

На правах рукописи



**Дегтярев Алексей Робертович**

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОНФИГУРАЦИЕЙ СИСТЕМ  
ИНТЕГРИРОВАННОЙ МОДУЛЬНОЙ АВИОНИКИ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной  
техники и систем управления

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ульяновск – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Измерительно-вычислительные комплексы» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»  
Киселев Сергей Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление и экономика на воздушном транспорте» ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени главного маршала авиации Б.П. Бугаева»  
Махитько Вячеслав Петрович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные технологии и сети» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»  
Чекал Елена Георгиевна

Ведущая организация: Ульяновский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

Защита состоится «21» декабря 2016 г. в «12» час. «00» мин. на заседании диссертационного совета Д212.277.01 при ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» по адресу 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет».

Автореферат разослан «20» октября 2016 г.

Ваши отзывы и замечания по автореферату (в двух экземплярах), заверенные печатью, просим направлять в адрес университета: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, ученому секретарю диссертационного совета Д212.277.01.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д212.277.01  
доктор технических наук, профессор



Смирнов В.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Необходимость наращивания функционала комплексов бортового оборудования (КБО) с одновременным снижением их стоимости и эксплуатационных расходов, а также стремление к глубокой интеграции аппаратных, программных и алгоритмических ресурсов определяют следующие направления развития интегрированной модульной авионики (ИМА):

- создание унифицированных открытых отказоустойчивых архитектур КБО с применением перспективных высокоскоростных сетевых интерфейсов;
- дальнейшая унификация аппаратуры с целью снижения номенклатуры разрабатываемых изделий и сокращения сроков выпуска конструкторской документации (КД), улучшение массогабаритных характеристик, увеличение общей производительности системы, ее надежности и отказоустойчивости;
- расширение функционала КБО для обеспечения безопасности и повышения эффективности выполнения поставленных задач;
- создание эффективных методов и средств встроенного контроля с целью повышения отказоустойчивости и обеспечения простоты технического обслуживания, в том числе и в полевых условиях;
- разработка и внедрение реконфигурации для обеспечения живучести КБО и выполнения поставленных задач при возникновении одиночных или множественных отказов.

Одним из ключевых вопросов является разработка алгоритмов функционирования и средств реализации отказоустойчивого КБО с возможностью изменения его структуры для сохранения работоспособности критичных функций. Осуществление динамической реконфигурации его ресурсов позволит минимизировать резервирование и обеспечит максимально возможный уровень безопасности и эффективности завершения полета или его дальнейшего выполнения в случае возникновения отказов.

Развитие методологии проектирования КБО ИМА в России началось в начале 2000-х годов, когда первые зарубежные комплексы уже внедрялись в серийное производство. В настоящее время работы по проектированию архитектуры комплексов для перспективных ЛА осуществляются рядом предприятий Российской Федерации: АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», ФГУП «СПб ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова», ВНИИРА (Санкт-Петербург), МИЭА (г. Москва), НПО «Полет» (Нижний Новгород), ФГУП «НИИ Авиационных систем» (г. Москва), ОАО «РПКБ «Раменское» (г. Москва) и др. Достигнутые в настоящее время результаты разработки защищены патентами.

К числу государственных программ, направленных на модернизацию существующих и разработку новейших КБО с использованием перспективных технологий относятся:

- государственная программа Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы», утвержденная постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 303 «Об утверждении госу-

дарственной программы Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы»;

- государственная программа Российской Федерации «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013-2025 годы», утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 15 декабря 2012 г. № 2396-р;

- федеральная целевая программа «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на 2011-2020 годы», утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 26.05.2011 № 912-рс.

Новейшими стандартами проектирования систем ИМА являются:

- руководство Р-297 по вопросам разработки и квалификации интегрированной модульной авионики, введенное в действие Авиационным Регистром Межгосударственного Авиационного Комитета (АР МАК) 20 марта 2015 года директивным письмом № 05-2015;

- руководство 4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации;

- руководство 4754 по процессам сертификации высокоинтегрированных сложных бортовых систем воздушных судов гражданской авиации.

Таким образом, исследования принципов построения и методологии проектирования систем на базе ИМА на сегодняшний день являются актуальными, способствуют повышению конкурентоспособности отечественного производителя и ускорению научно-технического прогресса, что позволит вывести проектирование авионики на качественно новый уровень.

**Объектом исследования** в диссертационной работе является проектирование систем ИМА, **предметом исследования** являются разработанная математическая модель реконфигурирующейся системы ИМА и алгоритмы распределения функциональных задач и динамической реконфигурации.

В диссертационной работе использован системный подход к описанию принципов построения систем ИМА. **Методы исследования** базируются на теории алгоритмов, теории графов, теории надежности и математическом моделировании.

**Цель** диссертационной работы состоит в развитии методов проектирования систем ИМА в соответствии с основными положениями концепции ИМА и в разработке моделей и алгоритмов оптимального распределения ресурсов КБО и алгоритмов динамического управления структурой системы при возникновении отказов, которые позволят обеспечить требуемые показатели надежности проектируемых комплексов.

В соответствии с поставленной целью в работе решены следующие **задачи**:

1. Определены структурные особенности комплексов ИМА, обеспечивающие возможность управления их конфигурацией.

2. Проанализирована возможность непрерывного контроля состояния комплекса и изменения его структуры в процессе выполнения задач без необходимости проведения дополнительных сервисных операций.

3. Проанализированы основные виды изменения конфигурации систем ИМА: аппаратная динамическая реконфигурация, программная динамическая реконфи-

гурация, функциональная динамическая реконфигурация, смешанная динамическая реконфигурация.

4. Разработана единая математическая модель аппаратной и программной структур системы ИМА.

5. Разработан алгоритм определения базовой конфигурации системы ИМА (распределения программных ресурсов по аппаратной платформе системы с учетом выбранного критерия оптимальности – минимума загрузки сети передачи данных).

6. Разработаны алгоритмы динамического изменения конфигурации системы ИМА для различных условий ее функционирования.

7. Проведены вычислительные эксперименты и проверка разработанных алгоритмов на макете многопроцессорной вычислительной системы.

8. Проведена оценка эффективности разработанных методов и алгоритмов для достижения требуемых показателей надежности при проектировании образца системы ИМА, проходящей этап межведомственных испытаний.

**Положения, выносимые на защиту, обладающие научной новизной:**

1. Единая математическая модель, объединяющая аппаратную и программную составляющие системы ИМА, отличающаяся тем, что в ней учитываются особенности архитектуры как аппаратной части, так и программной, а также возможные виды отказов и соответствующие состояния системы, что позволяет использовать ее для разработки алгоритмов управления конфигурацией систем ИМА с обеспечением требуемого уровня надежности в целом.

2. Алгоритм определения базовой конфигурации системы ИМА на основе заданного критерия оптимальности, отличающийся тем, что он учитывает критичность функциональных приложений, требуемые уровни гарантии конструирования аппаратуры, ограничения производительности аппаратных модулей и их тип.

3. Алгоритмы принятия решения и динамического изменения конфигурации системы ИМА, позволяющие достичь требуемого уровня надежности при различных условиях ее функционирования и учитывающие критичность функциональных приложений, уровни гарантии конструирования аппаратуры, информационную взаимосвязанность функций, а также возможные комбинации отказов.

4. Методика определения конфигурации системы ИМА, основанная на разработанных моделях и алгоритмах управления конфигурацией и обеспечивающая требуемые показатели надежности на различных этапах ее проектирования в соответствии с современными стандартами.

**Новизна научных положений состоит в следующем:**

1. В единой математической модели системы ИМА описаны состав и структура как аппаратной, так и программной составляющих системы, а также, кроме связей между аппаратной и программной частями системы, в ней учтены особенности архитектуры аппаратной и организации программной частей.

2. Алгоритм определения базовой конфигурации системы ИМА на основе заданного критерия оптимальности (представляющий собой модифицированный вариант алгоритма решения задачи об упаковке) позволяет учитывать критич-

ность функциональных приложений и требуемый уровень гарантии конструирования аппаратуры.

3. Выявлены и показаны идентичность и отличия решений задач аппаратной, программной и смешанной реконфигурации системы ИМА, с учетом чего предложены взаимосвязанные алгоритмы динамического изменения конфигурации системы, позволяющие обеспечивать требуемый уровень ее надежности при различных условиях функционирования.

**Практическая значимость работы и реализация ее результатов.** Результаты работы получены автором при выполнении в интересах гражданской авиации Российской Федерации составных частей ОКР:

- «Создание образцов комплекса унифицированных базовых элементов бортового оборудования открытой архитектуры на основе интегральной модульной авионики» по теме «Разработка курсоверткали», исполнитель – АО «УКБП», 2012-2015 гг.;

- «Разработка модуля воздушных данных МВД», исполнитель – АО «УКБП», 2012-2015 гг.

- «Разработка платформы ИМА ИМ-21-2», исполнитель – АО «УКБП», 2013-2015 гг.

**Достоверность результатов.** Достоверность проведенных теоретических исследований обеспечивается математическим обоснованием предлагаемых моделей и алгоритмов, а также успешным их применением при решении практических задач по разработке КБО ИМА на базе АО «УКБП» при участии автора.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- III и IV Всероссийских конгрессах молодых ученых НИУ ИТМО (г. Санкт-Петербург, 2014 и 2015 гг.);

- всероссийской научно-технической конференции «XII Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского» (г. Москва, 2015 г.);

- II Всероссийской научно-практической конференции «Прикладные информационные системы-2015» (г. Ульяновск, 2015 г.);

- VI Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых «Информатика и вычислительная техника» (г. Ульяновск, 2014 г.);

- всероссийской молодежной школе-семинаре «Актуальные проблемы информационных технологий, электроники и радиотехники - 2015» (ИТЭР – 2015, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, г. Таганрог, 2015 г.);

- всероссийской научно-технической конференции «Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы ИВК-2013» (г. Ульяновск, 2013 г.);

- научно-технических конференциях Ульяновского государственного технического университета «Вузовская наука в современных условиях» (Ульяновск, 2012-2016 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ, из них: 4 статьи в рецензируемых журналах, утвержденных ВАК РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,

10 работ в сборниках трудов всероссийских конференций и других рецензируемых изданиях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа изложена на 163 страницах, состоит из введения, 4 глав, содержащих 45 рисунков и 9 таблиц, заключения, списка используемых источников литературы, включающего 96 наименований, списка иллюстративного материала. В приложениях к диссертации представлены деревья неисправностей КБО ИМА и акт внедрения результатов работы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы и необходимость разработки КБО с возможностью динамического изменения структуры при возникновении отказов для достижения повышенных показателей надежности. Определены объект и предмет исследования, цели и задачи исследования, а также приведены положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* приведен аналитический обзор и анализ архитектуры существующих систем ИМА. Показано, что такие системы на сегодняшний день являются предметом большого числа исследований, и различные производители, предлагающие свои продукты на рынке, по-разному подходят к реализации основных положений проектирования интегрированных комплексов. Показано, что под ИМА понимается принцип построения систем, базирующийся на открытой сетевой архитектуре и единой вычислительной аппаратной платформе, а также обозначены характерные свойства таких систем.

В главе рассмотрены структурные элементы ИМА, на основе которых возможна реализация механизмов динамического изменения структуры - аппаратная платформа, функциональные приложения и операционная система реального времени (ОСРВ). Показано, что аппаратная часть комплекса в общем случае делится на три уровня: унифицированные конструктивно-функциональные модули (КФМ), объединяющие их крейты, высокоскоростная бортовая сеть передачи данных, служащая интегратором крейтов второго уровня.

Анализ аппаратуры комплексов, разработанных на предприятиях РФ, показал, что она строится на основе общедоступных COTS (Commercial Off The Shelf) компонентов, которые обеспечивают высокопроизводительную элементную базу при достаточной экономической эффективности. Для того чтобы КБО ИМА, спроектированный с использованием подобных компонентов, не рассчитанных на работу при воздействии внешних факторов, соответствующих авиационной группе оборудования, удовлетворял требованиям авиационных норм и успешно прошел периодические и приемосдаточные испытания, необходимо при его разработке использовать специальные технологические и конструкторские методы.

При рассмотрении функциональных особенностей ИМА были проанализированы возможные типы многопроцессорных систем и способы размещения ОСРВ в проектируемом КБО. Поскольку взаимодействие программной и аппаратной частей обеспечивается ОСРВ, то производить реконфигурацию программной части в случае отказов необходимо встроенными в нее средствами, пусть даже с использованием каких-либо сервисных приложений.

В результате рассмотрения современных методов проектирования реконфигурирующихся систем и оптимизации их структуры на примере работ В.А. Терскова, И.А. Каляева, И.И. Левина, Е.А. Семерникова, В.И. Шмойлова, И.В. Беседина, А.В. Лысенко, Г.В. Кремеца, В.В. Гроля, В.А. Романкевича и С.М. Мораведжа, показано, что предлагаемые ими критерии и алгоритмы перераспределения ресурсов не учитывают многие параметры и ограничения, что требует их доработки или адаптации для применения при проектировании систем ИМА.

По итогам проведенного анализа показано, что для создания эффективных методов и алгоритмов проектирования КБО ИМА необходимо разработать специальную математическую модель комплекса, которая объединит в себе все его структурные составляющие и позволит получать, анализировать и оценивать различные архитектурные и структурные варианты построения комплекса.

**Во второй** главе описана математическая модель системы ИМА, которая состоит из соответствующих математических описаний состава и структуры. Математическое описание состава сложного программно-аппаратного КБО представлено в виде вектора  $E(C) = \{C_S, C_H, C_T\}$ , в котором координаты соответствуют состояниям комплекса после проведения различных видов реконфигурации. Каждое состояние основывается на трех составляющих, полученных в результате первичной декомпозиции системы: наборе сменных КФМ  $S$ , на которых запущены программные приложения  $Y$ , работающие в различных режимах под управлением ОСРВ (рисунок 1):

$$\begin{aligned} C_S &= \{C_1(S_1, Y_1), C_2(S_1, Y_2), \dots, C_f(S_1, Y_m)\}, \\ C_H &= \{C_1(S_1, Y_1), C_2(S_2, Y_2), \dots, C_n(S_k, Y_r)\}, \\ C_T &= \{C_1(S_k, Y_1), C_2(S_k, Y_2), \dots, C_p(S_k, Y_l)\}, \end{aligned}$$

где  $C_S, C_H, C_T$  – множества конфигураций КБО, которые могут быть получены в результате соответствующей реконфигурации,  $S_l$  – набор исправных КФМ,  $Y_m$  – набор функционирующих программных приложений, соответствующий текущей программной конфигурации,  $S_k$  – набор отказавших КФМ,  $Y_r$  – набор программных приложений, оставленных в составе комплекса после проведения аппаратной реконфигурации,  $Y_l$  – набор программных приложений для данного режима.

Математическое описание функциональной структуры системы ИМА представлено в виде ориентированного графа, в узлах которого находятся функциональные приложения, характеризующиеся параметрами критичности и объема вычислений, которые соединены дугами, соответствующими массивам данных с параметрами частоты обращения и размера:

$$G_F = (Y(K, P), Z(\Xi, \mathcal{G})),$$

где  $Y$  – множество приложений, работающих под управлением ОСРВ,  $K$  – параметр критичности функции  $y \in Y$ ,  $P$  – необходимый объем вычислений для функции  $y \in Y$ ,  $Z$  – множество дуг, соответствующих потокам данных между функциями  $y \in Y$ ,  $\Xi$  – объем передаваемого массива данных,  $\mathcal{G}$  – частота обращения к массиву.



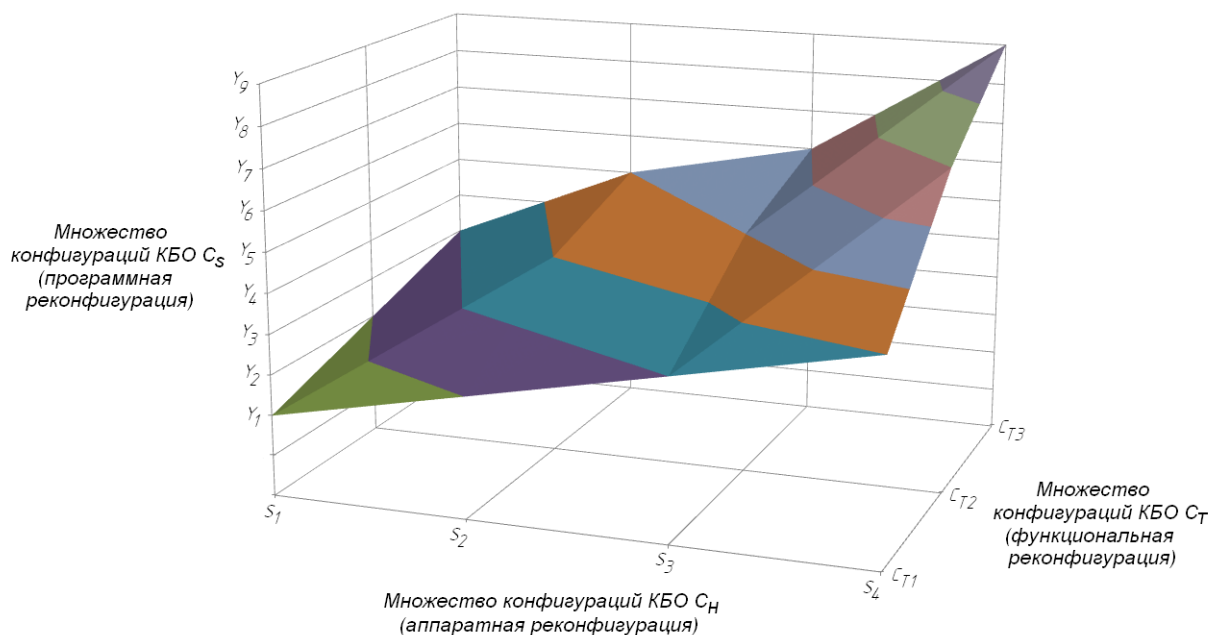


Рисунок 1 – Многомерная поверхность реконфигурирующей системы ИМА

Математическое описание аппаратной структуры также представлено в виде ориентированного графа:

$$G_S = (V(L, R), W(\Psi, \Omega)).$$

где  $V$  – множество вычислительных модулей (ВМ),  $L$  – объем доступной памяти ВМ,  $R$  – производительность процессора ВМ,  $W$  – множество дуг, соответствующих каналам связи между ВМ  $v \in V$ ,  $\Psi$  – объем передаваемых данных по каналу связи,  $\Omega$  – пропускная способность канала.

Математическая модель системы ИМА представлена в виде двудольного графа (рисунок 2), состоящего из графов  $G_F$  и  $G_S$ . Его особенностью является наличие связей не только между долями, но и внутри самих долей, которые впоследствии используются при формировании целевой функции и ограничений. Связи между графами  $G_F$  и  $G_S$  определяются выбранным критерием оптимальности, а состав графов – текущим и требуемым состоянием системы  $E(C)$ . В качестве оптимального выбран критерий минимума загрузки сети передачи данных, так как он позволяет уменьшить время, затрачиваемое на обмен между модулями по каналам связи, а, следовательно, время реализации и запаздывания прикладных функций. При этом значительно повышается надежность выполнения функций из-за уменьшения времени использования и числа обращений к каналам связи. С точки зрения управления конфигурацией комплекса размещение приложений с наибольшим значением суммарного потока информации между ними обеспечит полное (или частичное) выполнение критичных функций в случае отказа сетевого коммутатора. *Целевая функция* обеспечения минимума загрузки сети представлена в следующем виде:

$$\min \left( \sum_{v \in V} \sigma_v \nu_v \right),$$

где  $\sigma_v \nu_v = \sum_{m \in M} \sigma_m \nu_m - \sum_n \sum_{y \in Y_n} \sigma_y \nu_y$ , при чем  $\sum_{v \in V} \sigma_v \nu_v$  – поток данных между модулями после распределения задач,  $\sum_{m \in M} \sigma_m \nu_m$  – суммарный поток данных между функциями до распределения,  $\sum_n \sum_{y \in Y_n} \sigma_y \nu_y$  – суммарный поток данных между функциями после распределения,  $Y_n$  – набор функций, закрепленный за модулем  $n$ .

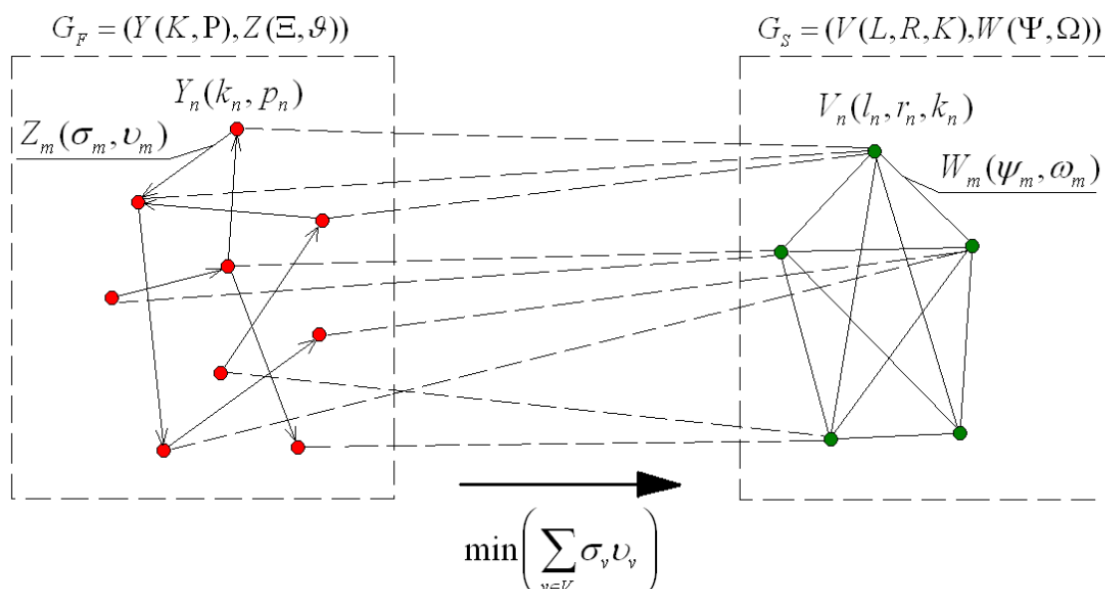


Рисунок 2 – Математическая модель системы ИМА в виде двудольного графа

Задача размещения приложений и массивов данных в модулях рассматривается как поиск отображения множества вершин графа  $G_F$  на множество вершин графа  $G_S$  с учетом выбранной целевой функции и ограничений. При этом показано, что существующие алгоритмы решения типовых задач на графах не могут быть применены ввиду невозможности учета множества ограничений, либо из-за большого количества затрачиваемого времени на перебор всех возможных вариантов распределения.

В главе предложен алгоритм, рисунок 3, размещения приложений по критерию минимума загрузки сети передачи данных, который заключается в последовательном размещении функций по модулям при условии соблюдения ограничений по емкости памяти, быстродействию процессоров и соответствию уровней критичности ВМ и приложений. Алгоритм состоит из последовательного перебора пар вершин графа  $G_F$  по убыванию значений их критичности и величины потока данных между ними с последующим отображением указанных пар на вершины графа  $G_S$  при соблюдении ограничений на объем памяти и быстродействие процессора.

Приведены необходимые для работы алгоритма исходные данные: матрица смежности  $A(G_F)=[a_{ij}]$ , построенная на основе графа функциональной структуры, матрица потоков данных  $D(G_F)=[c_{ij}]$ , набор ограничений, которые должны выполняться в процессе распределения, записанный в виде системы неравенств:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, (y_i, y_j) \in Z \\ 0, (y_i, y_j) \notin Z \end{cases}; c_{ij} = \begin{cases} \nu_{ij} \sigma_{ij}, (y_i, y_j) \in Z \\ 0, (y_i, y_j) \notin Z \end{cases}; \text{Cond} = \begin{cases} \sum_{y \in Y} \sigma_y x_{yv} \leq L_v, \forall v \in V \\ \sum_{y \in Y} \rho_y x_{yv} \leq R_w, \forall v \in V \end{cases}$$

Выходными данными является матрица  $R(G_s)=[b_{ij}]$ , построенная на основе графа аппаратной структуры.

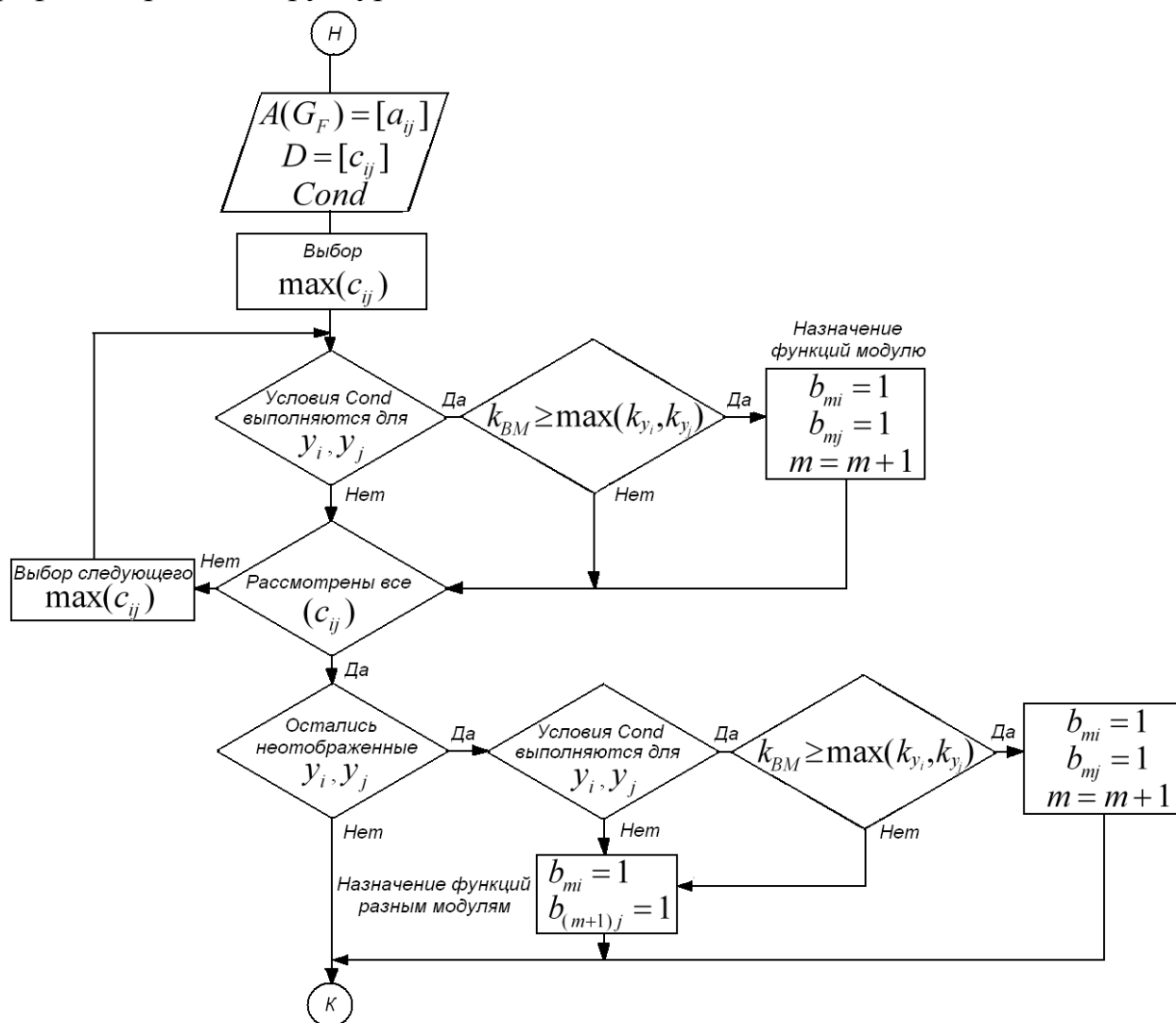


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма распределения по критерию минимума загрузки сети передачи данных

Показано, что предложенный алгоритм будет более эффективен при проектировании сложных систем авионики, в которых работает большое количество различных программных приложений и используется большое число модулей. В отличие от алгоритмов решения типовых задач данный алгоритм обладает следующими преимуществами:

- возможность внесения множества ограничений, что не приводит к возрастанию числа вариантов перебора и времени выполнения.
- отсутствие необходимости поиска максимального потока. Фактически нужно лишь перебрать все дуги, соединяющие вершины. Как следствие, добавление новых вершин и дуг ведет к линейному возрастанию сложности алгоритма. При ис-

пользовании алгоритмов поиска максимального потока в сложных системах может оказаться невозможным отображение соответствующих вершин на один вычислитель (из-за накладываемых ограничений);

- возможность применения на самых ранних стадиях проектирования системы, когда известны лишь набор функциональных приложений, требования к обмену информацией (объем данных, скорость передачи и т.д.) и характеристики ВМ. При этом количество необходимых ВМ определяется в конце работы алгоритма и удовлетворяет всем ограничениям, накладываемым на систему (кроме стоимости).

Недостатки приведенного алгоритма:

- рост стоимости системы при внесении в нее множества сложных программных приложений и соответствующем увеличении количества модулей, необходимых для их реализации;

- зависимость эффективности от целевой функции. Например, при задании в качестве критерия оптимальности минимума загрузки процессора ВМ, алгоритм будет фактически сведен к перебору всех возможных комбинаций вершин (то есть к типовому алгоритму решения задачи об упаковке).

**В третьей** главе представлены механизмы осуществления динамической реконфигурации системы ИМА. На основе категорий отказов, присущих комплексам данного вида, рассмотрены три базовых вида динамической реконфигурации: *аппаратная, программная, функциональная*. *Смешанная динамическая реконфигурация* представлена как функциональная реконфигурация при одновременном отказе модуля/приложения.

Отмечено, что помимо множества  $Y$  необходимо множество функций  $Y_{rec}$ , осуществляющих контроль состояния программной и аппаратной частей комплекса и на основе его результатов принимающих решение о перераспределении ресурсов. Обосновано, что комбинированный принцип размещения функций контроля наилучшим образом подходит для системы ИМА.

Предложен алгоритм принятия решения о проведении реконфигурации, основанный на результатах выполнения функций контроля  $Y_{rec}$  и встроенного контроля аппаратуры в виде вектора с булевыми координатами:

$$\overrightarrow{REC} = \left\{ \left\{ \begin{array}{l} 1, S_{ki} \neq S_{ki-1} \\ 0, S_{ki} = S_{ki-1} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} 1, Y_{ki} \neq Y_{ki-1} \\ 0, Y_{ki} = Y_{ki-1} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} 1, q_i \neq q_{i-1} \\ 0, q_i = q_{i-1} \end{array} \right\} \right\},$$

где  $S_k$  – множество исправных КФМ,  $Y_k$  – множество исправных приложений из всего множества приложений  $Y$ ,  $q$  – заданный режим работы. При этом индексом  $i-1$  обозначается предыдущая итерация выполнения алгоритма, а  $i$  – текущая. Единица означает, что по сравнению с предыдущей итерацией произошли изменения в соответствующем составе или режиме.

Алгоритм заключается в анализе значения вектора  $REC$ , координаты которого изменяются на основании данных от функций  $Y_{rec}$  и средств контроля аппаратной части, и принятии решения о проведении соответствующего вида реконфигурации в зависимости от его значения на текущей и предыдущей итерации выполнения. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 4.

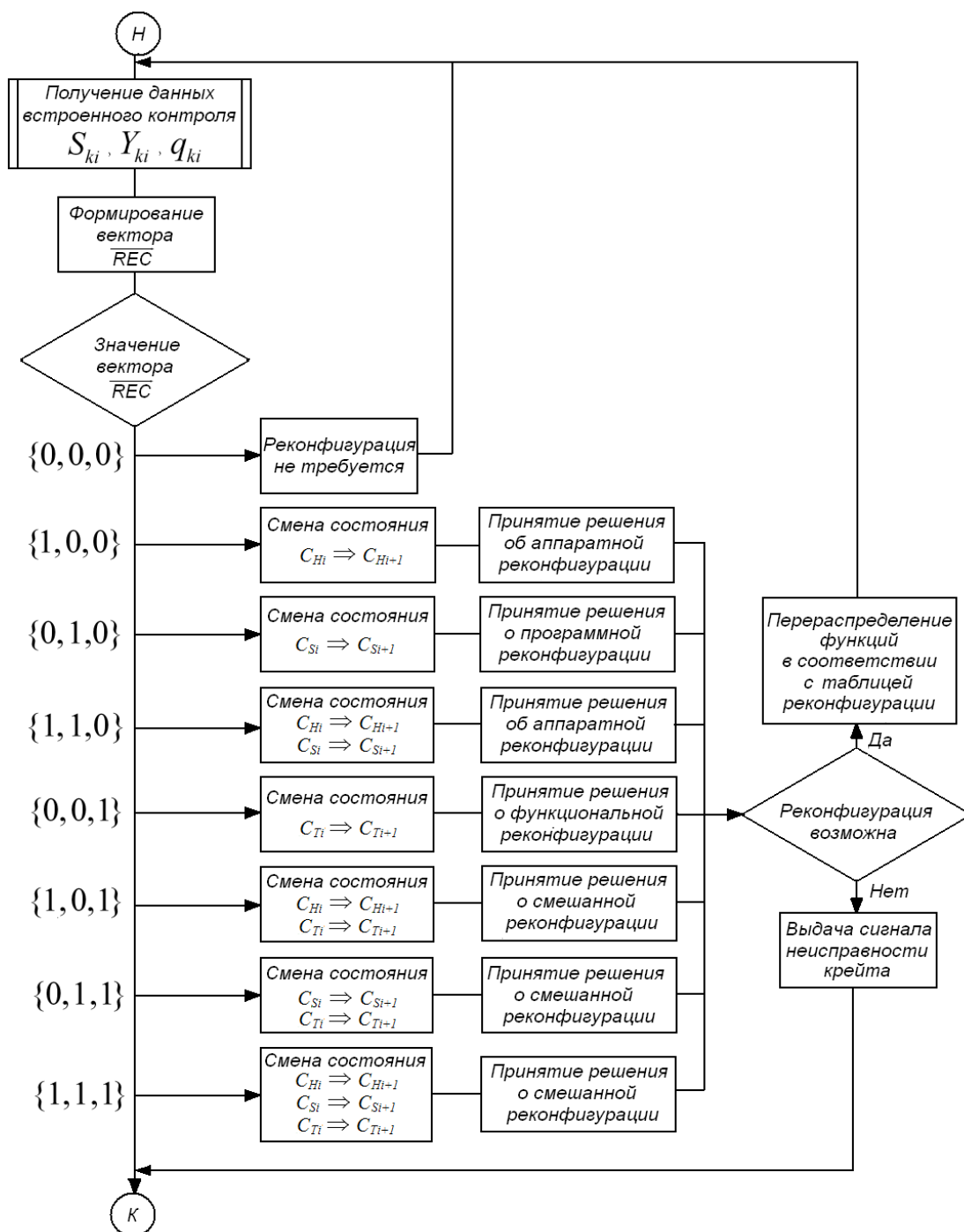


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма принятия решения о реконфигурации

В главе сформулированы задачи проведения всех типов реконфигурации.

Задача аппаратной реконфигурации состоит в перераспределении функциональных приложений  $u \in U$  по исправным модулям  $v \in V$  с учетом выбранного критерия оптимальности. При этом данное перераспределение должно учитывать критичность функций и ВМ  $k \in K$  и множество отказавших модулей  $S_k$ . Показано, что в общем случае данный вид реконфигурации подразумевает исключение задач из состава КБО по причине недостаточности аппаратных ресурсов для выполнения всех приложений после возникновения отказа.

Предложен порядок формирования упорядоченного множества функций для их последующего исключения. Ограничения на возможность исключения наклад-

дывает информационная связанность, при которой выходные данные одной функции служат входными для другой, не связанной с ней максимальным потоком данных.

На основе упорядоченного множества функций предложен алгоритм аппаратной реконфигурации, который заключается в распределении функциональных приложений по аппаратной платформе по заданному критерию оптимальности с учетом отказавших модулей. При этом исключение функций из состава системы осуществляется на основании упорядоченного множества, сформированного по предложенному принципу.

Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 5.

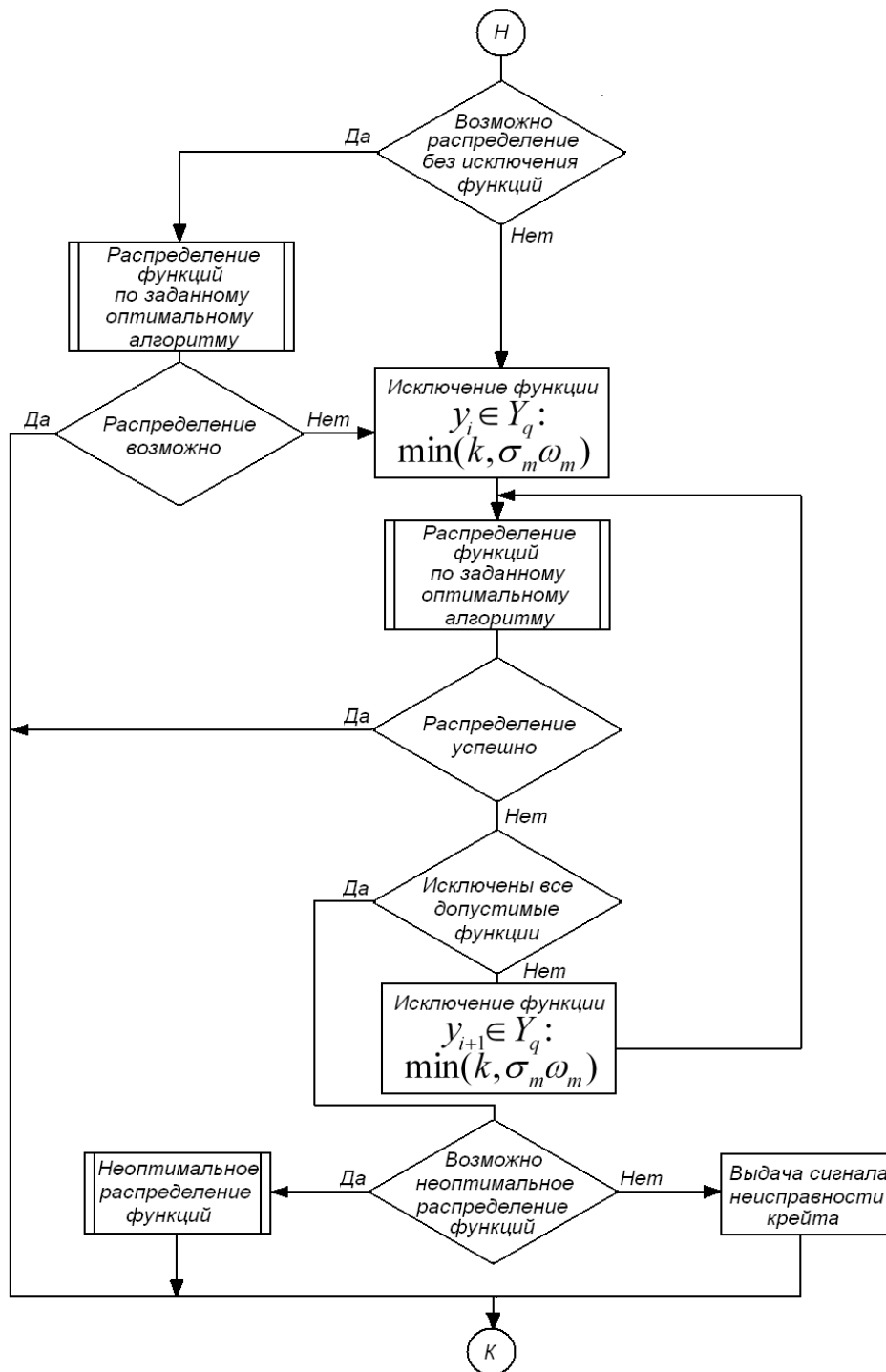


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма аппаратной реконфигурации системы ИМА

Показано, что для обеспечения функциональной безопасности системы ИМА предпочтительнее использовать программную или смешанную динамические реконфигурации. Отмечено, что задача программной реконфигурации идентична задаче распределения приложений и заключается в минимизации (максимизации) целевой функции с учетом ограничений, а алгоритм программной реконфигурации также повторяет алгоритм оптимального распределения ресурсов.

Для осуществления функциональной реконфигурации при выполнении различных задач в полете определено множество режимов  $Q$ . Количество режимов задается в техническом задании и заранее известно. Перечень функций, выполняющихся в режиме  $q \in Q$ , также определен и представляет собой ориентированный граф функциональной структуры  $G_{Fq}=(Y_l, Z_q)$ , где  $z \in Z_q$  – дуга, соответствующая информационной связи между двумя функциями из множества  $Y_l$ . Отмечено, что функциональная реконфигурация будет заключаться лишь в переходах между режимами, а закрепление приложений за модулями не потребует реализации какого-либо алгоритма непосредственно в полете. На практике может возникнуть такая ситуация, когда потребуется одновременно провести несколько типов реконфигурации. В этом случае распределение приложений только лишь в соответствии с режимами полета теряет смысл, поскольку оно не учитывает возникшие отказы, следовательно, целесообразно осуществлять *смешанную* реконфигурацию.

Показано, что задача смешанной реконфигурации состоит в перераспределении функциональных приложений  $y \in Y$  по исправным модулям  $v \in V$  с учетом выбранного критерия оптимальности. При этом данное перераспределение должно учитывать критичность функций  $k \in K$ , количество отказавших модулей  $m \in S_k$  и приложений  $y \in N_y$ , а также установленный режим полета  $q \in Q$ .

Предложен алгоритм смешанной реконфигурации, который заключается в распределении функциональных приложений по аппаратной платформе по заданному критерию оптимальности с учетом требуемого режима полета и возникших программных и функциональных отказов. Определены необходимые изменения входных данных для работы алгоритма. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 6.

В данной главе работа предложенных алгоритмов показана на примере функций КБО вертолета. Приведены соответствующие графы с указанием параметров функций, их упорядоченные множества, а также входные и выходные данные для алгоритмов.

**В четвертой главе** приведены результаты исследования алгоритмов оптимального распределения и реконфигурации, а также предложена процедура определения конфигурации системы ИМА.

На первом этапе исследования оценивалось количество необходимых аппаратных модулей  $v \in V$  для реализации различных наборов функциональных приложений  $y \in Y$ , распределенных по предложенному алгоритму, при фиксированном значении средней сложности. Зависимость числа ВМ от количества приложений практически линейная.

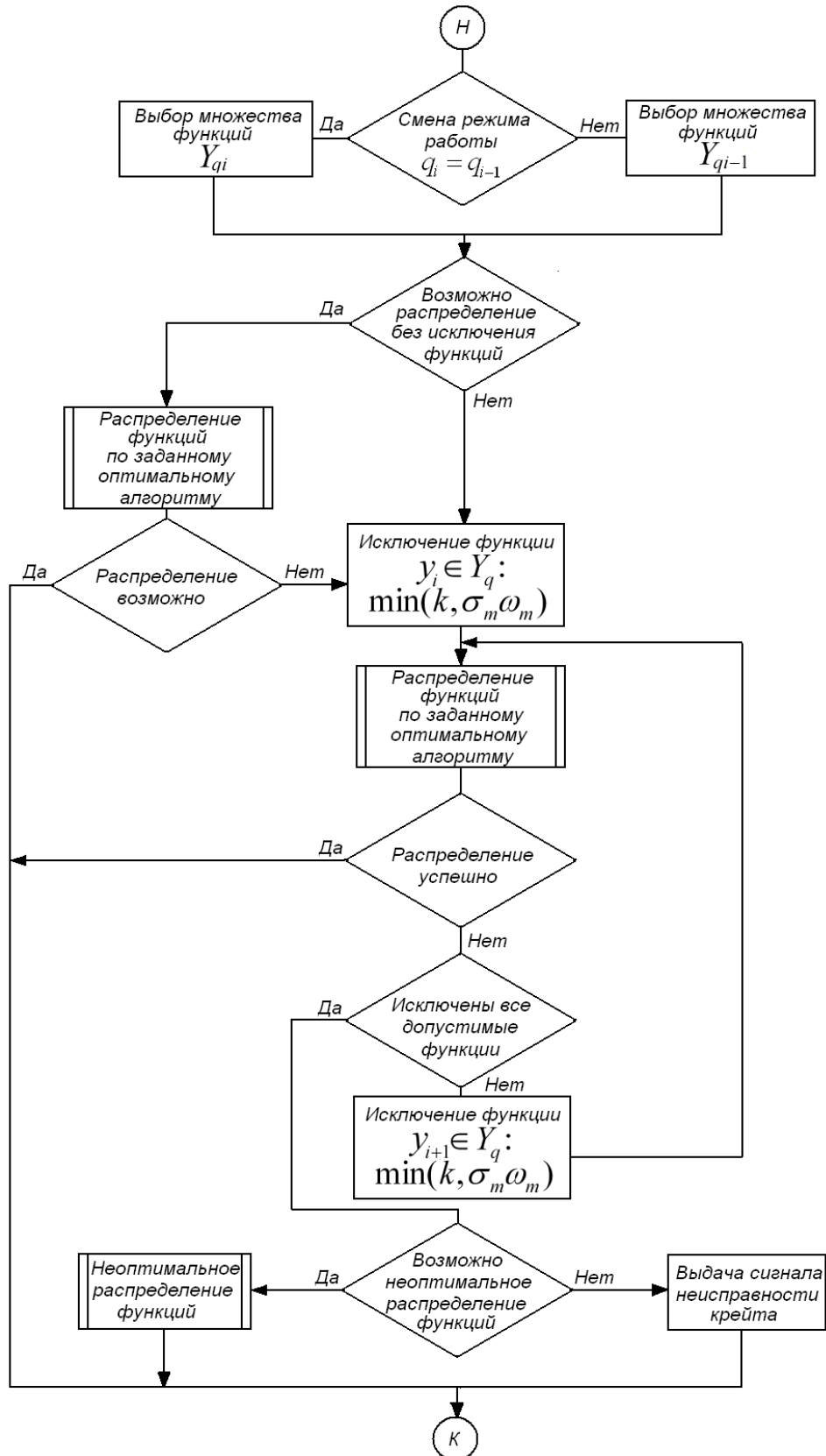


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма смешанной реконфигурации КБО ИМА

На втором этапе исследования оценивалась зависимость количества модулей  $v \in V$  от их средней сложности при фиксированных наборах функциональных приложений  $y \in Y$ .



На основе полученных зависимостей была определена приближенная поверхность системы, позволяющая оценить ее конечную размерность при известном количестве функциональных приложений и их средней сложности, которая может быть определена посредством экспертных оценок.

Результаты исследований алгоритмов оптимального распределения оформлены в виде графиков, изображенных на рисунках 7 и 8.

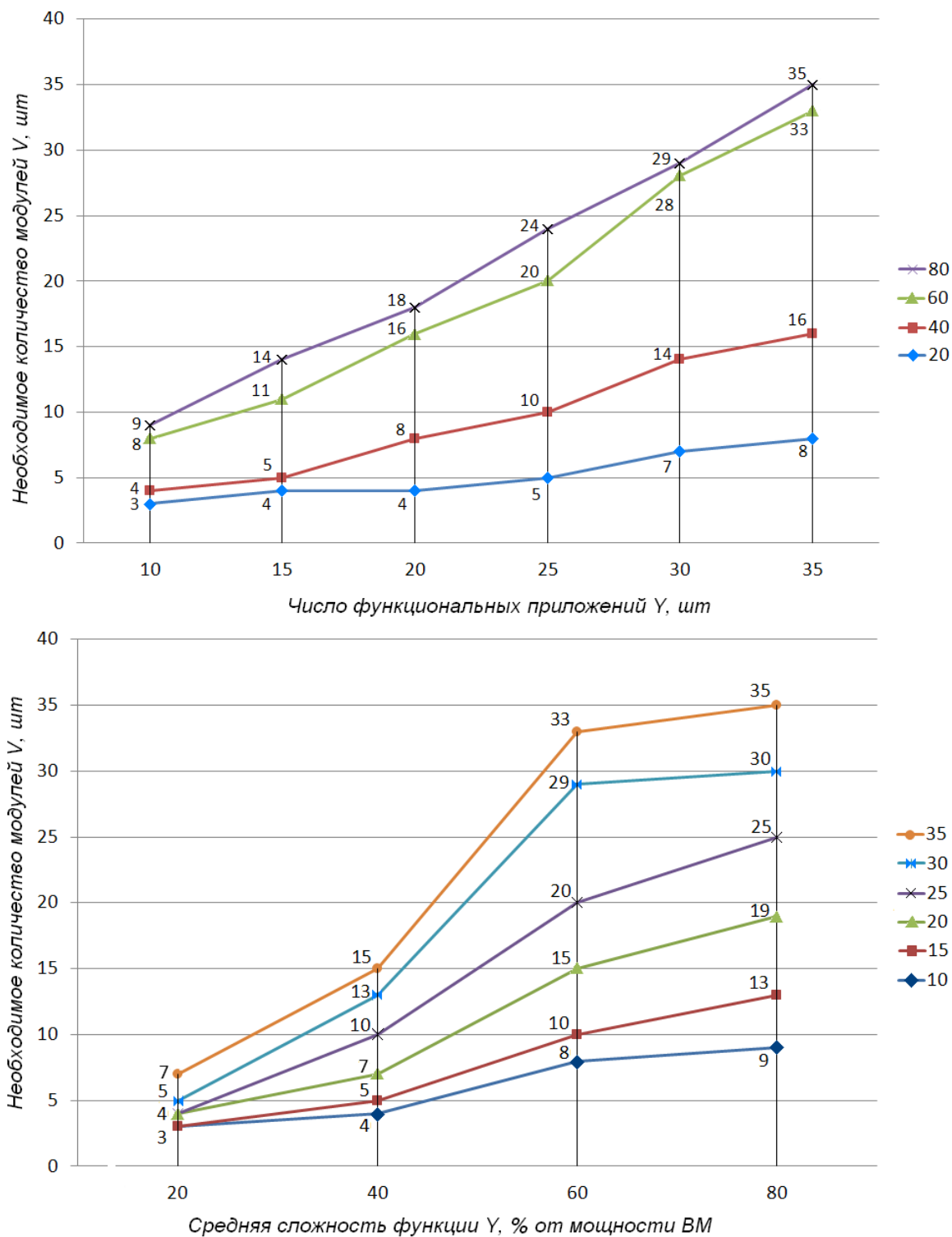


Рисунок 7 – Графики зависимостей параметров системы ИМА при использовании предложенного алгоритма распределения

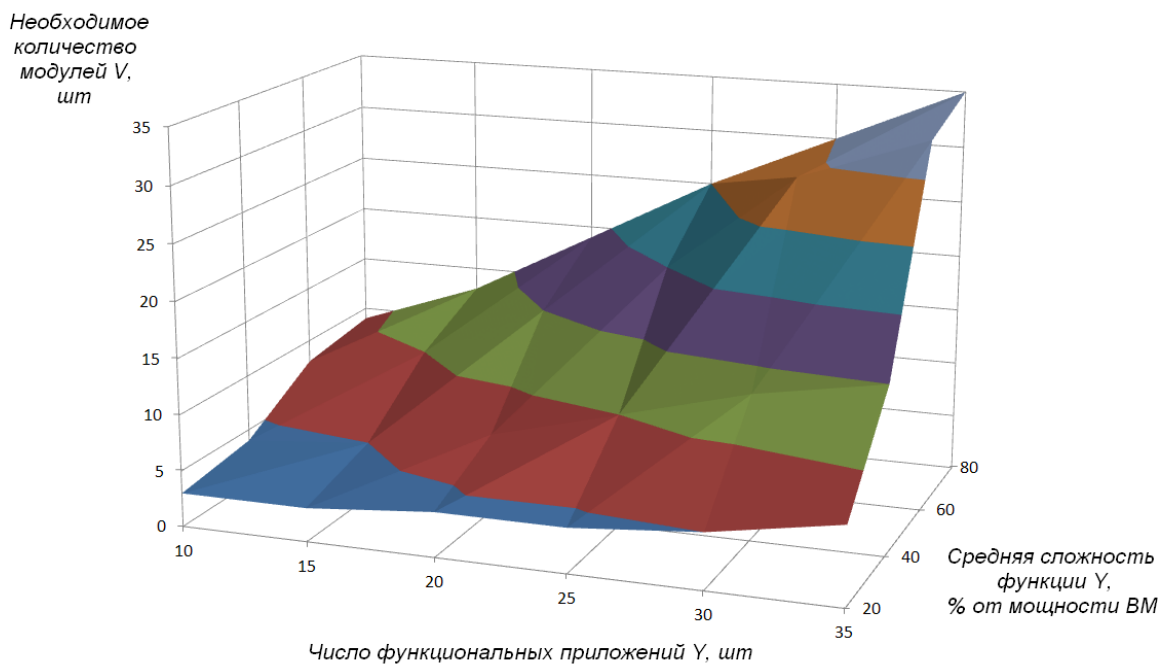


Рисунок 8 – Параметрическая поверхность КБО, полученная в результате работы алгоритма оптимального распределения

Оценка эффективности алгоритмов реконфигурации была проведена на примере алгоритма аппаратной реконфигурации. Оценивалась зависимость допустимого количества отказавших модулей  $m \in S_k$  от количества функций с уровнями критичности  $k_1$  и  $k_2$  (уровни А и В с соответствии с КТ-178В). При этом данная зависимость рассматривалась для параметрической поверхности КБО, изображенной на рисунке 8. Результаты исследования приведены на рисунке 9.

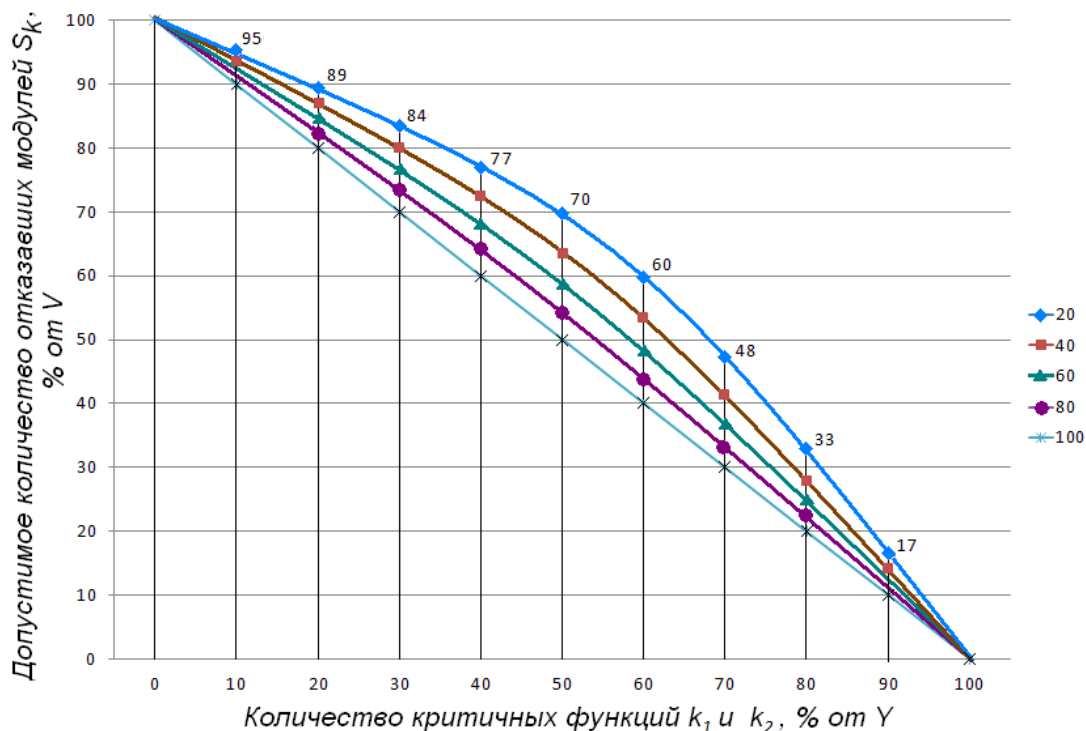


Рисунок 9 – Зависимость допустимого количества отказавших ВМ от количества функций с высокими уровнями критичности

Отмечено, что максимальная разница наблюдается при 50% функций с уровнями  $k_1$  и  $k_2$ , при этом допустим отказ дополнительных 20% модулей.

С целью оценки эффективности алгоритмов динамической реконфигурации была проведена предварительная оценка безопасности проектируемого комплекса в соответствии с Руководством 4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации. Для предварительной оценки эффективности реконфигурирующихся крейтов, были построены и проанализированы деревья неисправностей для блоков классической федеративной архитектуры с двойным резервированием и архитектуры ИМА, состоящей из одного реконфигурирующегося крейта с резервированным коммутатором.

Показано, что федеративная система с двойным резервированием блоков не обладает лучшими показателями надежности, чем один реконфигурируемый крейт с резервированным коммутатором ( $2,5 \times E-013$  у ИМА против  $7,2 \times E-011$  у федеративной архитектуры).

Для более точной оценки надежности реконфигурирующегося КБО ИМА были построены деревья неисправностей для распределенной системы ИМА разработки АО «УКБП» при участии автора и для варианта реализации этой системы на основе реконфигурирующегося крейта. Базовыми событиями деревьев являются отказы КФМ крейта или блоков, входящих в состав КБО, но не участвующих в реконфигурации. При этом логические связи в деревьях строятся на основе разработанных алгоритмов реконфигурации и схем резервирования, характерных для блоков каждого типа. На основе деревьев неисправностей был проведен расчет вероятности отказа распределенной системы ИМА и реконфигурирующегося КБО ИМА на один час полета для экспоненциального закона распределения вероятностей. Вероятность отказа реконфигурирующегося КБО составила  $2,78 \cdot 10^{-9}$ , а распределенной системы ИМА  $5 \cdot 10^{-5}$ . Показано, что наибольший вклад в результирующую вероятность отказа вносят нерезервированные элементы с высокой интенсивностью отказов. Сосредоточение вычислительных мощностей в высоконадежном реконфигурирующемся крейте позволяет уменьшить показатель суммарной интенсивности отказов некоторых нерезервированных элементов, что приводит к уменьшению вероятности отказа КБО. Кроме того, сокращается количество модулей-вычислителей, что позволяет внести дополнительное резервирование ненадежных датчиков при сохранении текущей себестоимости системы.

На основе проведенных исследований была предложена методика предварительного определения конфигурации КБО ИМА на основе предложенных алгоритмов в соответствии с современными стандартами.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Обзор и анализ архитектуры, конструктивных особенностей и структурных элементов КБО ИМА показали, что структура перспективного отказоустойчивого комплекса определяется тремя взаимосвязанными компонентами: аппаратной

платформой, функциональными приложениями и ОСРВ – которые являются взаимодополняющими и должны проектироваться с учетом особенностей интеграции и совместной реализации. Одним из наиболее перспективных конструктивных методов повышения надежности проектируемого КБО ИМА является совместное решение задач оптимального использования ресурсов вычислительных модулей, распределения функциональных задач и управления конфигурацией комплекса при возникновении отказов или изменении решаемых задач, что можно сделать на основе специальной математической модели комплекса, которая объединит в себе все его структурные составляющие, позволит получать, анализировать и оценивать различные архитектурные и структурные варианты его построения.

2. При проектировании КБО ИМА должны учитываться такие характеристики сложной системы как иерархическая структура, наличие связей между структурными элементами, их глубокая интеграция и необходимость проектирования с учетом взаимного влияния друг на друга, а также возможность функционирования в различных режимах и наличие множества параметров, характеризующих как отдельные элементы, так и комплекс в целом.

3. Разработана единая математическая модель, объединяющая аппаратную и программную составляющие системы ИМА. Модель отличается тем, что кроме связей между аппаратной и программной частями системы в ней учитываются особенности архитектуры аппаратной и организации программной частей. Модель позволяет разрабатывать алгоритмы управления конфигурацией систем ИМА с обеспечением требуемого уровня надежности системы в целом.

4. Разработан алгоритм определения базовой конфигурации системы ИМА на основе заданного критерия оптимальности с учетом критичности функциональных приложений и требуемого уровня гарантии конструирования аппаратуры. Предложенный алгоритм учитывает большое число ограничений, что не приводит к возрастанию числа вариантов перебора и времени поиска решения, и может быть применен на самых ранних стадиях проектирования системы, когда известны лишь набор функций, требования к обмену информацией и характеристики ВМ.

5. Определен вектор текущего состояния системы ИМА, значение которого показывает необходимость проведения одного из видов (аппаратной, программной, функциональной и смешанной) реконфигурации. Вектор автоматически формируется при работе системы на основе информации от встроенного контроля о количестве неисправных модулей, функциональных приложений и требуемого режима работы. Предложен алгоритм принятия решения о проведении реконфигурации в зависимости от значения вектора текущего состояния системы ИМА.

6. Разработаны алгоритмы динамического изменения конфигурации системы ИМА, позволяющие достичь требуемого уровня надежности при различных условиях ее функционирования и учитывающие критичность функциональных приложений, уровни гарантии конструирования аппаратуры, информационную взаимосвязанность функций, а также возможные комбинации отказов.

7. Исследования предложенного алгоритма определения базовой конфигурации системы показали, что размерность проектируемого реконфигурирующегося КБО ИМА в большей степени зависит от сложности и количества выполняемых функций с уровнями критичности А и В в соответствии с «Руководством по гарантии конструирования бортовой электронной аппаратуры КТ-254» (RTCA DO-254/EUROCAE ED-80 «Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware») и Квалификационными требованиями КТ-178В «Требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники» (RTCA/DO-178В «Software considerations in airborne systems and equipment certification»). На основе алгоритма была получена параметрическая поверхность КБО, которая позволяет с достаточной точностью оценить модульный состав проектируемого реконфигурирующегося крейта ИМА. Показано, что для гибкого распределения функций по ВМ и для обеспечения возможности проведения реконфигурации системы критичным является соотношение сложности реализуемых функций и производительности ВМ. При этом:

- наибольшее влияние на размерность системы оказывает сложность функциональных приложений;
- влияние количества приложений на размерность системы усиливается с ростом их сложности;
- наибольшее влияние на допустимое количество отказавших ВМ оказывает доля приложений с высокими уровнями критичности;
- эффективность предложенных алгоритмов и гибкость системы ИМА возрастает при достаточном количестве функциональных приложений, сложность которых не превышает 10-30% от производительности ВМ;
- эффективность предложенных алгоритмов распределения и реконфигурации возрастает при достаточном количестве ВМ и функциональных приложений, не более 50% из которых обладают высокими уровнями критичности.

8. Построение и анализ деревьев неисправностей в соответствии с «Руководством Р-4754 по сертификации сложных бортовых систем воздушных судов гражданской авиации» (SAE ARP-4754) и «Руководством Р-4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации» (SAE ARP-4761) показал, что вероятность отказа реконфигурирующегося крейта ИМА более чем на порядок меньше, чем соответствующая вероятность отказа блока федеративной архитектуры. При этом вероятность отказа за 1 час полета реконфигурирующегося КБО ИМА на несколько порядков ниже, чем у распределенной системы ИМА, состоящей из того же набора аппаратных средств и выполняющей тот же набор функциональных приложений. На основе полученных результатов исследования алгоритмов предложена обобщенная методика предварительного определения аппаратной конфигурации КБО ИМА, которая включает первичную декомпозицию функций системы, проведение исходного анализа деревьев неисправностей (Fault tree analysis - FTA) в контексте процесса определения функциональной опасности (Functional Hazard Assessment - FHA) на уровне системы, определение архитектуры платформы ИМА, распределение функциональных задач по аппаратной платформе на основании проведенных оце-

нок параметров проектируемого КБО, повторное проведение ФТА с модифицированными деревьями неисправностей, которые получены с учетом выбранной архитектуры аппаратной платформы и заданного распределения функций, реализацию реконфигурирующегося КБО, модификацию деревьев неисправностей с учетом механизмов реконфигурации в КБО, результирующую оценку его уровней надежности и безопасности. Показано использование разработанных математических моделей и алгоритмов при реализации процесса проектирования КБО ИМА.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

***Статьи в журналах, утвержденных ВАК РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:***

1. Дегтярев А.Р., Медведев Г.В. Алгоритм распределения задач в многопроцессорных комплексах интегрированной модульной авионики // Автоматизация процессов управления. – 2014. – Т. 35. – № 1. – С. 79–84.

2. Дегтярев А.Р., Киселев С.К. Смешанная реконфигурация в многопроцессорных комплексах интегрированной модульной авионики // Электротехнические комплексы и системы. – 2015. – Т. 11. – № 3. – С. 5–11.

3. Дегтярев А.Р. Киселев С.К. Надежность реконфигурирующихся комплексов интегрированной модульной авионики // Автоматизация процессов управления. – 2016. – Т. 43. – № 1. – С. 25–30.

4. Дегтярев А.Р. Киселев С.К. Отказоустойчивые реконфигурирующиеся комплексы интегрированной модульной авионики // Электротехнические комплексы и системы. – 2016. – Т. 12. – № 1. – С. 89–99.

***Работы, опубликованные в сборниках статей и научных трудов всероссийских конференций***

5. Дегтярев А.Р., Киселев С.К. Реализация Avionics Full-Duplex Switched Ethernet для интегрированной модульной авионики с использованием COTS-компонентов // Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы: сб. науч. тр. Всероссийской научно-технической конференции ИВК-2013 / под ред. В.В. Родионова. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – 329 с.

6. Дегтярев А.Р. Интегрированная модульная авионика как мультипроцессорная система // Информатика и вычислительная техника: сб. науч. тр. 6-й Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых ИВТ-2014 / под общ. ред. В.Н. Негоды. – Ульяновск : УлГТУ, 2014. – 502 с.

7. Дегтярев А.Р. Перспективные динамически реконфигурирующиеся комплексы бортового оборудования на основе интегрированной модульной авионики // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского – 2015. – №3. – С. 371–375.

8. Дегтярев А.Р., Киселев С.К. Алгоритм оптимизации схемотехнического и конструкторского решения многопроцессорной системы интегрированного ком-

плекса бортового оборудования // Вузовская наука в современных условиях: сб. матер. 49-й науч.-техн. конф. В 3 ч. Ч 2. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – 283 с.

9. Дегтярев А.Р., Киселев С.К. Подходы к оценке надежности реконфигурируемых многопроцессорных комплексов интегрированной модульной авионики // Прикладные информационные системы: вторая Всероссийская НПК (г. Ульяновск, 25 мая – 7 июня 2015 г.): сб. науч. тр. / под. ред. Е.Н. Эгова. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – 533 с.

10. Дегтярев А.Р., Киселев С.К. Анализ деревьев неисправностей при оценке надежности реконфигурируемых мультипроцессорных систем // Радиоэлектронная техника : межвузовский сб. науч. тр. / под ред. В.А. Сергеева. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – 290 с.

11. Дегтярев А.Р., Киселев С.К. Особенности построения реконфигурирующихся комплексов бортового оборудования // Сборник материалов Всероссийской молодежной школы семинара «Актуальные проблемы информационных технологий, электроники и радиотехники - 2015» (ИТЭР – 2015). Том 2. – Таганрог : изд-во НОЦ ЗИС КТ Южного федерального университета, 2015. – 260 с.

12. Дегтярев А.Р. Оценка безопасности реконфигурирующихся комплексов бортового оборудования интегрированной модульной авионики // V Всероссийский конгресс молодых ученых. 12-15 апреля 2016 года: Сборник тезисов. – СПб: Университет ИТМО, 2016.

13. Дегтярев А.Р. Киселев С.К. Алгоритмы динамической реконфигурации комплексов бортового оборудования интегрированной модульной авионики // IV Всероссийский конгресс молодых ученых. 7-10 апреля 2015 года: Сборник тезисов. – СПб: Университет ИТМО, 2015.

14. Дегтярев А.Р. Киселев С.К. Разработка перспективных динамически реконфигурируемых комплексов бортового оборудования // III Всероссийский конгресс молодых ученых. 8-11 апреля 2014 года: Сборник тезисов. – СПб: Университет ИТМО, 2014.

ДЕГТЯРЕВ АЛЕКСЕЙ РОБЕРТОВИЧ

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОНФИГУРАЦИЕЙ СИСТЕМ  
ИНТЕГРИРОВАННОЙ МОДУЛЬНОЙ АВИОНИКИ

Автореферат

Подписано в печать 18.10.2016. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,40. Тираж 100 экз. Заказ 911.

ИПК «Венец» УлГТУ. 432027, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32