

На правах рукописи

Бочаров Никита Алексеевич

**Разработка научных методов и программных средств обеспечения контроля,
диагностики и живучести специализированных вычислительных
комплексов для робототехнических комплексов**

Специальность 05.13.15
«Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва
2020

Работа выполнена в ПАО «Институт электронных управляющих машин им. И.С. Брука».

Научный руководитель **Парамонов Николай Борисович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ПАО «Институт электронных управляющих машин им. И.С. Брука»

Официальные оппоненты **Иванов Михаил Александрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой 12 «Компьютерные системы и технологии» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Захаров Виктор Николаевич, доктор технических наук, доцент, учёный секретарь Федерального исследовательского центра Информатика и Управление РАН

Ведущая организация: **ПАО «НПО «Алмаз»**

Защита состоится 27 февраля 2020 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 212.131.05 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет» по адресу: 119454, г. Москва, пр-т. Вернадского, д. 78, ауд. Д 117

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РТУ МИРЭА.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119454, г. Москва, пр-т. Вернадского, д. 78, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.131.05.

Автореферат разослан 25 января 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.131.05

Андрианова Елена Гельевна

Актуальность исследования

Управление современными автономными робототехническими комплексами (РТК) осуществляются с помощью специализированных вычислительных комплексов, которые чаще всего имеют централизованную архитектуру системы управления, однако в настоящее время все чаще используются принципы децентрализованного управления, которое требует разработки принципиально новых методов и алгоритмов. Исследования в области создания таких специализированных вычислительных комплексов ведутся во многих мировых научных центрах и в том числе в нашей стране. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать вычислительные комплексы РТК, обладающие широкими интеллектуальными возможностями. Одной из важных проблем вычислительных комплексов РТК, оснащенных системой децентрализованного управления, является проблема живучести.

В работе введен ряд допущений и ограничений, сведенных в модель вычислительных комплексов РТК, в которой РТК представлен группой роботов, которые управляются децентрализованной системой управления, представленной вычислительным комплексом с многоуровневой сетью. Роботы функционируют автономно, координируя свои действия между собой по сети. Особенности модели подразумевают возможность отказов, заключающихся в полной или частичной потере связи между роботами и полном или частичном выходе из строя вычислительных машин. Причинами таких отказов могут быть функциональные сбои программных средств или сбои технических средств от внешних воздействующих факторов. Такие отказы могут возникать комплексно, то есть в разных подсистемах и из-за различных воздействующих факторов одновременно, поэтому в этом случае встает вопрос адаптации существующих методов обеспечения живучести к комплексу отказов для реализации возможности к продолжению работы вычислительных комплексов РТК с частичной допустимой потерей эффективности. Парирование таких комплексов отказов может быть осуществлено с использованием специализированных вычислительных

комплексов РТК, способных осуществить реконфигурацию. Поэтому задача создания структуры таких вычислительных комплексов РТК, обеспечивающих живучесть при комплексных отказах в условиях рассматриваемой модели, является актуальной. Соответственно, решение данной задачи способствует созданию и совершенствованию теоретической и технической базы специализированных вычислительных комплексов, обладающих высокими качественными и эксплуатационными показателями, и имеет важное народно-хозяйственное значение.

Степень разработанности

Вопросом создания специализированных вычислительных комплексов для РТК занимается много организаций как в России, так и в Китае, США и Европе. Получены результаты по разработке научных методов, алгоритмов и программ обеспечения контроля, диагностики и живучести вычислительных комплексов как для отдельных роботов, так и для групп (роев) роботов в виде централизованных и многоагентных систем.

Научной основой данного исследования в области РТК явились работы, в которых рассматривались модели РТК, таких отечественных ученых, как И.В. Рубцов, А.А. Бошляков, В.Ю. Корчак, С.В. Манько.

В части решения задач расчета и обеспечения живучести вычислительных комплексов значительную роль сыграли труды В. П. Воеводина, Б. В. Гнеденко, Г. Н. Черкесова, И. Б. Шубинского.

Задаче обеспечения живучести вычислительных комплексов для РТК посвящено множество работ, в большинстве которых показан путь к повышению надежности через резервирование. Задача комплексного использования различных методов резервирования для вычислительных средств представлена в работах В. А. Ведешенкова, П. П. Пархоменко и др.

Применительно к современным вычислительным комплексам для РТК, решение задачи обеспечения контроля, диагностики и живучести в рассматриваемой модели РТК в условиях комплексных отказов, возникающих

кратковременно и высокоинтенсивно, недостаточно проработано с учетом массового применения.

Цели и задачи работы

Цель работы заключается в разработке научных методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих контроль, диагностику и живучесть специализированных вычислительных комплексов для робототехнических комплексов в условиях рассматриваемой модели.

Объектом исследования являются специализированные вычислительные комплексы, обеспечивающие контроль, диагностику и живучесть РТК.

Предметом исследования являются научные методы, алгоритмы и программы, обеспечивающие контроль и диагностику специализированных вычислительных комплексов и живучесть РТК.

Основная идея диссертационной работы заключается в обеспечении живучести вычислительных комплексов РТК в условиях принятых допущений и ограничений, которые сведены в модель вычислительного комплекса РТК, за счет возможностей вычислительных и программных средств. Соответственно этой цели основными задачами диссертационного исследования являются:

1. Обзор и анализ современных решений обеспечения контроля, диагностики и живучести вычислительных комплексов для РТК.
2. Разработка метода обеспечения живучести вычислительных комплексов РТК за счет адаптивного резервирования программно-аппаратных ресурсов с учетом рассматриваемой модели РТК.
3. Разработка метода диагностики и контроля вычислительных комплексов РТК за счет возможностей совокупности программно-аппаратных средств типа сторожевого таймера и модуля привязки времени, учитывающего особенности рассматриваемой модели РТК.
4. Разработка метода реконфигурации вычислительных комплексов РТК за счет возможностей вычислительных средств, учитывающего особенности рассматриваемой модели РТК.

5. Разработка и реализация на основе платформы «Эльбрус» программных средств, обеспечивающих контроль, диагностику и живучесть специализированных вычислительных комплексов РТК.

Научная новизна работы

В диссертации предложены научные методы, алгоритмы и программы для создания специализированных вычислительных комплексов РТК, обеспечивающих контроль, диагностику и живучесть. Принята модель вычислительного комплекса РТК, в которой РТК представлен группой роботов, каждый из которых управляется как минимум одной вычислительной машиной, которые в свою очередь объединены в вычислительный комплекс с многоуровневой сетью. Роботы функционируют автономно, координируя свои действия между собой по сети. Подразумевается возможность возникающих одновременно отказов, заключающихся в полной или частичной потере связи между роботами и полным или частичном выходе из строя вычислительных машин.

Разработан новый метод обеспечения живучести вычислительных комплексов РТК за счет адаптивного резервирования программно-аппаратных ресурсов с учетом рассматриваемой модели РТК.

Разработан метод диагностики и контроля вычислительных комплексов РТК за счет возможностей совокупности программно-аппаратных средств типа сторожевого таймера и модуля привязки времени, учитывающий особенности рассматриваемой модели РТК.

Разработан метод реконфигурации вычислительных комплексов РТК, учитывающий особенности рассматриваемой модели РТК.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит в разработке математического и программного аппарата для решения задачи создания специализированных вычислительных комплексов РТК, обеспечивающих контроль, диагностику и живучесть вычислительных комплексов РТК.

Практическая значимость обусловлена тем, что на основе полученных теоретических результатов разработаны алгоритм диагностики и контроля вычислительных комплексов РТК и алгоритм реконфигурации вычислительных комплексов РТК, решающие важную научно-техническую задачу диагностики, контроля и живучести специализированных вычислительных комплексов. Разработаны программные средства для моделирования вычислительных комплексов РТК. Разработаны программные средства обеспечения диагностики, контроля и живучести РТК. Полученные результаты расширяют спектр угроз, при возникновении которых удается сохранить функционирование вычислительных комплексов РТК с допустимым снижением эффективности их применения.

Появление отечественных вычислительных и программных средств нового поколения, таких как микропроцессоры «Эльбрус-4С» и «Эльбрус-8С» с ОС «Эльбрус» открыло новые возможности обеспечения живучести вычислительных комплексов РТК, разрабатываемых на основе отечественных вычислительных средств. В частности, появились возможности, представляемые аппаратными и программными устройствами типа сторожевого таймера и модуля привязки времени, а также возможности для организации сетевого взаимодействия в вычислительных комплексах групп роботов.

В соответствии с государственной стратегией импортозамещения вычислительных машин для систем управления, выполненная работа является значимой для повышения обороноспособности страны ввиду создания на основе полученных в ней результатов робототехнических комплексов специального назначения. Соискатель проводил исследования в рамках «Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации» в редакции Указа Президента Российской Федерации от 16.12.2015 г. N 623.

Результаты, полученные соискателем, внедрены в работы по разработке вычислительных комплексов РТК специального назначения, проводимых отечественными разработчиками, такими как МГТУ им. Н.Э. Баумана и АО «МЦСТ». Получены соответствующие акты о внедрении.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.13.15 – «Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети» и относится к области исследований «Разработка научных методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих надежность, контроль и диагностику функционирования вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей».

Методология и методы исследования

В основе методологии работы лежат комплексное использование аналитических методов и моделирование. Системный подход в ходе исследований сочетал методы вычислительной математики, математической статистики и имитационного моделирования. Результаты проверялись в ходе натурных экспериментов и испытаний группировки РТК.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Метод обеспечения живучести вычислительных комплексов РТК за счет адаптивного резервирования программно-аппаратных ресурсов с учетом рассматриваемой модели РТК.
2. Метод диагностики и контроля вычислительных комплексов РТК за счет возможностей совокупности программно-аппаратных средств типа сторожевого таймера и модуля привязки времени, учитывающий особенности рассматриваемой модели РТК.
3. Метод реконфигурации вычислительных комплексов РТК, учитывающий особенности рассматриваемой модели РТК.
4. Программные средства для обеспечения контроля, диагностики и живучести специализированных вычислительных комплексов РТК на основе платформы «Эльбрус».
5. Внедрение результатов исследования в разработки РТК, проводимые отечественными разработчиками.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций обеспечивается: корректностью постановки математических методов решения задач, согласованностью полученных в ходе экспериментальных проверок результатов, полученных в работе, с уже существующими в отечественной и зарубежной литературе данными; положительными рецензиями, полученных при соответствующих публикациях в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук; разработкой действующего программного обеспечения, подтвержденной соответствующими актами внедрения и свидетельствами о регистрации программы в ФИПС.

Апробация

Наиболее важные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих форумах и конференциях:

1. 58 научная конференция МФТИ. Москва, МФТИ. 23-28 ноября 2015 г.
2. Международный форум «Микроэлектроника 2016». 2-я научная конференция «Интегральные схемы и микроэлектронные модули». Республика Крым, г. Алушта, 26-30 сентября 2016 г.
3. 59 научная конференция МФТИ. Москва, МФТИ. 21-26 ноября 2016 г.
4. I Международная научная конференция «Конвергентные когнитивно-информационные технологии». Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 25-26 ноября 2016 г.
5. Международный форум «Микроэлектроника 2017» 3-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и электронные модули». Республика Крым, г. Алушта, 02-07 октября 2017 г.
6. 60 научная конференция МФТИ. Москва, МФТИ. 20-25 ноября 2017 г.
7. II Международная научная конференция «Конвергентные когнитивно-информационные технологии». Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 24-26 ноября 2017 г.

8. III Международная научная конференция «Конвергентные когнитивно-информационные технологии». Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 29 ноября-2 декабря 2018 г.

9. XIV Международная научно-практическая конференция «Современные информационные технологии и ИТ-образование». Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 21-24 ноября 2019 г.

Публикации по теме диссертации

По результатам, полученным в ходе проведения диссертационного исследования, были опубликованы 15 печатных работ [1-15]. Из них 6 [1-6] в ведущих рецензируемых журналах из списка ВАК. Также получено 3 свидетельства о регистрации программного средства [16-18] в Федеральной службе по интеллектуальной собственности – Роспатент.

Структура работы

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (90 наименований) и 2 приложений. Объем текста диссертации составляет 133 страницы, который содержит 5 таблиц и 31 рисунок.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель и основные задачи, перечисляются методы исследований, раскрывается новизна и практическая ценность работы, описывается структура и содержание диссертации, приведены сведения о публикациях и апробации работы.

В первом разделе проведен анализ особенностей современных наземных РТК. Рассмотрены группы наземных роботов, их архитектура и задачи. Показано, что группы наземных робототехнических комплексов являются одним из наиболее перспективных направлений развития средств ВВСТ, однако методы создания вычислительных комплексов для управления такими РТК недостаточно проработаны с учетом массового использования. Проведен анализ исследований на

тему обеспечения живучести вычислительных комплексов групп наземных робототехнических комплексов как в России, так и в других странах.

Определена рассматриваемая модель РТК. В этой модели РТК представлен группой роботов, которые управляются вычислительными машинами, объединенными в многоуровневую сеть. На каждом роботе находится как минимум одна вычислительная машина. Если количество вычислительных машин на роботе больше одной, то они объединяются в полносвязную резервированную внутреннюю сеть. Роботы функционируют автономно, координируя свои действия между собой по сети. В модели подразумевается возможность возникновения отказов, заключающихся в полной или частичной потере связи между роботами и полном или частичном выходе из строя вычислительных машин. Причинами таких отказов могут быть: функциональные сбои программных средств или сбои технических средств от внешних воздействующих факторов. Такие отказы могут возникать комплексно, то есть в разных подсистемах и из-за различных воздействующих факторов одновременно. На рисунке 1 приведен пример вычислительного комплекса РТК, с учетом рассматриваемой модели РТК.

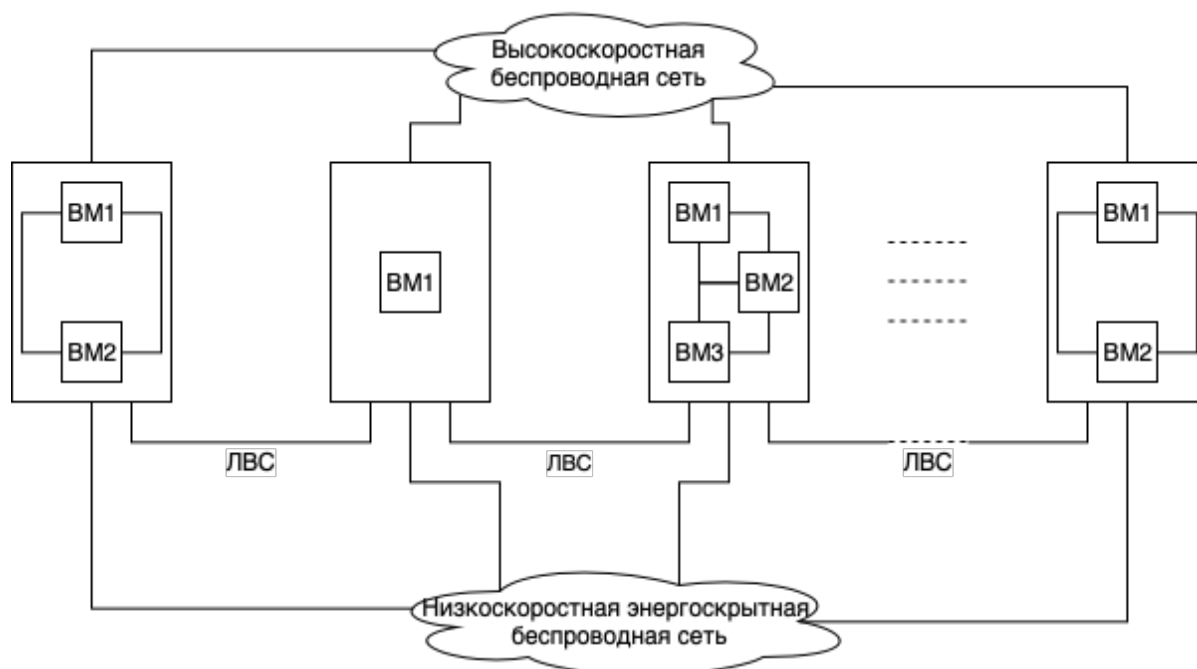


Рисунок 1. Структура типичного вычислительного комплекса РТК

Отмечено, что существующие методы обеспечения живучести вычислительных комплексов не учитывают особенностей рассматриваемой модели РТК с учетом массового применения.

На основе проанализированных источников сформулирована решаемая задача обеспечения живучести РТК. Под обеспечением живучести РТК в условиях рассматриваемой модели понимается способность системы управления РТК, являющейся специализированным вычислительным комплексом, сохранить критически важные данные и продолжить выполнять свои функции после массового (возможно, целенаправленного) отказа его компонентов, и в случае нарушения доступности системы за минимальное время восстановить свою работоспособность. Сделан вывод о необходимости решения задачи обеспечения живучести вычислительных комплексов для групп наземных роботов в условиях рассматриваемой модели.

Рассмотрены особенности режимов эксплуатации РТК в группе. Определены основные показатели надежности, которые можно применить к рассматриваемой предметной области.

Введено допущение, что помимо основного (естественного) потока отказов, которые являются следствием ошибок, сбоев и т.д., есть поток отказов, который возникает кратковременно, высокоинтенсивно и в нескольких подсистемах. Будем называть его потоком комплексных отказов. Общий поток отказов для бортового вычислительного комплекса будет определяться выражением:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2,$$

где λ_1 – интенсивность потока естественных отказов, а λ_2 – интенсивность потока комплексных отказов.

Введено допущение, что робот в группе может функционировать в трех режимах, характеризующихся согласно сложившейся обстановке и соответствующим потоком отказов:

- Режим подготовки. Роботы в составе группы движутся к назначенной цели, ведут активную работу с системами технического зрения, строят подробные карты проходимости и т.д. Между роботами в составе группы есть

высокоскоростная связь, позволяющая организовывать многосторонний обмен информацией.

- Режим повышенной боевой готовности. Робот находится близко к зоне боевых действий и должен быть готов к переходу в режим боевых действий. Становятся возможными множественные отказы. Связь между роботами нестабильна, но присутствует почти всегда.

- Режим боевых действий. Роботу непосредственно угрожает враждебные элементы, велик риск получения серьезного физического урона или несанкционированного доступа в систему управления. Связь между роботами отсутствует большую часть времени. Критически важно соблюдение условий реального времени.

Режимы функционирования робота формализуются следующим образом. Предположим, что группа роботов реализует задачу F . Сложную задачу F целесообразно декомпозировать на суперпозицию нескольких более простых подзадач $F_1 \dots F_n$, решаемых каждым роботом по отдельности. В таком представлении любая из подзадач F_i становится более обозримой. Каждую подзадачу, в свою очередь, можно декомпозировать на еще более простые подзадачи $F_{11} \dots F_{nm}$, которые являются простейшими функциями, выполняемыми роботом. Каждой задаче F_{ij} ставится в соответствие приоритет P_k , зависящий от критичности выполнения данной подзадачи роботом в текущем режиме. При росте интенсивности потока отказов λ , требуемые вычислительные ресурсы у задач F_{ij} с наивысшим приоритетом P_k резко увеличиваются, так как становится жизненно необходимым наличие резервного вычислительного устройства с полной репликой приоритетных задач.

Анализ возможных методов обеспечения живучести показал, что каждый из режимов характеризуется своими требованиями по использованию избыточности и нельзя эффективно реализовывать возможности резервирования одним методом для всех условий эксплуатации.

Сформулированы допущения и ограничения, в которых решается поставленная задача:

- роботы представляют собой колесные робототехнические комплексы массой в 1 тонну, с полезной нагрузкой до 250 килограмм, оснащенных многоспектральной системой компьютерного зрения и датчиками определения свойств грунтов;

- скорость перемещения роботов - до 40 км/час;
- количество роботов в группе ограничивается максимумом в 10 единиц;
- вычислительные машины РТК образуют вычислительный комплекс с многоуровневой сетью, один уровень которой является низкоскоростной и энергоскрытой командной сетью, и еще один или несколько уровней являются высокоскоростными и предназначены для обмена данными;

- каждый робот оснащен как минимум одной вычислительной машиной;
- время реакции на отказ составляет не более 0.1 с;
- ключевой характеристикой является время, в течение которого группа роботов может выполнять поставленную задачу.

Результатом рассмотрения является вывод о необходимости решения задачи обеспечения живучести для вычислительных комплексов РТК и сформулированные допущения и ограничения решаемой задачи.

Во втором разделе разработана модель угроз безопасности вычислительных комплексов РТК для предложенной модели робота. Угрозы классифицированы по природе возникновения. Модель угроз предполагает возникновение сразу нескольких отказов в вычислительном комплексе РТК.

Сделан вывод о необходимости рационального использования средств резервирования вычислительных ресурсов. Предложен метод адаптивного резервирования для обеспечения избыточности в зависимости от режима эксплуатации робота на основе распределенного управления. Адаптивное резервирование определяется в виде функции, зависящей от режима работы робота:

$$\left\{ \begin{array}{l} r(m1) \rightarrow (\lambda = \lambda_{min}; V = V_{max}) = \text{теплый резерв, } t_{п} \gg 0 \\ r(m2) \rightarrow (\lambda_{min} < \lambda < \lambda_{max}; V < V_{max}) = \text{горячий резерв, } t_{п} < 1 \text{ с} \\ r(m3) \rightarrow (\lambda = \lambda_{max}; V = \frac{V_{max}}{n}) = \text{горячий резерв, } t_{п} < 0.1 \text{ с,} \end{array} \right.$$

где m_1 – режим подготовки, m_2 – режим повышенной боевой готовности, m_3 – режим боевых действий, t_{π} – время на переключение с основной вычислительной машины на резервную, t_p – время реакции на отказ, задаваемое ТУ на устройство, V – объем используемых вычислительных ресурсов на работу с датчиками, V_{\max} – максимальный доступный объем вычислительных ресурсов на всех вычислительных машинах, n – количество вычислительных машин.

Особенностью изменения режимов является изменение характеристик вычислительного комплекса, образованного вычислительными машинами. Изменение характеристик может касаться как параметров самих вычислительных машин, так и сетей связи между ними.

Разрабатываемый метод обеспечения живучести вычислительных комплексов РТК разделен на следующие части:

- Резервирование вычислительных машин.
- Резервирование производительности.
- Резервирование каналов связи на физическом уровне.
- Разнесение вычислительных машин и каналов связи по разным бортам РТК.

Сущность метода заключается в следующем:

1. Программно-аппаратные ресурсы вычислительного комплекса РТК резервируются с учетом особенностей рассматриваемой модели РТК.
2. Реализуется механизм, с использованием программно-аппаратных средств, осуществляющий контроль и диагностику системы, для своевременного обнаружения отказов и определения их последствий.
3. После обнаружения и диагностики отказа проводится соответствующая реконфигурация вычислительного комплекса РТК, чтобы исключить из состава сети отказавшие устройства, до тех пор, пока они не будут заменены или восстановлены.

Модель метода заключается в следующем. Вычислительный комплекс РТК может находиться во множестве состояний Z , каждое из которых может быть декомпозировано до кортежа состояний всех ее элементов $S=(S_1, \dots, S_n)$, где под

элементами понимаются вычислительные машины отдельных роботов и каналы связи между ними. Каждое состояние S_i зависит от режима работы робота m , который зависит от уровня потока отказов λ и состояния сети n , состояния k отдельных вычислительных машин s_i , т.е. $S_i=(m(\lambda, n), s=(s_1, \dots, s_k))$. В ходе функционирования система переходит между состояниями S_i . Переход между состояниями вычислительного комплекса РТК происходит как под воздействием внешних сигналов, так и под воздействием внутренних событий.

Предлагаемый метод адаптивного резервирования предполагает создание ряда частных методов, обеспечивающих обеспечение живучести вычислительных комплексов РТК при заданных допущениях и ограничениях.

В третьем разделе приведены методы обеспечения живучести вычислительных комплексов РТК:

- Метод контроля и диагностики вычислительных комплексов РТК;
- Метод реконфигурации вычислительных комплексов РТК.

Сущность метода контроля и диагностики вычислительных комплексов РТК заключается в переиспользовании существующих отлаженных программ и использовании средств операционной системы реального времени и специальных аппаратных средств типа модуля привязки времени (МПВ).

Алгоритм работы с устройством модуля привязки времени МПВ, реализованным в ОС «Эльбрус» выглядит следующим образом. При поступлении прерывания драйвер МПВ анализирует регистр входных прерываний МПВ. Если обнаружено, что на данный вход поступил сигнал, то считывается регистр счетчика времени этого входа (корректирующий счетчик) и текущее время ОС. На основании этих данных пользователю будет выдано время поступления прерывания `intr_appear_nsec` на вход модуля привязки времени в операции `read()`. На резервной машине вызывается функция `ioctl(fd_in_i, MPVIO_LSTN_ALIVE, interval_msec)` и драйвер устанавливает режим генерации прерываний по данному входу `fd_in_i`, и устанавливает режим прослушивания сигнала “я живой” по данному входу МПВ. В этом режиме контроллер МПВ не посылает сгенерированные сигналы, а использует их для

обнаружения исчезновения сигналов “я живой”: если за два периода не поступит ни одного сигнала “я живой”, то контроллер начинает выдавать прерывания с заданной периодичностью. Параметр `interval_mcsec` задает периодичность выдаваемых сигналов “я живой”.

Сущность метода реконфигурации вычислительных комплексов РТК заключается в создании резервированной архитектуры многомашинного комплекса, и использовании возможностей специального программного устройства – сторожевого таймера. Метод позволяет реконфигурировать вычислительный комплекс РТК после отказа одного из компонентов и продолжить исполнение вычислительного процесса.

Общий алгоритм реконфигурации вычислительных комплексов РТК в случае отказа состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Определение и диагностика отказа, передача задачи на другое устройство (с сохранением / без сохранения полученных промежуточных результатов).

Шаг 2. Исключение отказавшего устройства из конфигурации вычислительного комплекса, попытка замены его резервным с того же робота, либо резервным с другого робота из состава группы.

Шаг 3. Исключение связей с отказавшим устройством, запрет на доступ к нему, а для самого отказавшего ресурса – попытка его восстановления.

Концепцию архитектуры, использующей этот алгоритм реконфигурации, и резервируемой на основе однородных ВМ иллюстрирует рисунок 2, на котором показан пример бортового вычислительного комплекса и основные связи, реализующие одну из схем резервирования.

Для восстановления работы после отказа используется сторожевой драйвер. Для ОС Эльбрус процесс работы со сторожевым драйвером выглядит следующим образом. Пользовательский процесс-демон через равные промежутки времени уведомляет драйвер сторожевого таймера через специальное устройство `/dev/watchdog` о том, что он до сих пор работоспособен. При получении такого уведомления драйвер программирует сторожевой таймер таким образом, чтобы

отложить перезагрузку ОС на некоторое время. Если по какой-то причине уведомления не произошло, то сторожевой таймер перезагрузит ОС по истечению заданного интервала.

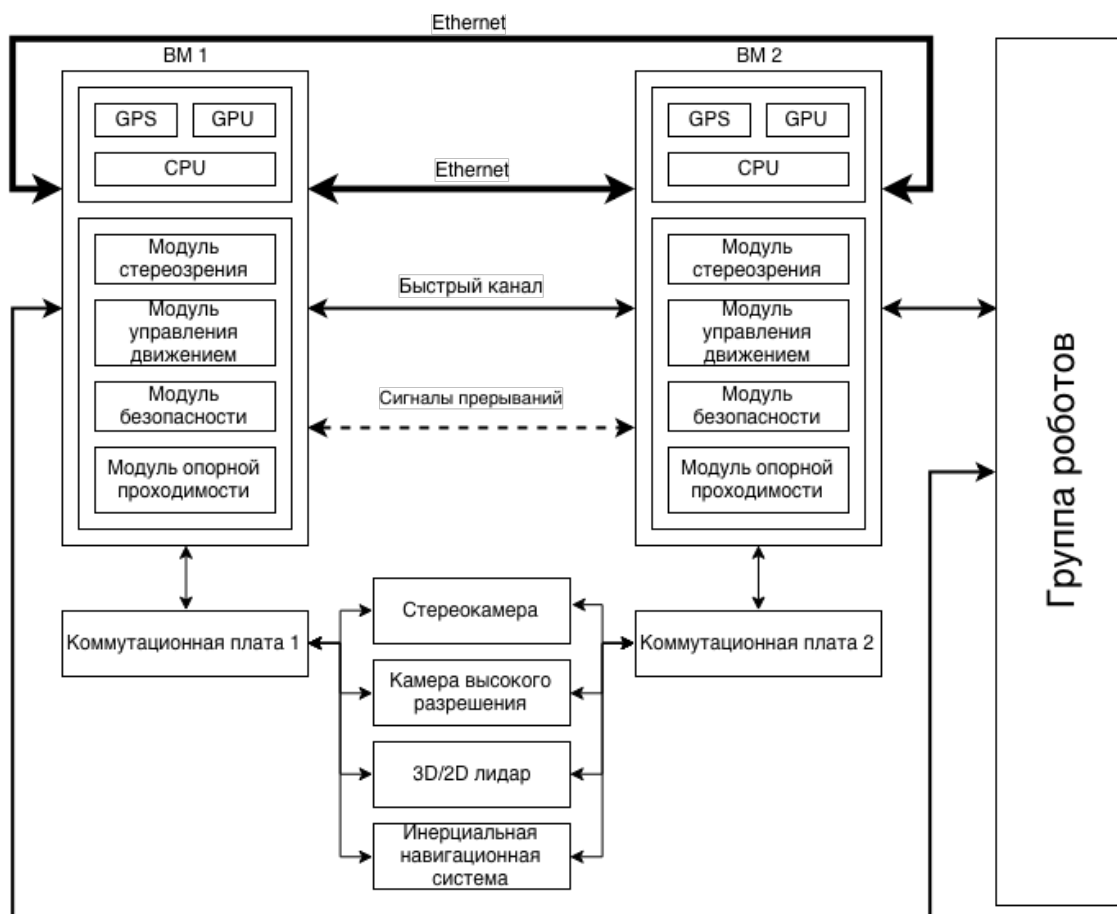


Рисунок 2 - Схема функциональных связей.

Предложенные методы отличаются от существующих тем, что учитывают особенности используемой модели РТК, подразумевающей комплексные отказы в вычислительных машинах и сетях связи, а также предполагают использование отечественной вычислительной техники с учетом массового использования.

Четвертый раздел посвящен разработке программным средствам обеспечения диагностики, контроля и живучести вычислительных комплексов РТК, и экспериментальной проверке разработанного метода обеспечения живучести вычислительных комплексов РТК. Были поставлены и выполнены следующие задачи:

1. Определен критерий функциональности РТК.
2. Разработаны программные средства обеспечения контроля, диагностики и живучести вычислительных комплексов РТК на основе разработанных алгоритмов.
3. Разработаны программные средства, моделирующие РТК в условиях рассматриваемой модели и позволяющие провести оценку функциональности РТК по установленному критерию.
4. Программные средства реализованы на программно-аппаратной платформе «Эльбрус».
5. Показано улучшение показателя функциональности РТК при использовании предложенного метода обеспечения живучести вычислительных комплексов РТК с использованием разработанных программных средств.

Для оценки разработанного метода обеспечения живучести вычислительных комплексов РТК введен численный критерий функциональности. Функциональность РТК оценивается в зависимости от режима работы. Критерий основывается на потенциальном числе сценариев, которые могут быть выполнены РТК и учитывает потерю производительности на каждом из них.

$$eff = \begin{cases} \frac{\sum_{i=0}^n eff_i}{n}, \text{ режим подготовки} \\ \frac{2\sum_{i=0}^n eff_i}{n}, \text{ режим боевых действий} \\ \frac{\frac{\sum_{i=0}^n eff_i}{n} + \frac{2\sum_{i=0}^n eff_i}{n}}{2}, \text{ режим боевой готовности} \end{cases}$$

Разработаны программные средства моделирования РТК, представляющие собой программы, реализующие типовые функциональные задачи РТК. В качестве таких задач выбраны:

- Планирование движения робота;
- Планирование движения группы роботов;
- Стереозрение.

Разработаны программные средства обеспечения диагностики, контроля и живучести вычислительных комплексов РТК. Программные средства разработаны

на языке Java с использованием средств ОПО и СПО «Эльбрус». Для оценки разработанного метода они объединены в программную модель, в которой есть возможности для проведения экспериментов по оценке функциональности по определенному в данной главе критерию.

Программное средство для реализации метода контроля и диагностики вычислительных комплексов РТК была разработана на основе ранее созданной автором программы моделирования одиночных отказов в двухмашинном комплексе и предназначена для контроля и диагностики событий, нарушающих связь между вычислительными машинами, связанными по сети. Программное средство позволяет замерить время реакции на такое событие. В качестве протокола обмена сообщениями «я живой» между вычислительными машинами программным средством использовались средства Socket API и аппаратное устройство МПВ.

Программное средство для реализации метода реконфигурации вычислительных комплексов РТК использует сторожевой таймер ОС «Эльбрус», который производит попытку перезапуска отказавшей вычислительной машины. При невозможности перезапуска задачи отказавшей вычислительной машины распределяются по другим вычислительным машинам в комплексе. Для распределения нагрузки при отказе части оборудования в разработанной модели производится численное выравнивание значений вычислительной нагрузки в рамках одного робота при проведении реконфигурации.

Разработанные программные средства используются специальной программной моделью, которая позволяет провести эксперимент по оценке функциональности РТК с использованием методов обеспечения живучести вычислительных комплексов РТК. Программа моделирует возникновение отказов в случайных элементах вычислительного комплекса РТК и применяет, в зависимости от конфигурации, разработанные методы, после чего показывает результирующую оценку функциональности. Возникновение отказов моделируется с учетом принятых в разделе 2 значений интенсивности потока естественных и комплексных отказов:

$$\lambda_1 \in [10^{-5}; 10^{-7}] \text{ 1/час}$$

$$\lambda_2 \in \begin{cases} \{0\}, \text{ режим подготовки} \\ [1 * 10^{-5}; 1 * 10^{-1}] \frac{1}{\text{час}}, \text{ режим повышенной боевой готовности} \\ [1 * 10^{-1}; 5 * 10^{-1}] \frac{1}{\text{час}}, \text{ режим боевых действий} \end{cases}$$

Результаты проведенного экспериментального исследования показали:

- использование метода контроля и диагностики вычислительных комплексов РТК повышает функциональность РТК на 6-8%;
- использование метода контроля и диагностики вычислительных комплексов РТК в совокупности с методом реконфигурации вычислительных комплексов РТК и балансировкой нагрузки повышает функциональность РТК на 23-43%;
- модифицированный разработанными методами вычислительный комплекс РТК имеет более высокую функциональность, чем классический при наличии возможностей для резервирования.

Основные результаты диссертационной работы

Проведен обзор и анализ современных решений обеспечения контроля, диагностики и живучести вычислительных комплексов для РТК

Разработан метод обеспечения живучести вычислительных комплексов РТК за счет адаптивного резервирования программно-аппаратных ресурсов.

Разработан метод контроля и диагностики вычислительных комплексов РТК, за счет возможностей совокупности программно-аппаратных средств типа сторожевого таймера и модуля привязки времени, учитывающий особенности рассматриваемой модели РТК.

Разработан метод реконфигурации вычислительных комплексов РТК за счет возможностей вычислительных средств, учитывающий особенности рассматриваемой модели РТК.

Разработаны и реализованы на платформе «Эльбрус» программные средства обеспечения диагностики, контроля и живучести вычислительных комплексов РТК.

Результаты внедрены в разработки МГТУ им. Н.Э. Баумана и АО МЦСТ по разработке вычислительных комплексов РТК специального назначения. Полученные результаты позволили обосновать структуру специализированных вычислительных комплексов для одиночных РТК и для групп РТК.

Список работ по теме диссертации

Статьи, опубликованные в перечне научных рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК:

1. Бочаров Н.А., Сапачев И.Д., Парамонов Н.Б. Макеты задач робототехнических комплексов на языке Java в среде ОС «Эльбрус» // Наноиндустрия 2017. №74. С 122-126.

2. Бочаров Н.А., Лимонова Е.Е., Парамонов Б.Н., Усилин С.А. Оптимизация для вычислительной архитектуры Эльбрус модифицированного метода Виола и Джонса // Труды ИСА РАН. 2017. №4. С. 12-23.

3. Бочаров Н. А., Парамонов Н. Б., Тимофеев Г. С., Панова О. Ю. Производительность вычислительной техники с процессором «Эльбрус-8С» на задачах робототехнического комплекса // Наноиндустрия. 2018. №82. С 79-84.

4. Limonova E.E., Bogdanov D.S., Arlazarov V.V., Slavin O.A., Nikolaev D.P., Vocharov N.A., Paramonov N.B. Performance evaluation of a recognition system on the VLIW architecture by the example of the Elbrus platform // Programming and Computer Software. 2019. Т. 45. № 1. С. 12-17.

5. Бочаров Н.А., Елисеев Р.В., Парамонов Н.Б., Янко Д.В. Катастрофоустойчивость бортовых вычислительных систем на базе микропроцессоров «Эльбрус» // Наноиндустрия. 2019. № S89. С. 107-112.

6. Бочаров Н. А. Моделирование алгоритмов катастрофоустойчивости групп роботов на программно-аппаратной платформе «Эльбрус»// Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 3. С. 8–14. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.

Статьи в других журналах

7. Бочаров Н. А., Парамонов Н. Б., Сапачев И. Д. Реализация алгоритмов

группового управления на языке в среде ОС «Эльбрус» // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2016. № 1. С. 108-115.

8. Бочаров Н.А., Парамонов Н.Б., Славин О.А., Янко Д.В. Оценка перспектив использования вычислительных средств семейства «Эльбрус» при реализации алгоритмов распознавания в современных робототехнических комплексах // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 2. С. 99–105.

Публикации в сборниках научных трудов:

9. Бочаров Н.А., Сапачев И.Д., Парамонов Н.Б. Макеты робототехнических комплексов на языке Джава в среде ОС «Эльбрус»: Материалы 58 научной конференции МФТИ, 23 -28 ноября 2015 г.

10. Бочаров Н.А., Парамонов Н.Б., Сапачев И.Д. Реализация модели группового управления на языке Java в среде ОС «Эльбрус». Материалы 59 научной конференции МФТИ, 21–26 ноября 2016 г.

11. Bocharov N.A., Sapachev I.D., Paramonov N.B. Implementation of algorithms of group control on Java language in OS "Elbrus" environment. Selected Papers of the 1st International Scientific Conference Convergent Cognitive Information Technologies, Convergent 2016.

12. Бочаров Н.А., Сапачев И.Д., Парамонов Н.Б. Макеты задач робототехнических комплексов на языке Java в среде ОС «Эльбрус». Материалы международного форума «Микроэлектроника-2016». Республика Крым, г. Алушта, 26-30 сентября 2016 г.

13. Бочаров Н.А. Оценка перспектив использования вычислительной техники с процессором Эльбрус-8С для решения задач робототехнического комплекса. Труды 60-й Всероссийской научной конференции МФТИ, 20–26 ноября 2017 г.

14. Бочаров Н. А., Парамонов Н. Б., Тимофеев Г. С., Панова О. Ю. Производительность вычислительной техники с процессором «Эльбрус-8С» на задачах робототехнического комплекса. Материалы международного форума «Микроэлектроника-2017». Республика Крым, г. Алушта, 02–07 октября 2017 г.

15. Бочаров Н.А., Парамонов Н.Б., Александров А.В., Славин О.А.

Решение задач когнитивного управления группой роботов на многоядерных микропроцессорах «Эльбрус» // Труды II Международной научной конференции «Конвергентные когнитивно-информационные технологии» (Convergent”2017), Москва, 24-26 ноября, 2017. С 232-244.

Регистрация программы для ЭВМ:

16. Бочаров Н.А., Парамонов Н.Б., Сапачев И.Д. Программный комплекс для моделирования алгоритмов группового управления роботами и отождествления траекторий с использованием группы камер. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660783 от 21 сентября 2016 г.

17. Александров А.В., Бочаров Н.А., Панова О.Ю., Парамонов Н.Б., Тимофеев Г.С. Модель системы технического зрения для распознавания объектов на микропроцессорах семейства «Эльбрус». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614977 от 20 апреля 2018 г.

18. Бочаров Н.А. Модель обеспечения катастрофоустойчивости бортовых вычислительных комплексов на базе аппаратно-программной платформы «Эльбрус». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019616256 от 30 апреля 2019 г.