Антимиров, В.М. Исследование вариантов реализации контроля для модулей БЦВС / В.М. Антимиров, Г.А. Смельчакова // Естественные и технические науки. – М.: Спутник+, 2014. – №5(73) – С. 115–120. – ISSN 1684-2626.

3. Антимиров, В.М. Решение задачи обоснования архитектуры бортовой цифровой вычислительной системы / В.М. Антимиров, Г.А. Смель-

чакова, А.С. Пентин // Естественные и технические науки. – М.: Спутник+, 2014. – №6(74) – С. 100-106. – ISSN 1684-2626.

4. Антимиров, В.М. Исследование путей оптимального резервирования источника вторичного электропитания и выбор варианта реализации / В.М. Антимиров, Г.А. Смельчакова, В.А. Светлаков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – Вып. 3. – Лыткарино: ФГУП НИИП, 2014. – С. 42–46. – ISSN 1997-2830.

Патенты и программы:

5. Сбоеустойчивая вычислительная система : пат. 2541839 РФ: 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.

6. Моделирующий КОАП : пат. 2516703 РФ: МПК G 06 F 15/00, МПК G 06 F 9/44 / В.М. Антимиров, А.В. Журавлев, И.В. Шашмулин, 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.

7. Технологическая УВМ : пат. 2563139 РФ : 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 патентообл.: ФГУП «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова». – № 2013116173/08 ; заявл. 09.04.2013 ; опубл. 20.09.2015, Бюл. № 26.

8. 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. Смельчакова, А.В. Журавлев ; заявитель и правообладатель: ФГУП «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова» – № 2013662024 ; заявл. 24.12.2013 ; опубл. 20.03.2014.

Другие публикации:

9. 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. Смельчакова, В.А. Светлаков // Моделирование систем и процессов. – Воронеж: Воронежский гос. лесотех. университет им. Г.Ф. Морозова, 2012. – №2 – С. 16–19. – ISSN: 2219-0767.

10. Антимиров, В.М. Выбор генератора случайных чисел для оценки параметров надежности систем методом статистического моделирования / В.М. Антимиров, Г.А. Смельчакова // Моделирование систем и процессов. – Воронеж: Воронежский гос. лесотех. университет им. Г.Ф. Морозова, 2012. – №3 – С. 10–13. – ISSN: 2219-0767.

11. Антимиров, В.М. Выбор оптимального варианта архитектуры управляющей вычислительной системы / В.М. Антимиров, Г.А. Смелычакова // Моделирование систем и процессов. – Воронеж: Воронежский гос. лесотех. университет им. Г.Ф. Морозова, 2012. – № 2 – С. 11–15. – ISSN: 2219-0767.

12. Антимиров, В.М. Исследование вариантов резервирования источников вторичного электропитания на стадии проектирования / В.М. Антимиров, Г.А. Смелычакова, 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. – ISSN 2309-1932.

13. Антимиров, В.М. Направления реализации радиационно-стойких источников вторичного электропитания / В.М. Антимиров, В.Г. Бельцов, Г.А. Смелычакова, 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.

14. Антимиров, В.М. Оценка целесообразности восстановления модулей БЦВС во время работы на этапе проектирования БЦВС / В.М. Антимиров, Г.А. Смелычакова // 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. – ISSN 2309-1932.

15. 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. ун-т им. Г.Ф. Морозова, 2013. – № 4. – С. 5–7. – ISSN: 2219-0767.

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

17. Смелычакова, Г.А. Автоматизированные системы оценки надежности структурно-сложных технических систем / Г.А. Смелычакова // 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. – ISBN 978-5-00021-028-4.

18. 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. – ISSN 2309-1959.

19. Смелъчакова, Г.А. Выбор оптимального варианта расчета контрольной суммы сообщения при передаче по магистрали / 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. 47 – 51. – ISSN 2308-5991.

20. 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»: тезисы докладов Всероссийской молодёжной научно-практич. конференции (05-06 июня 2015 г., г. Благовещенск). – Самара: СГАУ, 2015. – С. 206-207. – ISBN 978-5-88940-139-1.

21. 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. – ISBN 978-5-9907785-2-8 (ч. 2).

22. 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.

23. 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. – ISBN 978-5-905945-59-5.