

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Хакимов Дмитрий Валерьевич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ФУНКЦИЙ
КОМПЛЕКСОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ПОСТРОЕННЫХ НА
ПРИНЦИПАХ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДУЛЬНОЙ АВИОНИКИ**

Специальность 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
(промышленность)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д. т. н., доцент Киселев Сергей Константинович

Ульяновск – 2017

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР КБО, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	16
1.1 Анализ архитектур КБО, их исторического развития и взаимосвязей.....	16
1.1.1 Независимая архитектура КБО.....	16
1.1.2 Федеративная архитектура КБО.....	26
1.1.3 Интегральная модульная архитектура КБО.....	44
1.2 Анализ применяемых САПР при проектировании КБО.....	55
1.3 Постановка задачи исследования.....	64
1.4 Результаты и выводы.....	70
2 ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОЦЕССУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ФУНКЦИЙ КБО ИМА.....	72
2.1 Анализ нормативной документации регламентирующей типовой процесс проектирования КБО.....	72
2.2 Анализ типового процесса проектирования КБО.....	78
2.2.1 Модель типового процесса проектирования КБО и ее анализ.....	81
2.2.2 Анализ типового ТЗ на ОКР (СЧ ОКР) по разработке КБО ВС.....	86
2.2.3 Анализ процесса оценки безопасности КБО.....	95
2.3 Разработка модели процесса проектирования структуры функций КБО типа «черный ящик».....	101
2.4 Интеграция модели процесса проектирования структуры функций в модель типового процесса проектирования КБО.....	101
2.5 Результаты и выводы.....	104
3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ФУНКЦИЙ КБО ИМА.....	106
3.1 Математическая модель структуры функций КБО ИМА.....	106
3.2 Исследование структуры функций и анализ возможных методов решения задачи.....	114

3.3	Разработка алгоритма автоматизированного проектирования структуры функций КБО ИМА.....	125
3.4	Результаты и выводы	134
4	ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ФУНКЦИЙ КБО ИМА.....	135
4.1	Оценка результатов работы алгоритма	135
4.2	Реализация механизмов повышения отказобезопасности КБО на основе структуры функций.....	149
4.3	Возможные варианты реализации САПР по проектированию структуры функций.....	151
4.4	Результаты и выводы	158
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	159
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	163
	Приложение А	178
	Приложение Б	181
	Приложение В.....	185
	Приложение Г	202

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день авионика представленная на мировом рынке авиаприборов и эксплуатируемая на воздушных судах (ВС) представлена двумя большими классами. Первый класс – это авионика построенная на основе федеративной архитектуры, а второй – интегральная модульная авионика (ИМА).

Авионика, построенная по федеративному принципу, сейчас считается устаревающей. Однако, в большинстве своем, представленные на сегодняшний день на мировом рынке авиаприборы и комплексы бортового оборудования (КБО) по-прежнему базируются на принципах федеративной архитектуры. Хотя нельзя говорить о том, что эти изделия ничем не отличаются от тех, что были разработаны несколько лет назад.

Современной и самой перспективной архитектурой построения авионики на сегодняшний день является ИМА [1]. Еще в 1990-ых годах 20-ого века были сформированы принципы построения авионики такого типа. Однако практическое применение этой технологии было крайне трудно реализуемым. В результате этого первые экземпляры систем, основанных на принципах ИМА появились на мировом рынке только в 2000-ых годах 21-ого века. Стоит сказать, что эти системы не являлись полноценными представителями ИМА. Они представляли собой гибрид федеративной и интегральной модульной архитектур. При этом черт характерных для федеративной архитектуры было больше, чем ИМА. Реализовывалась только часть основных принципов построения архитектуры ИМА.

Представленные сейчас на мировом рынке авионики системы и другое электронное оборудование являются гибридами более совершенными, чем те, что были представлены в 2000-ых годах. В основе современных систем преобладают принципы построения именно ИМА. Но характеристики свойственные федеративной архитектуре присущи и современным системам, и комплексам класса ИМА.

Переход к проектированию оборудования на основе архитектуры ИМА в промышленности РФ был обусловлен не только перспективами данной технологии, но и в связи со сформировавшимися предпосылками экономического и технического отставания от общемирового уровня развития. Крупнейшие зарубежные производители начали выпускать авионику, позиционируемую как ИМА, еще в конце прошлого века. Это позволило им вырваться на лидирующие позиции мирового рынка авиаприборов.

При рассмотрении авионики отечественного производства 2000-ых годов в сравнении с авионикой представленной на мировом рынке видно, что зарубежные аналоги в большинстве своем опережали отечественную продукцию по уровню функциональности, удобству наращивания функциональности, надежности, стоимости и стоимости эксплуатационных расходов.

В связи со сложившейся ситуацией в авиационной промышленности и авиаприборостроении в частности, а также на фоне общего положения дел в государстве был принят ряд мер.

В 2004 году ФГУП «ГосНИИАС» впервые сформировал предложение провести комплекс научно-исследовательских опытно-конструкторских работ (НИОКР). В результате их выполнения должны быть заложены основные принципы проектирования авионики по технологии ИМА. В рамках данного комплекса НИОКР главными решаемыми задачами стали:

- Объединение авиаприборостроительных предприятий на основе современных технологий и системных наработок;
- Устранение экономического эффекта удорожания авионики вследствие ее уникальности и низкой приспособленности к серийному производству;
- Создание конкурентоспособной сертифицированной продукции и продвижение ее на мировой рынок в рамках самостоятельной реализации и в составе КБО.

Поставленные задачи требовали глобального подхода. Заказчиком данного комплекса НИОКР выступил Минпромторг РФ [2]. Очевидно, что столь крупная НИОКР затронула не только интересы отдельных предприятий, а целой отрасли промышленности в целом. В результате выполнения работ в рамках НИОКР на сегодняшний день появилось несколько крупных корпораций, под началом которых работают все авиаприборостроительные организации.

В рамках развития промышленности РФ в течение последних 10 лет была создана госкорпорация «Ростех», целью создания которой является содействие, управление и контроль над разработкой, производством и экспортом высокотехнологичной промышленной продукции. Под контролем «Ростех» сформированы следующие крупные концерны, работающие с авиационной продукцией:

- Холдинг «Вертолеты России»;
- Концерн «Радиоэлектронные технологии»;
- «Объединенная приборостроительная корпорация»;
- «Объединенная двигателестроительная корпорация»;
- Холдинг «Технодинамика»;
- Холдинг «Росэлектроника»;

Таким образом, посредством формирования централизованного управления промышленностью РФ, а в частности областью авиаприборостроения был реализован механизм, позволивший объединить все предприятия для достижения поставленных целей. Сформирована единая концепция развития отрасли авиаприборостроения. Сформулированы основные принципы дальнейшего развития.

На сегодняшний день процесс формирования конкурентно способной отрасли авиаприборостроения не завершен. В рамках модернизации существующей и разработки перспективной авионики действуют следующие государственные программы:

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

- 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.

В рамках комплекса НИОКР проведенных за последние года изменились не только процессы управления предприятиями и их финансовые структуры. Для успешной конкуренции на мировом рынке авионики был внедрен ряд отраслевых стандартов, которые представляют собой аналоги зарубежных нормативных документов межгосударственного уровня. При рассмотрении комплекса нормативных документов, относящихся к проектированию КБО отметим не так давно введенные руководства:

- 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 [3];
- Руководство Р-4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации [4];
- Руководство Р-4754 по процессам сертификации высокоинтегрированных сложных бортовых систем воздушных судов гражданской авиации [5].

Данные руководства предприятия разработчики обязаны использовать при проектировании КБО ИМА. Выполнение требований и процедур, установленных данным набором нормативных документов, позволяет придать разрабатываемой авионике такие свойства, благодаря которым она не только пройдет сертификацию, но и будет конкурентоспособной.

Введение новых требований, централизация направления развития отрасли и ряд других мероприятий, проведенных за последние годы, несомненно, привели к повышению качества, функциональности и надежности производимой отечественными предприятиями авионики.

Однако очевидным фактом для всех является то, что наиболее сильно влияющим на итоговые характеристики сложных современных КБО является качество процесса проектирования, его оснащенность и быстротечность.

Ключевой фигурой в любом процессе проектирования является человек. Человек выполняет огромное количество функций, таких как:

- Создание функционального облика изделия;
- Проведение схемотехнических работ;
- Создание дизайна и конструкции изделия;
- Управление процессом разработки;
- Контроль процесса разработки;
- Обеспечение процесса разработки и т. д.

Все функции, выполняемые людьми, обуславливают качество процесса проектирования. Исходя из этого, можно констатировать факт того, что квалификация специалистов является определяющим фактором.

С научной точки зрения человек представляет собой один из самых мощных и универсальных инструментов для проектирования. Функциональность человека неограниченна. Однако наряду со столь огромными преимуществами человек обладает и несколькими весомыми недостатками:

- Невозможность безошибочного выполнения действий – это явление принято называть «человеческий фактор». В результате человеческого фактора в процессе проектирования возникают ошибки;
- Ограниченная скорость и невысокая точность выполнения расчетов в ходе проектирования – этот факт приводит к тому, что многие процессы проектирования требуют годы для их выполнения вручную;

- Ограниченная память и возможности обмена информацией – этот факт приводит к тому, что человеку необходимы инструменты для хранения результатов проектирования и правила их оформления для возможности их прочтения.

Совокупность этих трех факторов приводит к тому, что человек не может создавать современную авионику без применения сложных инструментов. В настоящее время таким инструментом является вычислительная техника во всем ее многообразии. Вычислительная техника, предназначенная для компенсации недостатков человеческой природы, применительно к процессу проектирования представляет собой персональный компьютер с набором программного обеспечения. При этом данное программное обеспечение является не набором примитивных программ для выполнения конкретной прикладной функции, например, таких как хранение данных, вычисление математических выражений и т. п. Современные инструменты для проектирования являются совокупностью мощной аппаратной вычислительной платформы и сложных систем автоматизированного проектирования (САПР). Такие системы позволяют минимизировать влияние «человеческого фактора» на процесс и результат проектирования, значительно сократив его продолжительность. Ряд типовых задач выполняется в автоматическом или автоматизированном режимах.

Результатом оптимизации процессов проектирования, сокращения времени проектирования, многократного снижения влияния «человеческого фактора» является повышение общей эффективности предприятия как экономического объекта.

Таким образом, для повышения качества авионики отечественного производства необходимо применение на предприятиях мощных САПР.

Исходя из выше изложенного, можно сделать вывод о том, что изучение, развитие и внедрение САПР является актуальной задачей на сегодняшний день.

Применительно к авиаприборостроению, а именно к процессу проектирования КБО данная задача является сложной и многогранной. Степень автоматиза-

ции, достигаемая современными САПР применительно к конкретным прикладным задачам очень высока. Очень часто функциональность современных САПР при решении локальных задач проектирования бывает излишней. Однако при рассмотрении процесса проектирования не как процесса состоящего из совокупности множества узкоспециализированных задач, а как единого целого, выявляется множество задач неавтоматизированных. Кроме того, возникает проблема интеграции узкоспециализированных САПР между собой.

Современные тенденции развития технологий САПР направлены на устранение проблем совместимости САПР, а также на повышение степени автоматизации процесса проектирования в целом.

Становление архитектуры ИМА привело к возникновению множества проблем, которые в рамках федеративной архитектуры решались на протяжении более чем пятидесяти лет. Однако современные специалисты, располагая обширным опытом решения данных задач в рамках федеративного комплекса, достаточно быстро находят решения для аналогичных задач при проектировании КБО ИМА.

Внедрение новой архитектуры привело не только к необходимости вновь решать старые проблемы проектирования, но и искать решения для новых. К таким задачам можно отнести задачу построения структуры функций КБО. В результате того, что архитектура ИМА позволяет реализовать принцип независимости программной платформы комплекса от аппаратной появилась необходимость построения и оптимизации структуры функций комплекса. Целью построения структуры функций КБО является не только обеспечение высочайшего уровня функциональности, но и достижение высоких эксплуатационных характеристик комплекса в целом.

Возможность изменения ПО КБО без преобразования его аппаратной платформы является одним из ключевых преимуществ ИМА перед федеративным комплексом.

В федеративном КБО все функции имеют жесткую аппаратную привязку. В связи с этим как такового процесса проектирования структуры функций нет. Про-

цесс проектирования аппаратной части комплекса естественным образом приводит к формированию структуры функций.

Перед разработчиками КБО ИМА возникла трудоемкая задача, которая носит сложный комплексный характер. Процесс проектирования структуры функций КБО не автоматизирован и выполняется на сегодняшний день практически вручную.

Таким образом, исследование принципов построения и критериев оптимизации структуры функций КБО и методологии ее формирования является **актуальной** задачей, решение которой позволит качественно повысить функциональные и эксплуатационные характеристики авионики отечественного производства. В свою очередь это приведет к повышению конкурентоспособности авиаприборостроительных предприятий РФ.

Цель диссертационной работы состоит в развитии:

1. методов повышения эффективности разработки КБО строящихся на основе архитектуры ИМА на ранних стадиях процесса проектирования;
2. методов построения и оптимизации структуры функций КБО ИМА;
3. систем автоматизированного проектирования для построения и оптимизации структуры функций КБО ИМА.

В соответствии с обозначенными целями в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ и выявлены основные принципы развития структур КБО, показаны отличительные особенности комплексов, проектируемых на основе интегральной модульной авионики;
2. Установлены изменения, которые необходимо внести в процесс проектирования, для получения более оптимальных решений структур КБО на основе интегральной модульной авионики – выделение и обособление процедуры проектирования структуры функций КБО;
3. На основе анализа определенных нормативными документами процессов проектирования и оценки безопасности авионики определено место про-

цедуры проектирования структуры функций в общем процессе проектирования КБО, определены исходные данные, требования и ограничения для реализации данной процедуры;

4. Построена модель процесса проектирования КБО ИМА, включающая процедуру проектирования структуры функций;
5. Предложена модель структуры функций КБО, с использованием которой данная структура оптимизируется для достижения требуемых технических характеристик КБО ИМА, разработаны критерии оценки оптимальности и сравнения различных вариантов конфигурации структур функций комплекса;
6. Разработан общий алгоритм построения структуры функций КБО для автоматизации данной процедуры при проектировании КБО в формате ИМА;
7. Проведено исследование алгоритма автоматизации проектирования структуры функций КБО на примере типового КБО. Показана эффективность использования полученных решений для поиска оптимальных структур функций КБО;
8. Предложены варианты реализации САПР для автоматизации построения структуры функций КБО.

Объектом исследования в диссертационной работе является процесс проектирования КБО. **Предметом исследования** является структура КБО, степень ее эффективности, методы проектирования.

Методы исследования, примененные при написании диссертационной работы, базируются на принципах композиционного проектирования, теории алгоритмов, теории и методах САПР, теории надежности.

Положения, выносимые на защиту, обладающие научной новизной:

1. Модель процесса проектирования КБО ИМА, в которой задача построения структуры функций КБО выделена в отдельную проектную процедуру

ру, что позволяет формализовать и типизировать ее, предложить математическое описание и алгоритм решения.

2. Графовая модель структуры функций КБО, которая связывает множество входных и выходных параметров функций и их групп, необходимые для их реализации вычислительные мощности, нагрузку на сеть передачи данных и позволяет определять основные параметры АО и ПО КБО, реализующих данную структуру функций.
3. Формулировка задачи достижения заданных функциональных характеристик КБО ИМА через оптимизацию структуры функций, критерии оценки оптимальности и сравнения различных вариантов конфигурации структур функций комплекса.
4. Общий алгоритм построения структуры функций КБО, который позволяет автоматизировать данный процесс при проектировании КБО ИМА и решить задачу поиска оптимальной по заданным характеристикам структуры функций и частные алгоритмы минимизации количества функций и формирования групп функций в структуре.
5. Результаты вычислительного исследования алгоритма оптимизационного построения структуры функций типового КБО, подтверждающие возможность получения локально-оптимальных решений, обладающих при определенных сочетаниях параметров структуры на 10-20% лучшими характеристиками, чем следует из общей тенденции изменения исследуемых характеристик.

Новизна научных положений состоит в следующем:

1. Модель процесса проектирования КБО ИМА, в которой задача построения структуры функций КБО выделена в отдельную проектную процедуру позволила формализовать и типизировать ее, предложить математическое описание и алгоритм решения.
2. Впервые предложена и обоснована постановка задачи достижения заданных функциональных характеристик КБО ИМА через оптимизацию

структуры функций, впервые предложены критерии оценки оптимальности и сравнения различных вариантов конфигурации структур функций комплекса.

3. Алгоритм построения структуры функций, позволяет автоматизировать данный процесс при проектировании любого сложного аппаратно-программного комплекса.
4. Определено существование локально-оптимальных по функциональным характеристикам технических решений КБО ИМА, обладающих при определенных сочетаниях параметров структуры функций на 10-20% лучшими характеристиками, чем следует из общей тенденции их изменения.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможности применения её результатов (моделей, алгоритмов и их программной реализации, результатов вычислительных экспериментов) для создания средств САПР КБО ИМА на этапе проектирования структуры функций.

Применение алгоритма построения и оптимизации структуры функций КБО позволяет эффективно провести работы по формированию структуры комплекса на ранних стадиях процесса проектирования, что в итоге приводит к:

- снижению количества ошибок на ранних стадиях проектирования;
- снижению трудозатрат на устранение ошибок, совершенных на ранних стадиях проектирования;
- снижению временных затрат на устранение ошибок, совершенных на ранних стадиях проектирования;
- повышению эффективности выполнения работ в рамках эскизного этапа проектирования;
- сокращению общего времени проектирования КБО;
- снижению стоимости процесса проектирования;

Процесс построения и оптимизации структуры функций КБО позволяет произвести первичную оценку уровня отказобезопасности в соответствии с «Ру-

ководством Р-4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации» и «Руководством Р-4754 по сертификации сложных бортовых систем воздушных судов гражданской авиации» до завершения процессов эскизного проектирования. Это позволяет сформировать требования по применению методов повышения надежности и отказобезопасности выполнения функций на ранних стадиях проектирования и дальнейшую разработку КБО производить с учетом данных требований.

Результаты работы получены автором при выполнении в интересах гражданской авиации РФ составных частей ОКР:

1. «Разработка комплекса бортового оборудования вертолета Ми-171А2», исполнитель ОА «УКБП», 2010-2017 гг.;
2. «Разработка комплекса бортового оборудования вертолета Ка-226», исполнитель ОА «УКБП», 2014 г. – по н. в.

Достоверность результатов. Достоверность проведенных теоретических исследований обеспечивается математическим обоснованием разработанных моделей, процессов и алгоритмов.

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

1. Всероссийской научно-технической конференции «Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы», 2013 г.;
2. VI всероссийской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых «Информатика и вычислительная техника», 2014 г.;
3. 13-й международной конференции «Авиация и космонавтика», 2014 г.;
4. VI всероссийском школе-семинаре аспирантов, студентов и молодых ученых «ИМАП-2014»;
5. V всероссийском конгрессе молодых ученых «ВКМУ», 2016 г.

1 АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР КБО, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ архитектур КБО, их исторического развития и взаимосвязей

КБО как цифровые вычислительные системы зародились на рубеже 60-ых годов. С того времени и по сей день происходит непрерывный процесс их видоизменения и развития. При сравнении КБО первых серийных образцов с современными комплексами отчетливо видны коренные отличия в архитектуре аппаратного обеспечения (АО). Значительно улучшились эксплуатационные качества. Функциональные возможности комплексов стали несравнимо велики. До неузнаваемости преобразился интерфейс управления ВС. Степень автоматизации полетных задач возросла настолько, что зачастую пилот выполняет лишь роль наблюдателя [6, 7].

Начиная с 60-ых годов 20-ого века, процесс исторического развития авиаприборостроения преодолел два эволюционных периода и сейчас находится на третьем. Отличительной чертой каждого из периодов считается архитектура построения авиаприборов, систем и КБО в целом [1]. Выделяют три основных типа архитектур [8, 119]:

- Независимая;
- Федеративная;
- Интегральная модульная.

1.1.1 Независимая архитектура КБО

Независимая архитектура – это такая организация структуры авионики, при которой КБО состоит из независимых систем, каждая из которых содержит свои собственные датчики, вычислители, индикаторы и пульты управления. Связи систем друг с другом минимальны и представлены радиальными соединениями источник-приемник.

Далее по тексту КБО, построенный на основе независимой архитектуры, будем называть – «КБО первого типа». Типовая схема КБО первого типа представлена на рисунке 1.

Изначально КБО первого типа проектировались с применением технологии электромеханических вычислителей. Такой тип вычислителей на сегодняшний день является устаревшим. Данная технология проектирования применялась на заре становления технологий разработки сложных многофункциональных комплексов. Электромеханические вычислители характеризовались следующим набором качеств:

- Это специализированный вычислитель, функции которого заложены в него на конструктивном уровне. Изменение назначения механического вычислителя невозможно без изменения его конструкции;
- Реализация математических функций на основе технологий электромеханики приводит к высоким массогабаритным показателям вычислителя;
- Механические свойства деталей электромеханических вычислителей очень сильно ограничивают скорость вычислений. В сравнении со скоростью вычисления современных вычислительных устройств, скорость вычисления электромеханического вычислителя крайне мала;
- Срок эксплуатации электромеханических вычислителей в несколько раз короче, чем электронных;
- Эксплуатация электромеханических вычислителей требует постоянного периодического и предполетного обслуживания;
- Детектирование неисправностей электромеханических вычислителей является трудной задачей, требующей участия высоко квалифицированных специалистов;
- Электромеханические вычислители невосприимчивы к воздействию электромагнитных излучений;

- Выход из строя одной из систем, ни каким образом не влияет на работоспособность других систем КБО;
- Увеличение функциональности КБО прямо пропорционально увеличению количества систем в составе комплекса и как следствие прямо пропорционально его массогабаритным характеристикам.

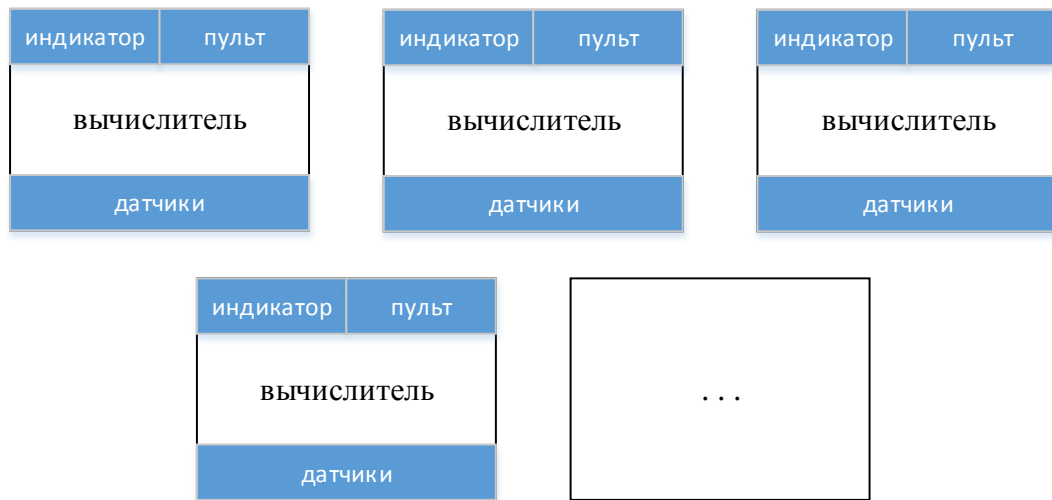


Рисунок 1 - Типовая схема КБО первого типа

С точки зрения процесса проектирования, разработка электромеханического вычислителя является сложнейшей конструкторской задачей. Сложность заключается в сохранении высокой точности вычислительных операций. При этом вопрос сохранения точности актуален на протяжении всего жизненного цикла изделия. Механический износ деталей, погрешности изготовления и скрытые дефекты материалов крайне сложно прогнозировать.

С течением некоторого времени произошел эволюционный скачок в области электроники, который был обусловлен появлением технологий создания полупроводниковых электронных компонентов. Начиная с внедрения первых вычислителей, основанных на полупроводниковой элементной базе, КБО приобретают первые черты присущие современным комплексам.

Применение полупроводниковой радиоэлектронной базы позволило использовать цифровые технологии. Сформировалось понятие бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ). БЦВМ, благодаря своим многочисленным пре-

имуществам и очевидной перспективе применения в авиаприборостроении, стали предметом разработок крупнейших предприятий СССР и всех ведущих авиаприборостроительных предприятий мира [6, 9, 10, 11]. На территории СССР разработкой БЦВМ занимались следующие предприятия:

- АО «ОКБ «Электроавтоматика»;
- АО «НИИ «Аргон»;
- АО «ЦНПО «Ленинец»;
- «Московский институт электромеханики и автоматики»;
- АО «МНИИ «Агат»;
- АО «Авиаавтоматика» имени В.В. Тарасова»;
- АО «МНПК «Авионика»;
- АО «ВНИИРА»;
- АО «Концерн радиостроения «Вега»;
- АО «НИИП имени В.В. Тихомирова».

Комплексы НИОКР по разработке БЦВМ были направлены на создание двух типов вычислителей. Первый – это вычислители универсального типа, а второй – это специализированные. Универсальные БЦВМ проектировались для применения в большинстве систем, где степень вычислительной нагрузки варьировалась от малой до средней. Специализированные вычислители должны были обеспечивать потребности систем, узкоспециализированных функциональных модулей с высокой вычислительной нагрузкой.

Второе направление разработок БЦВМ было направлено на создание методов, технологий и средств обмена информацией. Уже при появлении первых БЦВМ идея реализации межсистемного обмена стала актуальной, так как даже минимальные межсистемные связи позволяли избавиться от большого количества дублированных функций.

Третьим направлением разработок являлось создание программного обеспечения (ПО). Эта прикладная задача была новой для того времени, поэтому была

достаточно трудоемкой и требовала отдельного внимания несмотря на то, что сложность ПО была мала.

В результате интенсивных разработок того времени были спроектированы такие известные БЦВМ как:

- «Пламя-263» – использовалась на ИЛ-38;
- «Гном-А» – использовалась на ИЛ-76.

В качестве примера ниже представлены основные технические характеристики БЦВМ «Пламя-263:

- Собрана на дискретной полупроводниковой базе;
- Быстродействие 62 тыс. оп./с. типа регистр-регистр и 31 тыс. оп./с. типа регистр-память;
- Емкость ОЗУ – 256 16-и разрядных слов;
- Емкость ПЗУ – 8000 16-и разрядных слов;
- Нарботка на отказ – 200 ч.;
- Масса – 330 кг;
- Потребляемая мощность – 2 кВт.

Внешний вид БЦВМ «Пламя-263» представлен на рисунке 2.

«Пламя-263», использовалась для обработки информации в составе поисково-прицельного комплекса «Беркут-38» противолодочного самолёта Ил-38 (первый полёт в 1961 году). БЦВМ получает информацию от установленных радио-гидроакустических буёв, радиолокационных станций, самолётных систем и определяет вероятное местонахождение цели, рассчитывает варианты атаки и вероятность поражения, выдаёт сигналы управления в автопилот и управляет сбросом радиогидроакустических буёв, противолодочных бомб или торпед, а также решает ряд технических задач по управлению аппаратурой и системами поисково-прицельного комплекса [10].

«Гном-А» стала первой в СССР авиационной БЦВМ, выполненной на гибридных микросхемах – модулях серии 116 «Квант». Она была специально разработана для самолёта Ил-76.

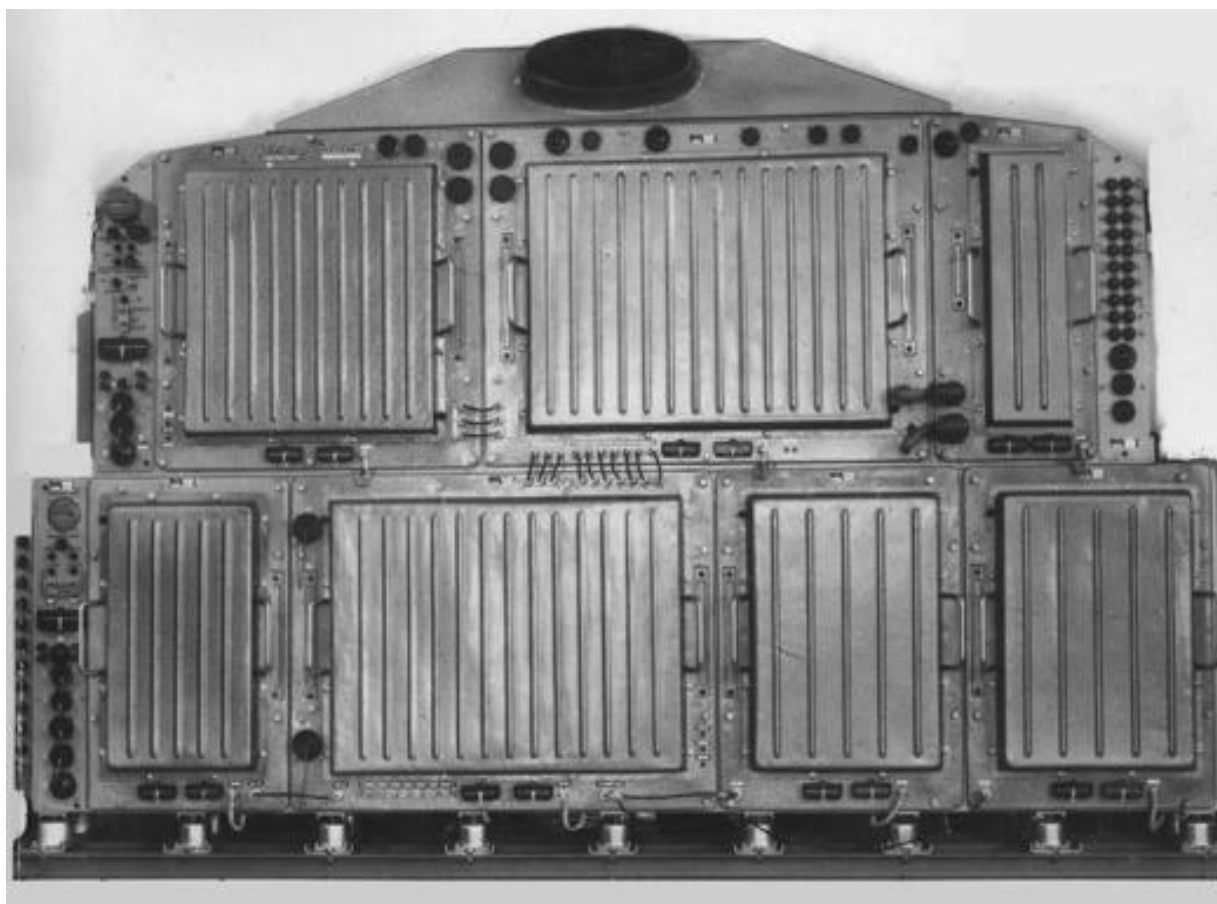


Рисунок 2 – БЦВМ «Пламя-263» образца 1964 года, производства АО «ОКБ «Электроавтоматика» [10]

При разработке этой БЦВМ впервые в СССР были созданы уникальные цифровые германиевые бескорпусные интегральные микросхемы серии 102, на основе которых собирались и выпускались 9 типов стандартных цифровых элементов 116 серии. Вычислительные машины на микросборках «Квант» применялись не только в авиации, но также на морских и стационарных объектах. Серийное производство микросборок «Квант» продолжалось с середины 60-х и до середины 90-х годов.

БЦВМ первого поколения по массогабаритным характеристикам были неприемлемо велики для применения в истребительной и штурмовой авиации, поэтому БЦВМ первого поколения использовались в основном для наземной техники.

Дальнейшее развитие технологий изготовления полупроводниковых радиоэлементов привело к появлению гибридных интегральных микросхем (ИМС). На основе данной технологии строилось второе поколение авиационных БЦВМ. Самыми известными БЦВМ второго поколения являются:

- «Орбита-10»;
- «Аргон-15» – имеет несколько модификаций.

16-разрядные БЦВМ второго поколения серии «Орбита-10» были созданы в 1971 году. Они построены на гибридных ИМС малой степени интеграции «Тропа» и «Трапедия» и достаточно широко применялись на различных типах отечественной авиатехники [11].

БЦВМ «Аргон-15» разработана в 1972 году, выполнена на твердотельных ИМС серии 133, имеет блочную структуру. Изначально БЦВМ была разработана для нужд авиации, но позже нашла широкое применение и в мобильных наземных объектах. «Аргон-15» использовалась в составе более 50 систем, в том числе в авиационных комплексах противолодочной обороны “Коршун”, “Сова”, на истребителях МиГ-31, МиГ-33, в мобильных оперативно-тактических комплексах “Точка”, “Ока”, “Бук”, “Куб”, “Волга” [11, 12].

БЦВМ «Аргон-15» обладает следующими техническими характеристиками:

- Быстродействие: операция сложения - 5 мкс, вычисления синуса, косинуса, квадратного корня – от 16 до 30 мкс;
- Объем ОЗУ – 4 Кбайт;
- Объем ПЗУ – 64 Кбайт;
- Объем ПЗУ со сменой информации – 256 байт;
- Имеет два канала ввода / вывода со скоростью обмена: ввод – 200 Кбайт/с, вывод – 400 Кбайт/с;
- Нарботка на отказ – 500 ч;
- Масса – 60 кг;
- Потребляемая мощность – 250 Вт.

Внешний вид БЦВМ «Аргон-15» представлен на рисунке 3.

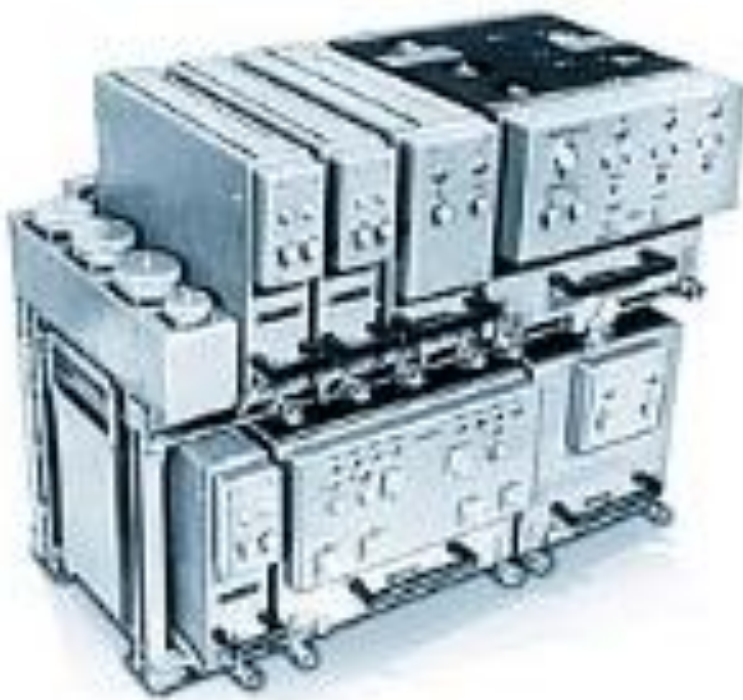


Рисунок 3 – БЦВМ «Аргон-15» образца 1972 года, производства «Научно-исследовательского центра электронной вычислительной техники (с 1986 г. – НИИ «Аргон»)) [12]

Переход на новую элементную базу и итоговый выигрыш в массогабаритных характеристиках позволили разработчикам БЦВМ второго поколения отойти от жестких критериев экономии веса. Появилась возможность использовать дополнительные специализированные устройства для таких операций как умножение и деление, что в конечном счете повысило производительность.

Технологии по производству радиоэлементов в тот период времени активно развивались. В скором времени разработчикам БЦВМ стали доступны логические элементы в твердотельном исполнении, миниатюрные резистивные и конденсаторные сборки. Еще одним важнейшим эволюционным шагом стало появление технологий производства многослойных печатных плат.

Новая элементная база и технологии создания многослойных печатных плат стали основой создания БЦВМ третьего поколения.

Первой БЦВМ третьего поколением является «Орбита-20». Она является одной из самых массово выпускавшихся. Ее серийное производство началось в

1974 году. При этом она получила широкое распространение за пределами авиационной промышленности. Структура данной БЦВМ реализована на ИМС, но при этом она является детерминированной структурой практически закрытого типа. Для программирования данной БЦВМ использовались языки типа ассемблер. «Орбита-20» имела возможность цифрового ввода-вывода информации [10]. Для обмена информацией в цифровом формате использовался протокол взаимодействия ARINC-429, соответствовавший ГОСТ 18977-79.

Основные характеристики БЦВМ «Орбита-20» следующие:

- Собрана на ИМС;
- Быстродействие – 200 тыс. оп./с. типа сложение и 100 тыс. оп./с. типа умножение;
- Емкость ОЗУ – 512 16-и разрядных слов;
- Емкость ПЗУ – 16000 16-и разрядных слов;
- Нарботка на отказ – до 500 ч.;
- Масса – до 90 кг;
- Потребляемая мощность – до 1,5 кВт.

Внешний вид БЦВМ «Орбита-20» представлен на рисунке 4.

В авиационной промышленности эта БЦВМ использовалась в составе систем для выполнения следующих задач:

- Преобразование пилотажно-навигационной информации, которая поступает от датчиков и систем, к виду удобному для ее обработки в вычислительном устройстве;
- Управление работой датчиков и устройств отображения информации;
- Контроль состояния систем и устройств комплекса и значений параметров полета.

При сравнении массогабаритных и вычислительных параметров БЦВМ «Пламя-263», «Аргон-15» и «Орбита-20» очевидно, что БЦВМ каждого следующего поколения на порядок более высокопроизводительны и при этом обладают гораздо меньшими массогабаритными характеристиками.



Рисунок 4 – БЦВМ «Орбита-20» образца 1969 года, производства АО «ОКБ «Электроавтоматика» [10]

Стоит заметить, что и по сей день некоторые из экземпляров БЦВМ «Орбита-20» продолжают выполнять свои функции, что является показателем высочайшего уровня качества разработки и производства.

К середине 70-ых годов появилась необходимость в БЦВМ, которые могли бы выполнять сложные задачи в составе систем автоматизированного управления войсками, сложных авиационных радиоэлектронных комплексов, систем управления воздушным движением в зоне крупных морских объектов. Для данных задач потребовались БЦВМ с характеристиками, которыми на тот период времени обладали только стационарные универсальные машины, которые решали преимущественно расчетные и информационные задачи. Требовалась БЦВМ имеющая 32-разрядную сетку, высокую производительность, оперативную и внешнюю память большой емкости и оснащенные сложным программным обеспечением.

Построение КБО на основе независимой архитектуры фактически продолжалось вплоть до середины 70-ых годов 20-ого века. Для проектирования применялись специализированные БЦВМ первого и второго поколений. Количество

различных БЦВМ производимых отечественными предприятиями на тот период времени было очень велико. Было создано большое число машин, предназначенных, как правило, для одной конкретной системы. Незначительно отличаясь по функциональным возможностям, они имели оригинальные систему команд, структуру, и конструкцию. Такой подход к проектированию БЦВМ и рост серийного производства в совокупности привели к высокой трудоемкости и стоимости разработки. Перед разработчиками встала проблема унификации создаваемых моделей [11].

Для решения возникших проблем требовался переход от проектирования отдельных моделей с несовместимыми системами команд к семействам машин построенных на основе однотипной архитектуры. Уникальность БЦВМ являлась очевидной преградой на пути к расширению возможностей межсистемного обмена данными и переходу к проектированию КБО на основе федеративной архитектуры.

1.1.2 Федеративная архитектура КБО

Федеративная архитектура – это такая организация структуры авионики, при которой КБО состоит из полунезависимых систем, объединенных едиными мультиплексными каналами обмена данными или другими разветвленными системами связи, что обеспечивает возможность общего доступа систем к общим ресурсам (датчики, индикаторы и пульта управления).

Далее по тексту КБО, построенный на основе федеративной архитектуры, будем называть – «КБО второго типа».

Типовая схема КБО второго типа представлена на рисунке 5.

С точки зрения эволюции федеративная архитектура является промежуточным звеном между независимой архитектурой и ИМА. Существование такого промежуточного звена обусловлено естественными процессами развития электроники и техники.

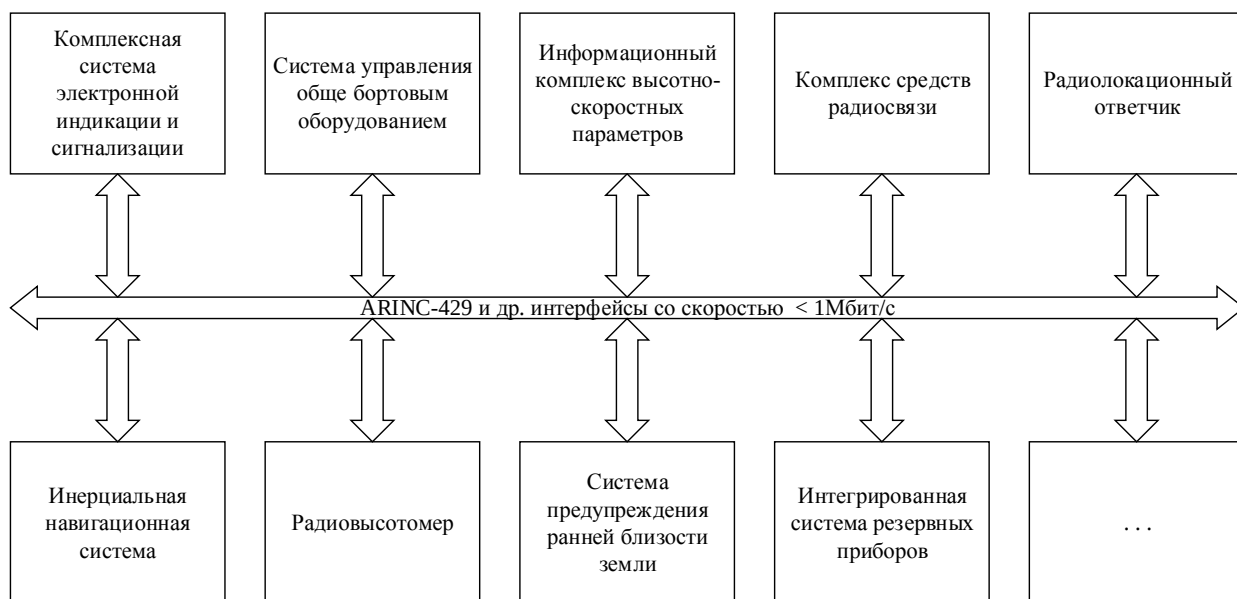


Рисунок 5 - Типовая схема КБО второго типа

Для КБО второго типа характерными признаками являются:

- Системы комплекса специализированы под выполнение конкретной функции КБО. Изменение функционального назначения системы возможно лишь частично, полная смена функционального назначения не возможна без изменения состава ее АО;
- Системно-ориентированный принцип построения функциональной архитектуры КБО позволяет эффективно выполнять функции комплекса при помощи специализированных систем, методом распараллеливания во времени в неоднородных по своей организации и характеристикам вычислительных средствах;
- Функциональные подсистемы и системы КБО территориально распределены на борту ВС и имеют связь с общими ресурсами комплекса и друг с другом при помощи стандартных информационных соединений (в основном по интерфейсу ARINC-429);
- Каждая система имеет внутренний контроль работоспособности, что позволяет централизованно формировать данные о неисправностях КБО. Это обеспечивает легкость процесса детектирования поломок комплекса;

- Увеличение функциональности КБО прямо пропорционально увеличению количества систем в составе комплекса и как следствие прямо пропорционально его массогабаритным характеристикам;
- При реализации современных многофункциональных КБО количество систем очень велико, что приводит к снижению уровня надежности и отказобезопасности комплекса и увеличению стоимости разработки и конечной стоимости систем и КБО в целом;
- Разработка ПО систем является сложнейшей задачей, которая по трудоемкости превосходит задачу проектирования АО;
- При разработке КБО отдельные системы разрабатываются по большей части различными фирмами-подрядчиками автономно. Далее следует процесс их комплексирования, обеспечивающий их функциональную интеграцию в составе комплекса;
- Процесс согласования работы систем между собой в рамках КБО является сложным, итерационным и трудоемким, так как требует согласования на уровне АО и ПО одновременно;
- Применение электронных компонентов и свойственная им восприимчивость к электромагнитным помехам в совокупности с большим количеством силовых и сигнальных линий связи между системами приводит к предъявлению высоких требований помехоустойчивости. Это требует внедрения дополнительных конструктивных ограничений.

Развитие БЦВМ второго поколения привело к формированию единой базы радиоэлементов и освоению технологий создания сложных многослойных печатных плат. Необходимость в повышении производительности БЦВМ до уровня стационарных вычислительных устройств привела к тому, что первые БЦВМ третьего поколения были разработаны на основе архитектуры единых систем электронно-вычислительных машин (ЕС ЭВМ), которым были присущи мощная система ПО, универсальный набор команд, 32-разрядное слово данных, модульность, стандартизованные интерфейсы, мульти-системные свойства, наращивае-

мость функциональных возможностей. ЭВМ, построенными на основе архитектуры ЕС ЭВМ являются: А-30, А-40, А-50. Данные вычислители применялись в наземном мобильном вычислительном комплексе «Бета-3М» [6, 13].

Фактически разработчиками БЦВМ велась работа по изменению физических параметров ЕС ЭВМ с целью их применения на борту ВС. Итогом этой работы стало появление проблемно-ориентируемой с изменяемой системой команд архитектуры «ПОИСК». Из-за наличия жестких ограничений на физические характеристики бортовых БЦВМ, не удавалось уйти от необходимости специализации системы команд к особенностям системы управления. Опыт применения архитектуры «ПОИСК» в последующие года показал, что при условии идентичности элементной базы БЦВМ построенные на ее основе превосходят обычные одноадресные архитектуры по производительности в 1,5 - 2,5 раза, а по компактности кода - в 3-5 раз. Это особенно актуально для авиационных вычислительных машин с жесткими массогабаритными ограничениями.

На основе архитектуры «ПОИСК» были созданы следующие БЦВМ третьего поколения: «Ц100», «Ц101», «Ц102». При проектировании данных БЦВМ первостепенное внимание было уделено адаптации под серийное производство, то есть снижению их трудоемкости и стоимости, обеспечению контроле- и ремонтно-пригодности, повышению удобства эксплуатации, а также реализации возможности межвидового применения без необходимости доработки. БЦВМ успешно эксплуатируются в бортовых системах самолетов МиГ-29, Су-27, Су-25 и их модификациях, а также в составе различных оперативно-тактических комплексов [12]. В качестве примера ниже представлены основные технические характеристики БЦВМ «Ц101»:

- Разрядность данных – 16 бит;
- Разрядность команд – переменная;
- Быстродействие – 400 тыс. оп/с;
- Емкость ОЗУ – 16 Кбайт;
- Емкость ПЗУ – 128/256/384 Кбайт;

- Количество каналов ввода / вывода по ОСТ 11.305.903-80 – 1 или 2 с пропускной способностью – 400 - 800 Кбайт/с;
- Количество входных / выходных линий по ГОСТ 18977-79 – 24 / 16;
- Количество разовых входных / выходных команд по ГОСТ 18977-79 – 10 / 10 или 8 / 6;
- Нарботка на отказ – 1000 ч.;
- Масса – 19 кг;
- Потребляемая мощность – 260 Вт.

Внешний вид БЦВМ «Ц101» представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – БЦВМ «Ц101» образца 1991 года, производства НИИ «Аргон» [12]

Если провести сравнение первых БЦВМ третьего поколения и более поздних, например, БЦВМ «Орбита-20» и «Ц101», то можно обнаружить существенные отличия. Производительность «Ц101» в два раза выше, чем «Орбиты-20». Существенно изменился объем ОЗУ и ПЗУ, более чем на один порядок. Сложность ПО поддерживаемого последними разработанными БЦВМ третьего поколения во много раз сложнее, чем была в 70-ые годы 20-ого века. Параметры надежности так же возросли, в среднем в два раза [14].

На фоне столь солидного увеличения производительности БЦВМ стоит обратить особое внимание на факт сокращения потребляемой мощности. «Орбита-20» в процессе работы потребляет 1.5 кВт электроэнергии, в то время как «Ц101»

всего лишь 260 Вт, а модификация «Ц100» образца 1983 года потребляет 275 Вт. К тому же масса БЦВС сократилась со средних 100 кг до уровня 20 кг и меньше.

На третьем поколении процесс эволюции БЦВМ не остановился. АО «ОКБ «Электроавтоматика» в 1980 году выпустила в серийное производство «БЦВМ 80-3000». Эта вычислительная машина имеет одно очень важное принципиальное отличие, она основана на магистрально-модульном принципе. Именно применение магистрально-модульного принципа является отличительной чертой всех последующих БЦВМ. Заметим, что вычислители более поздних версий третьего поколения и четвертого поколения стали называть не машинами, а бортовыми цифровыми вычислительными системами (БЦВС) [10].

Принцип магистрально-модульного построения архитектуры БЦВС состоит в реализации информационного обмена данными между модулями вычислителя при помощи единой системной шины [15-18]. Структура магистрально-модульной архитектуры БЦВС в общем виде представлена на рисунке 7.

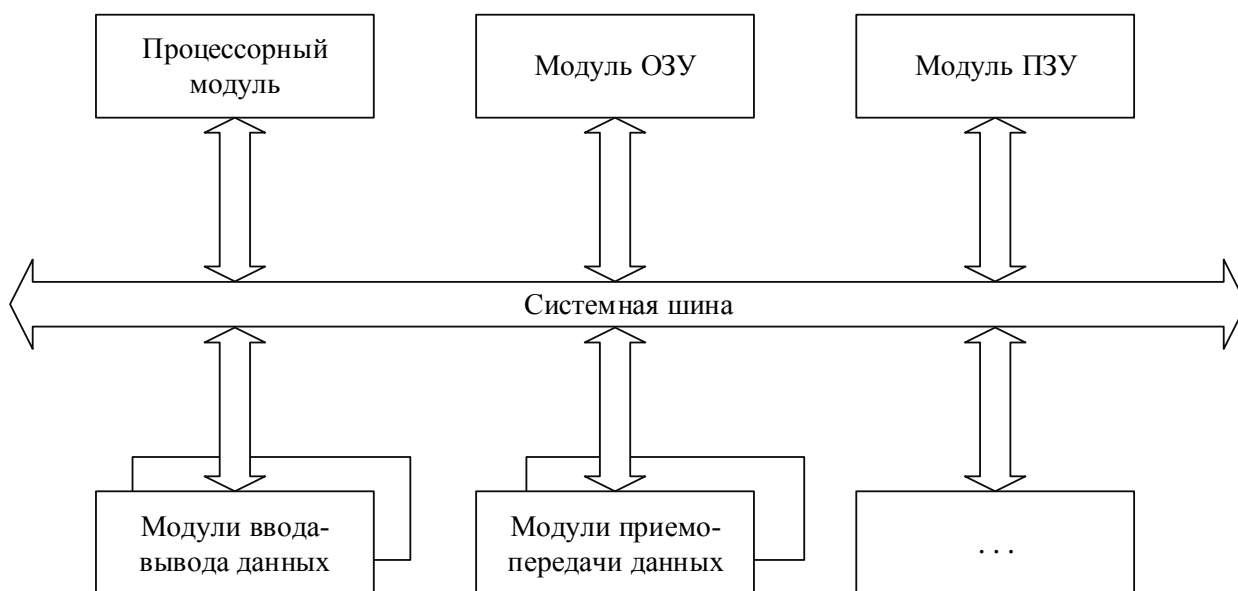


Рисунок 7 – Структура магистрально-модульной архитектуры БЦВС

Магистрально-модульная архитектура БЦВС реализует принцип открытой архитектуры. Это позволяет без особых трудностей вводить в состав БЦВС дополнительные модули. Эта технология перешла в БЦВС из стационарных ЭВМ

типа «СМ 4» и «М6000». Отметим, что «БЦВМ 80-3000» имела совместимую систему команд с этими ЭВМ. Кроме применения принципа совместимости с системой команд универсальной цифровой вычислительной машины было применено такое конструктивно-технологическое решение как микропроцессорные сборки. Это позволило снизить массогабаритные характеристики БЦВС и снизить энергопотребление. Внешний вид «БЦВМ 80-3000» представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – «БЦВМ 80-3000» образца 1980 года, производства АО «ОКБ «Электроавтоматика» [10]

Данная БЦВС применялась, в основном, на легких самолетах как встроенная в составе инерциальных систем, систем управления оружием и систем индикации. Немного позже, в 1980 году, для тяжелых самолетов и систем контроля и управления силовыми установками Ту-204 и Ил-96 была разработана «БЦВМ 80-4000». Внешний вид «БЦВМ 80-4000» представлен на рисунке 9.

Одной из последних БЦВС четвертого поколения является «БЦВМ 90-600». При ее проектировании была использована технология применения ИМС высокой степени интеграции и обеспечена функциональная модульность вычислителя. Данная БЦВС была спроектирована в 1996 году и применялась в качестве вычислителя управления полетом, тягой и устойчивостью на ТУ-204/214, Ил-96 [10].



Рисунок 9 – «БЦВМ 80-4000» образца 1980 года, производства
АО «ОКБ «Электроавтоматика» [10]

Проведя обзор характеристик БЦВС третьего и четвертого поколений однозначно можно сказать, что дальнейшее развитие авиаприборостроения направлено на повышение функциональности и производительности вычислителей универсального типа. Применение вычислителей именно универсального типа позволяет создать наиболее оптимальную конфигурацию оборудования, обладающую такими важными свойствами, как:

- Скоростной обмен данными между вычислителями;
- Параллельная работа вычислителей в многофункциональном режиме обработки информации;
- Гибкость аппаратной платформы под требования конфигурации ПО;
- Максимально открытая архитектура АО и ПО.

Анализируя возможности создания локальных сетей на примере БЦВС «Орбита-20» и последующих моделей третьего и четвертого поколений видно, насколько сильно возросло количество интерфейсов обмена данными. «Орбита-20» не была пригодна для создания КБО с широко развитой структурой межсистемных связей. Первыми БЦВС, которые поддерживали возможность скоростно-

го обмена данными между вычислителями являются системы серии «Ц100», которые имели более трех десятков каналов ввода / вывода по ГОСТ 18977-79. С течением некоторого времени разработчики смогли не только обеспечить возможность создания развитой структуры межсистемного обмена, но и реализовать функцию параллельной согласованной работы нескольких БЦВС. Технология параллельной работы вычислителей позволила в значительной степени увеличить производительность систем комплекса. В результате чего разработчики при проектировании ПО смогли применять гораздо более эффективные алгоритмы обработки данных. Качество выполнения функций КБО системами возросло. Общее повышение функциональных, скоростных и точностных характеристик комплекса позволило повысить тактико-технические характеристики ВС.

Возможности, которые предоставляют разработчикам авионики БЦВС четвертого поколения огромны. При рассмотрении функциональных задач на уровне системы требования к АО удовлетворены. Однако за последние 20 лет применения БЦВС в рамках системно-ориентированного проектирования стало ясно, что дальнейшее развитие КБО не может продолжаться, опираясь на принципы построения федеративной архитектуры. Причиной этого стало постоянно растущее стремление к усовершенствованию качественных и эксплуатационных характеристик современных высокоманевренных ЛА, следствием чего стало увеличение количества функций комплекса и ужесточение требований к их выполнению.

В ходе многочисленных разработок КБО второго типа изменялись не только характеристики БЦВС. Огромные нагрузки на экипаж ВС привели к формированию огромного количества автоматических и автоматизированных инструментов помощи и даже замещения пилота в процессе полета. Система, взявшая на себя большую часть таких функций комплекса называется системой автоматического пилотирования (АП) [1]. Первые АП выполняли только функции стабилизации полета ВС. Постепенно функциональность АП возросла и сейчас даже такие функции как: полет по заданному маршруту, автоматические взлет и посадка ЛА

– стали обыденными [19]. Ниже представлен перечень стандартных на сегодняшний день функций системы АП:

- Управление в боковом и продольном канале;
- Стабилизация угловых положений;
- Совмещенное управление;
- Автоматический заход на посадку, автоматическая посадка;
- Управление на пробеге;
- Уход на 2-й круг;
- Взлет;
- Стабилизация высоты;
- Стабилизация курса;
- Выход на заданную высоту и выдерживание высоты;
- Стабилизация / управление вертикальной скоростью;
- Стабилизация / управление числом M ;
- Стабилизация / управление воздушной скоростью;
- Смягчение турбулентности;
- Директорное управление;
- Управление по сигналам VOR;
- Управление по сигналам ILS;
- Навигация в боковой и вертикальной плоскостях;
- Режимы улучшения полетных характеристик;
- Экономичный режим полета;
- Управление тягой силовых установок;
- Вычисление предельного значения тяги двигателя;
- Ручное уменьшение предельного значения тяги двигателя;
- Автоматическое уменьшение предельного значения тяги двигателя;
- Торможение при выравнивании;
- Вычисление минимальной скорости по углу атаки;

- Изменение положения закрылков;
- Стабилизация / управление скоростью на посадке;
- Стабилизация / управление скоростью в крейсерском режиме;
- Оптимальное управление тягой;
- Автоматическая отдача РУД;
- Заход на посадку с торможением;
- Управление оборотами.

Современные системы АП способны производить полет по заданному маршруту или более сложной траектории (например, при выполнении боевой задачи), используя пилотажно-навигационную информацию от группы собственных датчиков, систем комплекса, наземных радионавигационных средств [20]. Встречаются системы АП способные согласованно управлять группой ВС. Это АП военного назначения, которые поддерживают функцию выполнения боевых задач двумя ВС или в составе большей группы, постоянно обмениваясь тактической информацией по радиоканалам, вырабатывая тактику совместных действий и выполняя полётное задание в автоматическом или, полуавтоматическом режимах. Подсистема траекторного управления ЛА позволяет выполнять заходы на посадку с высокой точностью без вмешательства экипажа.

Для летчика управление ВС сегодня является гораздо более лёгким и единообразным процессом, чем это было раньше. Парировалась болтанка, предотвращаются сносы, скольжения, выходы на критические режимы полёта и даже запрещаются некоторые некорректные действия. Таким образом, летчик не загружен решением многочисленных задач по управлению ВС. Как результат, общая нагрузка на экипаж мала, и он способен более эффективно выполнять свои функции и оставаться сосредоточенным в течении более длительного периода времени.

Кроме систем АП серьезные изменения коснулись и рабочего поля кабины ВС. Изменениям подверглась практически вся эргономика кабины и уклад процесса управления полетом. При использовании КБО первого типа индикация информации производилась при помощи электромеханических шкал. Каждая систе-

ма комплекса была оборудована своим собственным указателем и набором органов управления. Количество указателей практически соответствовало количеству систем в составе КБО. Подобная организация рабочего поля кабины ЛА поддерживалась до 80-ых годов 20-го века. Проблемы такого подхода стали актуальны тогда, когда в виду усложнения структуры КБО количество указателей и органов управления стало настолько велико, что приходилось геометрически увеличивать пространство кабины и вводить в состав экипажа дополнительных людей. Так к 1980-му году органами управления и указателями в кабине была занята не только вся панель приборов, но и боковые панели, потолочные панели. В состав экипажа кроме двух пилотов дополнительно входили штурман, бортинженер, радист [1].

Вскоре увеличивать рабочее поле кабины стало невозможно, как и наращивать численность экипажа. Тогда разработчики начали прибегать к использованию комбинированных шкал, модифицировали линейные указатели в круглые и т. д. В качестве примера такого КБО на рисунке 10 представлена кабина самолета «Ту-154» [21].



Рисунок 10 – Кабина самолета «Ту-154»

Несмотря на все старания разработчиков увеличение сложности двигательных установок ЛА, внедрение множества гидравлических и других систем неизбежно вело к дальнейшему увеличению органов управления и указателей. Для решения сложившейся ситуации требовалось внедрение принципиально нового подхода. Таким подходом стало применение индикаторов на базе электроннолучевой трубки (ЭЛТ) в 1980-ых годах. ЭЛТ стали основой формирования рабочего пространства кабины [20]. Возможность комплексного отображения множества шкал в совокупности с возможностью смены кадра на индикаторе позволили за кратчайший промежуток времени сократить количество шкал в кабине в несколько раз.

Стоит отметить, что внедрение ЭЛТ без наличия БЦВМ позволяющих создать достаточно высокий уровень межсистемного обмена данными было бы невозможно. Совокупность БЦВС и ЭЛТ индикатора, объединенных в одном конструктиве, получила название системы электронной индикации (СЭИ) [20]. На СЭИ выводилась как минимум следующая информация:

- Пространственное положение (крен, тангаж);
- Курс полета;
- Различные скорости полета;
- Высоты полета;
- Вертикальная скорость;
- Температура наружного воздуха;
- Превышение максимально-допустимых пороговых значений пилотажных параметров;
- Параметры силовой установки (обороты, температура выходных газов, тяга, количество топлива и др.).

Многочисленные органы управления, такие как клавиши, тумблеры, кнопки, рычаги и т. д. стали выполняться в виде многофункциональных пультов управления (МФПУ). МФПУ применялись в основном для управления системами ВС, требующими сложной настройки. С их помощью, например, вводят и коррек-

тируют план полета, осуществляют настройку частот радиотехнических систем. Такие пульты могут иметь в своем составе клавиатуру и экран. На базе ЭЛТ и МФПУ была произведена модернизация множества уже эксплуатируемых КБО. В качестве примера на рисунке 11 представлена кабина самолета «Boeing-737» [22].



Рисунок 11 – Кабина самолета «Boeing-737»

Дальнейшее развитие средств индикации в последующее десятилетие продолжалось в направлении наиболее качественной организации рабочего поля индикаторов. В результате система СЭИ приобрела стандартную комплектацию из двух индикаторов, один из которых предназначен для отображения пилотажной информации, а второй - для отображения навигационной информации. Группа СЭИ из пилотажного и навигационного индикаторов устанавливается для каждого из пилотов ВС [20].

Наряду с развитием системы СЭИ происходило развитие и становление комплексной информационной системы сигнализации (КИСС). Назначение данной системы – это отображение информации об исправности бортового оборудования, состоянии двигателей и общесамолетных систем. КИСС комплектовались

своим индикатором, где в нормальном режиме работы отображались параметры работы двигателей. На этот индикатор пилот мог вывести подробную информацию по любой из систем комплекса.

В современных КБО системы СЭИ и КИСС объединены в единую комплексную систему электронной индикации и сигнализации (КСЭИС). Такая система обладает большей гибкостью в отношении представления информации и имеет меньшие массогабаритные характеристики за счет объединения вычислителей.

Следующим инновационным шагом стало внедрение технологии жидкокристаллических индикаторов (ЖК). Эта технология позволила значительно уменьшить массогабаритные характеристики КСЭИС, в частности наиболее сильно была уменьшена глубина монтажа в приборную панель. ЖК панели пришли на смену индикаторам основанным на технологии ЭЛТ в двухтысячных годах. Первые ЖК панели имели маленькую диагональ монитора и не могли применяться в качестве основных индикаторов. Однако развитие технологии ЖК панелей происходило очень стремительно и уже вскоре все ЭЛТ мониторы были заменены на ЖК панели. Сейчас ЖК панели применяемые на борту ЛА достигают диагонали в 21 дюйм [20].

Индикаторы в современных КБО также применяются для отображения сигнальной информации об исправности оборудования, отображения мнемосхем, вывода видеосигналов с камер наблюдения и поисково-спасательных систем, систем ночного видения и других данных.

В дополнение к основным системам индикации на современных ВС существуют электронные системы для представления пилоту различной справочной информации, которая ранее находилась в кабине ЛА на бумажных носителях. Такое устройство представляет собой бортовой вариант портативного компьютера «laptop». Индикатор обычно имеет вид планшета с экраном. Органы управления располагаются вокруг экрана или же сам экран является сенсорным и тогда кноп-

ки просто изображаются на поле экрана. Эта система не является частью КБО, а лишь дополняет его.

В качестве примера КБО второго типа, на рисунке 12 представлена кабина самолета «Ту-204». Это самолет разработки ПАО «Туполев», выпускаемый с 1996 года и по сегодняшний день [23].



Рисунок 12 – Кабина «Ту-204»

В результате многочисленных ОКР по проектированию КБО второго типа структура комплекса, внутренний вид кабины ВС и другие многочисленные аспекты конструкции приобрели типовой облик и строение. КБО стали характеризоваться продуманной эргономикой, высоким уровнем функциональности, удобством эксплуатации и обслуживания. Несмотря на все достижения авиаприборостроительной промышленности КБО второго типа требованиям разработчиков ВС и конечных потребителей полностью не отвечают.

Внедрение многочисленных систем, например, таких как: система предупреждения приближения земли, система предупреждения критических режимов,

система предупреждения о грозе, система предупреждения о сдвиге ветра, система сбора и локализации отказов – привело к значительному увеличению количества систем в составе КБО. Вместе с ростом количества систем в составе комплекса появились тенденции снижения его надежности и усложнения процесса разработки [1]. Отказоустойчивость основных систем, выполняющих критические функции осталась прежней. Другая картина наблюдается относительно систем, при проектировании которых не применяются высоконадежные компоненты и метод резервирования. В результате этого такие системы в процессе эксплуатации ВС достаточно часто выходят из строя. Несмотря на безобидный характер неисправности для владельца ВС это оборачивается постоянными простоями и дорогостоящим ремонтом [24]. Вторым аспектом снижения надежности является наличие огромного количества жгутовых соединений между системами комплекса. Даже при минимальной комплектации в состав КБО входит около трех десятков систем. Построение межсистемных связей ведет к образованию нескольких сотен, а то и тысяч проводных соединений. Когда комплектация комплекса расширяется за счет внедрения дополнительных систем, то и количество проводных соединений неизбежно растет.

Подводя итоги обзора КБО второго типа можно сказать, что в рамках федеративной архитектуры за последние 30 лет структура комплексов очень сильно изменилась. Коренные изменения коснулись как архитектуры построения БЦВС, так и систем, и всего комплекса в целом. Внутренняя эргономика кабины ВС за счет внедрения систем КСЭИС и МФПУ приобрела совершенно иной облик. Функциональность комплексов вышла на новый, ранее недостижимый уровень. Получив определенный функциональный резерв возможностей совершенствования КБО разработчики ВС позволили себе сформировать новые концепции и цели. Реализацией этих концепций стало появление ВС с высокими летными и эксплуатационными характеристиками.

Тесная конкуренция на авиационном рынке привела к тому, что функциональный резерв КБО второго типа быстро иссяк.

С точки зрения разработчика ВС КБО второго типа обладают следующими серьезными недостатками:

- Высокая стоимость процесса проектирования;
- Длительный цикл разработки;
- Высокий уровень трудозатрат;
- Уникальность КБО по отношению к ВС.

Если говорить о недостатках с точки зрения конечного потребителя, то они следующие:

- Для обеспечения оперативного ремонта КБО требуется иметь в запасе практически полный набор систем, входящих в состав комплекса;
- КБО различных ВС состоят из уникальных систем и не могут быть донорами друг для друга;
- Удобство интерфейса кабины современных КБО имеет в основном средний уровень.

Кроме наличия ряда недостатков эксплуатационного характера и характера экономического с течением последних лет потребность в повышение функциональных характеристик комплекса становится все больше [2].

На сегодняшний день отечественные разработчики ВС гражданской авиации испытывают мощную конкуренцию со стороны зарубежных авиакомпаний. Рассматривая рынок гражданской авиации нельзя забывать о том, что это сфера в первую очередь является коммерческой, а значит главные критерии оценки ВС – это:

- Соотношение цены и функциональности ВС;
- Безопасность эксплуатации;
- Стоимость эксплуатации;
- Срок службы ВС;
- Комфортабельность.

Построение КБО на основе федеративной архитектуры фактически продолжалось вплоть до середины 10-ых годов 21-ого века. Для проектирования приме-

нялись БЦВМ четвертого поколения, основанные на подходе комбинирования специализированных и унифицированных процессорных модулей. Расширение функциональности КБО достигалось ростом количества систем в его составе. Практически линейная зависимость масштабирования функциональности КБО от количества систем в его составе стала очевидной проблемой.

Аналогичная проблема уже возникала на рубеже 80-ых годов 20-го века при проектировании КБО первого типа. Переход к КБО второго типа и появление мощных БЦВМ позволили значительно уменьшить массогабаритные характеристики АО и повысить его производительность, таким образом сделав эту проблему не актуальной на долгие годы.

Выход из сложившейся ситуации стал возможен благодаря появлению архитектуры ИМА.

1.1.3 Интегральная модульная архитектура КБО

Интегральная модульная архитектура авионики – это такая организация структуры авионики, при которой АО комплекса представлено группой датчиков, группой индикаторов и сигнализаторов и единым вычислительным блоком – крейтом. Функции реализованы в качестве программных приложений, разделяющих общие вычислительные ресурсы крейта [25, 26]. Далее по тексту КБО, построенный на основе архитектуры ИМА, будем называть – «КБО третьего типа».

Концепция ИМА подразумевает полную централизацию вычислительных функций КБО на одном вычислительном ядре [2]. Все оставшееся оборудование комплекса – периферийное относительно крейта, располагается в зависимости от требований к его месторасположению на борту ЛА. К периферийному оборудованию относятся:

- Индикаторы отображения информации;
- Пульты управления;
- Комплект датчиковой аппаратуры;
- Комплект радиосвязного оборудования;

- Комплект антенн радиолокационной аппаратуры;
- Комплект антенн радионавигационного оборудования;
- Общесамолетное оборудование ЛА.

В КБО второго типа индикаторы отображения информации являются частью системы КСЭИС, которая производит прием данных, их подготовку и формирование изображения. В КБО ИМА функции вычислителя выполняются крейтом, в результате чего индикатор становится аналогом монитора обычного персонального компьютера.

Расположение датчиковой аппаратуры и антенн определяется конструкцией ЛА. Это обусловлено требованиями реализации физических процессов. Количество датчиков может варьироваться в зависимости от типа ЛА, его назначения и летных характеристик. Как и в федеративном комплексе, методом повышения точности передачи измеряемого датчиком сигнала является расположение АЦП в непосредственной близости к нему. Это обеспечивает передачу данных по цифровым интерфейсам без потери точности. При этом роль системы воздушных сигналов (СВС) по концентрации сигналов от датчиковой аппаратуры берет на себя крейт. Это предполагает возможную необходимость наличия специфических интерфейсов обмена данными. Комплекты радиосвязного, радиолокационного и радионавигационного оборудования по своей сущности являются наборами антенн и блоков обработки сигнала. В КБО ИМА крейт может выполнять роль блоков обработки сигнала. Если вычислитель должен быть в непосредственной близости от антенны, тогда крейт работает как приемник готовой к дальнейшей обработке информации [27].

Индикаторы и пульта управления являются оборудованием, расположение которого определяется в зависимости от требований эргономики кабины ВС. Реализация КСЭИС в виде мониторов и пультов с минимальными габаритами глубины установки, как плоских панелей с сигнальными контактами позволяет максимально адаптировать рабочее пространство кабины ВС.

Четкое разграничение крейта и периферийного оборудования приводит к тому, что отказ функции комплекса становиться возможен в случае неисправности непосредственно самого периферийного оборудования, линии передачи данных или крейта. Учитывая высокие показатели надежности каждого из этих элементов получается, что вероятность отказа функции в КБО третьего типа меньше, чем в КБО других типов. Кроме того, это приводит к повышению удобства и сокращению стоимости сервисного обслуживания. В виду того, что отказ функции не влечет за собой замену целой системы, а требует лишь замены вышедшего из строя периферийного оборудования, стоимость восстановления функциональности КБО значительно снижается.

Большим достижением КБО третьего типа является возможность реализации свойства независимости ПО и АО. Без реализации данного свойства нельзя считать КБО полноценным комплексом третьего типа. Реализовать независимость ПО и АО стало возможным за счет создания крейта. Его структура построена по модульному принципу. Основу крейта составляют вычислительные модули универсального типа. Применение вычислительных модулей именно универсального типа позволяет реализовать принцип независимости ПО и АО. За счет того, что вычислительные модули идентичны, программные приложения – функции комплекса могут быть выполнены любым из этих модулей. Это и обеспечивает независимость ПО и АО друг от друга. Реализация независимости ПО и АО придает КБО третьего типа целый ряд преимуществ.

Во-первых, разработчик может реализовать такой механизм повышения надежности как реконфигурация КБО. Реконфигурация КБО - это процедура изменения связей между ПО и АО крейта, выполняемая вручную или автоматически. Эффективность применения реконфигурации достаточно высока для того чтобы в большинстве случаев отказаться от применения метода резервирования. Таким образом, разработчик может добиться существенного снижения стоимости АО комплекса, при этом сохранив уровень его надежности и безотказности. А если взять в расчет тот факт, что количество блоков в составе комплекса сократится,

то возможно не только сохранение уровня безотказности комплекса, но и его повышение.

Таким образом, проблема большого количества АО в виду наличия зависимости количества блоков комплекса от количества функций в его составе теряет свою актуальность. В КБО третьего типа данная зависимость осталась линейной, как и в КБО второго типа, однако значительно изменился коэффициент наклона данной линейной функции. Теперь в рамках одного вычислительного модуля могут быть реализованы одна и более функций комплекса одновременно.

Во-вторых, разработчик получил возможность изменения структуры ПО комплекса с целью ее оптимизации. Это возможно благодаря модульной структуре ПО.

В-третьих, независимость АО позволила реализовать принцип открытой архитектуры.

Открытая архитектура – это архитектура, позволяющая изменять конфигурацию КБО по принципу «plug and play». То есть включение новых приложений – функций КБО или модернизация аппаратной части комплекса может производиться, не затрагивая уже работающие части.

Открытая архитектура позволяет производить замену устаревших модулей, либо внедрять в состав КБО дополнительные модули различных производителей [28, 29]. Это обеспечивается применением в процессе разработки только общеприменяемых стандартов. Еще один положительный эффект от реализации открытой архитектуры – это избавление производителя от необходимости повторной сертификации всего КБО после проведения его модернизации. Сертификации подлежат только изменившиеся части АО или ПО. Это позволяет многократно сократить экономические и временные расходы [3, 5].

Для реализации принципа независимости и минимизации влияния изменений одной части комплекса на другие применяется введение между АО и ПО разделяющего слоя. Роль этого разделяющего слоя выполняет операционная система реального времени (ОСРВ). Она предусматривает стандартный набор интерфей-

сов и услуг для приложений – программ, выполняющих ту или иную функцию. Каждое приложение выполняется в своей собственной среде, на своей собственной виртуальной машине, при этом доступ к общим разделяемым ресурсам для данного приложения строго ограничен. Приложение не знает о том, что оно разделяет процессор с другими приложениями. Это необходимо для возможности одновременного запуска приложений различных уровней критичности на одном процессоре. К разделяемым ресурсам АО относятся: память, процессорное время и сетевые ресурсы. Первичное распределение ресурсов происходит при начальной инициализации, которая следует после включения комплекса. Любая попытка нарушить установленные границы любого из ресурсов вызывает обращение к ядру операционной системы и инициирует процедуру восстановления. Наряду с независимостью АО и ПО обеспечивается независимость ПО от физического интерфейса и топологии сети. Приложение не знает используемых им источников данных и приемников результатов своей работы, соответственно не знает и о месте их расположения. Весь обмен строится через посылку и прием стандартных сообщений.

Все функции в среде ОСРВ используют язык высокого уровня, который поддерживает масштабируемость и независимость от функций ввода/вывода. Разработка и проверка кода приложения может быть проведена на рабочем месте инженера при помощи моделирующей среды, без реальной аппаратуры. В отличие от коммерческих операционных систем, например, таких как «Windows», исходный код ОСРВ соответствует требованиям Federal Aviation Administration (FAA) к живучести ПО. Существует соответствующий стандарт на ОСРВ разработанный комитетом IEEE 1003 и имеющий название «POSIX» (Portable Operating System Interface X) [30]. Необходимым качеством программного обеспечения для модульной авионики считается толерантность к программным ошибкам, то есть способность обнаружить их и компенсировать негативные последствия. Толерантность обеспечивается тремя способами: на этапе трансляции программы - использованием свойств языков высокого уровня, таких как «Ada», на этапе испол-

нения программы - встроенными механизмами операционной системы и процедурами контроля целостности используемых данных [27].

Основным недостатком КБО третьего типа является огромная трудоемкость создания ПО [31]. Однако реализация принципов ИМА позволяет единожды создать множество функциональных приложений и в дальнейшем сформировать библиотеку программных модулей. При этом трудоемкость создания ПО КБО в дальнейшем значительно снизится.

Теперь более подробно рассмотрим, что на сегодняшний день представляет из себя крейт.

Крейт – это механический каркас, в который устанавливаются модули, кроме этого, в крейте располагаются: магистраль, блок питания, система охлаждения. В случае, если система очень велика и состоит из нескольких крейтов, то они могут быть смонтированы в специальную стойку.

Основные составляющие крейта – это модули и магистраль.

Модули – это электронные блоки, выполняющие различные функции: измерение, генерация сигналов, хранение информации, преобразование сигналов и др. Модули устанавливаются в крейт и подключаются к магистрали.

Магистраль – это совокупность электрических проводников, соединяющих различные модули крейта, сгруппированных по функциональному назначению в шины. В общем случае выделяют следующие типы шин: адресная, данных, команд, состояния, управления, арбитража, прерываний [27].

В идеализированном виде набор типовых модулей крейта должен быть следующий:

- Вычислительный модуль;
- Модуль памяти;
- Модуль приема и передачи данных;
- Модуль питания;
- Модуль поддержания нормальных климатических условий.

В реальности достичь идеализированной структуры крейта КБО ИМА на данный момент времени не представляется возможным. Проанализировав разработки производителей авионики в области ИМА за последнее десятилетие можно выделить общие тенденции построения структуры крейтов.

На сегодняшний день типичный КБО построенный по архитектуре ИМА состоит из несколько крейтов, их количество определяется сложностью задач и требованиями компоновки. Обычно крейтов два, что позволяет распределять между ними задачи. Монтаж модулей в крейт производится через лицевую часть. Любой из модулей должен быть легко заменяем в процессе эксплуатации, что обеспечивается механизмом его крепления и открытой архитектурой АО. По аналогии с федеративными блоками и системами последних разработок, также имеющих модульную структуру, в крейте имеется объединяющая системная плата – кросс-плата, с помощью которой все модули крейта подключаются к магистрали. При помощи кросс-платы в крейте прокладываются линии электропитания и магистраль передачи данных. Внешние сигналы поступают непосредственно на разъем модуля приема и передачи данных. Преимущества применения кросс-платы вместо иных методов монтажа заключаются в том, что:

- изменения структуры периферийных устройств, приводящие к необходимости изменения количества или типов каналов ввода / вывода приводят только к необходимости замены модуля приема и передачи данных и не приводят к необходимости доработки кросс-платы и задней панели устройства, как это обычной было при доработке федеративных систем;
- минимизируется количество проводных соединений внутри крейта, что значительно снижает трудоемкость коммутации модулей при сборке, исключает возможность ошибки коммутации модулей по причине человеческого фактора, уменьшает массогабаритные характеристики крейта и повышает надежность устройства;

- техобслуживание проводки между крейтом и периферийным оборудованием значительно облегчается, благодаря концентрации и размещению разъемов на задней панели крейта.

Модули крейта в нормальном режиме работы выполняют определенный набор функций. Как правило, распределение функций между модулями производится таким образом, что функциональная структура получается аналогичной структуре функций федеративного комплекса. С учетом такой градации функций КБО набор типовых модулей крейта расширяется, ряд функций обособливается.

Отдельно обособливаются функции требующие применения специализированных модулей. К таким функциям относятся функции, требующие обработки графических данных и функции контроля и управления сетевым обменом данными. Кроме того, на сегодняшний день производители отдельно выделяют функции радиосвязи, радионавигации и радиолокации. Вычислители этих функций устанавливают поблизости от своих антенн исходя из соображений электромагнитной совместимости, снижения количества помех в передающих трактах, а также минимизации потерь излучаемой мощности. При этом, как правило, эти системы предприятие разработчик КБО не разрабатывает, а закупает серийные. Таким образом, получается, что радиосвязное, радиолокационное и радионавигационное оборудование – это обособленные системы КБО.

Отдельно стоит выделить инерциальную навигационную систему (ИНС), так как по сей день она содержит свой комплект датчиков углов и ускорений. Причиной этого являются требования повышенной точности измерения и необходимости установки датчиков в строго определенном месте на борту ЛА.

Таким образом получается, что набор типовых модулей крейта такой:

- Вычислительный модуль;
- Модуль памяти;
- Модуль приема и передачи данных;
- Модуль питания;
- Модуль поддержания нормальных климатических условий;

- Модуль концентрации сигналов;
- Модуль графической обработки.

Вычислительный модуль – это основной модуль крейта, предназначенный для выполнения вычислительных операций в рамках той или иной функции комплекса.

Модуль памяти выполняет функцию электронной библиотеки, к которой при необходимости обращаются пилоты ВС, сервисные службы, а также другие модули комплекса.

Модуль приема и передачи данных предназначен для связи крейта с локальной сетью (ЛС) комплекса. Если ЛС построена по топологии «звезда», то данный модуль выполняет роль переключателя, обеспечивая полнодуплексную связь компонентов сети.

Модуль питания преобразует первичное напряжение бортовой сети ЛА (~115 В или =27 В) в номиналы напряжений, необходимых для питания модулей крейта.

Модуль поддержания нормальных условий обеспечивает автоматическую принудительную стабилизацию температуры и влажности окружающей среды внутри крейта.

Модуль концентрации сигналов служит для приема информации от самолетных систем и датчиков ЛА. Информация, которая поступает в комплекс из бортовых интерфейсов различных видов, например, от систем, выдающих информацию последовательным кодом по ARINC 429. Модуль преобразует эту информацию, упаковывает ее и передает в крейт и ЛС комплекса. При необходимости модуль концентрации сигналов может принимать и преобразовывать в цифровую форму аналоговые и дискретные сигналы различного типа. С целью уменьшения длины и массы проводки концентратор сигналов может располагаться вне основного крейта, то есть как можно ближе к датчикам сигналов. В этом случае конструктивно он выполняется в виде отдельного блока.

Модуль графической обработки предназначен для сбора информации подлежащей отображению на индикаторах. Готовит и передает собранную информацию в индикаторы в виде готового изображения. Может получать видеосигнал от сенсоров ЛА, например, от инфракрасной обзорной системы или радиолокатора. Полученное видеоизображение масштабируется, на него накладывается символьная информация и подготовленная для индикации картинка передается в индикатор.

Для расширения возможностей какого-либо модуля применяются платы расширения, получившие название мезонин или мезонинный модуль.

Мезонинный модуль – это плата, вставляемая в основную плату и располагающаяся параллельно плате-носителю. Носитель (модуль) может иметь несколько слотов для размещения мезонин, чем достигается функциональная гибкость его конфигурации.

Одной из важнейших отличительных черт КБО третьего типа является наличие высокоскоростной ЛС. Процессу выбора типа и организации ЛС в процессе проектирования уделяется очень много внимания. Например, в комплексе Primus Epic ЛС создана на основе шины ASCB (Avionics Standard Communication Bus). ASCB состоит из 4 отдельных шин. Каждая шина включает три линии. Средой передачи данных служит биаксиальный кабель. Шины связи двунаправленные, скорость передачи данных до 10 Мбит/с. Передаваемая информация управляется четырьмя контроллерами, из которых одновременно активен только один, а остальные находятся в резерве. Активный контроллер посылает управляющие сообщения по трем из четырех шин. К ASCB можно подключить до 50 потребителей. Каждая подсистема, выдающая информацию, подключена к двум из 4 шин, а каждый приемник подключен и может принимать информацию по 3 шинам. Шины имеют механизм защиты от ошибок. Для всех подключенных устройств передача разрешается только в отведенные интервалы времени, в остальное время передатчики блокируются.

В комплексе ProLine 21 в качестве ЛС используется разновидность Ethernet - 100Base-TX с топологией звезда. Один из модулей крейта осуществляет функции переключателя сети. Для соединения с другими типами сетей и другой средой передачи данных предусмотрена установка на этот модуль мезонинных плат, осуществляющих функции мостов.

Комплексе авионики самолета Airbus A380 организуется на базе другой разновидности Ethernet - AFDX. А на истребителе F-22A и вертолете RAH-66 применяется интерфейс Fibre Channel со скоростью передачи данных до 1 Гбит/с [1].

На сегодняшний день самой высокоскоростной средой передачи данных являются ЛС, основанные на применении оптоволоконных линий. Оптоволоконные интерфейсы передачи данных совместно с применением протоколов семейства Ethernet позволяют достичь скоростей в несколько раз превосходящих те, что достигаются при применении «витых пар».

Типовая структура современного крейта изображена на рисунке 13.

Анализируя существующие проекты КБО ИМА, которые выпускаются серийно можно констатировать факт, что они далеки от идеализированного облика ИМА. Принципы ИМА в них реализованы лишь частично. Многие ведущие мировые производители авионики не единожды заявляли о создании полноценного КБО ИМА, но результатами их труда являются КБО с частичной реализацией базовых принципов ИМА.

Сложность проектирования ИМА состоит не в написании кодов программ, а в разработке его структуры [32]. На сегодняшний день разработать структуру КБО ИМА возможно лишь при помощи авторской работы высококвалифицированных специалистов. А этот метод не приемлем для того, чтобы применить его в качестве типового и сформировать стандартный процесс разработки КБО ИМА. Таким образом, разработка КБО ИМА является дорогостоящей, длительной и сопровождается высокими рисками. Это приводит к сдерживанию развития ИМА.

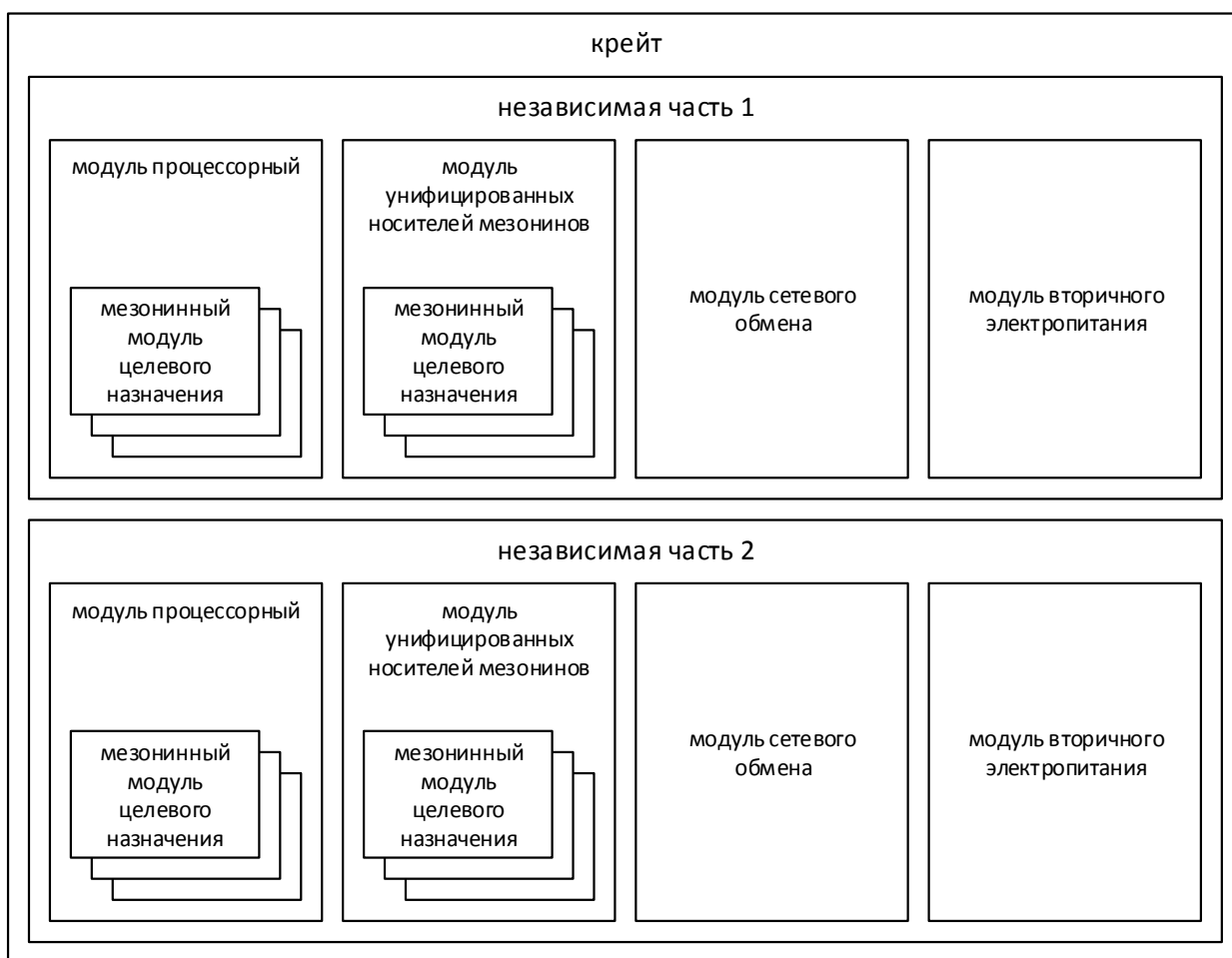


Рисунок 13 - Типовая структура крейта

Как известно, все крайне трудоемкие процессы проектирования на сегодняшний день выполняются при помощи САПР. В виду этого целесообразно провести анализ применяющихся при проектировании КБО САПР и оценить возможность автоматизации процесса проектирования структуры КБО ИМА с их помощью.

1.2 Анализ применяемых САПР при проектировании КБО

На сегодняшний день САПР является самым эффективным инструментом для решения трудоемких задач проектирования. Наиболее значимые эффекты от применения САПР следующие:

- Сокращение трудоемкости проектирования;
- Сокращение цикла проектирования;

- Сокращение себестоимости проектирования;
- Улучшение качества проектирования;
- Сокращение затрат на натурное моделирование и испытания;
- Сокращение трудоемкости разработки;
- Сокращение трудоемкости адаптации к условиям эксплуатации;
- Сокращение трудоемкости сопровождения.

Высокую эффективность САПР приобрели в процессе интенсивного развития в течении последних двух десятилетий. Первые САПР появились в начале 60-х годов 20-го века и представляли собой набор частично связанных между собой прикладных программ узкой специализации. Тогда были разработаны программы для решения задач строительной механики, анализа электронных схем и проектирования печатных плат.

Высокая эффективность и огромные перспективы развития САПР привлекли большое количество компаний разработчиков в данную сферу. В скором времени облик САПР изменился коренным образом. Уже к концу 20 века системы САПР претерпели качественные изменения и стали представлять собой мобильные и строго организованные системы, способные к оптимизации под задачи предметной области.

Сегодня САПР являются сложными математическими объектами, основанными на сочетании множества прикладных наук. Разработка математического аппарата САПР требует использования огромного разнообразия методов вычислительной математики, статистики, дискретной математики, математического анализа, методов математического программирования, вероятностных расчетов, применения сложных алгоритмов и т. д.

Современные САПР можно классифицировать по множеству признаков. В РФ САПР классифицируются в соответствии с ГОСТ 23501.108-85 по [33]:

- типу объекта проектирования;
- сложности объекта проектирования;
- уровню автоматизации проектирования;

- комплексности автоматизации проектирования;
- характеру выпускаемых документов;
- количеству выпускаемых документов за год;
- количеству уровней технического обеспечения.

В соответствии с данной классификацией задача проектирования структуры КБО является комплексной и по признаку типа объекта проектирования, относится к проектированию изделий приборостроения. По признаку сложности объекта проектирования, в зависимости от конкретного изделия может относиться как к объектам средней сложности, так и к объектам высокой сложности.

При проектировании КБО применяется множество САПР, различных по своему целевому назначению:

- Средства проектирования CAD (Computer Aided Design);
- Средства инженерного анализа CAE (Computer Aided Engineering);
- Средства управления документооборотом PDM (Product Document Management);
- Геоинформационные системы GIS (Geo informatics Systems).

В свою очередь, из всего множества CAD-решений выделим по отраслевому назначению следующие:

- Машиностроительные CAD - MCAD (Mechanical Computer Aided Design);
- САПР электронных устройств, EDA (Electronic Design Automation);

А из систем CAE следующие:

- Средства выполнения прочностных расчетов;
- Средства выполнения тепловых расчетов;
- Средства построения гидроаэродинамических моделей (CFD, Computational Fluid Dynamics);
- Средства выполнения кинематического анализа;
- Средства выполнения механической симуляции (MES, Mechanical Event Simulation);

- Средства выполнения электромагнитных и электродинамических расчетов.

Ниже представлены примеры САПР получивших на сегодняшний день наиболее широкое распространение:

- Для проектирования электрических систем: AutoCAD Electrical, E3.series, CADdy++ и др.;
- Для трехмерного проектирования конструкций аппаратуры БРЭО: Autodesk Inventor, SolidWorks, UniGraphics, КОМПАС, CATIA и др.;
- Для инженерных расчетов и моделирования тепловых полей, создаваемых аппаратурой БРЭО: BETAsoft, Sauna, Асоника-Т и др.;
- Для моделирования электромагнитных полей, создаваемых аппаратурой БРЭО: OrCAD Family Release, GENESYS и др.;
- Для проведения спектрального анализа радиочастотных сигналов, генерируемых и принимаемых аппаратурой БРЭО – TESLA и др.;
- Для моделирования прочностных и резонансных характеристик конструкций авиационных изделий: Samcef, Mecano, Boss Quattro и др.;
- Для автоматической трассировки печатных плат с учетом трехмерной компоновки элементов монтажа: ACCELEDA, P-CAD, Altium Designer и др.;
- Для конструирования и разводки жгутов в трехмерном пространстве корпусов аппаратуры БРЭО: UG / Wiring, Autodesk Inventor и др.;
- Для моделирования гидродинамических процессов в системах охлаждения авиационных изделий с учетом тепловыделения электронных радиоэлементов и физических процессов теплопереноса: Fine/Turbo др.;
- Для электронного моделирования радиотехнических сигналов и цепей: Cadence Design, Mentor Graphics, XILINX Foundation, ALTERA, Micro-Cap и др.;
- Для проектирования программного обеспечения: C/C++/C#, ADA и др.;

- Для анализа и расчета надежности, готовности и ремонтпригодности: АРБИТР, АРМ, АСОНИКА-К, AnyGraph, CRISS, Block Sim, ITEM Software, RAM Commander, Reliability Workbench, Windchill и др.

Приведенные примеры программных пакетов САПР по уровню сложности являются одноэтапными. Если классифицировать их по уровню автоматизации в рамках соответствующего этапа проектирования КБО, то их можно отнести к классу высокоавтоматизированных САПР. Если рассматривать данные САПР в рамках всего процесса разработки, то общий уровень автоматизации будет средним.

Внедрение САПР позволяет сократить время процесса проектирования примерно на 20%. Внедрение же принципов унификации и стандартизации аппаратно-программных разработок предприятия на основе принципов интегрированной среды САПР позволяет сократить время процесса проектирования примерно на 50%.

Проанализируем на примере двух предприятий АО «УКБП» и НПП «ЦРТС» степень автоматизации процесса проектирования среднестатистического Российского производителя электроники.

АО «УКБП» - это крупное предприятие, история которого начинается с 1954 года. Огромный опыт разработок и преемственность поколений инженеров обеспечивают данному предприятию крепкое положение на рынке авионики. Предприятию свойственна большая инерционность в области внедрения новых САПР и изменению уклада рабочего процесса. Численность инженерного состава данного предприятия превышает 1000 человек.

НПП «ЦРТС» - это молодое быстро развивающееся предприятие, появившееся в 2013 году. В работе предприятия наблюдаются активные организационно-оптимизационные процессы, набор сотрудников и наращивание инженерных и производственных мощностей.

Несмотря на то, что сравниваемые предприятия сильно отличаются друг от друга, в процессе проектирования своей продукции ими решаются одни и те же

задачи. Это такие задачи, как проектирование печатных плат, трехмерная разработка конструкций электронных устройств, проведение инженерных анализов, разработка и прокладка жгутовых и кабельных трасс, разработка жгутов, комплексная схемотехническая проработка изделий, создание ПО для электронных устройств и т. д. Совокупное решение всех этих задач приводит к формированию структуры изделия.

Произведем краткий обзор сфер деятельности данных предприятий, перечней выпускаемой продукции и сравним применяемые САПР.

АО «УКБП» в основном занимается разработкой авиационного электронного оборудования, однако также занимается разработкой оборудования для ГЭС, наземной военной техники и медицины. Основная продукция - это:

- Системы электронной индикации и сигнализации на основе высокопроизводительных мультипроцессорных структур и многофункциональных ЖК-индикаторов;
- Отказоустойчивые реконфигурируемые информационно-управляющие системы сбора и обработки данных для контроля и управления общесамолетным и общевертолетным оборудованием;
- Интегрированные системы восприятия, измерения, вычисления воздушных параметров, лётных ограничений, приёмники и датчики аэрометрических данных;
- Системы и элементы внутрикабинного освещения и сигнализации, в том числе адаптированные для работы экипажа с очками ночного видения;
- Наземные автоматизированные системы контроля и диагностики бортового оборудования;
- Цифровые системы автоматического управления, сигнализации и контроля гидроагрегатов микро, малых и крупных ГЭС;
- Системы мониторинга артериального давления и сердечно-сосудистой деятельности, электронные измерители артериального давления, суточные мониторы артериального давления и кардиосигналов.

Для автоматизации процесса проектирования, а в частности основных задач проектирования, решаемых при разработке АО «УКБП» применяет ряд САПР различного назначения. Автоматизация процесса проектирования печатных плат решается при помощи P-CAD 2006 SP2. Задача трехмерного проектирования конструкции электронных устройств автоматизируется при помощи пакета программ Solid Works. Задача комплексной схмотехнической проработки проектируемого КБО на предприятии АО «УКБП» не автоматизирована специализированной САПР. В качестве среды разработки электрических схем ЭЗ и Э4 применяется программа AutoCAD, которая используется как универсальный чертежный инструмент - «электронный кульман». Достижимая степень автоматизации процесса комплексной схмотехнической проработки при помощи AutoCAD является низкой [34]. Четвертая задача - анализ и расчет надежности, готовности и ремонтнопригодности изделия автоматизируется при помощи программы RAM Commander. Задача проектирования и оптимизации структуры КБО, являющаяся одной из сложнейших задач выполняется инженерами вручную.

На основе изложенных данных можно сделать вывод о том, что две из пяти основных задач проектирования на предприятии АО «УКБП» выполняются практически вручную, с использованием «электронного кульмана». Таким образом получается, что лишь 60% процесса эскизного и технического проектирования выполняется с использованием САПР.

НПП «ЦРТС» специализируется на разработке и производстве высокотехнологичных цифровых радиотехнических систем для управления воздушным движением.

Основная продукция – это:

- Моноимпульсные вторичные радиолокаторы;
- Системы АЗН-В;
- Многопозиционные системы наблюдения;
- Аэродромные радиолокационные комплексы и их комплектующие.

НПП «ЦРТС» для автоматизации проектирования также применяет ряд САПР различного назначения. Автоматизация процесса проектирования печатных плат решается при помощи P-CAD 2006 SP2. Задача трехмерного проектирования конструкции электронных устройств решается при помощи программы Autodesk Inventor. Третья задача – комплексная схемотехническая проработка проектируемого комплекса оборудования, в частности разработка электрических схем Э3 и Э4 выполняется в AutoCAD Electrical. Для автоматизации задачи анализа и расчета надежности, готовности и ремонтпригодности изделия НПП «ЦРТС» практикует применение САПР, которую рекомендует (требует) заказчик. Поэтому условно будем считать, что внедренной САПР для решения данной задачи на предприятии нет. Пятая задача - проектирование и оптимизации структуры АРЛК, как и задача проектирования КБО является одной из сложнейших задач проектирования и предшествует непосредственному процессу проектирования составляющих электронных устройств. Разработка структуры изделия и ее оптимизация выполняются инженерами вручную. При этом формируется ряд базовой документации, которая является основой для понимания принципов работы изделий и его дальнейшей разработки.

Проведя сравнительный анализ САПР применяемых в АО «УКБП» и НПП «ЦРТС» и основных существующих аналогов сформировался перечень программ, позволяющих достичь оптимального уровня автоматизации процесса проектирования КБО [35 - 41]. Перечень программ представлен в таблице 1.

Исходя из данных, представленных в таблице 1 можно сделать вывод о том, что современный уровень развития САПР очень высок [42]. При выборе САПР было отдано предпочтение продукции компании Autodesk. Это связано с высокой степенью популярности продукции данной компании на Российском рынке, качеством технической поддержки, приспособленностью к работе по стандартам РФ, высоким авторитетом производителя.

Таблица 1 – Перечень САПР для автоматизации процесса проектирования КБО

Этап проектирования	Задача проектирования	Средство САПР	Степень автоматизации
Эскизное проектирование	Разработка архитектуры изделия	–	низкая
	Схемотехническая проработка изделия	AutoCAD Electrical	высокая
	Проектирование печатных плат	Altium Designer	высокая
	Трехмерное проектирование конструкции изделия	Autodesk Inventor	высокая
	Анализ и расчет надежности	RAM Commander	высокая
Техническое проектирование	Доработка архитектуры изделия	AutoCAD Electrical	низкая
	Схемотехническая доработка изделия	AutoCAD Electrical	высокая
	Доработка печатных плат	Altium Designer	высокая
	Доработка трехмерных моделей конструкции изделия	Autodesk Inventor	высокая
	Анализ и расчет надежности	RAM Commander	высокая

САПР на сегодняшний день очень сильно интегрированы во все типовые процессы жизненного цикла изделия и их роль крайне велика. Разработка большинства современных изделий была бы невозможна без САПР. К таким изделиям относится и КБО.

Анализ степени автоматизации проектирования КБО показал, что наименее автоматизированной и сложной задачей проектирования является разработка структуры комплекса.

Типовой процесс разработки всегда начинается с выбора аналогов и прототипа нового изделия [43]. Таким образом, производитель использует уже готовую

структуру изделия, лишь дорабатывая ее. Степень доработки прототипа крайне редко превышает 20%. Это позволяет производителю в полном объеме использовать принцип наследования наилучших технических решений прошлых разработок.

Такой подход актуален, когда речь идет о небольшом устройстве, выполняющем типовой набор функций. Целью разработки такого устройства вновь, как правило, является повышение его качественных характеристик.

При рассмотрении КБО как объекта проектирования, очевидно, что лишь часть его функций являются типовыми. Каждый новый КБО отличен от аналогов не только качественными показателями, но и функционально. Рассматривая архитектуру ИМА задача разработки структуры комплекса становится еще более сложной. Производители выпускающие КБО ИМА, имеют в своем распоряжении огромный опыт разработок лишь федеративных комплексов. К тому же особенности самой архитектуры приводят к тому, что производитель вынужден каждый КБО ИМА разрабатывать практически «с нуля».

1.3 Постановка задачи исследования

Подведем итоги анализа и сравнения КБО трех различных типов. Очевидным фактом является то, что все три типа архитектур в процессе исторического развития тесно связаны друг с другом. Переход от одной архитектуры к другой нельзя назвать ступенчатым, это плавный процесс, имеющий неравномерный характер. Применение архитектуры КБО того или иного типа происходило вплоть до возникновения явных трудностей достижения поставленных задач.

Как видно из проведенного анализа, основной проблемой КБО первого типа стало наличие линейной зависимости между массогабаритными характеристиками и функциональностью комплекса. Необходимость перехода от КБО первого типа к КБО второго типа появилась в результате наращивания возможностей ВС. Постепенно количество средств автоматики и исполнительных механизмов на борту ВС стало очень многочисленным. Это позволяло делать ВС более манев-

ренными, легко управляемыми и увеличивать их геометрические размеры. Вместе с тем это привело к увеличению количества пультов управления (ПУ) и индикаторов рабочих параметров каждого из исполнительных механизмов. В итоге нагрузка на экипаж стала недопустимо большой. Сложилась ситуация, когда надежность ЛА была достаточно высока, но сложность управления им приводила к очень высокой вероятности ошибки экипажа. Безопасность эксплуатации ВС в итоге оказалась не высока. Такая ситуация фактически может быть названа кризисом КБО первого типа.

Кризис КБО первого типа определил дальнейшее направление эволюции авионики. Для всех очевидным фактом стало то, что необходимо ряд функций, выполняемых экипажем автоматизировать, а управление многими механизмами и узлами ВС и вовсе перевести в автоматический режим. Таким образом, острая потребность в автоматизации рабочих процессов ВС привела к необходимости внедрения мощных БЦВС, способных реализовывать сложные логические функции. Развитие этой концепции привело к формированию развитой ЛС на борту ЛА и комплексированию нескольких выполняемых функций в рамках одной БЦВС. Все эти новшества позволили в значительной степени изменить соотношение функциональных и массогабаритных характеристик КБО.

Кризис КБО второго типа, как и первого типа, тоже был связан с проблемой наличия прямой зависимости между количеством систем и функциональностью комплекса. Однако в сравнении с кризисом комплексов первого типа задача снижения массогабаритных характеристик стояла не столь остро. Главной проблемой стало наличие большого количества линий коммутации в составе ЛС. Суть проблемы была в том, что количество линий связи сильно увеличивается при внедрении каждой новой системы в состав комплекса. Этот факт ограничил возможности дальнейшего наращивания функциональности комплекса без снижения уровня отказобезопасности. Таким образом, возникла проблема реализации качественной высокоскоростной ЛС, которая бы позволяла легко масштабировать состав и функциональность КБО.

Стоит заметить, что рост высотно-скоростных и маневренных параметров современных ВС и их многозадачность требуют от комплекса не только высокой надежности и точности информации, но и высокой скорости ее предоставления. Структура алгоритмов управления механизмами и узлами ВС, сбора и индикации информации построена по последовательно параллельному принципу. Количество звеньев последовательных цепей управления некоторыми устройствами очень велико. В итоге, общее время задержки в вычислительных трактах приводит к низкой скорости управления исполнительными механизмами.

Таким образом получается, что кризис КБО второго типа вызван сразу несколькими взаимосвязанными причинами:

- Сильная зависимость функциональных характеристик КБО от массогабаритных;
- Сложность обеспечения требуемого уровня качества ЛС;
- Необходимость повышения скорости обработки полетных данных.

Решением кризиса КБО второго типа стал процесс глубокой интеграции ПО и АО, то есть переход к архитектуре ИМА. Частичная реализация концепции ИМА в масштабах систем еще на рубеже 21 века показала высокую эффективность данной архитектуры. Благодаря многочисленным НИОКР на сегодняшний день является возможным создание АО крейта, которое в достаточной мере удовлетворяет требованиям концепции ИМА [44, 45].

Сложность создания полноценного КБО ИМА состоит в трудности реализации свойств независимости ПО и АО, а также открытой архитектуры. Причинами этого являются:

- Высокая степень сложности создания ОСРВ, обладающей свойством реконфигурации;
- Высокая сложность организации структуры ПО комплекса;
- Высокая загруженность ЛС межмодульного обмена данными;
- Невозможность полного отказа от применения специализированных модулей.

Эти сложности приводят к тому, что решение каждой технической задачи в ходе проектирования КБО ИМА является уникальным. Из-за этого процесс проектирования КБО ИМА применяемый на сегодняшний день не позволяет полноценно реализовывать все преимущества данной архитектуры. Проектирование производится упрощенно:

- Свойство независимости ПО и АО в полном объеме реализуется только для небольшой части функций комплекса;
- Повышение надежности за счет применения механизма реконфигурации реализуется лишь частично, по-прежнему приоритет отдается методу резервирования;
- АО КБО лишь условно обладает свойствами открытой архитектуры.

Существующие методы проектирования структуры КБО ИМА не позволяют эффективно решить данные задачи. Единственным существующим методом решения является итерационный процесс проектирования структуры комплекса и ее оптимизации в ходе разработки. Однако такой метод проектирования сопровождается следующими недостатками:

- Высокий риск в виду большой вероятности ошибки по причине человеческого фактора;
- Эффективность разработки напрямую зависит от уровня квалификации проектировщиков;
- Высокие трудозатраты;
- Высокие временные затраты.

Все это приводит к невозможности отказаться от применения принципа наследования, что фактически ведет к реализации КБО второго типа, на базе АО ИМА.

Проектирование КБО ИМА подразумевает решение двух смежных задач – проектирование АО и ПО. Для решения каждой из этих задач на сегодняшний день разработаны методы и способы построения структуры и ее оптимизации. Проектирование АО производится на основе принципов композиционного проек-

тирования, системно-структурного и системно-функционального подходов. Проектирование ПО производится при помощи методов объектно-ориентированного программирования, функционального программирования и т. д.

В основе всех этих концепций заложен принцип приоритета либо АО, либо ПО. Это позволяет в зависимости от конкретного объекта проектирования выбрать подходящий метод оптимизации и достичь поставленных задач [46, 47].

Концепция ИМА подразумевает формирование библиотек программных модулей, которые будут универсальны по отношению к АО – принцип независимости ПО и АО. То есть реализация программного модуля производится без ориентации на конкретный вычислитель. Таким образом привязка к определенному аппаратному модулю теряется. А значит и провести оптимизацию структуры ПО под конкретную платформу АО КБО ИМА невозможно. Это приводит к возникновению некоторой неопределенности в данном вопросе. Теряется оптимизационная связь между АО и ПО. Возникает необходимость поиска новых точек соприкосновения структур ПО и АО и принципов их оптимизации относительно друг друга.

Учитывая то, что реализация ПО и АО производится в рамках задачи реализации конкретной функции КБО, то очевидно, что параметры функций и их характеристики (атрибуты) будут напрямую влиять на структуры ПО и АО комплекса. Таким образом, можно рассматривать функцию, как иерархически более высокий элемент КБО по отношению к АО и ПО.

Количество функций, выполняемых в рамках комплекса очень велико. Обозначим множество функций комплекса как:

$$F(f_1, \dots, f_a),$$

где a – количество функций комплекса.

Все функции комплекса являются сложными и могут быть разделены на некоторое количество подфункций, а те в свою очередь еще на некоторое количество подфункций. Таким образом можно утверждать о наличии связей между

функциями. Возникает задача построения структуры функций, которая решается на иерархически более высоком уровне проектирования относительно ПО и АО.

Для того чтобы построить структуру функций, необходимо определить элементы и правила ее построения. Для этого введем понятие архитектуры функций. Понятие архитектуры как таковое является неоднозначным и в каждой предметной области интерпретируется по-разному [48 - 52]. Локализуясь в области информационных технологий можно выделить некоторые из определений, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Определения архитектуры

Определение	Стандарт
Архитектура – это базовая организация системы, воплощенная в ее компонентах, их отношениях между собой и с окружением, а также принципы, определяющие проектирование и развитие системы.	ГОСТ Р ИСО/МЭК 27033-1-2011: Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Безопасность сетей. Часть 1. Обзор и концепции.
Архитектура – это описание (модель) основного устройства (структуры) и связей частей системы (физического или концептуального объекта, или сущности).	ГОСТ Р ИСО 15704-2008: Промышленные автоматизированные системы. Требования к стандартным архитектурам и методологиям предприятия.
Архитектура – это описание (модель) основного устройства (структуры) и связей частей системы (физического или концептуального объекта, или сущности).	ГОСТ Р 54136-2010: Системы промышленной автоматизации и интеграции. Руководство по применению стандартов, структура и словарь.
Архитектура – это набор правил для определения структуры системы и взаимосвязей между ее частями.	ГОСТ Р ИСО/МЭК 10746-2-2000: Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Управление данными и открытая распределенная обработка. Часть 2. Базовая модель.

На основе приведенных определений архитектуры введем понятие архитектуры функций системы.

Архитектура функций системы – это базовая структура устройства, воплощенная в ее функциях и их отношениях между собой.

Взаимодействие структур функций, АО и ПО между собой, представлено на рисунке 14.



Рисунок 14 – Взаимодействие структур функций, АО, ПО

В соответствии с принятой концепцией иерархического превосходства структуры функций над структурами АО и ПО, первая из них будет определять основные свойства последующих.

Опираясь на тот факт, что функциональный облик любой системы определяется до того, как будет произведено проектирование АО и ПО, можно утверждать, что оптимизация структуры функций на ранних стадиях проектирования позволит спрогнозировать и изначально принять верные ключевые решения по проектированию структур ПО и АО. Это в свою очередь позволит ускорить и снизить трудоемкость процесса проектирования КБО ИМА.

1.4 Результаты и выводы

1. Анализ развития структур КБО показал, что при переходе от одного типа к другому повышается уровень типизации АО и в значительной степени усложняется ПО комплексов.

2 Работы по проектированию КБО на основе принципов ИМА ведутся уже более 20 лет, в настоящее время структура АО всех КБО ИМА в достаточной сте-

пени типизирована и представляет собой резервированный крейт с набором модулей. Однако, существующие КБО ИМА не обладают рядом желаемых свойств:

- применением только унифицированных модулей, поддерживающих многозадачный режим эксплуатации;
- открытой архитектурой АО и ПО;
- независимостью ПО и АО.

Причиной этого можно считать отсутствие процесса и отлаженных методов проектирования, учитывающих в полной мере особенности построения КБО ИМА.

4 Для процесса проектирования КБО на принципах независимой и федеративной архитектур характерно масштабное применение принципа наследования технических решений, что позволяет гарантировать качество создаваемого изделия, его отказобезопасность и сохранять достаточно высокий уровень оптимизации структуры комплекса в целом.

Использование принципов организации КБО предыдущих типов при разработке комплекса, создаваемого на принципах ИМА (их наследование), в значительной степени нивелирует преимущества архитектуры ИМА, уровень оптимизации структуры КБО ИМА оказывается низким.

5. Для достижения максимальных преимуществ структуры ИМА требуется при проектировании КБО минимизировать использование принципов организации предыдущих типов, для чего необходимо разработать метод проектирования, который позволит оптимизировать структуру КБО ИМА и гарантировать его соответствие требованиям качества и отказобезопасности.

6. Для решения поставленной задачи предложено использовать концепцию иерархического превосходства структуры функций над структурами ПО и АО. Для этого введено понятие архитектуры функций комплекса и поставлена задача разработки метода автоматизированного оптимизационного проектирования структуры функций КБО.

2 ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОЦЕССУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ФУНКЦИЙ КБО ИМА

Типовой процесс проектирования КБО регламентируется множеством различных нормативных документов международного, государственного и отраслевого уровней. Поэтому, при разработке методики проектирования структуры функций КБО ИМА необходимо учесть требования данных документов.

Выполним анализ нормативной документации регламентирующей типовой процесс проектирования КБО.

2.1 Анализ нормативной документации регламентирующей типовой процесс проектирования КБО

В соответствии с ГОСТ 34.601-90 процесс проектирования авионики делится на несколько этапов [53]:

- Формирование требований к КБО;
- Разработка концепции проектирования;
- Формирование технического задания;
- Эскизное проектирование изделия;
- Техническое проектирование изделия;
- Формирование рабочей документации;
- Ввод в действие (подготовка и проведение испытаний КБО);
- Гарантийное сопровождение и послегарантийное обслуживание.

Каждый этап заканчивается формированием соответствующей документации с фиксацией результатов проделанной работы. Переход от одного этапа к другому осуществляется по итогам оценки проделанной работы в ходе завершеного этапа и принятия основополагающих решений о проведении следующего.

Проектирование авионики для ВСГА должно осуществляться на основе стандартов и руководящей документации, к которым относятся:

- Документация AP МАК, EASA и FAA по нормам летной годности и сертификации авиационного оборудования;
- Документация AP МАК, FAA, EASA, ARINC, RTCA и SAE по процессам разработки, испытаний, сертификации и производства бортового оборудования;
- Национальные стандарты РФ;
- Стандарты ANSI/VITA и разрабатываемые нормативные документы ОАК по НИР «Конструктор КБО», «ИМА-Конструктор», «ИМА-Интеграция».

Подробный список данных нормативных документов представлен ниже:

- AP МАК Авиационные правила. Часть 21. Процедуры сертификации авиационной техники (АП-21);
- AP МАК Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории (АП-25);
- AP МАК P-25-11A. Руководство по сертификации систем электронной индикации самолетов транспортной категории;
- AP МАК ТТ-ВП. Технические требования к самолетам транспортной категории, выполняющие всепогодные полеты;
- AP МАК Руководство P-4754 по процессам сертификации высокоинтегрированных сложных бортовых систем воздушных судов гражданской авиации;
- AP МАК Руководство P-4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования самолетов гражданской авиации;
- AP МАК КТ-254. Руководство по гарантии разработки бортовой электронной аппаратуры (проект);
- AP МАК КТ-153. Аппаратные элементы систем интегрированной модульной авионики;
- AP МАК КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования;

- АР МАК Квалификационные требования КТ-178В. Требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники;
- RTCA DO-248B/EUROCAE ED-94B, Final Report for Clarification of DO-178B «Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification»;
- EASA Certification Memorandum (SWCEH-002). Software Aspects of Certification;
- ARINC 653. Avionics Application Software Standard Interface;
- IEEE Std 830-1998 Recommended Practice for Software Requirements Specification;
- IEEE Std 1233-1998 Guide for Developing System Requirements Specification;
- ISO/IEC 15289 Systems and software engineering – Content of systems and software life cycle process information products (Documentation);
- АР МАК Циркуляр 21.1 «Сертификационные документы». Первое издание;
- ГОСТ 19.201-78 Техническое задание, требования к содержанию и оформлению;
- ГОСТ Р 15.201-2000 СРПП. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство;
- ГОСТ 19.202-78 Спецификация. Требования к содержанию и оформлению;
- ОСТ 1 00132-97 Надёжность изделий авиационной техники;
- ОСТ 1 02785-2009 Воздушные суда гражданской авиации. Эксплуатационно-технические характеристики;

- ГОСТ 2.004-88 Единая система конструкторской документации. Общие требования к выполнению конструкторских и технологических документов на печатающих и графических устройствах вывода ЭВМ;
- ГОСТ 2.102-68 Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов;
- ГОСТ 2.104-68 Единая система конструкторской документации. Основные надписи;
- ГОСТ 2.105-95 Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам;
- ГОСТ 2.106-96 Единая система конструкторской документации. Текстовые документы;
- ГОСТ 7.32-2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления;
- ГОСТ 2.124-85 Единая система конструкторской документации. Порядок применения покупных изделий;
- ГОСТ ВТ 0019-001-2006 Программное обеспечение встроенных систем. Требования к содержанию и оформлению документов;
- DOC 9613 AN/937 Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN);
- DOC 8168 OPS/611 Производство полетов воздушных судов;
- DOC 4444 ATM/501 Руководство по разработке функций авионики. Организация воздушного движения;
- DOC 8071 Руководство по испытаниям радионавигационных средств. Том II. Испытания спутниковых радионавигационных систем (GNSS);
- DOC 9863 AN/461 Руководство по бортовой системе предупреждения столкновений (БСПС).

При разработке КБО ИМА дополнительно вступают в силу следующие документы:

- ANSI/VITA 46.0-2007 VPX Baseline Standard (Базовый стандарт VPX);
- ANSI/VITA 48.0-2010 Mechanical Specification for Microcomputers Using Ruggedized Enhanced Design Implementation (REDI) (Конструкции микрокомпьютеров для жестких условий эксплуатации);
- VITA 46.9 PMC/XMC/Ethernet Signal Mapping to 3U/6U on VPX User IO (Назначение сигналов ввода-вывода и Ethernet-мезонин PMC/XMC для стандарта VPX с форматом модулей 3U и 6U);
- IEEE 1386.1-2001 Standard Physical and Environmental Layers for PCI Mezzanine Cards: PMC (Стандарт на физический уровень и окружающие условия для мезонинных плат с интерфейсом PCI).

Представленный перечень нормативной документации позволяет типизировать процесс разработки авионики и сделать его полностью контролируемым. С этой целью в процесс проектирования внедряются необходимые для контроля качества процессы. Одним из основных таких процессов является – процесс оценки безопасности. Работы по оценке безопасности проектирования КБО производятся в соответствии со следующими документами:

- Руководство Р-4754 по процессам сертификации высокоинтегрированных сложных бортовых систем воздушных судов гражданской авиации;
- Руководство Р-4761 по методам оценки безопасности систем бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации.

Отдельные под процессы, являющиеся частью процесса оценки безопасности, регламентируются документами:

- ГОСТ В 20436-88 Изделия авиационной техники. Общие требования к комплексным программам обеспечения безопасности полета, надежности, контроле пригодности, эксплуатационной и ремонтной технологичности;

- ГОСТ В 23743-88 Изделия авиационной техники. Номенклатура показателей безопасности полета, надежности, контроле пригодности, эксплуатационной и ремонтной технологичности;
- ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения;
- ОСТ 1 02776-2001 Эксплуатация техническая авиационной техники по состоянию. Основные положения;
- ГОСТ 27.310-95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения;
- ОСТ 1 00132-97 Надежность изделий авиационной техники. Методы количественного анализа безотказности функциональных систем при проектировании самолетов и вертолетов;
- КТ-160D Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового оборудования. Требования, нормы и методы испытаний;
- КТ-178В Требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники;

К современным КБО в обязательном порядке предъявляется ряд требований по унификации изделий и их взаимозаменяемости, поэтому в техническом задании (ТЗ) на комплекс закладываются требования по стандартизации, унификации и каталогизации в соответствии с:

- ГОСТ РВ 15.207-2005;
- ОСТ 1 027551-94;
- ГОСТ РВ 51725.7-2002;
- ГОСТ РВ 0044-005-2007;
- ГОСТ РВ 0044-006-2007;
- ГОСТ РВ 0044-007-2007;
- ГОСТ РВ 0044-009-2007.

Такой подход зачастую сдерживает темпы внедрения новых технологий в авиационную промышленность, однако минимизирует вероятность ошибок и рисков на стадии проектирования изделий.

2.2 Анализ типового процесса проектирования КБО

Проведем анализ процесса проектирования, соответствующего представленному перечню нормативной документации.

Современный процесс проектирования авионики производится с обязательным соблюдением требований руководств Р-4761 и Р-4754, которые были введены в действие с 1 января 2011 года директивным письмом АР МАК № 05-2010. В этих руководствах и на рисунке 15 представлена «V» - образная модель процесса проектирования авионики.

В соответствии с руководствами процесс проектирования представляет собой сложный итерационный процесс последовательного характера, который тесно связан с процессом оценки безопасности. Весь процесс разделен на этапы и уровни. Этапы проектирования указаны в модели общими формулировками и не противоречат ГОСТ 34.601-90 [54]. В модели разделение на уровни предусматривает разграничение процессов проектирования ВС, КБО, систем и модулей друг от друга и определяет механизмы взаимосвязей между ними. Между уровнями проектирования существуют жесткие иерархические связи. Это обеспечивает единство концепций проектирования модулей в рамках системы, систем в рамках КБО и т. д. [55]. Связи между уровнями отражены в документации, содержащей требования. Требования к любой составной части изделия формируются сочетанием требований верхнего уровня и частных требований. Выделим два основных вида требований:

- Технические требования;
- Требования безопасности.

Технические требования определяют основные технические характеристики, такие как функции, конструктивное исполнение, дизайн изделия, прочность и т. д.

Требования безопасности закрепляют определенные характеристики надежности изделия, формируют перечень мер и процедур для обеспечения и гарантии безопасности проектирования и последующей эксплуатации. Требования безопасности на первый взгляд имеют менее важный приоритет, чем технические. Такое положение дел обстоит в большинстве отраслей промышленности. В силу высокой вероятности гибели людей в случае отказа оборудования ВС в авиационной промышленности требования безопасности имеют крайне высокий приоритет.

Модель, представленная в Р-4754 и Р-4761 является совмещенной моделью процессов проектирования и оценки безопасности. Из нее видно, сколь тесно современный процесс проектирования КБО связан с процессом оценки его безопасности. При чем можно сказать, что процесс оценки безопасности фактически определяет ход процесса проектирования. Множественные анализы оценки безопасности на каждом из уровней проектирования выполняют роль главного критерия перехода между ними. Причем критерием ограничен не только процесс завершения этапа проектирования, но и его начало. Столь высокая контролирующая роль процесса оценки безопасности является результатом реализации концепции сквозного проектирования авионики [55, 56].

Произведем разделение представленной на рисунке 14 модели на две части, одна из которых будет моделью процесса проектирования, а другая – моделью процесса оценки безопасности. А затем выполним анализ этих процессов по отдельности.

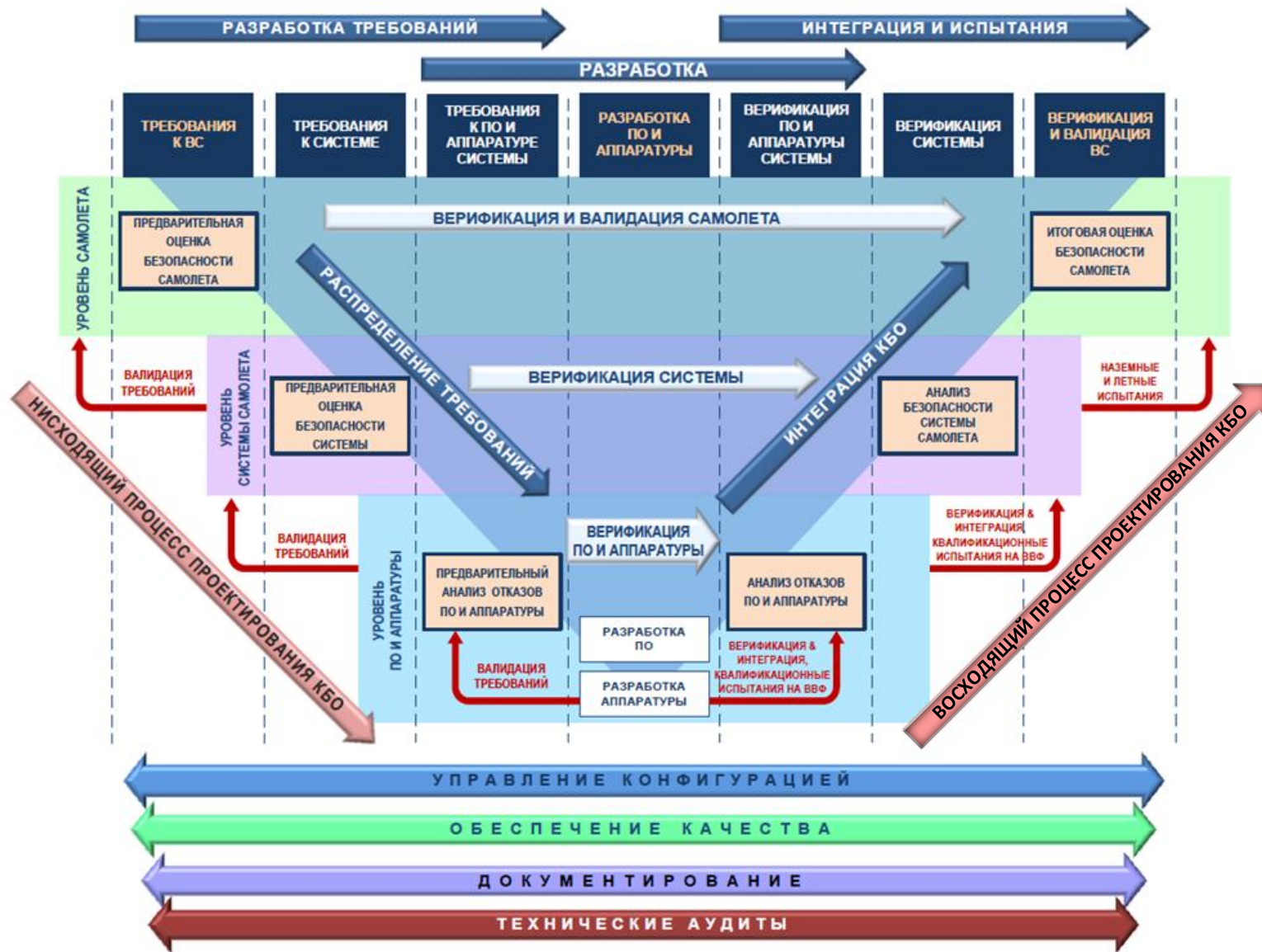


Рисунок 15 – Модель процесса проектирования авионики [4, 5]

2.2.1 Модель типового процесса проектирования КБО и ее анализ

На рисунке 16 представлена модель процесса проектирования КБО, разработанная на основе действующих нормативных документов и модели представленной на рисунке 15. Как видно из модели, исходными данными для начала эскизного этапа проектирования изделия являются данные ТЗ. Данные ТЗ интерпретируются как требования и определяют основные характеристики КБО. На основе данных ТЗ разработчик первым делом приступает к разработке схемы деления (Е1) и функциональной (Э2).

Практика показывает, что чем более сложным является изделие, тем менее законченный вид имеют схемы Е1 и Э2 на начальном этапе проектирования. Причиной этого является отсутствие четкого представления о конечной структуре КБО. В случае высокой сложности изделия, перед началом этапа эскизного проектирования дополнительно проводят предпроектное исследование, содержащее теоретические исследования, предназначенные для обоснования принципиальной возможности и целесообразности создания изделия, а также проведения дополнительных работ по определению ключевых концепций разработки. Но несмотря на это в ходе процесса проектирования схемы Е1 и Э2 претерпевают многократные корректировки, что является неоспоримым свидетельством того, что проектирование структуры функций комплекса производится в процессе его разработки методом проб и ошибок.

Первый этап проектирования – это разработка эскизного проекта. Эскизный проект – это совокупность документов, содержащих принципиальные решения и дающих общее представление об устройстве и принципе его работы. На рисунке 17 представлена модель этапа эскизного проектирования. В рамках данного этапа разработчиком выполняется комплекс работ по схемотехнической проработке изделия. Проектируются схемы электрические как на устройства верхнего уровня, так и на все их составные части. Формируются перечни элементов. В ходе схемотехнической проработки изделия разработчиком определяются основные концепции проектирования [54].

Дальнейшие работы в рамках данного этапа связаны с разработкой конструкции изделия и его составных частей. Эта работа начинается с дизайнерской проработки изделия. Проектирование дизайна любого устройства выполняется по нисходящему принципу. Сначала формируется модель устройства целиком. Производятся работы по эргономике и организации рабочего процесса с устройством. Предварительно определяется место расположение органов управления и индикации. Далее производится макетное моделирование составных частей. Макетные модели позволяют приблизительно определить габаритные размеры устройства и его частей, выработать единую стратегию расположения интерфейсов на монтажных панелях и получить общее представление о внешнем виде устройства. При необходимости макетные модели могут быть предварительно детализированы с целью проведения, например, прочностных расчетов или прикидки массы устройства.

По окончании дизайнерской проработки разработчик приступает к процессу моделирования устройства и его составных частей на основе схем и спецификаций на них. Этот процесс выполняется по восходящему принципу. Сначала формируются модели элементов и деталей, указанных в спецификациях. Потом на основе этих моделей производится разработка моделей составных частей изделия. Полученные модели интегрируются в модель устройства разработанную в ходе дизайнерской проработки. Далее производится конструкторская проработка самого устройства.

Таким образом производится детализация модели изделия. Полученная модель подвергается ряду анализов, например, температурному, вибрационному и т. д., по итогам которых формируется перечень замечаний. На основе этих замечаний производится доработка конструкции изделия. По необходимости заменяются составные компоненты и дорабатываются электрические схемы.

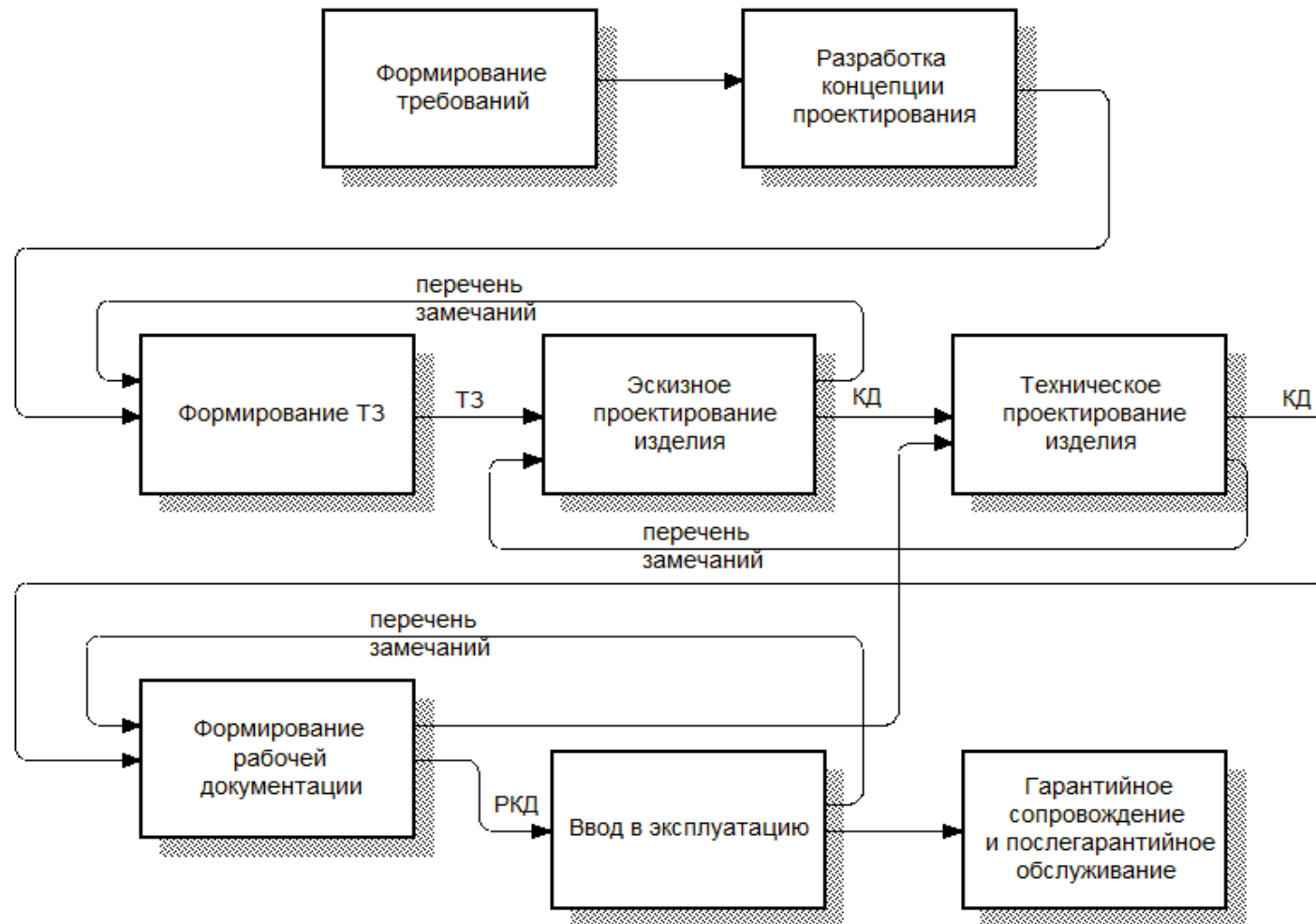


Рисунок 16 – Модель процесса проектирования

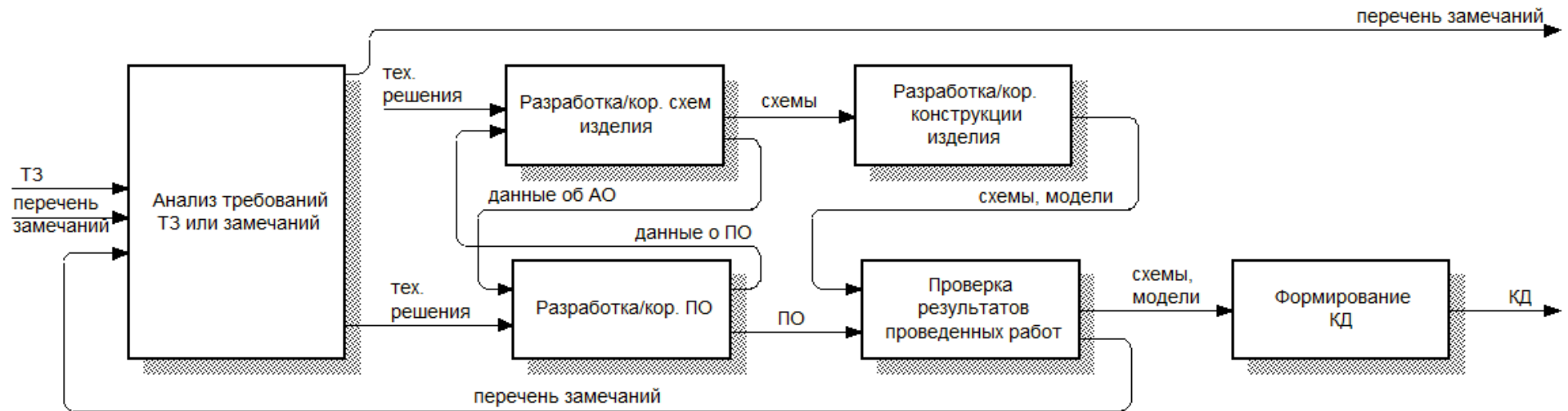


Рисунок 17 – Модель этапа эскизного проектирования

Этап эскизного проектирования считается оконченным, когда разработаны схемы на устройство и все его составные части, а также спроектированы соответствующие модели.

При эскизном проектировании могут параллельно разрабатываться несколько вариантов реализации изделия и даже несколько его видов, основанных на разных физических принципах действия. Все предложенные варианты реализации изделия проходят этап эскизного проектирования и по итогам его завершения производится сравнение их характеристик. Наиболее оптимальный вариант исполнения утверждается.

Следующий этап проектирования – это этап технического проектирования. В ходе данного этапа производится детальная проработка конструкции изделия и его составных частей. Основная работа направлена на выявление недостатков конструкции изделия и их устранение. Ход работы на данном этапе восходящий.

Сначала разработчиком производится разработка частей устройства нижнего уровня, то есть плат и модулей. Формируются модели плат и модулей устройства высокого уровня детализации. На основе этих моделей производятся работы по устранению недостатков. На основе полученных результатов проектирования плат и модулей производится изготовление опытных образцов.

Изготовление опытного образца изделия является первой материальной реализацией проектируемого устройства. Цель изготовления опытного образца – это проверка результатов проектирования на практике. Все опытные образцы проходят тщательный ряд проверок на соответствие их фактических характеристик заданным. Проверяются технические характеристики, прочностные качества конструкции, показатели надежности и т. д. Каждый параметр должен обладать характеристиками не хуже заданных требованиями ТЗ.

На практике крайне редко бывает так, что опытный образец не имеет недостатков. Практически всегда в ходе испытаний опытного образца выявляется ряд недоработок. По итогам проведения утвержденного перечня испытаний формируется соответствующий отчет. По данным отчета производится доработка моделей

плат и модулей устройства. Повторяются анализы моделей и по итогам производится доработка опытного образца, либо его изготавливают заново.

Аналогичный механизм устранения недостатков методом испытания опытного образца применяется на любом из уровней проектирования КБО. Итогом завершения этапа технического проектирования является формирование комплекта конструкторской документации, набора моделей устройства и наличие опытного образца, прошедшего все испытания.

Стоит отметить, что успех реализации опытного образца сильно зависит от качества предшествовавшего процесса проектирования. Лишь в идеальном случае опытный образец дефектов не имеет и отвечает всем заданным требованиям.

Основные исходные данные о КБО доступные для проектирования его структуры функций на ранних этапах разработки содержатся в ТЗ. Проведем анализ типового ТЗ на разработку КБО ВС.

2.2.2 Анализ типового ТЗ на ОКР (СЧ ОКР) по разработке КБО ВС

Процесс проектирования любого модуля, системы, КБО и всего ЛА в целом всегда начинается с формирования перечня требований, которые в последующем будут определять основные характеристики и функциональный облик КБО. Перечень этих требований фиксируется в ТЗ, форма написания которого, его содержание и составные части регламентируются ГОСТ 19.201-78 и ГОСТ 34.602-89 [57, 58].

На первых страницах документа указывается наименование изделия, присвоенный шифр, основания для проведения работ, исполнитель работы и сроки выполнения. Основанием для разработки КБО и проведения соответствующей ОКР являются:

- Решение о проведение ОКР по созданию ВС;
- ТЗ на проведение ОКР.

Следует обратить внимание на тот факт, что зачастую в ТЗ содержатся требования на разработку КБО в нескольких комплектациях [53]. Это делается тогда,

когда ВС планируется выпускать в нескольких модификациях, отличных по назначению. Соответствующим образом это учитывается при присвоении индекса изделия.

Минимальная комплектация может, например, предполагать отказ от ряда специфических систем, таких как:

- Бортовой метеолокатор;
- Система раннего предупреждения близости земли;
- Круглосуточная обзорная система.

При расширении комплектации КБО приобретает специальное назначение: пожаротушение, охрана, спасательные операции и т. д.

Далее в ТЗ указываются область применения и назначение изделия. Область применения комплекса напрямую зависит от назначения воздушного судна. Важнейшим требованием, которое предъявляется в данном пункте ТЗ является определение принадлежности комплекса к ГА или военной авиационной (ВА) технике. В авиации имеется строгое подразделение между ВС ГА и ВА назначения. Это разграничение отражается в наложении огромного ряда ограничений на комплектующие КБО, предъявляемые к нему требования и процесс сертификации. Большинство военных ЛА имеют назначение не применимое в ГА. Однако ВС имеющие, например, транспортное и ряд других назначений зачастую могут быть применимы как в ГА, так и в ВА.

Исходя из целевого назначения ЛА, формируется перечень летных задач. На основе перечня летных задач формируется перечень функций БРЭО. На основе перечня функций БРЭО формируется перечень требований к ним.

Многолетний опыт авиастроительных компаний всего мира позволил выделить как общие, так и специфические требования к каждому типу ВС. Фокусируясь на конкретном объекте проектирования, перечень требований дополняется на основе экспертных анализов, проводимых разработчиком ВС.

Кроме общей принадлежности КБО к ГА или ВА в пункте о назначении изделия дается полное описание того, в каких режимах полета должен функционировать комплекс и какие режимы управления при этом он должен обеспечивать.

Практически все современные ВС поддерживают четыре основных режима управления полетом:

1. Автоматическое управление – процесс программного изменения и стабилизации отдельных параметров движения летательного аппарата или целенаправленного управления траекторией полёта, осуществляемый с помощью средств автоматики без воздействия лётчика на органы управления;
2. Совмещенное управление – режим управления с включенным автопилотом, при котором летчик может вмешиваться в управление с целью изменения параметров полета. По окончании действий пилота комплекс должен обеспечить автоматическую стабилизацию параметров полета, установленных пилотом;
3. Комбинированное управление – режим, при котором в 20 % диапазоне отклонения проводки управления обеспечивается автоматическое выполнение траекторных режимов пилотирования с расширением диапазона до 100 % посредством вмешательства летчика с помощью штатных органов управления по командам директорных приборов вне зависимости от того, включено автоматическое триммирование или нет;
4. Директорное управление – способ управления, при котором для стабилизации движения самолёта на заданной траектории лётчик с помощью штатных органов управления выполняет индицируемые ему директорным прибором команды.

При автоматическом режиме управления все пилотажные функции выполняются системами автопилотирования. При совмещенном и комбинированном режимах управления главные управляющие функции пилотирования возлагаются на пилота, а остальные выполняются КБО. При директорном режиме управления

все функции пилотирования выполняются пилотом, но при этом система автопилотирования продолжает выполнять функции стабилизации полета и формировать директорную информацию.

Каждый из режимов полета должен поддерживаться комплексом при выполнении обширного ряда полетных задач, таких как:

- Трассовый полет по внутренним и международным воздушным трассам;
- Полет по заданному маршруту вне воздушных трасс;
- Маршрутно-трассовые полеты;
- Аэродромные полеты;
- Проведение авиационных работ;
- Точный заход на посадку по первой категории ИКАО;
- Неточный заход на посадку;
- Полет в режиме галсирования по встречно-параллельным курсам;
- Взлет, полет и посадка на морские суда и другие не статичные объекты;
- Другие полетные задачи.

Объем полетных задач и обеспечиваемых комплексом режимов полета в процессе их выполнения напрямую зависит от типа ВС, его назначения и комплектации.

Проектируемый КБО может быть адаптирован для применения на различных ВС. В виду этого в список требований назначения входит перечень летных параметров ВС, по которым формируется перечень ограничений по диапазонам скоростей, высот, угловых отклонений и т. д. Это является необходимым, так как входящие в состав комплекса датчики скорости, угловых положений и другое измерительное оборудование имеют свои диапазоны измерений, которые как правило превосходят максимально допустимые значения пилотажных параметров ВС. Типовой перечень таких параметров следующий:

- Широта географическая – от 80 градусов южной широты до 80 градусов северной широты;

- Долгота географическая – от 180 восточной долготы градусов до 180 градусов западной долготы;
- Беспосадочная дальность полета;
- Максимальное время полета;
- Воздушная скорость продольная;
- Вертикальная скорость подъема / спуска;
- Путевая скорость;
- Абсолютная барометрическая высота;
- Угол курса – от 0 до 359 градусов;
- Угол крена;
- Угол тангажа;
- Угол сноса;
- Угловая скорость вокруг нормальной оси;
- Угловая скорость вокруг поперечной оси;
- Угловая скорость вокруг продольной оси;
- Линейные продольные и поперечные перегрузки;
- Нормальная линейная перегрузка;
- Атмосферное давление аэродрома;
- Температура наружного воздуха;
- Скорость ветра;
- Турбулентность атмосфер.

Следующим разделом ТЗ является раздел «Тактико-технические требования к изделию». В нем производится описание состава комплекса, его назначение и перечень исполняемых функций, требования к техническим характеристикам и т. д. Перечень функций комплекса далее по тексту будем называть функциями верхнего уровня.

Состав изделия в ТЗ изначально представлен в общем виде. В ходе разработки комплекса данный раздел уточняется и перечень входящего в его состав оборудования изменяется или дополняется. Первичный состав изделия формиру-

ется экспертным методом, на основе опыта аналогичных разработок прошлых лет. В состав включается оборудование только верхнего уровня.

В разделе требований назначения на КБО для детального описания его функционального облика приводится перечень функций.

Анализируя типовую градацию и формулировки функций, можно констатировать тот факт, что при составлении ТЗ заранее предполагается построение комплекса на основе федеративной архитектуры. Это отражено в объединении ряда функций под общей формулировкой функции верхнего уровня, как например: «решение задач навигационного обеспечения полета вертолета», «вертолетовождение по запрограммированному маршруту», «функции формирования и отображения ПНИ» и т. д. Так же в ТЗ предписано использование ряда серийных систем. Таким образом, можно сделать вывод о том, что ТЗ носит специализированно-адаптированный под архитектуру комплекса характер.

Далее в ТЗ приводится перечень требуемых погрешностей измеряемых комплексом параметров. Данные требования являются производными от высотно-скоростных и маневренных характеристик ВС. Кроме того, требования к погрешности измерения летных параметров изменяются в зависимости от этапов и режимов полета, выполняемых маневров и погодных условий. Все эти влияющие факторы учитываются при формировании требований к погрешностям измерений.

Далее в ТЗ предъявляются требования к информационным интерфейсам комплекса. В соответствии с данными требованиями электрические линии связи и параметры сигналов, обеспечивающих взаимодействие изделий комплекса между собой и бортовым оборудованием (БО) вертолета, должны соответствовать ГОСТ 18977-79 [61]. Виды информационных связей комплекса с БО должны быть следующими [59, 60]:

- Аналоговые сигналы и дискретные сигналы с характеристиками по ГОСТ 18977-79;

- Кодовые линии связи (КЛС) с характеристиками по ГОСТ 18977-79, РТМ 1495-75 изм. 3, ARINC 429 ч. 1, 2, 3 (АС 1.1.429 ч.1-16-2003, АС 1.1.429 ч.2-15-2003, АС 1.1.429 ч.3-18-2003);
- КЛС с характеристиками по стандарту ARINC 708 (АС 1.1.708А-2003) [61];
- КЛС с характеристиками по стандарту RS – 422;
- КЛС с характеристиками по стандарту RS – 232 (только для связи с наземным оборудованием);
- Входные видеосигналы с параметрами по ГОСТ 7845-92 (кодировка цвета – PAL) [62];
- Входные видеосигналы с параметрами по ARINC 818-1-2, АС 1.1.160F-1-2008 [63].

Все интерфейсы, применяемые в авиационной технике стандартизированы, поэтому предъявление требований к ним сводится к перечислению соответствующих ГОСТов. Для федеративных комплексов основным протоколом обмена данными является ARINC – 429, который позволяет вести передачу данных на скорости до 100 Кбит/с по витой паре [64].

Далее в ТЗ предъявлены требования к электропитанию КБО. Электропитание каждого изделия должно осуществляться от двух независимых каналов системы электроснабжения (СЭС) постоянного тока номинальным напряжением +27 В с качеством электропитания по ГОСТ 54073-2010. Изделия комплекса должны удовлетворять требованиям к приемникам электроэнергии первой и второй категорий по ГОСТ 54073-2010 при нормальном, не нормальном и аварийном режимах работы системы электроснабжения [65]. Изделия комплекса должны сохранять работоспособность при нормальном, не нормальном и аварийном режимах работы системы электроснабжения для оборудования категорий А и В согласно требованиям КТ-160D [66]. При этом допускается потеря работоспособности при перерывах напряжения питания, оговоренных в ГОСТ 54073-2010 в обоих

каналах электропитания одновременно с последующим восстановлением функционирования после восстановления качества электропитания.

Следующим пунктом ТЗ являются требования по радиоэлектронной защите комплекса. Как правило, требования по генерации электромагнитных помех и по уровню напряжений помех соответствуют ГОСТ РВ 6601-002-2008, ГОСТ РВ 6601-001-2008 [67, 68].

Далее в ТЗ предъявляются такие требования к КБО как требования по живучести и стойкости. Данные требования важны при проектировании конструкции КБО и его составных частей. Однако в связи с отсутствием прямого влияния этих требований на процесс проектирования архитектуры функций, в дальнейшем анализе они рассматриваться не будут.

Далее предъявляются требования по надежности. Требования надежности подразделяют на:

- требования отказобезопасности;
- требования долговечности.

В требованиях отказобезопасности указываются значения средней наработки КБО на отказ и на повреждение в полете. Определяются условия состояния отказа комплекса и его повреждения. Так, отказом комплекса считается отказ его систем, приводящий к невыполнению требований назначения. Отказы систем и других частей комплекса, не приводящие к отказу комплекса, вызывают состояние его повреждения. Исходя из определения отказа комплекса, разработчик производит градацию уровней отказобезопасности его функций. Так же отдельно указывается среднее время наработки на отказ и повреждение конструктивно-съемных блоков комплекса.

Требования накладываются и на процессы оценки отказобезопасности в соответствии с ГОСТ27.310-95 и ОСТ 1 00132-97 с определением категорий особых ситуаций, которые могут возникать из-за функциональных отказов. В требованиях долговечности указывается гамма-процентный ресурс работы комплекса и

гамма-процентный срок службы. Срок хранения комплектующих комплекса устанавливается, как правило, на уровне пяти лет, в заводской упаковке.

Далее составляется перечень требований по эргономике, обитаемости и технической эстетике. Данные требования определяют расположение, цветовую окраску, размер органов управления и текстовой информации всех приборных панелей, индикаторов, световых и информационных табло в кабине экипажа. Размещенные в кабине экипажа приборы, должны удовлетворять требованиям АП-29, ГОСТ 19340-91, РЭО-ГА-ОД. Индикаторы и пульта управления комплекса в части компоновки лицевых частей, состава элементов управления, окраски, подсвета, направления перемещения органов управления должны удовлетворять требованиям эргономики в соответствии с АП-29, ОСТ 100533-87, ОСТ 100345-87, ОСТ 100416-90.

Следующий пункт ТЗ – это требования к эксплуатации, хранению, удобству технического обслуживания и ремонта. Определяются такие параметры как [69, 70]:

- Время готовности комплекса к работе;
- Время предполетной подготовки комплекса и его конфигурации в этот период;
- Время непрерывной работы комплекса;
- Периодичность проведения регламентных работ;
- Состав и количество блоков ЗИП.

Описываются требования к хранению изделий комплекса, комплектность различных видов документации и требования к проведению технических работ с комплексом на земле.

При разработке КБО военного назначения в ТЗ предъявляются требования секретности.

Далее в ТЗ предъявляются требования по:

- стандартизации и унификации изделий комплекса;
- каталогизации;

- технологичности;
- конструктиву изделия;
- технико-экономическим характеристикам;
- видам обеспечения;
- сырью, материалам и КИМП;
- консервации, упаковке и маркировке;
- учебно-тренировочным средствам;
- защите государственной тайны;
- порядку разработки конструкторской документации в военное время;
- этапам выполнения ОКР;
- порядку выполнения и приемки этапов СЧ ОКР.

Анализ данных требований в рамках диссертации не производится, так как эти требования не влияют на процесс проектирования структуры функций КБО.

2.2.3 Анализ процесса оценки безопасности КБО

Основным сопутствующим процессом, выполняемым в ходе процесса проектирования, является процесс оценки безопасности. На рисунках 18 и 19 представлена модель процесса оценки безопасности, разработанная на основе требований нормативной документации и модели, представленной на рисунке 15.

Как видно из модели, исходными данными для процесса оценки безопасности являются данные ТЗ на комплекс. На основе этих данных происходит формирование требований безопасности к изделию. Процесс оценки безопасности разделен на две части:

- Формирование требований безопасности (рисунок 18);
- Проверка соответствия фактических параметров изделия заданным требованиям (рисунок 19).

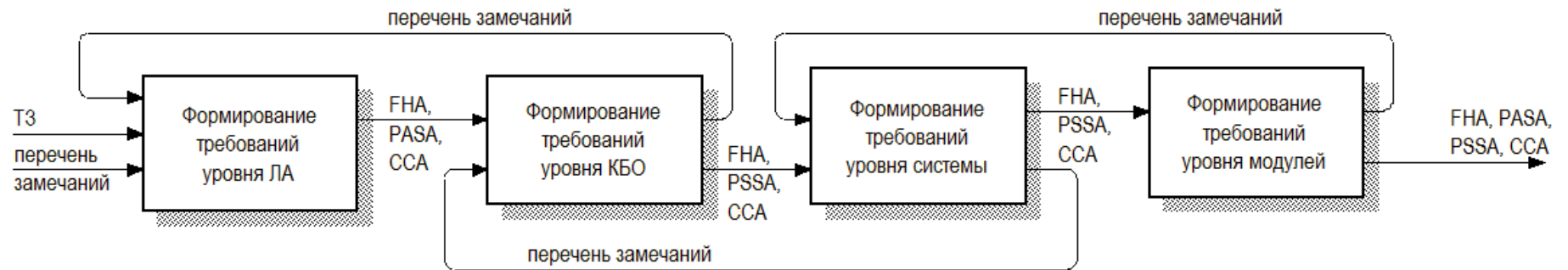


Рисунок 18 – Модель этапа формирования требований процесса оценки безопасности

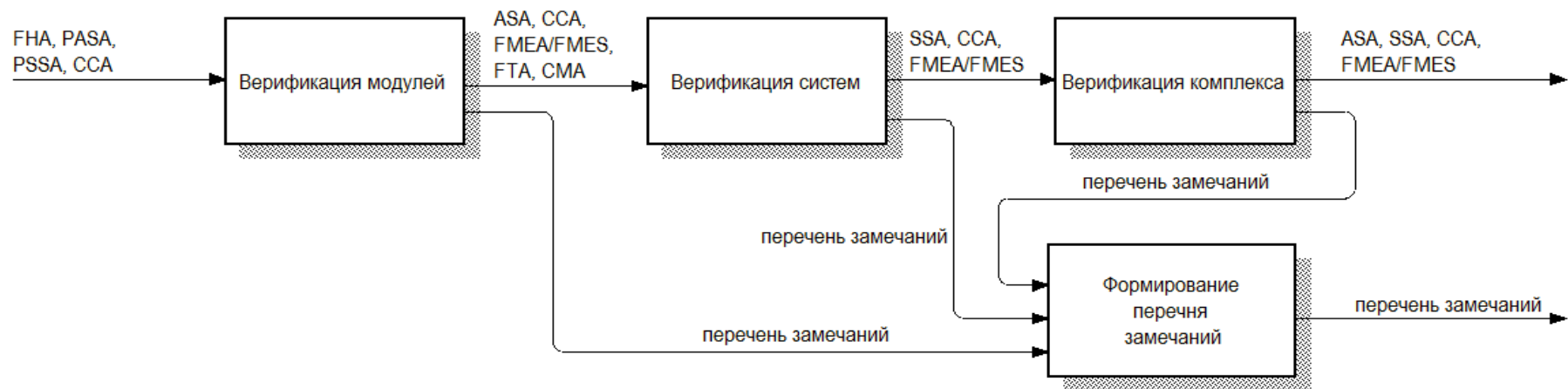


Рисунок 19 – Модель этапа верификации процесса оценки безопасности

Процесс формирования требований состоит в проведении оценки функциональных опасностей. По итогам оценки формируется соответствующий документ - оценка функциональных опасностей (FHA). Данный документ содержит следующую информацию о КБО:

- Перечень функций;
- Фазы эксплуатации изделия;
- Классификация отказных состояний функций;
- Уровни критичности отказных состояний функций;
- Классификация воздействий отказных состояний функций КБО на ВС, экипаж и пассажиров;
- Уровень гарантии проектирования (УГП) функций;
- Требования о необходимости выполнения предварительной оценки безопасности, с оформлением соответствующего документа - предварительная оценка безопасности (PSSA);
- Метод верификации.

FHA выполняется отдельно для комплекса и всех его составных частей, таких как системы, функциональные узлы и т. д. Рассмотрим FHA на комплекс, так как это первый документ формируемый в рамках процесса оценки отказобезопасности после оформления ТЗ [4].

Перечень функций в FHA в отличие от того, который представлен в ТЗ на комплекс, отличается. В FHA перечень функций расширен, за счет включения в него служебных функций, например, таких как межсистемный обмен данными. При формировании первой версии FHA перечень функций из ТЗ корректируется незначительно или может быть идентичен.

В FHA содержится перечень фаз эксплуатации комплекса. Как правило эти фазы являются фазами полета ВС. Указание фаз эксплуатации является обязательным, так как дальнейшие процессы оценки безопасности рассматриваются в привязке к определенной эксплуатационной фазе.

Далее в рамках ФНА производится классификация отказных состояний функций комплекса. Производится формирование перечня возможных состояний устройства в результате отказов его составных частей. Каждое отказное состояние функции приводит к различным последствиям. В зависимости от того, сколь серьезные последствия для ВС влечет за собой отказное состояние производится определение уровня критичности данного отказного состояния [71, 72].

При чем отказные состояния функции могут иметь несколько уровней критичности, в зависимости от фазы эксплуатации.

После завершения процесса классификации и описания последствий отказных состояний функции производится процесс классификации функций по УГП. В соответствии с правилами руководства Р-4761 присвоение УГП функции изделия производится на основе классификации ее отказных состояний.

По окончанию формирования ФНА принимается решение о проведении анализа PSSA. Как правило, если по итогам ФНА хотя бы одна функция имеет УГП выше чем «D», то анализ PSSA считается необходимым.

По окончанию формирования классификации функций в ФНА приводится информация о применении в обязательном порядке дополнительных мер по повышению надежности. Самым часто применяемым способом повышения надежности на сегодняшний день является резервирование [73, 74].

К ФНА разработчик должен прикладывать сформированные в ходе анализа дерева неисправностей (FTA). FTA прорисовывается по нисходящему принципу на основе классификации отказных состояний функций устройства.

По итогам оформления ФНА на устройство в рамках процесса оценки безопасности начинается процесс формирования ФНА на его составные части. Исходными документами для формирования ФНА более низких уровней проектирования являются соответствующие ТЗ на составные части комплекса и ФНА уровня КБО.

Дальнейший процесс оценки безопасности производится после того как завершается этап эскизного проектирования изделия. По необходимости произво-

дится процесс анализа оценки безопасности спроектированной архитектуры, формируется очередная версия PSSA.

Исходными для формирования PSSA данными являются все доступные на текущий момент данные о структуре устройства и его функциях. На основе результатов эскизного проектирования изделия производится анализ и прогнозирование того, сможет ли изделие в представленной конфигурации отвечать заданным требованиям безопасности. При выявлении недостаточного уровня отказобезопасности изделия производится назначение мер по устранению дефектов.

В рамках PSSA выполняется:

- Анализ и корректировка перечня функций;
- Анализ и корректировка перечня требований безопасности;
- Анализ отказных состояний на основе:
 - FTA;
 - идентификации всех требований по независимости отказов;
- Формирование дополнительных требований и назначение обязательных мер по повышению отказобезопасности КБО;
- Формирование требований по проведению анализа общих причин отказов, который оформляется соответствующим документом – анализ общих причин отказов (ССА).

Результаты PSSA в должны подтверждать полное соответствие характеристик изделия заданным. При наличии невыполненных требований безопасности возникает необходимость доработки изделия. Данные PSSA при всех последующих итерациях используются для корректировки ФНА.

Изделие будет считаться соответствующим требованиям безопасности тогда и только тогда, когда все требования безопасности, указанные в ФНА будут подтверждены в PSSA.

Для изделий сложной конфигурации и изделий нижнего уровня может быть выдвинуто требование по проведению дополнительного анализа – анализа общих причин отказов и оформлению отчета ССА.

Целью ССА является обнаружение причинно-следственных связей между различными отказными состояниями функций. Наличие таких связей неприемлемо, если они приводят к множественным отказам, тем более, если это отказы функций с УГП выше уровня «С». Процесс анализа структуры проектируемого оборудования с целью выявления общих причин отказов выполняется как на уровне непосредственно самого изделия, так и на всех более высоких уровнях.

Документы FNA, PSSA и ССА разрабатываются для каждого из уровней проектирования. Весь процесс формирования требований выполняется по нисходящему принципу. По завершении процесса эскизного проектирования и первой части процесса оценки безопасности начинается вторая часть процесса оценки безопасности.

В виду того, что вторая часть процесса оценки безопасности проводится после изготовления опытных образцов изделий и предназначена для подтверждения их соответствия заданным требованиям, то рассматриваться этот этап в рамках диссертационного исследования не будет. Стоит лишь сказать, что в случае выявления несоответствия характеристик изделия требованиям безопасности разработчик обязан устранить выявленные дефекты, что может потребовать изменения структуры функций комплекса.

В процессе оценки безопасности достаточно четко прослеживаются разграничения между уровнями АО и ПО. В ходе проектирования, руководящими документами верхнего уровня являются Р-4761 и Р-4754, но при этом для верификации и контроля процесса проектирования ПО нормативными документами также являются КТ-254 и КТ-178 [31, 75].

По итогам проектирования в соответствии с КТ-254 и КТ-178 производится перерасчет показателей безопасности оборудования исходя из фактических данных. Вновь строится FTA.

2.3 Разработка модели процесса проектирования структуры функций КБО типа «черный ящик»

Произведем разработку модели процесса проектирования структуры функций комплекса типа «черный ящик» на основе проведенных анализов. В соответствии с выше изложенным исходными документами содержащими данные о структуре функций являются ТЗ и ФНА на комплекс [76].

А по итогам завершения процесса проектирования разработчику изделия должна быть предоставлена структура функций КБО, позволяющая провести первичное проектирование структур ПО и АО комплекса, анализ и оценку структуры изделия в целом.

Модель процесса проектирования структуры функций типа «черный ящик» представлена на рисунке 20.



Рисунок 20 – Модель процесса проектирования структуры функций типа «черный ящик»

2.4 Интеграция модели процесса проектирования структуры функций в модель типового процесса проектирования КБО

На основе проведенных анализов всех процессов по-отдельности, а также анализа модели процесса проектирования представленной в руководствах Р-4754

и Р-4761 произведем объединение всех моделей в рамках типового процесса проектирования.

Как было установлено ранее, процесс проектирования структуры функций КБО выполняется в начале этапа эскизного проектирования и не затрагивает другие этапы. Поэтому при интеграции модели процесса проектирования структуры функций КБО в модель типового процесса проектирования комплекса ограничимся рассмотрением модели эскизного этапа проектирования. Модель эскизного этапа процесса проектирования КБО ИМА, включающая процессы оценки безопасности и проектирования структуры функций представлена на рисунке 21.

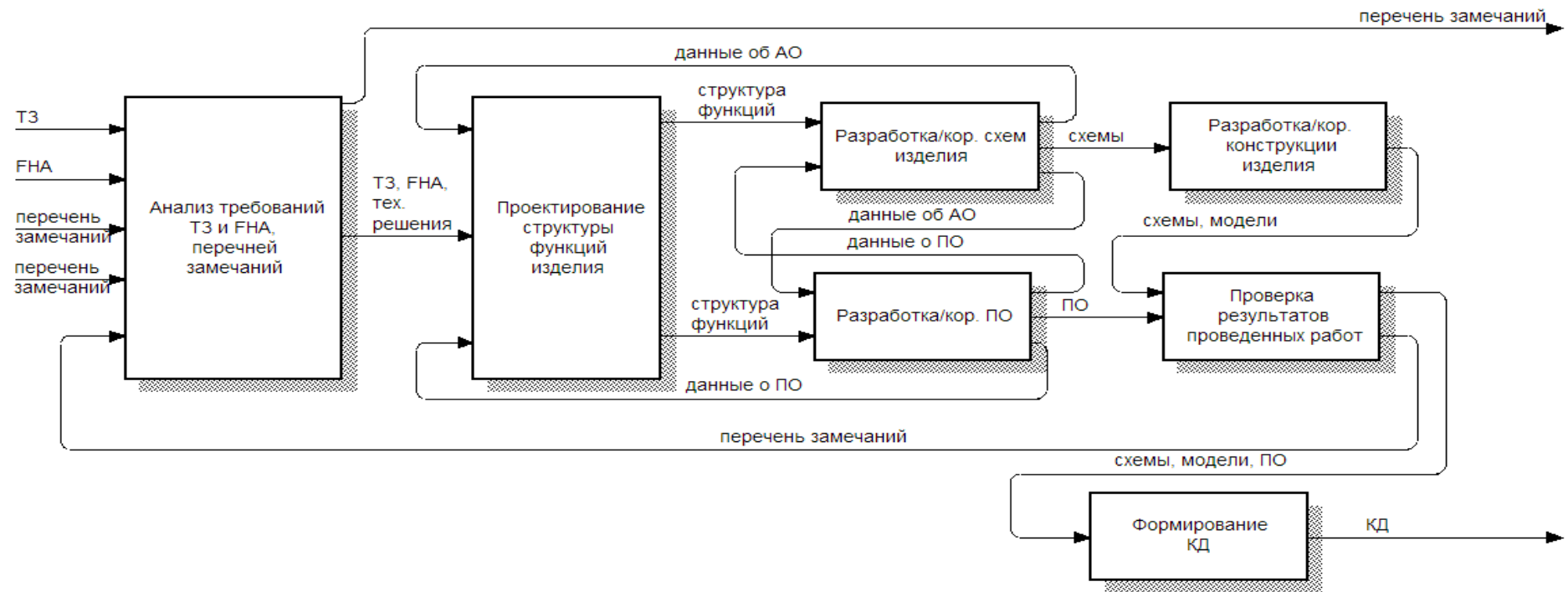


Рисунок 21 – Модель эскизного этапа процесса проектирования КБО ИМА, включающая процессы оценки безопасности и проектирования структуры функций

2.5 Результаты и выводы

1. На основе анализа моделей процесса проектирования авионики в соответствии с руководствами Р-4754 и Р-4761, этапа эскизного проектирования изделия, этапа формирования требований процесса оценки безопасности и этапа верификации процесса оценки безопасности определено место процесса проектирования структуры функций КБО – промежуточная проектная процедура между процессами анализа ТЗ и анализа безопасности и процессом схемотехнического проектирования изделия.

2. Исходные данные для реализации процедуры проектирования структуры функций КБО - перечень обобщенных функций верхнего уровня и первичные данные об их структуре - могут быть получены из раздела "Тактико-технические требования» ТЗ. В данном разделе ТЗ также определен перечень серийных систем, обязательных к внедрению в состав комплекса. Эти системы выполняют фиксированный набор функций КБО, которые не могут быть изменены при проектировании, что необходимо учесть при построении методов и алгоритмов проектирования структуры функций.

3. При проектировании структуры функций КБО должны учитываться данные об УГП функций, а также требования по применению дополнительных мер повышения отказобезопасности, представленные в документах FHA, PSSA и CCA.

4. Построена модель процесса проектирования КБО ИМА, включающая процедуру проектирования структуры функций.

5. Выделение и обособление процесса проектирования структуры функций в общем процессе проектирования КБО позволяет решать данную задачу как оптимизационную, сформировать требования по применению методов повышения надежности и отказобезопасности выполнения функций на ранних стадиях проектирования и дальнейшую разработку КБО производить с учетом данных требований. Выделение и обособление процесса проектирования струк-

туры функций не приводит к ухудшению адаптивности процесса проектирования применительно к федеративным КБО.

3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ФУНКЦИЙ КБО ИМА

3.1 Математическая модель структуры функций КБО ИМА

АО комплекса обладает множеством параметров, к которым относятся, например, массогабаритные характеристики, надежность, прочность, устойчивость и т. д. Однако при проектировании любого устройства всегда ограничиваются рассмотрением некоторого набора параметров, которые наиболее существенно влияют на функциональность. Остальные параметры должны быть обеспечены на достаточном, часто минимально достаточном уровне [116].

В современных КБО, имеющих федеративную архитектуру, по функциональному назначению выделяют системы:

- связи;
- навигации;
- индикации;
- управления полетом;
- предупреждения столкновений;
- метеонаблюдения;
- управления самолётом;
- регистрации параметров полета.

При проектировании КБО на основе архитектуры ИМА подобная классификация типов систем применяться не может, так как архитектура ИМА не предполагает наличия систем. Для классификации структуры оборудования КБО на основе ИМА по функциональному назначению можно выделить [77]:

- измерительное оборудование;
- вычислительное оборудование;
- оборудование индикации и отображения информации;
- оборудование специального назначения.

К оборудованию специального назначения, например, можно отнести: электронно-оптические системы наблюдения, системы поиска и обнаружения целей, системы управления вооружением и др.

С точки зрения оптимизации структуры функций имеет смысл разделить все оборудование на две категории:

- Специализированное АО;
- Универсальные вычислительные модули (ВМ).

К специализированным устройствам отнесем измерительное оборудование, оборудование индикации и отображения информации, оборудование специального назначения. То есть все функции КБО, которые не могут быть реализованы при помощи ВМ будут специализированными.

При решении задачи формирования структуры функций взаимосвязь специализированных устройств и функций однозначна. Это значит, что существует АО обладающее определенными свойствами, которые позволяют ему выполнять строго определенные функции комплекса. Даже если специализированная система является сложной и представляет собой совокупность АО и ПО, то ее функции все равно строго определены. ПО максимально тесно интегрировано в АО системы и тем самым общая эффективность выполнения устройством его функций максимальна.

Обращая внимание на структуру федеративного КБО можно констатировать тот факт, что любая система из его состава как таковая является специализированным устройством.

Те функции комплекса, которые по своей сути являются логико-математическими, и их реализация в основном программная, реализуются на базе ВМ. Для работы такого модуля необходимо обеспечить исходные данные и требуемый объем вычислительных ресурсов. Кроме того, так как полученные значения не могут быть в каком-либо виде представлены пользователю самим ВМ, то еще одной неотъемлемой его функцией будет передача сформированных значений потребителям.

Для эффективного использования ресурсов ВМ должны выполняться следующие условия и требования:

- Количество входных данных ВМ должно быть минимально;
- Количество повторений одинаковых функций должно быть минимально;
- В рамках одного ВМ не может быть реализован более чем один канал резервированной функции;
- ВМ крейта должны быть равно загружены;
- При построении структуры функций должны быть учтены УГП функций.

Снижение количества входных данных ВМ ведет к локализации вычислительных процессов в рамках одного модуля. Исполнение процессов в рамках одного модуля позволяет достичь минимального времени исполнения вычислительного цикла, так как передача данных даже по высокоскоростным интерфейсам вносит ряд задержек. Также следствием соблюдения данного принципа является снижение нагрузки на межмодульные интерфейсы обмена данными.

Достижение минимального количества повторений одних и тех же функций однозначно ведет к снижению общей вычислительной нагрузки и может быть достигнуто благодаря оптимизации структуры функций и реализации функций косвенным методом.

Косвенная реализация функции – это метод реализации функции, при котором ряд входных параметров и ряд данных от вычисляемых подфункций полностью либо частично заменяются аналогичными данными, ранее вычисленными данным ВМ. Такая реализация функций позволяет максимально сократить объем входных данных и снизить суммарную вычислительную нагрузку на платформу, максимально эффективно нагрузив модули.

Функции, реализуемые косвенным методом, в хронологическом порядке выполняются после базовых функций. Следовательно, с точки зрения функции, выполняющейся косвенным методом, выходные параметры базовых функций являются входными. Таким образом, в процессе построения структуры функций об-

разуется иерархическая структура функций, закрепленных за модулем. Такую структуру в дальнейшем будем называть – группа функций (ГФ).

Стоит обратить внимание на то, что методом косвенной реализации недопустимо выполнять функции, которые требуют высокой точности и скорости исполнения. Это связано с тем, что данные, полученные путем математических вычислений часто округляются и являются менее точными, чем данные, полученные от измерительной аппаратуры. Тот факт, что функции, реализованные косвенно, по времени выполняются после базовых функций, необходимых для их исполнения, приводит к появлению временной задержки. Разработчик изделия должен тщательно оценить для всех функций возможность реализации косвенным методом.

Невозможность реализации в рамках одного модуля более чем одного канал резервированной функции определяется принципом независимости резервируемых функций.

Учет УГП функций с достаточно высоким приоритетом позволяет провести градацию ВМ. Проектирование ВМ с более высоким уровнем надежности приводит к значительному повышению себестоимости, по причине необходимости использования дорогой элементной базы, применения различных конструктивных и схемотехнических методов повышения надежности. Исходя из данного факта, можно говорить о том, что учет УГП при формировании структуры функций должен быть произведен с целью максимального сосредоточения функций с одинаковым УГП в рамках ВМ с соответствующим уровнем отказобезопасности [78 - 80].

Опираясь на ранее принятую классификацию АО введем соответствующую классификацию функций комплекса:

- Вычислительные функции;
- Специализированные функции.

Реализация любой вычислительной функции подразумевает реализацию определенных логических и математических зависимостей. На практике - это разработка алгоритма и написание программы.

Специализированные функции однозначно привязаны к специализированному АО и ПО. Если на базе такого устройства реализуется не одна, а ГФ, то ее состав будет строго определен и изменить его возможно только изменив АО и ПО устройства. Поэтому взаимосвязи специализированных функций с АО и ПО являются предопределенными, в связи с этим далее по тексту, если нет дополнительного указания на тип функции, то под функцией будет подразумеваться вычислительная функция.

Как уже было сказано ранее, для реализации любой функции или ГФ необходимо, чтобы аппаратно были обеспечены:

- Множество входных параметров (исходные данные);
- Вычислительные мощности.

В ходе анализа требований, предъявляемых к функциям КБО, было установлено, что обязательным требованием является обеспечение заданного УГП. Эти требования предъявляются как к ПО, так и к АО комплекса.

Анализируя структуру КБО стоит выделить еще один важный параметр – нагрузка на сеть передачи данных. Данный параметр влияет на:

- время, затрачиваемое на выполнение функций КБО;
- надежность выполнения функций;
- достоверность передачи данных по сети.

С точки зрения структуры функций загрузка сети передачи данных определяется количеством передаваемых между ГФ параметров.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что основным элементом архитектуры функций является группа функций. А значит структура функций комплекса в конечном счете будет представлять из себя некоторое количество групп функций взаимосвязанных между собой.

Отразить связи групп функций (g) можно, например, как показано в таблице 3.

Таблица 3 – Таблица связей конечной структуры функций

$g \in G$	Связь $d \in D$	$g \in G$
g_1	d_1	g_2
g_1	d_2	g_3
g_2	d_3	g_3

Данная таблица фактически представляет из себя список ребер графа. Конечную структуру функций (S) комплекса можно представить в виде неориентированного взвешенного графа:

$$S = (G, D),$$

в котором каждой группе функций ставится в соответствие вершина $g \in G$, а связям – дуги $d \in D$, вес которых соответствует количеству передаваемых между группами параметров.

Пример графа, построенного на основании таблицы 3 представлен на рисунке 22.

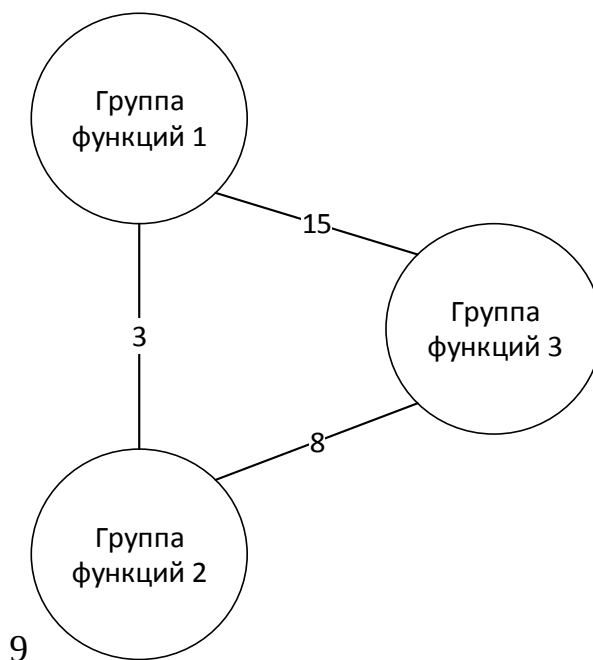


Рисунок 22 – Граф конечной структуры функций устройства

Опираясь на предложенную математическую модель структуры функций можно сделать вывод о том, что ее свойства будут определяться следующими параметрами:

1. Количеством ГФ;
2. Количеством параметров, передаваемых между ГФ;
3. Суммарно необходимым количеством вычислительных ресурсов для ее реализации.

Анализируя свойства структуры функций устройства и ее взаимосвязи со структурами ПО и АО можно сделать вывод о том, что она будет определять следующие параметры данных обеспечений:

АО:

- Общее количество модулей;
- УГП каждого модуля;
- Количество передаваемых по сети передачи данных параметров;

ПО:

- перечень функций, которые требуется реализовать в рамках программного модуля;
- УГП программного модуля.

Состав группы функций будет определять множество входных и выходных параметров, как программного модуля, так и аппаратного.

Таким образом, для формирования структуры функций КБО, обеспечивающей в целом требуемые параметры АО и ПО, необходимо математически описать данную задачу и предложить алгоритм ее решения.

Для этого воспользуемся результатами анализов процесса проектирования, процесса оценки безопасности и типового ТЗ. По итогам проведенных анализов было установлено, что исходными данными для проектирования первичной структуры функций являются:

- Перечень функций;
- УГП функций;

- Перечень входных данных (аргументов) для каждой функции;
- Перечень выходных данных (значений) для каждой функции.

ТЗ регламентирует основные функции устройства. Функции его составных частей определяются методом декомпозиции [81 - 83]. При выполнении данного процесса головные функции делятся на ряд подфункций, которые в свою очередь делятся еще на ряд подфункций и т. д.

Опираясь на то что формирование множества функций устройства производится методом декомпозиции сверху вниз, можно утверждать, что все полученные функции будут связаны иерархически. При этом каждая функция устройства, за исключением головных, будет иметь одну связь с верхней по иерархии функцией. Отобразить множество функций устройства (F) и множество их связей (L) можно как представлено в таблице 4.

Таблица 4 – Таблица связей функций

$f \in F$	Связь $l \in L$	$f \in F$
f_1	l_1	f_{11}
f_{11}	l_2	f_{111}
f_1	l_3	f_{12}
f_{12}	l_4	f_{121}
f_{12}	l_5	f_{122}
f_{122}	l_6	f_{1221}
f_1	l_7	f_{13}
f_{13}	l_8	f_{131}
f_{13}	l_9	f_{132}
f_{132}	l_{10}	f_{1321}

Данная таблица фактически представляет из себя список ребер графа. Структуру функций (P) комплекса можно представить в виде ориентированного графа:

$$P = (F, L),$$

в котором каждой функции ставится в соответствие вершина $f \in F$, а связям – дуги $l \in L$.

Пример графа построенного на основании таблицы 4 представлен на рисунке 23.

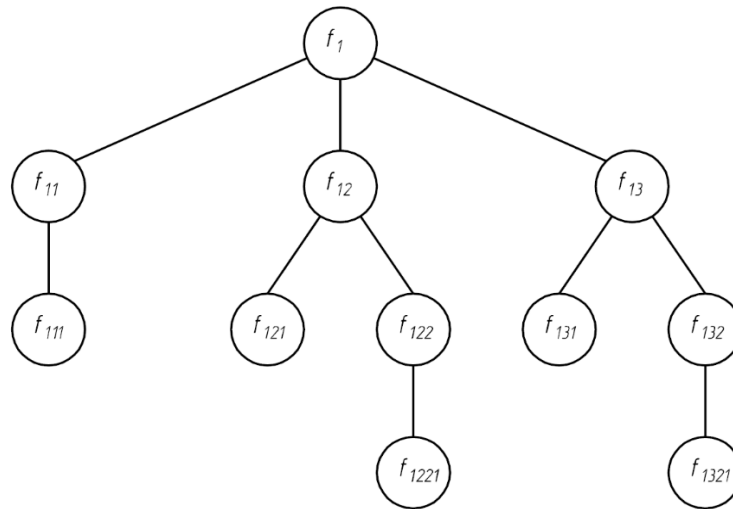


Рисунок 23 – пример графа первичной структуры функций устройства

Анализируя задачу проектирования структуры функций КБО ИМА на основе приведенных математических моделей, исходных данных и результатов проведенных анализов можно сделать вывод о том, что она состоит в построении итоговой структуры функций на основе первичной структуры функций. То есть задача заключается в формировании групп функций и связей между ними на основе исходных данных ТЗ и ФНА на комплекс.

3.2 Исследование структуры функций и анализ возможных методов решения задачи

Как уже отмечалось, исходными данными для проектирования структуры функций являются:

- Перечень функций;
- Уровень гарантии проектирования функций;
- Перечень входных данных (аргументов) для каждой функции;
- Перечень выходных данных (значений) для каждой функции.

Применение декомпозиционного метода для формирования первичного графа функций позволяет сформировать множество всех функций КБО [84]:

$$F(f_1, \dots, f_a),$$

где a – количество функций первичной структуры функций.

Для каждой из которых существует два характеризующих подмножества аргументов X_a и значений Y_a :

$$\forall f_a, \exists X_a \{x_1, \dots x_i\}$$

$$\forall f_a, \exists Y_a \{y_1, \dots y_j\}$$

где i – количество аргументов функции, j – количество значений функции.

Связь функций друг с другом в составе графа первичной структуры функций определяется составом множеств X_a и Y_a .

Кроме множеств X_a и Y_a любая функция характеризуется еще значением УГП и типом. Сформируем множество $S_a \{s_1, \dots s_k\}$ – множество специальных признаков. Для отображения типа функции введем булеву переменную s_1 :

$$s_1 = \begin{cases} 0, & \text{если функция } f_a \text{ специализированного типа} \\ 1, & \text{если функция } f_a \text{ вычислительного типа} \end{cases}$$

Для отображения значения УГП функции введем переменную s_2 :

$$s_2 = \begin{cases} 1 - \text{«катастрофический» (A)} \\ 2 - \text{«аварийный» (B)} \\ 3 - \text{«сложный» (C)} \\ 4 - \text{«усложнение условий полёта» (D)} \\ 5 - \text{«отсутствие влияния на безопасность» (E)} \end{cases}$$

В следствии того, что специализированные функции не являются объектом оптимизации структуры функций, то возникает необходимость сделать выборку функций, подлежащих оптимизации.

По результатам выборки будет сформировано множество:

$$F1(f_1, \dots, f_a), \text{ где } \forall f_a, s_1 = 1$$

Подразделение функций устройства на два типа позволяет изначально определить набор функций, для реализации которых требуется специализированное оборудование.

Проведем анализ механизмов формирования каждого из параметров конечной структуры функций и определим зависимости от параметров функций.

Идеальный случай оптимизации – это когда количество ГФ равно единице. Достижение этого результата возможно только в одном случае, когда ВМ обеспечивает весь объем требуемых для реализации структуры функций вычислительных ресурсов K_S .

Оценка вычислительных ресурсов, которыми обладает ВМ – это сложная задача, требующая комплексного подхода. Для решения данной задачи существует ряд методов. В последнее время наиболее широкое распространение получил метод замера производительности исследуемого объекта относительно эталонного. Для проведения процесса оценки вычислительных ресурсов корпорацией SPEC (Standard Performance Evaluation Corporation) [85] разработан ряд тестов и методик. Результатами данных методик можно воспользоваться и в рассматриваемом случае, однако, в рамках диссертации на этапе формирования методик и алгоритмов построения структуры функций КБО достаточно без потери общего смысла ввести условный коэффициент вычислительных ресурсов (КВР) в виде целого числа от 1 до 100, где 100 – максимальный объем вычислительных ресурсов [6, 7]. Обозначим КРВ ВМ как k_{BM} .

Тогда, при идеальном случае оптимизации будет выполняться условие:

$$K_S \leq k_{BM} \quad (1)$$

Из условия (1) видно, что его выполнение может быть обеспечено уменьшением K_S , либо увеличением k_{BM} .

$k_{\text{ВМ}}$ может изменяться в ограниченном диапазоне, определяемом уровнем используемых ВМ ценовыми параметрами и другими факторами. А величина K_S зависит от методов и способов реализации каждой из функций [86].

Ситуация, когда $K_S > k_{\text{ВМ}}$, разрешается методом увеличения количества ВМ. Тогда условие возможности реализации структуры функций будет следующим:

$$K_S \leq K_{\text{АО}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{АО}}$ – это общее количество вычислительных ресурсов аппаратного обеспечения комплекса.

$K_{\text{АО}}$ может быть вычислено по формуле:

$$K_{\text{АО}} = \sum_{n \in N} k_{\text{ВМ}_n}, \quad (3)$$

где n – количество ВМ.

Учитывая однотипность ВМ используемых в рамках концепции ИМА выражение (3) может иметь вид:

$$K_{\text{АО}} = k_{\text{ВМ}} * n \quad (4)$$

Ограниченность возможностей реальных ВМ является причиной необходимости увеличения их количества. Следствием этого является необходимость дробления структуры функций на части – на ГФ. Количество ГФ будет соответствовать количеству ВМ. Поэтому пусть в дальнейшем n – количество ВМ равно количеству ГФ в структуре.

В ходе ранее проведенных исследований было установлено, что одним из важнейших параметров КБО является УГП (параметр s_2). В соответствии с требованиями нормативной документации, функции аварийного и катастрофического уровня проектирования в обязательном порядке должны резервироваться. При чем резервированию подлежит как ПО, так и АО. Резервирование производится

таким образом, чтобы исключить все возможные причины одновременного отказа основных и резервных комплектов оборудования.

Резервирование негативно отражается на массогабаритных характеристиках комплекса и приводит к удорожанию стоимости его разработки и конечной стоимости. Наглядно оценить степень влияния УГП на конечную структуру комплекса и масштабность применения резервирования можно на примере типовой структуры современного КБО ИМА представленного на сайте «ГосНИИАС», рисунок 24.

Критические функции комплекса рассредоточены по модулям крейта, аналогично распределению критических функций между системами федеративного комплекса. Это обуславливает адекватность резервирования крейта целиком, так как это представлено на рисунке 24.

Рассмотрим ситуацию, когда мы имеем модуль, реализующий сразу все критические функции комплекса. Тогда согласно существующей методологии резервирования дублированию подлежал бы только данный модуль. Таким образом получается, что концентрация критических функций в рамках минимально возможного количества модулей ведет к снижению количества резервирующих модулей.

Анализируя зависимости взаимовлияния основного и резервного комплектов оборудования очевидно, что это влияние одностороннее. Структура и объемы резервного комплекта оборудования целиком и полностью определяются на основе структуры основного комплекта оборудования и исключительно в целях повышения качества второго.

Таким образом получается, что объем требуемого резервного оборудования может быть интерпретирован как еще одна характеристика АО устройства.

На основе сказанного можно утверждать, что сформировать подграф групп резервных функций возможно только после формирования подграфа групп основных функций и на его основе.

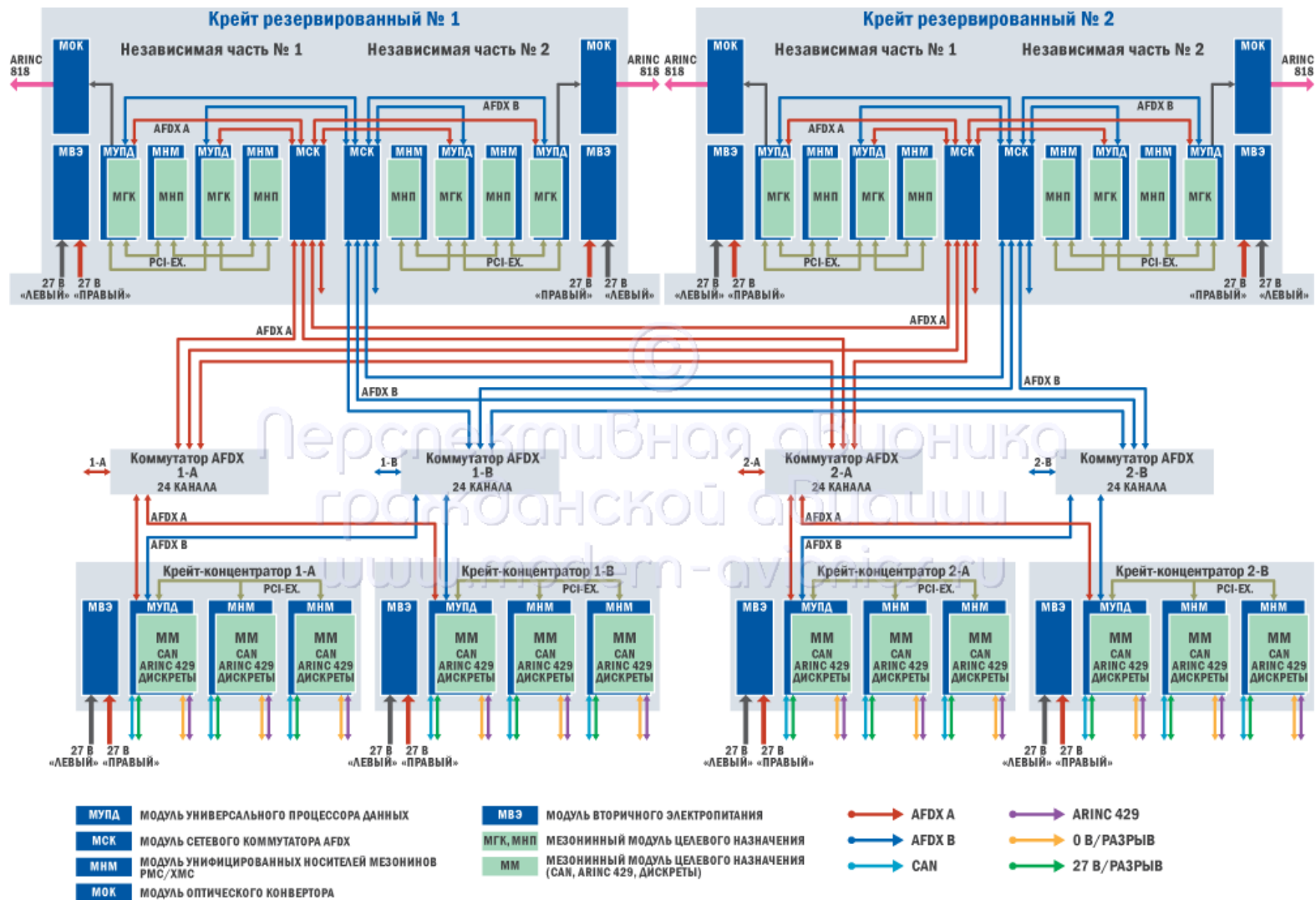


Рисунок 24 – Структурная схема платформы ИМА [87]

При этом, количество групп резервных функций будет определяться исходя из количества групп основных функций, включающих критические функции. Таким образом, именно количество ГФ включающих критические функции будет определять требуемое количество резервного оборудования устройства.

Обозначим количество модулей выполняющих критические функции как z :

$$F: (F1, s_{2a}) \rightarrow z \quad (5)$$

Тогда, на основе выражений (3, 4):

$$F: (n, k_{\text{BM}}, z) \rightarrow K_{\text{AO}} \quad (6)$$

Следовательно, выражение (4) примет вид:

$$K_{\text{AO}} = (n + z) * k_{\text{BM}} \quad (7)$$

K_S зависит от количества функций в составе первичной структуры функций и количества вычислительных ресурсов, требуемых для реализации каждой из них.

На практике КВР каждой функции устройства может быть определен экспертным методом. Этот факт позволяет сделать вывод о том, что для каждой функции известно значение требуемого КВР. Для отображения значения КВР функции введем переменную $s_3 \in S_a$.

На основе значений КВР функций КВР ГФ с некоторой погрешностью может быть вычислен следующим образом:

$$K_{G_n} = \sum_{a \in N} s_{3a} , \quad (8)$$

где s_{3a} – это параметр s_3 функции f_a входящей в состав ГФ G_n .

При всех известных значениях K_{G_n} суммарное количество вычислительных ресурсов для реализации итоговой структуры функций может быть определено как:

$$K_S = \sum_{n \in N} K_{G_n}, \quad (9)$$

Идеальным случаем оптимизации структуры функций по критерию КВР можно считать выполнение условия:

$$K_S = K_{A0}, \quad (10)$$

В силу того, что концепция ИМА предполагает использование унифицированных ВМ, то соответственно K_{A0} может принимать значения, определяемые выражением (7) и кратные значению k_{BM} . А, следовательно, вероятность выполнения условия (10) невелика. Чем более качественно будет проведен процесс оптимизации, тем меньше будет разница между K_S и K_{A0} .

С практической точки зрения, целью вычисления значения K_{G_n} является получение представления о том, сколько потребуется вычислительных ресурсов для реализации программного модуля (ПМ), реализующего группу функций G_n . Говорить о том, что значение K_{G_n} будет в точности соответствовать количеству требуемых вычислительных ресурсов для реализации ПМ ($K_{ПМ}$) нельзя. В зависимости от структуры ПМ, от используемого языка программирования, от используемого алгоритма и других многочисленных факторов значение $K_{ПМ}$ будет изменяться. Но учитывая тот факт, что оценка значений s_{3a} производится на основе уже существующих ПМ, можно утверждать о том, что влияние всех многочисленных факторов будет в значительной мере учтено. Тогда, пренебрегая погрешностью оценки численного значения параметров s_{3a} , будем считать, что выражение (8) справедливо и:

$$K_{G_n} = K_{ПМ_n} \quad (11)$$

В итоге можно сделать вывод о том, что количество ГФ зависит от состава множества функций $F1$ и значения k_{BM} . Но в виду обязательного учета требований УГП:

$$F: (F1, k_{\text{BM}}, z) \rightarrow n \quad (12)$$

Когда ГФ более чем одна и при этом в составе каждой из них есть хотя бы одна функция взаимосвязанная с функцией дугой ГФ возникает необходимость передачи параметров между группами. При повышении количества ГФ количество связей между ними увеличивается, либо не изменяется. Из выражения (12) следует, что количество ГФ зависит от $F1$, k_{BM} и z . А, следовательно, от этих же параметров будет зависеть и количество связей между ГФ. Однако в первичной структуре функций количество связей между функциями от данных параметров не зависит. Необходимость передачи параметра от одной функции к другой выявляется в ходе процесса декомпозиции и зависит от множеств X_a и Y_a каждой из функций. В итоге:

$$F: (n, L) \rightarrow m, \quad (13)$$

где m - количество параметров передаваемых между ГФ.

На основе выявленных зависимостей между исходными данными для проектирования первичной структуры функций и параметрами, характеризующими конечную структуру функций, а также выражений (6), (12), (13) можно сделать вывод о том, что оптимизация структуры функций состоит в минимизации каждого из параметров, ее характеризующих.

Для того чтобы произвести оценку конфигураций структуры функций и сравнить их между собой введем целевую функцию оптимизации y :

$$y = \frac{\Delta}{\Delta n} * n + \frac{\Delta}{\Delta K_{\text{AO}}} * K_{\text{AO}} + \frac{\Delta}{\Delta m} * m \quad (14)$$

Выражение (14) позволяет определить оптимальный вариант конфигурации КБО при условии, что все параметры оптимизации имеют равные приоритеты. Однако на практике в каждом конкретном случае приоритеты между параметрами могут быть различными. Для того чтобы разработчик мог произвести оптимиза-

цию с учетом приоритетных задач проектирования КБО введем весовые коэффициенты a, b, c , тогда выражение (14) примет вид:

$$y = a * \frac{\Delta_{max}}{\Delta n} * n + b * \frac{\Delta_{max}}{\Delta K_{AO}} * K_{AO} + c * \frac{\Delta_{max}}{\Delta m} * m, \quad (15)$$

где:

$$\Delta n = n_{max} - n_{min}, \quad (16)$$

$$\Delta K_{AO} = K_{AO_{max}} - K_{AO_{min}}, \quad (17)$$

$$\Delta m = m_{max} - m_{min}, \quad (18)$$

а Δ_{max} = наибольшему значению среди $\Delta n, \Delta K_{AO}, \Delta m$.

Значения весовых коэффициентов a, b, c определяются экспертным путем из диапазона от 0 до 1. Оптимальная конфигурация КБО будет соответствовать минимальному значению y .

Поставленная оптимизационная задача очень похожа по формулировке на одну из классических задач комбинаторики – мультипликативный рюкзак [88 - 96]. Задав ограничение по КВР модуля нами фактически формируется «рюкзак», для которого КВР – это параметр его вместимости. Каждый предмет, то есть функция комплекса должны быть положены в «рюкзак», так чтобы не был превышен критерий вместимости. Но такой метод решения задачи позволит добиться минимизации лишь K_{AO} , а два других параметра останутся неучтенными.

Существует несколько модифицированных вариантов задачи о рюкзаке, в которых накладываются условия ограничения совместимости. В данном типе задач вводится ограничение на упаковку некоторых вещей совместно. Однако и эта задача не является полноценно схожей с поставленной. Причина в том, что множество условий несовместимости задается жестко и не изменяется, что позволяет использовать этот критерий в качестве ограничения. Применительно к текущей задаче условием несовместимости будет результирующее количество параметров, передаваемых между ГФ. Данный критерий не является жестким и его оптималь-

ная величина становится известна только в конце процесса построения структуры функций. Это не позволяет применить данный критерий в качестве ограничения.

Анализируя другие классические комбинаторные задачи и их модификации можно выделить еще одну задачу – об упаковке в контейнеры. Данная задача заключается в упаковке объектов predetermined формы в конечное число контейнеров predetermined формы таким способом, чтобы число использованных контейнеров было наименьшим.

Примем за параметр объема объекта – КВР функции, а за параметр объема контейнера – КВР ВМ. Такой метод решения задачи позволит добиться минимизации лишь K_{AO} , а два других параметра останутся неучтенными.

Сложность поставленной задачи обуславливается наличием связей между ГФ, которые должны быть оптимизированы. Известные алгоритмы позволяют оптимизировать состав каждой из ГФ. Но оптимизация каждой ГФ в отдельности не означает достижения оптимальности всей структуры функций.

Сложность поставленной задачи оптимизации позволяет отнести ее к классу NP-полных. Решение поставленной задачи требует модификации алгоритма решения одной из приведенных выше задач, либо применения неточных методов решения.

При рассмотрении множества сложных задач структуризации и оптимизации, где количество рассматриваемых элементов велико, количество вариаций конечной структуры становится неприемлемо большим, достаточно часто применяют различные меры для упрощения задачи. Один из распространенных методов, применяемых в рамках композиционного проектирования, системно-структурного и системно-функционального подходов – это выделения иерархических уровней (комплекс, система, модуль). Процессы оптимизации производятся в рамках каждого отдельного уровня и последовательно в целом. При таком подходе общая эффективность оптимизации снижается в результате того, что при переходе от нижнего уровня к уровню иерархически более высокому возможность

изменения структуры каждого из элементов нижнего уровня становится невозможной. Поэтому при оптимизации на более высоком уровне объекты более низкого уровня не могут быть изменены для достижения максимального уровня оптимизации. Данное негативное влияние часто мало и в решении ряда задач им пренебрегают.

По отношению к структуре функций предсказать на сколько при таком подходе может снизиться эффективность оптимизации крайне затруднительно, а так как это влияет на характеристики всего КБО в целом, то применение такого способа нежелательно.

Можно сделать вывод, что точные алгоритмы решения рассматриваемой задачи являются более предпочтительными и поэтому следует рассмотреть все возможные варианты их применения. Для этого в ходе разработки алгоритма оптимизации структуры функций должна быть рассмотрена возможность формирования некоторого перечня ограничений или правил, которые позволят сократить количество вариаций структуры функций до приемлемого уровня.

3.3 Разработка алгоритма автоматизированного проектирования структуры функций КБО ИМА

Из выражений (6), (12), (13) можно видеть, что количество ГФ влияет как на параметр $K_{АО}$, так и на m . Как было установлено ранее, n зависит от исходной структуры функций и свойств самих функций. Свойства функций в процессе построения структуры функций изменены быть не могут. Поэтому, анализируя возможные способы изменения количества ГФ рассмотрим возможность изменения количества функций.

Функциональность устройства определяется требованиями ТЗ, а значит количество функций верхнего уровня не может быть изменено. Однако функциональная структура более нижнего иерархического уровня может быть изменена любым образом, при условии сохранения функциональности устройства [97].

Единственным возможным методом уменьшения количества функций является поиск и устранение повторяющихся функций в составе первичной структуры функций. При анализе первичной структуры функций простейшего устройства вероятность обнаружения повторяющихся функций близка к нулю. Однако с увеличением сложности устройства и его функциональности вероятность обнаружения дублированных функций растет. Таким образом, добиться уменьшения количества функций возможно заменой ряда дублированных функций – одной.

При этом необходимо учитывать, что зачастую проектирование сложных устройств приводит к необходимости намеренного внедрения нескольких дублирующих функций. Например, пусть есть две функции, имеющие идентичные множества $X_a\{x_1, \dots, x_i\}$ и $Y_a\{y_1, \dots, y_j\}$. К первой из них предъявляются жесткие требования по работе в режиме реального времени, при этом допускается достаточно высокая погрешность вычисления. А ко второй функции предъявляются высокие требования к точности вычисления, при этом временные рамки вычислений достаточно большие. В таком случае, логичным решением является дублирование функций.

Для того чтобы учесть наличие таких функций введем булеву переменную s_4 :

$$s_4 = \begin{cases} 0, & \text{если функция } f_a \text{ может быть заменена} \\ 1, & \text{если функция } f_a \text{ не может быть заменена} \end{cases}$$

Таким образом, до начала поиска и замены дублированных функций должна быть произведена выборка функций из множества $F(f_1, \dots, f_a)$, которые могут быть заменены. По результатам выборки сформируется множество:

$$F'(f_1, \dots, f_a), \text{ где } \forall f_a, s_4 = 0$$

Процесс поиска идентичных функций в составе первичной структуры функций будет строиться на основе сравнения характеристик функции. Ранее бы-

ло определено три множества характеризующих функцию: $X_a\{x_1, \dots x_i\}$, $Y_a\{y_1, \dots y_j\}$, $S_a\{s_1, \dots s_k\}$.

Множество S_a содержит данные о классификации функции и требованиях к ней предъявляемых. Поэтому свойства функции, определяемые данным множеством, будут учитываться только при формировании соответствующего множества заменяющей функции. Тогда функции f_a и f_{a+1} будут считаться идентичными, если выполняются следующие условия:

$$X_a\{x_1, \dots x_i\} = X_{a+1}\{x_1, \dots x_i\}, \quad (19)$$

$$Y_a\{y_1, \dots y_j\} = Y_{a+1}\{y_1, \dots y_j\} \quad (20)$$

После того как обнаружены все дублированные функции, необходимо произвести их замену. Заменим ряд дублированных функций одной функцией, которая будет отвечать всем требованиям, предъявляемым к заменяемым функциям. При формировании характеризующих множеств заменяющей функции множества $X_a\{x_1, \dots x_i\}$ и $Y_a\{y_1, \dots y_j\}$ будут идентичны соответствующим множествам заменяемых функций. А вот формирование множества $S_a\{s_1, \dots s_k\}$ будет производиться в соответствии со следующим правилом – значение параметра УГП заменяющей функции будет равно максимальному значению аналогичного параметра заменяемых функций. Таким образом, полученная заменяющая функция будет обеспечивать максимально высокие требования из тех, что были предъявлены к замененным функциям.

Алгоритм выполнения процесса минимизации количества функций представлен на рисунке 25.

Пусть процесс минимизации количества функций в составе первичной структуры функций будет представлен в качестве первого этапа процесса оптимизации структуры функций устройства.

Далее рассмотрим процесс группирования функций. В ходе данного процесса определяются все основные параметры конечной структуры функций.

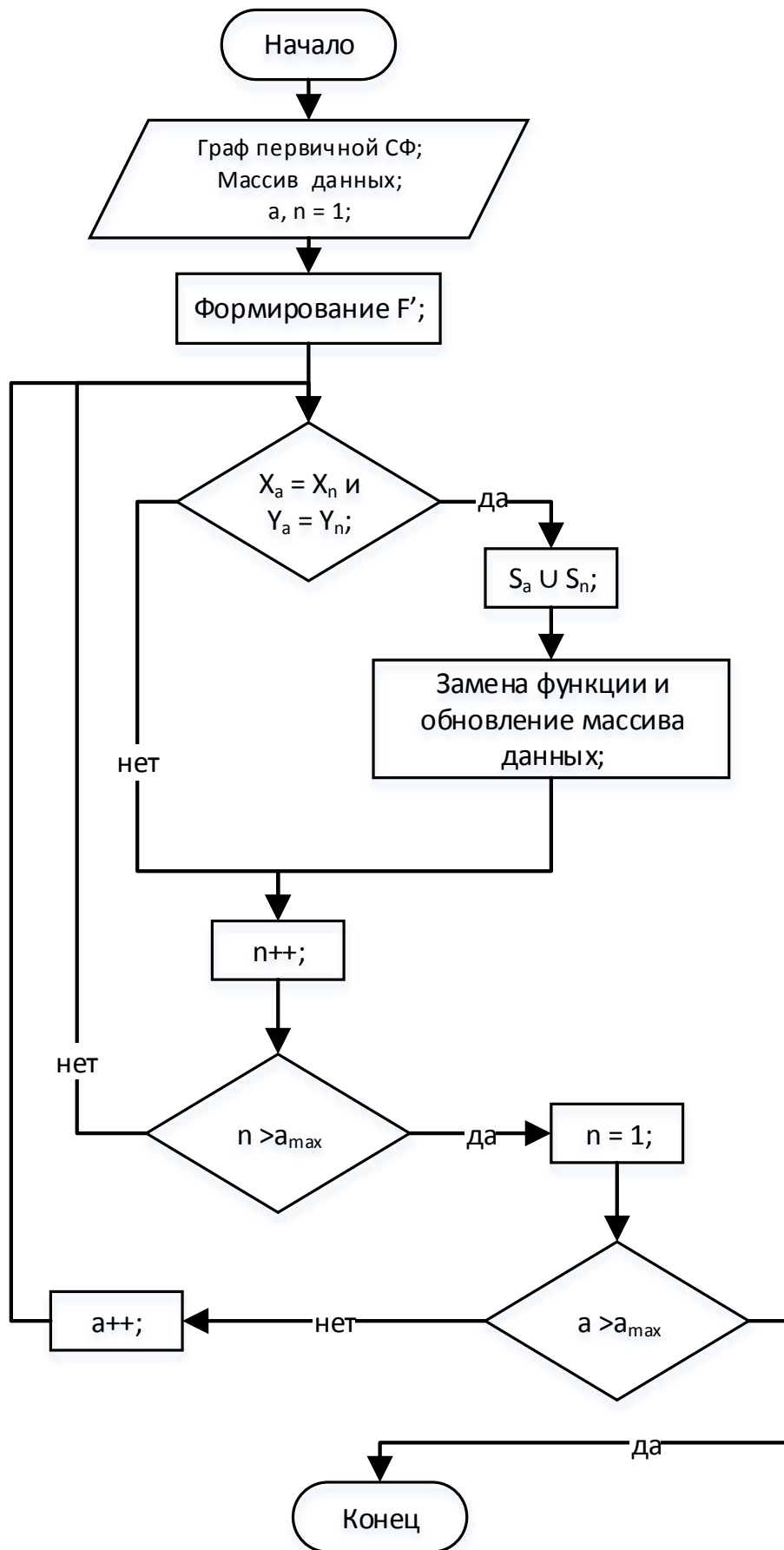


Рисунок 25 – Алгоритм минимизации первичной структуры функций

Каждая функция имеет конечное количество входных и выходных параметров, что определяет количество ее связей с другими функциями в составе первичной структуры функций. При определении набора функций, которые должны быть включены в состав ГФ имеет место определенная зависимость – чем больше функция имеет связей в первичной структуре функций, тем больше ее влияние на количество связей между ГФ.

Рассмотрим пример. Пусть есть множество из 10 функций устройства и ВМ, мощность которого позволяет реализовать любые 9 функций. Тогда, возникает необходимость применить еще один ВМ. Соответственно есть вопрос – какую из функций надо реализовать на втором ВМ, чтобы количество связей между модулями было минимально. Очевидным ответом на данный вопрос будет – минимум связей между модулями будет достигнут при реализации на втором ВМ той из функций, которая имеет меньше всего связей с другими функциями группы. Простейший метод решения такой задачи – это сортировка функций по количеству связей.

При большем количестве функций вариативность решения задачи возрастает и простейшие способы ее решения не будут гарантировать оптимального результата. Однако основываясь на выявленной закономерности можно сформировать следующую логику формирования ГФ.

Первоначально необходимо найти функцию, которая реализуется на основе измерительных данных и имеет наибольшее количество связей с другими функциями. Такую функцию будем далее по тексту называть базовой функцией ГФ. Дальнейшее расширение ГФ производится добавлением функций, связанных с первой. При этом приоритет отдается тем из связанных функций, которые минимально расширяют количество необходимых для реализации группы исходных параметров. Критерием завершения формирования ГФ является ограничение по максимально возможному K_{G_n} .

Теперь введем еще один критерий оптимизации – УГП и рассмотрим простейший пример. Пусть есть множество из 10 функций устройства, 8 из которых

не критические, а 2 критические. И ВМ, мощность которого позволяет реализовать любые 9 функций. Соответственно возникает вопрос – какую из функций надо реализовать на втором ВМ, чтобы количество связей между модулями было минимально и был минимален K_{AO} . Решение такой задачи методом сортировки функций по количеству связей не даст оптимального решения. Очевидно, что наиболее правильно будет две критические функции реализовать на втором ВМ. Такое решение позволит минимизировать K_{AO} , так как в дальнейшем потребуются резервирование лишь одного ВМ.

Опираясь на второй пример решения задачи можно констатировать тот факт, что параметр s_2 каждой из функций очень сильно влияет на конечное решение задачи. В рассмотренном примере решение было получено опираясь на условие большего приоритета критерия УГП. И это условие в конечном счете позволило минимизировать K_{AO} .

При анализе исходных данных было установлено наличие пяти уровней гарантии проектирования. Учитывая тот факт, что влияние УГП может быть приоритетно или нет относительно количества связей функций, то выстраивать сложную систему приоритетов между уровнями УГП и количеством связей функций не имеет смысла. Таким образом, более высоким приоритетом по критерию УГП будут обладать функции, которые требуют резервирования. Функции не требующие резервирования будут максимально оптимизироваться по критерию количества связей.

Такой подход к решению задачи приведет к группированию всех критических функций в рамках минимального количества ВМ. То есть получится группа функций, состоящая из критических функций. Но учитывая тот факт, что простое группирование критических функций в группу приведет к неоптимальному решению задачи по критерию минимума связей между ГФ, то встает вопрос об условии ограничения такого группирования.

Опираясь на предложенный механизм формирования ГФ основанный на объединении в рамках группы лишь связанных функций решение поставленного

вопроса невозможно. Однако, если перейти от условия связности к условию минимального расширения множества входных параметров ГФ, тогда вводя соответствующее ограничение и подбирая его значение можно добиться оптимального распределения.

Введем ограничение на максимальное расширение множества входных данных ГФ одной функцией и обозначим его как R . Чем меньше значение R , тем выше будет учитываться приоритет связей графа первичной структуры функций.

Для формирования ГФ был разработан алгоритм, представленный на рисунке 26.

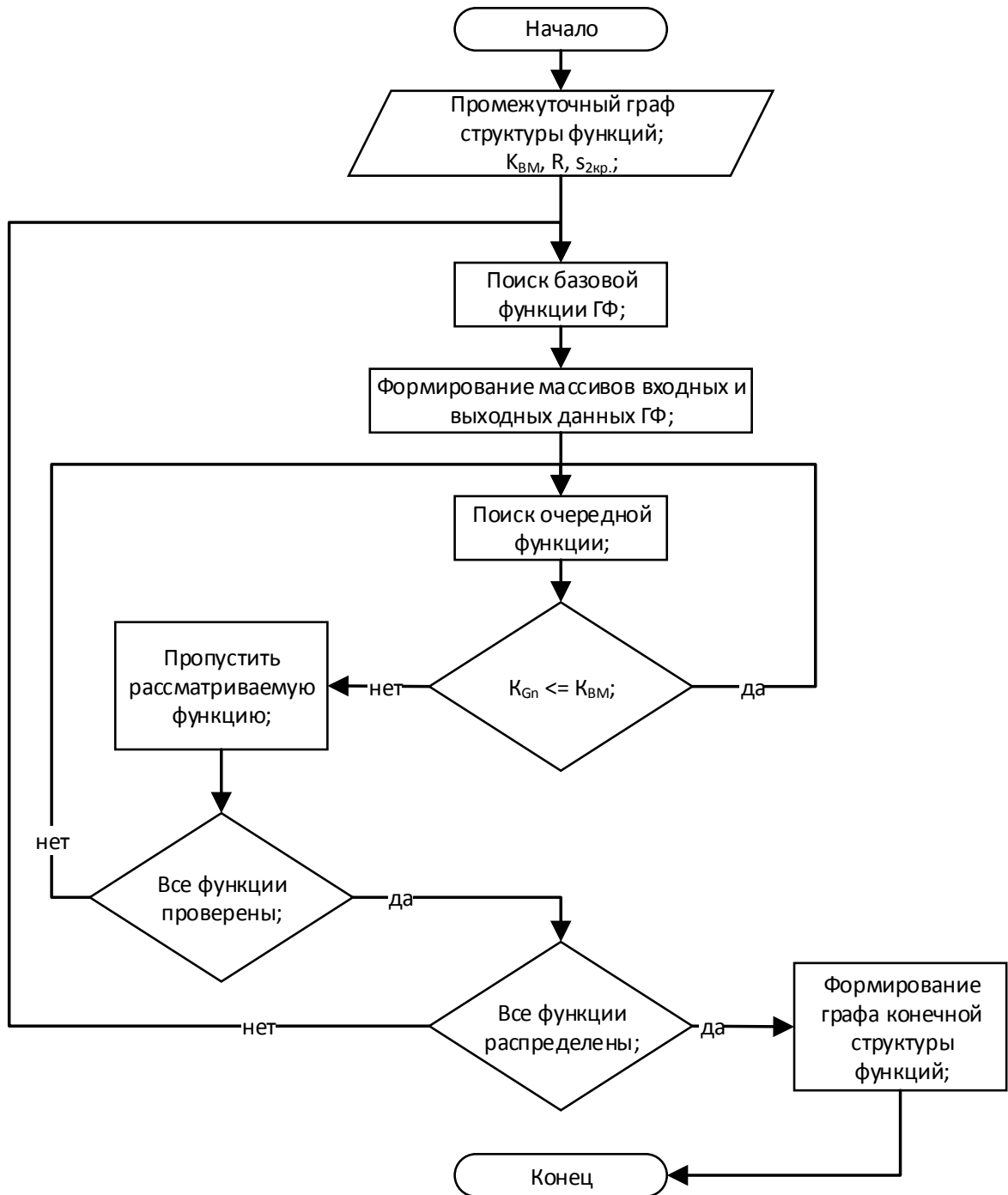


Рисунок 26 – Алгоритм формирования групп функций

На основе всего представленного выше можно построить диаграмму всего процесса проектирования и оптимизации структуры функций КБО, которая представлена на рисунок 27.

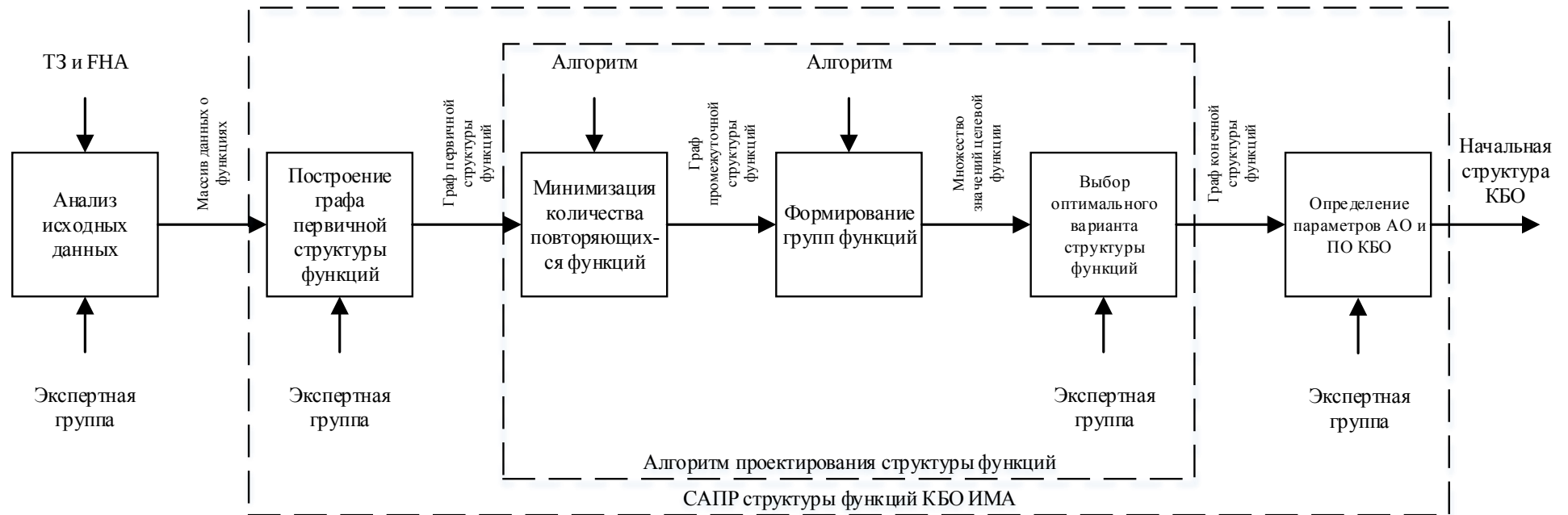


Рисунок 27 – Диаграмма процесса проектирования и оптимизации структуры функций КБО

3.4 Результаты и выводы

1. Предложена графовая модель структуры функций КБО, которая связывает множество входных и выходных параметров функций и их групп, необходимые для их реализации вычислительные мощности, нагрузку на сеть передачи данных и позволяет определять:

для АО КБО:

- необходимое количество вычислительных модулей;
- УГП каждого модуля;
- количество передаваемых по сети передачи данных параметров;

для ПО КБО:

- перечень функций, которые требуется реализовать в рамках одного программного модуля;
- УГП программного модуля.

2. Сформулирована оптимизационная задача достижения заданных функциональных характеристик КБО ИМА через оптимизацию структуры функций, предложены критерии оценки оптимальности и сравнения различных вариантов конфигурации структур функций комплекса.

3. Разработан общий алгоритм построения структуры функций КБО, который позволяет автоматизировать данный процесс при проектировании КБО в формате ИМА и решить оптимизационную задачу структуризации.

4. Разработаны частные алгоритмы минимизации количества функций в структуре и формирования групп функций.

5. Математическое описание структуры функций, алгоритмы ее построения и оптимизации служат основой для построения средств САПР КБО ИМА на этапе проектирования данной структуры.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ФУНКЦИЙ КБО ИМА

4.1 Оценка результатов работы алгоритма

Для того чтобы исследовать работу разработанного алгоритма проектирования структуры функций КБО ИМА требуется применить его при разработке нового комплекса. Однако в рамках диссертационного исследования данный вариант не применим. Исследование работы алгоритма будет произведено методом построения структуры функций КБО ИМА на основе данных о функциях типового КБО федеративного типа [20, 98, 99]. Произведем выборку основных функций, которые являются обязательными практически для любого ВС. Основываясь на данных о типовых функциях сформируем первичный граф структуры функций комплекса и массив исходных данных. После чего применим разработанный алгоритм и исследуем изменение конечной структуры функций в зависимости от изменения исходных условий проектирования.

Выбор функций типового КБО был произведен на основе данных изложенных в [20]. Выбранные для проведения эксперимента функции КБО представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Перечень функций типового КБО

№	Наименование функции	УГП	КВР	Резервирование
1	Формирование значения магнитного курса	3	3	
2	Формирование значения истинного курса	3	7	
3	Формирование значения угла крена	2	4	1х
4	Формирование значения угла тангажа	2	4	1х
5	Формирование значения барометрической высоты	2	2	1х
6	Формирование значения геометрической высоты	3	34	
7	Формирование значения приборной скорости	3	5	
8	Формирование значения истинной скорости	2	2	1х
9	Формирование значения путевой скорости	4	22	

№	Наименование функции	УГП	КВР	Резервирование
10	Формирование значения вертикальной скорости	3	12	
11	Формирование значения путевого угла	3	8	
12	Формирование значения текущих координат местоположения	3	28	
13	Автоматическая стабилизация барометрической высоты полета	3	18	
14	Автоматическая стабилизация углового положения	3	15	
15	Автоматическая координация разворота	3	32	

Представленные функции были проанализированы с точки зрения безопасности. Были назначены соответствующие УГП проектирования и определены требования по резервированию функций. На основе ориентировочных данных о типах вычислительных систем, применяемых для реализации тех или иных функций, экспертным путем были назначены КВР. Массивы входных и выходных данных были сформированы на основе данных о серийных системах федеративных КБО и математическом описании данных функций, представленном в учебно-методической литературе. Полное описание функций первичного графа структуры функций представлено в таблице А.1, приложения А.

Первоначально, опираясь на массив исходных данных, был сформирован граф первичной структуры функций. Описание графа в табличном виде представлено в таблице 6, а графическое представление на рисунке Б.1 – Б.4 приложения Б.

Таблица 6 – Таблица связей графа первичной структуры функций

Наименование функции $f \in F$	Номер связи $l \in L$	Наименование функции $f \in F$
Подграф 1		
Автоматическая координация разворота	1	Формирование значения магнитного

Наименование функции $f \in F$	Номер связи $l \in L$	Наименование функции $f \in F$
		курса
Автоматическая координация разворота	2	Формирование значения истинного курса
Автоматическая координация разворота	3	Формирование значения угла крена
Автоматическая координация разворота	4	Формирование значения угла тангажа
Автоматическая координация разворота	5	Формирование значения барометрической высоты
Автоматическая координация разворота	6	Формирование значения геометрической высоты
Автоматическая координация разворота	7	Формирование значения приборной скорости
Автоматическая координация разворота	8	Формирование значения истинной скорости
Автоматическая координация разворота	9	Формирование значения вертикальной скорости
Подграф 2		
Автоматическая стабилизация углового положения	10	Формирование значения магнитного курса
Автоматическая стабилизация углового положения	11	Формирование значения истинного курса
Автоматическая стабилизация углового положения	12	Формирование значения угла крена
Автоматическая стабилизация углового положения	13	Формирование значения угла тангажа
Автоматическая стабилизация углового положения	14	Формирование значения путевого угла
Подграф 3		
Автоматическая стабилизация барометрической высоты полета	15	Формирование значения барометрической высоты

Наименование функции $f \in F$	Номер связи $l \in L$	Наименование функции $f \in F$
Подграф 4		
Формирование значения текущих координат местоположения	16	Формирование значения магнитного курса
Формирование значения текущих координат местоположения	17	Формирование значения истинного курса
Формирование значения текущих координат местоположения	18	Формирование значения угла крена
Формирование значения текущих координат местоположения	19	Формирование значения угла тангажа
Формирование значения текущих координат местоположения	20	Формирование значения истинной скорости
Формирование значения текущих координат местоположения	21	Формирование значения путевой скорости
Формирование значения текущих координат местоположения	22	Формирование значения путевого угла
Подграф 5		
Формирование значения путевой скорости	23	Формирование значения путевого угла
Подграф 6		
Формирование значения истинной скорости	24	Формирование значения приборной скорости

Как видно из представленной модели графа первичной структуры функций, все функции разделились на некоторое количество обособленных подграфов, каждый из которых является независимым. Такое разделение графа первичной структуры функций на части вызвано появлением в ходе декомпозиции функций комплекса множества повторяющихся функций.

Далее, полученный граф необходимо подвергнуть процессу поиска и устранения повторов. Это первый этап оптимизации структуры функций.

По результатам выполнения данного процесса был получен граф структуры функций КБО, который можно назвать промежуточным. Структура данного графа в табличном виде представлена в таблице 7, а его графическое изображение – на рисунке 28.

Таблица 7 – Таблица связей графа промежуточной структуры функций

Наименование функции $f \in F$	Номер связи $l \in L$	Наименование функции $f \in F$
Формирование значения магнитного курса	1	Формирование значения текущих координат местоположения
Формирование значения магнитного курса	2	Автоматическая стабилизация углового положения
Формирование значения магнитного курса	3	Автоматическая координация разворота
Формирование значения истинного курса	4	Формирование значения текущих координат местоположения
Формирование значения истинного курса	5	Автоматическая стабилизация углового положения
Формирование значения истинного курса	6	Автоматическая координация разворота
Формирование значения угла крена	7	Формирование значения текущих координат местоположения
Формирование значения угла крена	8	Автоматическая стабилизация углового положения
Формирование значения угла крена	9	Автоматическая координация разворота
Формирование значения угла тангажа	10	Формирование значения текущих координат местоположения
Формирование значения угла тангажа	11	Автоматическая стабилизация углового положения
Формирование значения угла тангажа	12	Автоматическая координация разворота
Формирование значения барометрической высоты	13	Автоматическая стабилизация барометрической высоты полета

Наименование функции $f \in F$	Номер связи $l \in L$	Наименование функции $f \in F$
Формирование значения барометрической высоты	14	Автоматическая координация разворота
Формирование значения геометрической высоты	15	Автоматическая координация разворота
Формирование значения приборной скорости	16	Формирование значения истинной скорости
Формирование значения приборной скорости	17	Автоматическая координация разворота
Формирование значения истинной скорости	18	Формирование значения текущих координат местоположения
Формирование значения истинной скорости	19	Автоматическая координация разворота
Формирование значения путевой скорости	20	Формирование значения путевого угла
Формирование значения путевой скорости	21	Формирование значения текущих координат местоположения
Формирование значения вертикальной скорости	22	Автоматическая координация разворота
Формирование значения путевого угла	23	Формирование значения текущих координат местоположения
Формирование значения путевого угла	24	Автоматическая стабилизация углового положения

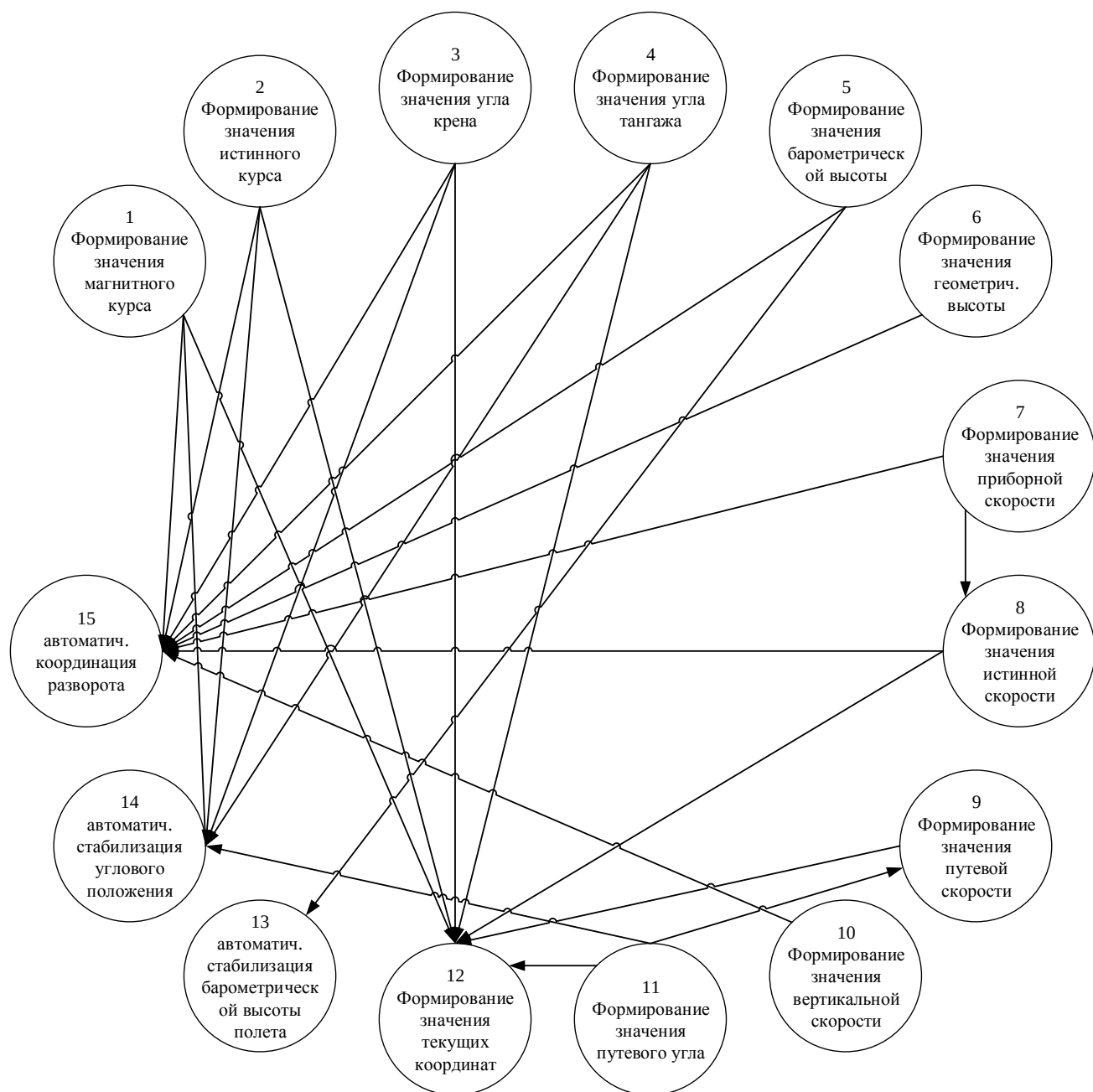


Рисунок 28 – Граф промежуточной структуры функций

Промежуточный граф функций позволяет наглядно оценить изменения структуры функций после первого этапа оптимизации. К тому же дает возможность произвести экспертную оценку, перед разбиением множества функций комплекса на множество ГФ и в случае необходимости внести какие-либо корректировки.

Следующий этап проектирования структуры функций комплекса – это формирование ГФ. Данный этап выполняется по алгоритму, представленному на рисунке 26.

Для того чтобы построить целевую функцию y по выражению (15) первоначально требуется задать весовые коэффициенты a, b, c . То есть определить систему приоритетов между параметрами n, K_{AO}, m конечной структуры функций. Пусть $a = b = c = 1$, тогда приоритет между параметрами будет одинаковым.

Зададим диапазоны изменения параметров оптимизации k_{BM} и R . Нижняя граница диапазона k_{BM} определяется максимальным значением параметра s_3 функций множества $F1$. В данном случае, как видно из таблицы 5, функция формирования значения геометрической высоты требует наибольшего КВР ($s_3 = 34$). Верхняя граница определяется максимально возможным КВР ВМ, то есть она равна 100. Таким образом значение k_{BM} изменяется в диапазоне от 34 до 100. В целях снижения количества экспериментальных данных ограничимся следующими значениями $k_{BM} = 34, 40, 45$ и т. д. до 100, с шагом в 5 единиц.

Диапазон изменения значения R . Нижняя граница диапазона обусловлена свойствами структуры функций комплекса и методологией формирования ГФ, $R = 1$. Верхнее значение диапазона в принципе не ограничено. Однако максимальное расхождение составов множеств входных параметров ГФ и некоторой функций КБО определяется размерностью массива X_a данной функции. В виду этого можно прогнозировать что, когда значение R станет больше чем размерность самого большого из множеств аргументов X_a функций КБО влияние данного коэффициента на структуру функций окажется нулевым. Поэтому в качестве значения верхней границы диапазона изменения значения R примем размерность самого большого из множеств аргументов X_a функций КБО. В данном случае оно равно 9. Таким образом значение R изменяется в диапазоне от 1 до 9 с шагом 1.

Процесс построения множества конфигураций КБО ИМА был произведен методом полного перебора. Полученное семейство кривых целевой функции представлено в виде поверхности на рисунке 29.

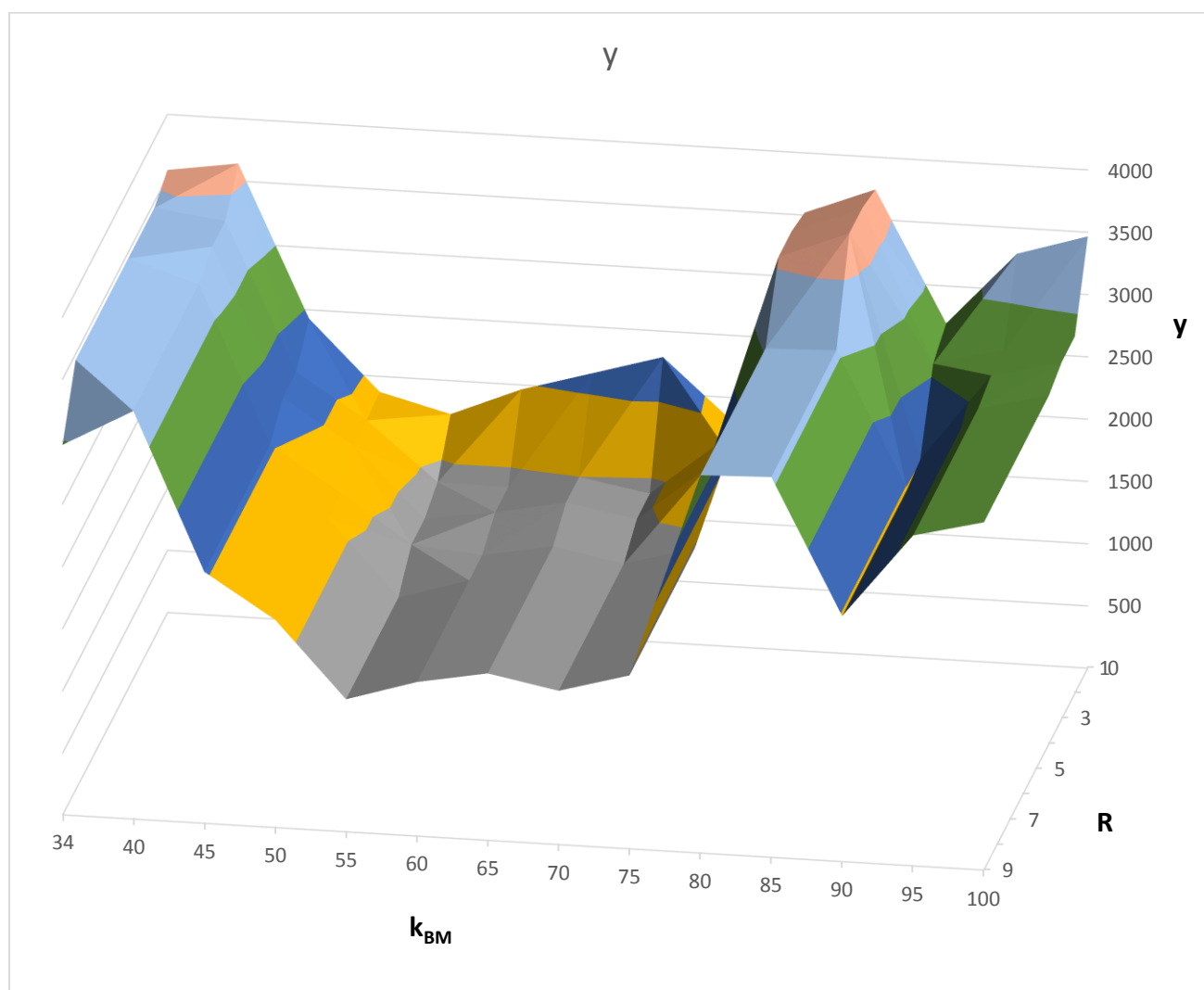


Рисунок 29 – Поверхность значений целевой функции

Как видно из рисунка, общий характер изменения целевой функции неоднозначен. Но при этом позволяет выявить область оптимальных конфигураций структуры функций КБО. Обращая внимание на характер изменения поверхности можно констатировать факт сильного влияния параметра k_{BM} на изменение значений целевой функции. А также увеличение влияния параметра R с ростом значения k_{BM} .

Для того чтобы более детально изучить причины такого характера изменения значений целевой функции необходимо изучить изменение значений каждого из параметров структуры функций КБО в отдельности. Для этого были построены три поверхности. На рисунке 30 представлена поверхность изменения значений параметра K_{A0} . На рисунке 31 представлена поверхность изменения значений па-

раметра m . На рисунке 32 представлена поверхность изменения значений параметра n .

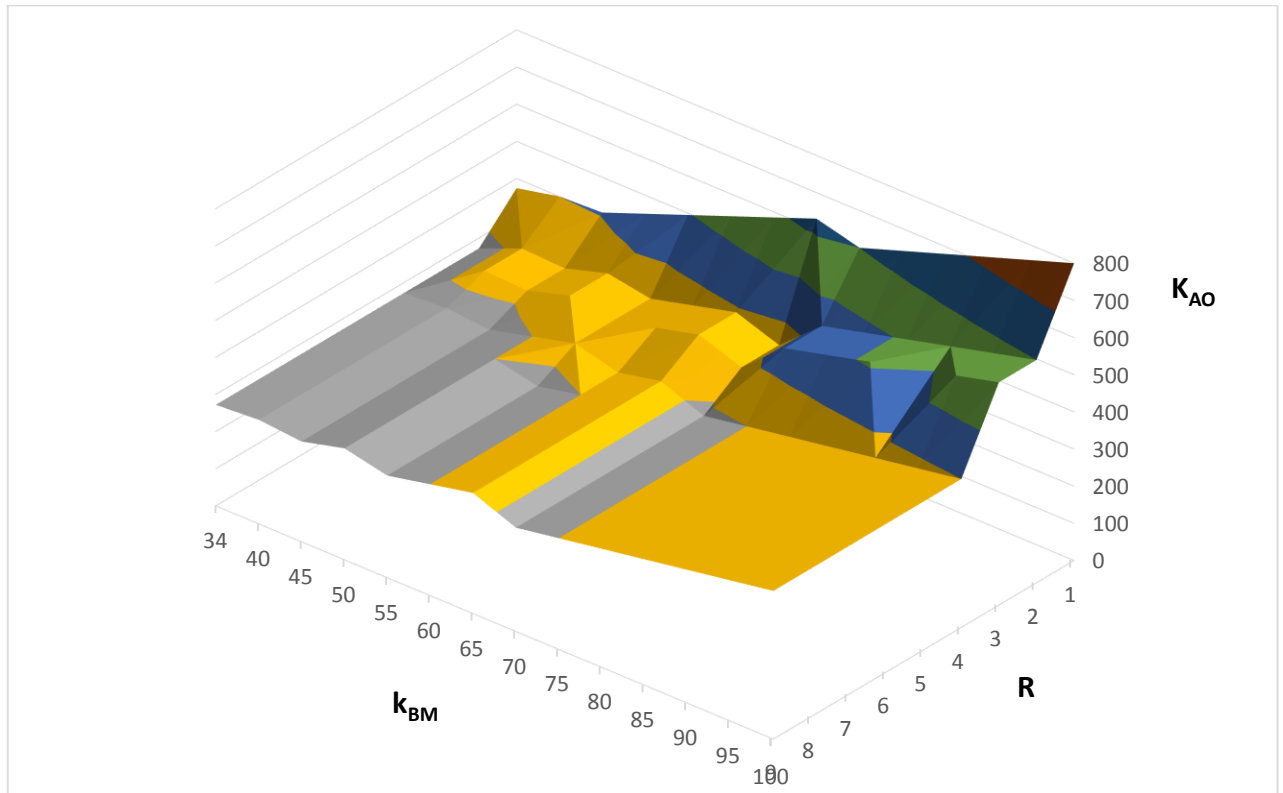


Рисунок 30 – Поверхность значений КВР АО

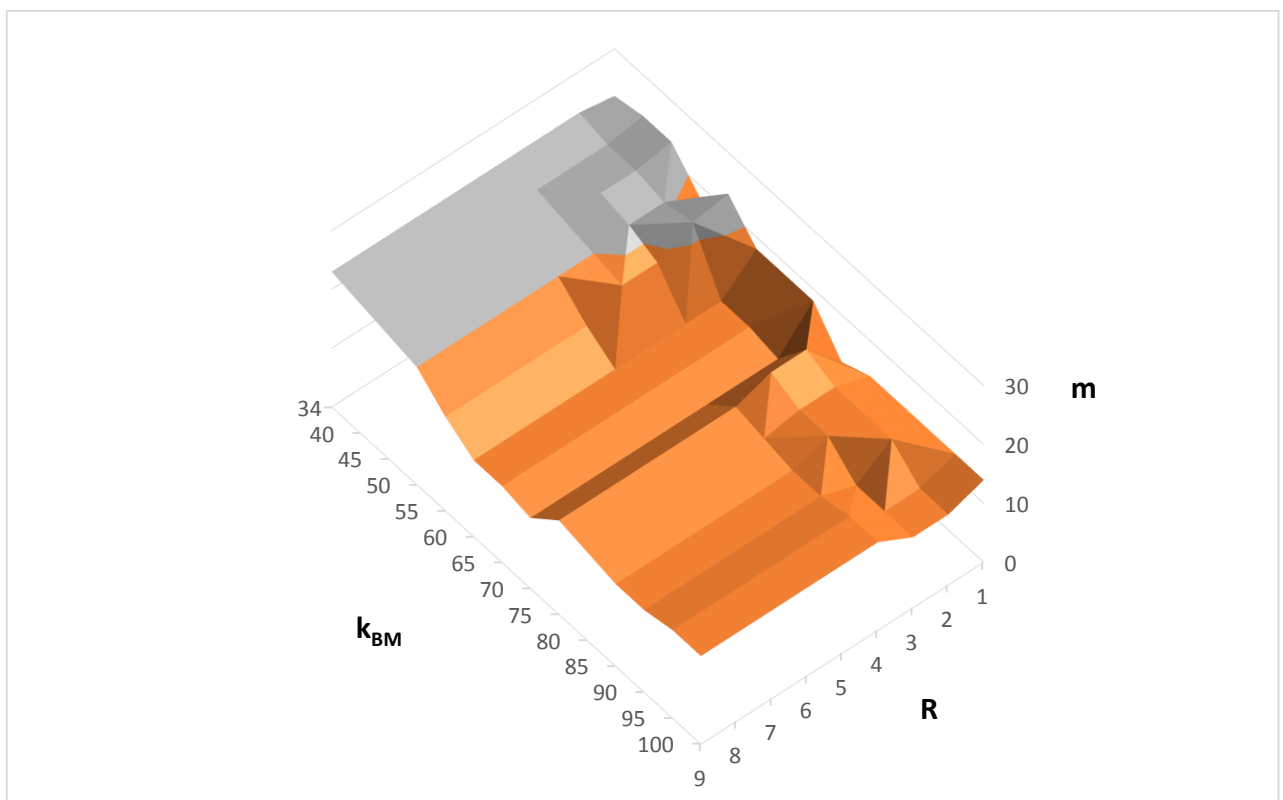


Рисунок 31 – Поверхность значений количества связей

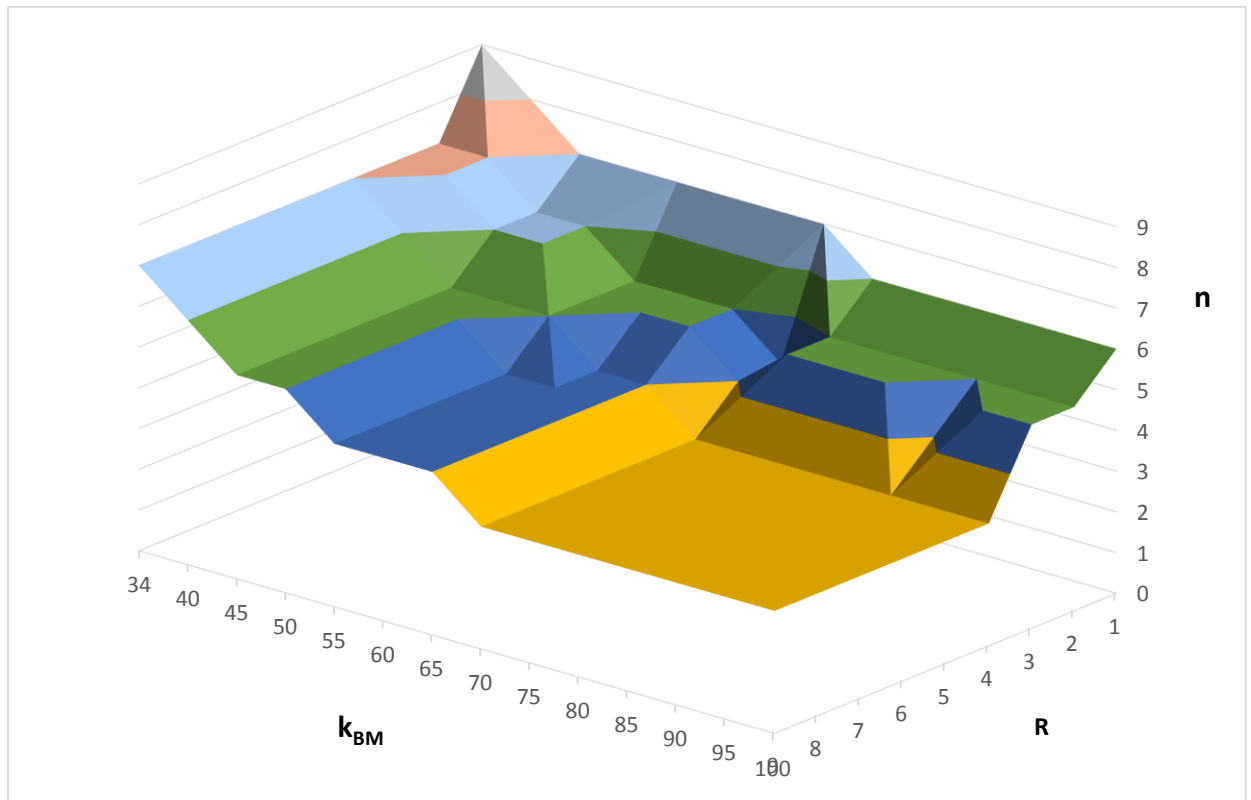


Рисунок 32 – Поверхность значений количества ГФ

Из рисунка 30 видно, что с увеличением $k_{\text{ВМ}}$ характеристика изменения значения $K_{\text{А0}}$ приобретает возрастающий характер. Но при этом имеет место несколько локальных минимумов. Объяснить данное поведение изменения поверхности можно опираясь на выражение (7). Как видно из выражения $K_{\text{А0}}$ может принимать только значения кратные значению $k_{\text{ВМ}}$. Но, как было установлено ранее, величина $K_{\text{С}}$ (КВР структуры функций) зависит только от свойств функций КБО и является постоянной. При выполнении условия (10) можно утверждать, что:

$$\frac{K_{\text{С}}}{k_{\text{ВМ}}} = n + z \quad (21)$$

Выполнение равенства (21) возможно лишь при некоторых значениях $k_{\text{ВМ}}$, при приближении к которым и наблюдаются локальные минимумы на поверхности изменения значений $K_{\text{А0}}$.

Анализируя поверхности, представленные на рисунках 31 и 32, можно заметить, что уменьшение значения R при малых значениях $k_{\text{ВМ}}$ приводит к увеличению количества ГФ и росту количества связей между ними. Но при значениях $k_{\text{ВМ}} > 85$ в явном виде наблюдается уменьшение значения m при малых значениях R . Это свидетельствует о том, что при распределении функций КБО в диапазоне значений $34 < k_{\text{ВМ}} < 85$ распределение по критерию минимального количества параметров, передаваемых между ГФ неэффективно в силу того, что значение $k_{\text{ВМ}}$ ограничивает возможность свободного комбинирования функций. При величине $k_{\text{ВМ}} > 85$ ограничивающее влияние снижается достаточно, для того чтобы эффективно выполнить оптимизацию по критерию минимального количества параметров, передаваемых между ГФ.

В завершении анализа представленных результатов исследования можно сделать вывод о том, что современные тенденции развития высокоскоростных локальных сетей передачи данных способствуют возможности применения менее производительных ВМ. Следствием роста количества ВМ в крейте является повышение его отказобезопасности.

Граф оптимальной конечной структуры функций КБО ИМА определенной по поверхности на рисунке 29 представлен на рисунке 33, состав ГФ и характеристики приведены в таблице 8.

Полный перечень данных о ГФ и конфигурациях структуры функций КБО сформированных в ходе выполнения исследования представлены в приложении В.

Таблица 8 – Характеристики конечной структуры функций

№	Состав ГФ	K_S	K_{G_n}	K_{AO}	m	n	z
1	1 Формирование значения магнитного курса; 2 Формирование значения истинного курса; 3 Формирование значения угла крена; 4 Формирование значения угла тангажа; 5 Формирование значения барометрической высоты; 7 Формирование значения приборной скорости; 8 Формирование значения истинной скорости; 11 Формирование значения путевого угла; 13 Автоматическая стабилизация барометрической высоты полета	196	53	275	16	4	1
2	6 Формирование значения геометрической высоты; 10 Формирование значения вертикальной скорости		46				
3	14 Автоматическая стабилизация углового положения; 15 Автоматическая координация разворота		47				
4	9 Формирование значения путевой скорости; 12 Формирование значения текущих координат		50				

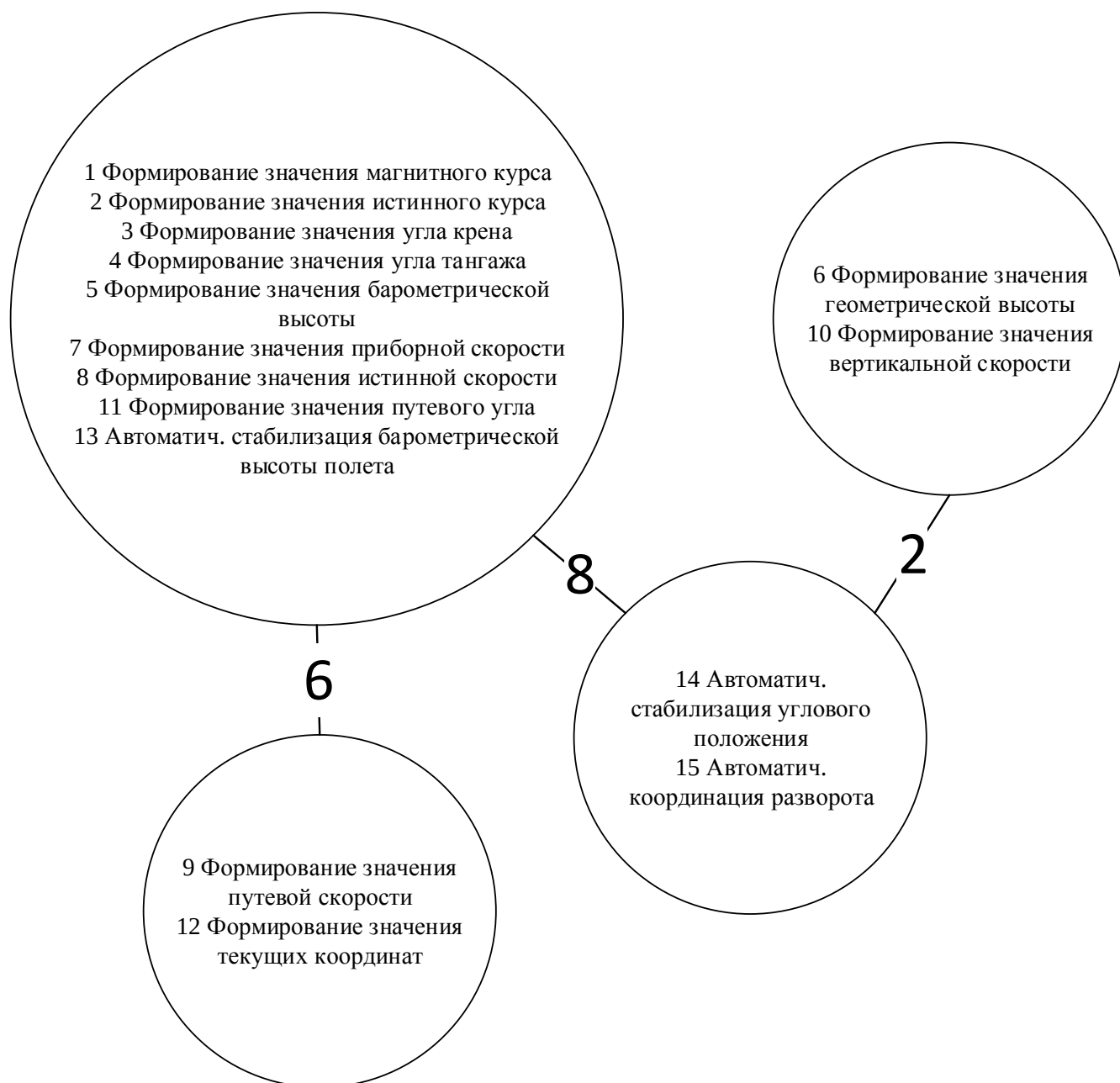


Рисунок 32 – Граф конечной структуры функций

4.2 Реализация механизмов повышения отказобезопасности КБО на основе структуры функций

Основным методом повышения отказобезопасности и надежности на сегодняшний день является резервирование. Применение резервирования позволяет эффективно повысить показатели надежности слабых механизмов и узлов до требуемого уровня. Метод резервирования хорошо изучен и существует множество различных способов его реализации.

Основными недостатками метода резервирования являются:

- Снижение эффективности при увеличении кратности резервирования;
- Сильный рост стоимости оборудования с увеличением кратности резервирования;
- Сильный рост массогабаритных характеристик оборудования с увеличением кратности резервирования;
- Основной и резервный канал как правило идентичны и имеют одинаковое время наработки на отказ, срок службы и т. д. Это приводит к высокой вероятности синхронного отказа всех резервных каналов.

Совокупность данных недостатков ведет к тому, что применение резервирования является нежелательным и дорогостоящим методом повышения надежности.

Архитектура ИМА позволяет в значительной мере снизить количество резервного оборудования в составе КБО. Это свойство ИМА является одним из наиболее значимых и обусловлено концепцией применения унифицированных ВМ в сочетании со свойством независимости ПО и АО.

Однако, анализируя структурную схему типового крейта ИМА видно, что резервированию подвергается весь крейт целиком. При таком подходе резервируются не только критические функции комплекса, но и не критические. То есть резервирование избыточно.

Причиной, обуславливающей целесообразность такого подхода к резервированию является распределение критических функций комплекса между ВМ крейта. В итоге избыточность ПО и АО КБО ИМА очень высока.

Основываясь на принципах работы алгоритма проектирования структуры функций можно предложить метод снижения избыточности ПО и АО комплекса.

УГП функций является одним из критериев проектирования структуры функций. На этапе определения состава ГФ учет УГП позволяет максимально сконцентрировать критические функции комплекса в рамках одной группы. То есть из полученного множества ГФ лишь малая часть будет иметь в своем составе критические функции.

На основе рисунка 32 и из таблицы 7 и видно, что лишь одна ГФ включает критические функции комплекса. То есть, при реализации ПО и АО крейта получится, что лишь один ВМ и реализуемые на нем программные приложения будут требовать резервирования. А значит можно минимизировать комплектность резервного крейта.

Теперь рассмотрим механизм реконфигурации КБО ИМА. Этот механизм является основой и методом сокращения количества резервного оборудования в составе крейта при значительном повышении его отказобезопасности [100, 101, 118, 119]. Реконфигурация основана на процедуре перераспределения программных приложений между исправными ВМ крейта [102 - 104]. Основанием для выполнения реконфигурации является отказ одного или более ВМ [105, 106]. Целью реконфигурации при критических режимах эксплуатации ВС, в случае повреждения большого числа ВМ является перераспределение программных приложений таким образом, чтобы обеспечить работоспособность наиболее критичных функций [107, 118].

Для эффективной работы алгоритмов реконфигурации требуется разбиение функций КБО на как можно более мелкие функциональные приложения. Однако при этом сложность определения оптимальной конфигурации многократно возрастает, вплоть до неприемлемого уровня. Это является препятствием на пути ре-

ализации высоко эффективного реконфигурирующегося КБО ИМА. Кроме того, сам алгоритм реконфигурации при таком подходе требует его реализации как программного приложения комплекса. А значит к нему предъявляются те же требования, что и ко всем другим функциям КБО, что делает реализацию свойства реконфигурации крайне сложной задачей [105 - 109].

Однако, если реализовать каждую ГФ как одно программное приложение и назначить соответствующие приоритеты между ними, то можно максимально упростить реализацию свойства реконфигурации комплекса. При выполнении этих условий сущность реконфигурации будет состоять в выполнении максимально возможного количества программных приложений в соответствии с их приоритетом.

4.3 Возможные варианты реализации САПР по проектированию структуры функций

Анализируя массив данных формируемых при проектировании структуры функций можно сделать вывод о том, что хранение этих данных можно осуществлять в базе данных (БД) реляционного типа, которые широко применяются в наше время [110, 117].

Для работы с реляционными БД существует множество систем управления БД (СУБД): IMS, DB2, Informix, Oracle, Database, Microsoft SQL Server, Adaptive Server Enterprise, Teradata Database, Firebird, Postgre SQL, MySQL, SQLite, Microsoft Access, Visual FoxPro, Линтер, CouchDB, MongoDB, Cache и т. д. Выбор конкретной СУБД определяется возможностями и потребностями предприятия. Все СУБД отличаются друг от друга предоставляемым набором функций для обслуживания и управления БД. Поэтому целесообразно определить ряд требований, которым должна отвечать СУБД [20, 27, 111, 112].

Для формирования массива исходных данных и построения графа первичной структуры функций требуется участие достаточно большого количества специалистов. Это специалисты различных уровней проектирования – ВС, комплекс,

система, модуль. Специалисты узкого и широкого профилей, которые занимаются разработкой программных приложений, функциональных узлов, печатных плат и т. д. Количество специалистов, вовлеченных в процесс проектирования структуры функций, определяется сложностью КБО и глубиной разложения комплексных функций на подфункции. При проектировании сложных КБО ИМА может возникнуть необходимость привлечения и сторонних специалистов. Кроме этого очевидно, что необходимо обеспечить доступ к БД как заказчика, так и исполнителя ОКР. А это может являться вопросом междугороднего взаимодействия. Тогда начинает играть важную роль вопрос секретности разработки и предприятий.

Таким образом СУБД должна обеспечивать возможность сетевого доступа к БД хотя бы в рамках сети предприятия и иметь встроенные инструменты для управления политикой доступа к данным.

Вторым важным аспектом является вопрос надежности хранения данных. Информация о структуре функций проектируемого КБО весьма ценна и объемна. Кроме того, массивы исходных данных о некоторых функциях и фрагменты графа первичной структуры функций являются с большой вероятностью типовыми. В виду чего со временем на предприятии будет сформирована библиотека данных о функциях комплекса. Потеря данных является тяжело восстанавливаемой и требует больших трудозатрат. Поэтому крайне важно, чтобы СУБД содержала стандартные инструменты повышения надежности хранения данных, проверки корректности вносимых изменений и т. д.

Теперь рассмотрим вопрос более масштабный и обратимся к материалам проведенного в п. 1.2 первой главы анализа.

На современном предприятии применяется ряд САПР, которые так или иначе имеют возможность импорта / экспорта проектных данных для обеспечения наибольшего уровня автоматизации процесса проектирования в целом. Однако кроме этих высокоэффективных САПР специалистами применяется большое количество узкоспециализированных программ, которые позволяют с высокой точ-

ностью решить конкретную задачу проектирования. Исторически сложилось три возможных варианта реализации приложения САПР:

- Специализированное ПО;
- Многофункциональные пакеты программ;
- Универсальное ПО.

Специализированное ПО как правило пишется для конкретных, узкоспециализированных задач, с жестким математическим и алгоритмическим набором функций. Степень сложности задач, реализуемых таким методом, может быть достаточно высока. Количество операторов при работе с таким ПО как правило не превышает одного человека.

Многофункциональные пакеты программ по своей сущности являются тесно интегрированным набором специализированного ПО. Такой подход позволяет создать ПО для решения целого комплекса смежных локальных задач. Весь комплекс программ объединен в рамках одной программной оболочки и привязан к единой БД. Такое ПО является наиболее сложным в реализации, но при этом и самым многофункциональным и удобным для работы инструментом.

Универсальное ПО дает разработчику возможность решения большого количества проектных задач, но при этом качество решения и масштабы проектирования как правило не велики [113].

Реализация разработанного алгоритма целесообразна как специализированного приложения. При этом нужно учесть необходимость работы приложения с БД, а значит и взаимодействия с СУБД.

Кроме технического вопроса реализации САПР вторым важнейшим аспектом является интерфейс пользователя.

Как ранее было сказано, при выполнении работ по формированию структуры функций КБО количество задействованных в работе людей может достигать большого количества. Частота обращения каждого из них к структуре функций, а именно к графу первичной структуры функций и массиву исходных данных будет весьма высока. В ходе дальнейшего процесса проектирования частота обращения

к структуре функций будет уменьшаться. Однако процесс проектирования комплекса является сложным и не обходится без множества итераций в ходе разработки. Как следствие, на практике разработчик вынужден делать многочисленные корректировки и изменения структур АО и ПО. Соответственно может возникать необходимость внесения изменений и в структуру функций КБО.

Таким образом можно прогнозировать существенную частоту взаимодействия разработчика с САПР. В виду данного факта актуальной задачей является построение интуитивно понятного и легкого в обращении интерфейса пользователя.

Основу графического интерфейса САПР составляет граф структуры функций. Граф достаточно легок для зрительного восприятия человеком. Однако тот факт, что структура функций может быть крайне сложной и количество вершин и их связей очень велико, однозначно приведет к разрастанию графа до неприемлемо больших размеров. С учетом ограничения масштаба видимого изображения графа размерами индикатора можно утверждать, что его визуальное восприятие будет весьма затруднительным. А тот факт, что структура графа и его графическое изображение могут сильно меняться при внесении изменений в исходные данные, еще больше усугубит данный факт.

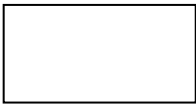
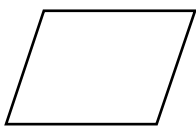
Для того чтобы предотвратить данную ситуацию можно прибегнуть к следующему. Любой разработчик, как правило, является специалистом по проектированию определенной части КБО. То есть при обращении к графу структуры функций его будет интересовать ограниченное количество вершин и связей графа. Обращая внимание на то что все функции КБО подразделены на уровни: комплексные, системные и т. д. можно предложить визуализацию лишь некоторой части структуры функций. Опираясь на иерархическую принадлежность функций к классу комплексных, системных и т. д. можно представить граф таким образом, чтобы он был более легким и интуитивно понятным для восприятия [114].

Введем ряд базовых определений для описания типа функций в соответствии с их расположением в графе:

- Функция верхнего уровня – это функция комплексного уровня, которая непосредственно указана в ТЗ и не входят в состав каких-либо других функций. Такие функции имеют высшее иерархическое положение;
- Базовая функция – это функция, разложение которой на подфункции является невозможным, либо нецелесообразным. Такие функции имеют низшее иерархическое положение;
- Измерительная функция – функция измерения одного из параметров ЛА;
- Промежуточная функция – это функция, которая является частью функции верхнего уровня и при этом является функцией более высокого уровня для ряда других функций из состава ДФИ.

Примем ряд условных графических обозначений, представленных в таблице 9.

Таблица 9 – Условные графические обозначения

Символ	Описание
	блок функции (указывается наименование функции)
	блок базовой функции (указывается наименование функции)
	указатель того, что функция является комплексной и разделяется на ряд подфункций
	указатель того, что функция является частью комплексной функции и ее УГП

Теперь, основываясь на введенных определениях и предложенных УГО можно формировать фрагменты структуры функций, например, как это показано на рисунке 33.

Измерительные функции всегда являются базовыми, так как результаты измерения текущих параметров ЛА являются исходными данными для промежуточных функций и функций верхнего уровня. Разработчик может ограничить глубину разложения промежуточных функций и присвоить промежуточной функции статус базовой. Причиной для этого может являться, например, использование серийного изделия. Таким образом, глубина разложения функций ДФИ может быть ограничена разработчиком принудительно.

Заметим, что функциям верхнего уровня в ФНА не всегда присваивается УГП, однако для тех функций, на которые они разложены, эти параметры указывают всегда. Так и в представленном примере фрагментов структуры функций КБО указание УГП начинается с промежуточных функций. Такое упрощение допустимо тогда, когда функция является суммой результатов нескольких промежуточных функций и данные промежуточных функций не подвергаются никакой обработке. При необходимости УГП таких функций верхнего уровня может быть найден математически.

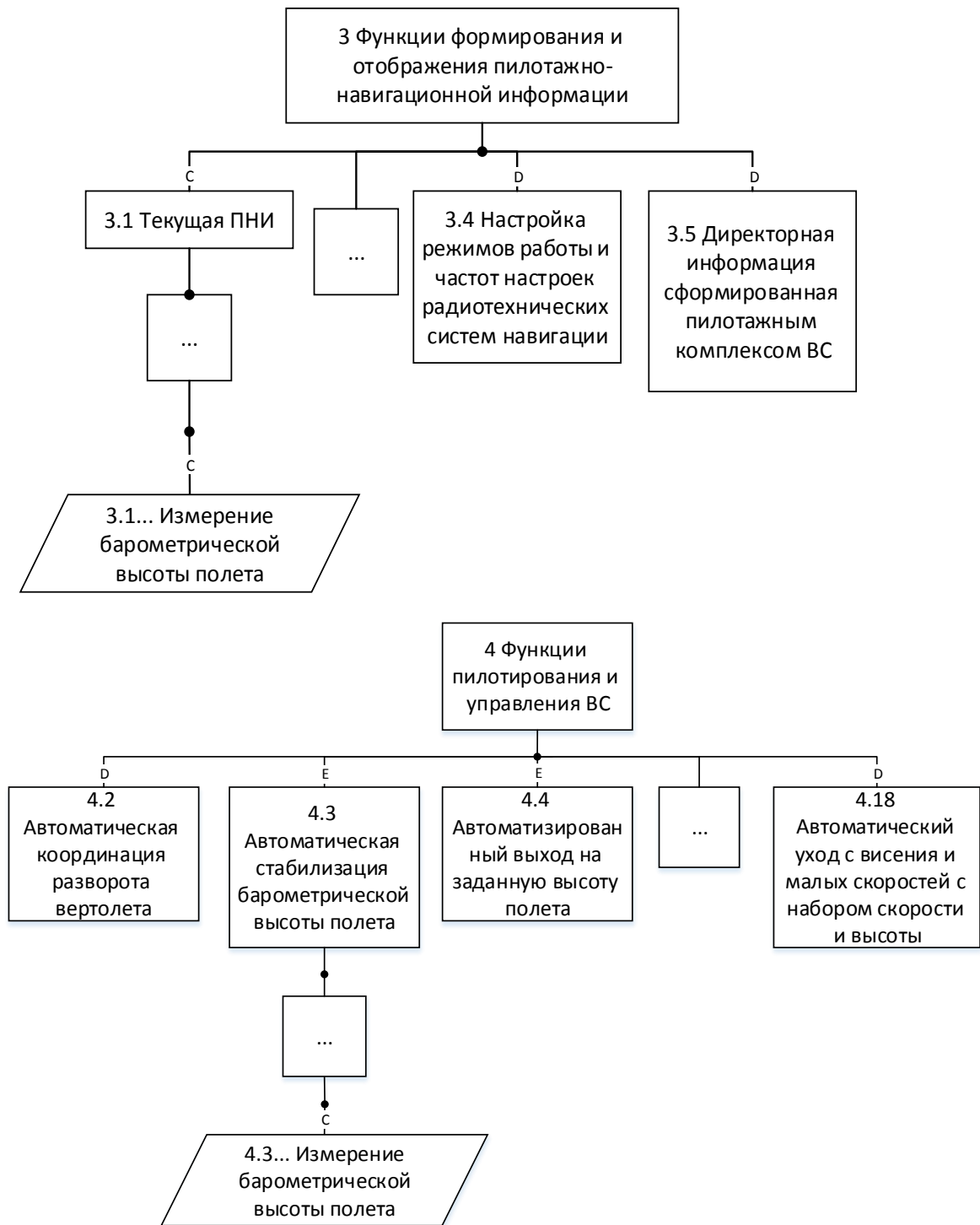


Рисунок 33 – Фрагменты структуры функций КБО

4.4 Результаты и выводы

1. На примере типового КБО проведено исследование алгоритма автоматизации проектирования структуры функций КБО. При исследовании реализованы следующие вычислительные эксперименты:

- определение КВР АО комплекса в зависимости от сформированной структуры функций;
- определение количества передаваемых в структуре параметров;
- определение количества формируемых в структуре групп функций;
- определение общей оптимальности структуры функций.

2. Результаты исследования вариантов построения структуры функций типового КБО, показали, что при одновременном варьировании двух и более параметров поверхность изменений исследуемой характеристики структуры носит сложный нелинейный характер при наличии некоторой общей выраженной тенденции изменения.

3. У характеристик структуры функций при определенных сочетаниях варьируемых параметров присутствуют локальные минимумы, которые позволяют получить решение более оптимальное на 10-20%, чем следует из общей тенденции изменения данной характеристики.

4. Результаты вычислительных экспериментов показали эффективность предложенных моделей и алгоритмов для поиска локально-оптимальной структуры функций КБО, отвечающей заданным требованиям и позволяющей установить основные характеристики АО и ПО КБО.

5. Рассмотрены варианты реализации САПР для автоматизации построения структуры функций КБО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ развития структур КБО ВС показал, что при переходе от одного типа к другому повышается уровень типизации АО и в значительной степени усложняется ПО комплексов. В настоящее время структура АО всех КБО ИМА в достаточной степени типизирована и представляет собой резервированный крейт с набором модулей. Однако, существующие КБО ИМА не обладают рядом желаемых свойств:

- применением только унифицированных модулей, поддерживающих многозадачный режим эксплуатации;
- открытой архитектурой АО и ПО;
- независимостью ПО и АО.

Причиной этого является отсутствие процесса и отлаженных методов проектирования, учитывающих в полной мере особенности построения КБО ИМА, т.к. для процесса проектирования КБО на принципах независимой и федеративной архитектур характерно наследование технических решений, а при разработке комплекса, создаваемого на принципах ИМА, использование принципов организации КБО предыдущих типов оказывается неэффективным и в значительной степени нивелирует преимущества данной архитектуры.

2. Для достижения максимальных преимуществ структуры ИМА разработан метод проектирования, который позволяет оптимизировать структуру КБО ИМА и гарантировать его соответствие требованиям качества и отказобезопасности.

Для решения данной задачи предложено использовать концепцию иерархического превосходства структуры функций над структурами ПО и АО, для чего введено понятие архитектуры функций комплекса и поставлена задача проектирование структуры функций КБО. Анализ моделей процесса проектирования авионики в соответствии с руководствами Р-4754 и Р-4761, этапа эскизного проектирования изделия, этапа формирования требований процесса оценки безопасности и этапа верификации процесса оценки безопасности показал, что проектирование

структуры функций КБО должно является промежуточной процедурой между процессами анализа ТЗ и анализа безопасности и процессом схмотехнического проектирования изделия.

Исходными данными для реализации процедуры проектирования структуры функций КБО служит перечень обобщенных функций верхнего уровня и первичные данные об их структуре, представленные в разделе "Тактико-технические требования» ТЗ. В данном разделе также определен перечень серийных систем, обязательных к использованию в составе комплекса. Эти системы выполняют фиксированный набор функций КБО, которые не могут быть изменены при проектировании, что необходимо учесть при построении моделей, методов и алгоритмов проектирования структуры функций.

3. Процесс проектирования КБО ВС является сложным итерационным процессом последовательного характера, который тесно связан с процессом оценки безопасности поэтому при проектировании структуры функций КБО должны учитываться данные об уровнях гарантии проектирования функций, а также требования по применению дополнительных мер повышения отказобезопасности, представленные в документах FHA (Functional Hazard Assessment – оценка функциональных опасностей), PSSA (Preliminary System Safety Assassment – предварительная оценка безопасности системы) и CCA (Common Cause Analysis – анализ общих причин отказов).

4. Построена модель процесса проектирования КБО ИМА, в которой процесс проектирования структуры функций выделен в отдельную процедуру, что позволяет формализовать и типизировать ее, предложить математическое описание и алгоритм реализации, сформировать требования по применению методов повышения надежности и отказобезопасности выполнения функций на ранних стадиях проектирования и дальнейшую разработку КБО производить с учетом данных требований.

5. Разработана графовая модель структуры функций КБО, которая связывает множество входных и выходных параметров функций и их групп, необходимые

для их реализации вычислительные мощности, нагрузку на сеть передачи данных и позволяет определять:

для АО КБО:

- необходимое количество вычислительных модулей;
- УГП каждого модуля;
- количество передаваемых по сети передачи данных параметров;

для ПО КБО:

- перечень функций, которые требуется реализовать в рамках одного вычислительного модуля;
- УГП программного модуля.

На данной модели сформулирована оптимизационная задача достижения заданных функциональных характеристик КБО ИМА через оптимизацию структуры функций, предложены критерии оценки оптимальности и сравнения различных вариантов конфигурации структуры функций комплекса.

6. Разработан общий алгоритм построения структуры функций КБО, который позволяет реализовать данный процесс при проектировании КБО в формате ИМА и решить оптимизационную задачу. Разработаны частные алгоритмы минимизации количества функций в структуре и формирования групп функций. Полученные алгоритмы являются основой для разработки средств автоматизации выполнения процедуры проектирования и оптимизации структуры функций КБО ИМА.

7. Исследование разработанных моделей и алгоритмов построения структуры функций КБО позволило определить характер зависимости величины КВР АО комплекса от характеристик сформированной структуры функций; зависимость общей оптимальности структуры функций от количества передаваемых в структуре параметров и количества формируемых в структуре групп функций.

Результаты исследования вариантов построения структуры функций типового КБО показали, что при одновременном варьировании двух и более параметров структуры поверхность изменений исследуемой характеристики носит слож-

ный нелинейный характер при наличии некоторой общей выраженной тенденции изменения. При этом для определенных сочетаний варьируемых параметров присутствуют локальные минимумы характеристик, которые позволяют получить решение более оптимальное на 10-20%, чем следует из общей тенденции ее изменения. Таким образом, результаты вычислительных экспериментов показали эффективность предложенных моделей и алгоритмов для поиска локально-оптимальных структур функций КБО, отвечающих заданным требованиям и позволяющих установить основные характеристики АО и ПО КБО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роль и место бортового оборудования воздушных судов на современном этапе развития авиации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.modern-avionics.ru/analytics/2014/modern-role-of-avionics-aircraft/part-1/#>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 21.12.2016).
2. Федосов Е. А., Косьянчук В. В., Сельвесюк Н. И. Интегрированная модульная авионика / Е. А. Федосов, В. В. Косьянчук, Н. И. Сельвесюк // Радиоэлектронные технологии. – 2015. - №1. – С. 66-71.
3. Руководство по вопросам разработки и квалификации интегрированной модульной авионики Р-297. – М. : ОАО «Авиаиздат», 2015. – 123 с.
4. Руководство по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации Р-4761. – М. : ОАО «Авиаиздат», 2010. – 262 с.
5. Руководство по процессам сертификации высокоинтегрированных сложных бортовых систем воздушных судов гражданской авиации Р-4754 – М. : ОАО «Авиаиздат», 2010. – 76 с.
6. Казакова И. А. История вычислительной техники : учебное пособие / И. А. Казакова. – Пенза : Издательство ПГУ, 2011. – 232 с.
7. Антимиров В. М. Проектирование аппаратуры систем автоматического управления : учебное пособие : в 2 ч. Ч.2 : Создание БЦВС / В. М. Антимиров. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 72 с.
8. Хакимов Д. В., Киселев С. К. Историческое развитие и современное состояние комплексов бортового оборудования летательных аппаратов / Д. В. Хакимов, С. К. Киселев // Вестник Ульяновского государственного технического университета – 2017. - №2 – С. 54-59.

9. НИИ «Аргон» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.computer-museum.ru/histussr/niiargon.htm>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 20.08.2015).
10. Краткая история «Опытно-конструкторского бюро "Электроавтоматика" имени П. А. Ефимова» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.electroavtomatica.ru/history_kr.php, свободный. Яз. рус. (дата обращения 21.12.2016).
11. История появления бортовых ЭВМ ряда «АРГОН» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.argon.ru/?q=node/20>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 21.12.2016).
12. БЦВМ. Прошлые разработки АО НИИ «Аргон» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.argon.ru/?q=taxonomy/term/1>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 21.12.2016).
13. Мячев А. А. Персональные ЭВМ и микроЭВМ. Основы организации: Справочник / А. А. Мячев, В. Н. Степанов ; под ред. А. А. Мячева. – М.: Радио и связь, 1991 г. – 320 с.
14. Беляев Ю. К. Надежность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин ; под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985 г. – 320 с.
15. Лабораторный практикум. Технические средства автоматизации научных исследований. Работа 2: «Магистрально – модульные системы автоматизации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.inp.nsk.su/chairs/radio/tsani/Lab%202.pdf>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 17.01.2016).
16. Голубев А.Ю., Отливанчик Е.А., Синайская М.Э., Суворов В.А. Персональные компьютеры и магистрально-модульные системы / А.Ю. Голубев, Е.А. Отливанчик, М.Э. Синайская, В.А. Суворов. – Компьютерная оптика. – 1989. - №6 – С. 103-109.

17. Андреев А. М., Можаров Г. П. Надежность и пропускная способность магистрально-модульных компьютерных систем / А. М. Андреев, Г. П. Можаров. – Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. - №1 – С. 27
18. Горностаев А. И., Капустин А. Н., Зубавичус В. А., Колесников С. М. Применение магистрально-модульного принципа при построении бортовой аппаратуры бортового комплекса управления космических аппаратов / А. И. Горностаев, А. Н. Капустин, В. А. Зубавичус, С. М. Колесников. – Решетневские чтения. – 2009. – №13 – С. 20-22.
19. Воробьев В. Г., Кузнецов С. В. Автоматическое управление полетом самолетов: учеб. для вузов / В. Г. Воробьев, С. В. Кузнецов. – М.: Транспорт, 1995. – 448 с.
20. Кучерявый А. А. Бортовые информационные системы: курс лекций / А. А. Кучерявый; под. ред. В. А. Мишина и Г. И. Ключева – 2-е изд., перераб. и доп. – Ульяновск : УлГТУ, 2004. – 504 с.
21. Ту-154 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tupolev.ru/tu-154>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 23.03.2014).
22. Boeing-737 Max [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.boeing.ru/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%8B-%D0%B8-%D1%83%D1%81%D0%BB%D1%83%D0%B3%D0%B8/%D0%93%D1%80%D0%B0%D0%B6%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D1%81%D0%B0%D0%BC%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%82%D1%8B/737-MAX.page>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 23.03.2014).
23. Ту-204СМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tupolev.ru/tu-204sm>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 23.03.2014).

24. ОСТ 1 02776-2001 Эксплуатация техническая авиационной техники по состоянию. Основные положения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 6 с.
25. Джанджгава Г.И. Авионика пятого поколения: новые задачи – новая структура // Вестник авиации и космонавтики. – 2001. – № 5. – С. 8–10.
26. Джанджгава Г.И., Герасимов Г.И., Рогалев А. П., Шерман В. М., Сухоруков С. Я., Вершков В. В. Концепция создания интегрированных комплексов бортового оборудования летательных аппаратов нового поколения // Авиакосмическое приборостроение. – 2002. – № 6. – С. 38.
27. Кучерявый А. А. Современная интегральная модульная авионика: состояние и тенденции развития : аналитический обзор / А. А. Кучерявый. – Ульяновск : ОАО «УКБП», 2006. – 105 с.
28. Каляев А. В., Левин И.И. Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. – М. : Янус-К, 2003. – 380 с.
29. Каляев И. А. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / И. А. Каляев [и др.] – Ростов-на-Дону : Издательство ЮНЦ РАН, 2008. – 393 с.
30. ISO/IEC/IEEE 9945:2009. Информационные технологии. Интерфейс переносимой операционной системы (POSIX). Базовые технические требования, выпуск 7. – Введ. 2014-12-17. – ISO/IEC/IEEE, 2014. – 3807 с.
31. КТ-178В Требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники. – Жуковский : НИИ АО, 2002. – 106 с.
32. Буздалов Д. В., Зеленов С. В., Корныхин Е. В., Петренко А. К., Страх А. В., Угненко А. А., Хорошилов А. В. Инструментальные средства

- проектирования систем интегрированной модульной авионики / Д. В. Буздалов, С. В. Зеленов, Е. В. Корныхин, А. К. Петренко, Страх А. В. Страх, А. А. Угненко, А. В. Хорошилов // Труды Института системного программирования РАН. – 2014. - №1. – С. 201-230.
33. ГОСТ 23501.108-85 Системы автоматизированного проектирования. Классификация и обозначение. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 16 с.
 34. Возможности AutoCAD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autodesk.ru/products/autocad/overview>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 11.09.2015).
 35. Калэнд Р. Сравнение возможностей систем Autodesk Inventor Professional 2011 и SolidWorks Premium 2010 по методике Delphi Expert / Р. Калэнд // Машиностроение и смежные отрасли. – 2010. – №6 – С. 45-50.
 36. Сабунин А. Почему Altium Designer, а не P-CAD / А. Сабунин // EDA Express. – 2010. – №18 – С. 3-6.
 37. Строгонов А., Жаднов В., Полесский С. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем / А. Строгонов, В. Жаднов, С. Полесский // Компоненты и технологии – 2007. – №5 – С. 183-190.
 38. Лопаткин А. В. P-CAD 2004 / А. В. Лопаткин – СПб. : БВХ-Петербург, 2006 г. – 560 с.
 39. Кузнецова О. В., Коробейников А. Г., Романова Е. Б. Сравнительный анализ P-CAD 2006 и ALTIUM DESIGNER 2012 [Электронный ресурс] / О. В. Кузнецова, А. Г. Коробейников, Е. Б. Романова // Электронные журналы. – 2013. – №6 – Режим доступа: http://enotabene.ru/kp/article_10324.html, свободный. Яз. рус. (дата обращения 21.10.2016).

40. Сабунин А. Е. Altium Designer Новые решения в проектировании электронных устройств / А. Е. Сабунин. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. – 432 с.
41. Зильбербург К. Л., Мекрюкова Е. В. Программные средства для анализа последствий отказов и обеспечения надежности изделий / К. Л. Зильбербург, Е. В. Мекрюкова // Рациональное управление предприятием – 2007. – №6 – С. 54-58.
42. Парамонов П. П., Гатчин Ю. А., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Дейко М. С. Принципы построения отраслевой системы автоматизированного проектирования в авиационном приборостроении / П. П. Парамонов, Ю. А. Гатчин, И. О. Жаринов, О. О. Жаринов, М. С. Дейко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – №6 – С. 111-117.
43. Павлов А. М. Принципы организации бортовых вычислительных систем перспективных летательных аппаратов [Электронный ресурс] / А. М. Павлов // Мир компьютерной автоматизации – 2001. – №4 – Режим доступа: <http://www.mka.ru/?p=41177>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 15.08.2016).
44. Жаринов И. О., Парамонов П. П. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении / И. О. Жаринов, П. П. Парамонов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. - №2. – С. 1-17.
45. Чуянов Г. А., Косьянчук В. В., Сельвесюк Н. И. Перспективы развития комплексов бортового оборудования на базе интегрированной модульной авионики / Г. А. Чуянов, В. В. Косьянчук, Н. И. Сельвесюк // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. - №3. – С. 55-62.

46. Антимиров В. М. Проектирование аппаратуры систем автоматического управления : учебное пособие : в 2 ч. Ч.1 : Создание САУ / В. М. Антимиров. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 92 с.
47. Гвоздев В. Е., Колоденкова А. Е. Формализация процедуры проектирования архитектур программной системы / В. Е. Гвоздев, А. Е. Колоденкова // Вестник УГАТУ. – 2009. – №1 – С. 34-39.
48. Соснин П. И. Архитектурное моделирование автоматизированных систем: учебное пособие / П. И. Соснин. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 147 с.
49. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27033-1-2011 Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Безопасность сетей. Часть 1. Обзор и концепции. – М. : Стандартинформ, 2012. – 73 с.
50. ГОСТ Р ИСО 15704-2008 Промышленные автоматизированные системы. Требования к стандартным архитектурам и методологиям предприятия. – М. : Стандартинформ, 2010. – 57 с.
51. ГОСТ Р 54136-2010 Системы промышленной автоматизации и интеграция. Руководство по применению стандартов, структура и словарь. – М. : Стандартинформ, 2012. – 36 с.
52. ГОСТ Р ИСО/МЭК 10746-2-2000 Информационная технология (ИТ). Взаимосвязь открытых систем. Управление данными и открытая распределенная обработка. Часть 2. Базовая модель. – М. : Стандартинформ, 2006. – 24 с.
53. Комплекс бортового оборудования КБО-17-1 вертолета Ми-171А2. Оценка функциональной опасности (Functional Hazard Assessment - FHA), редакция 1.
54. ГОСТ 34.601-90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. – М. : Стандартинформ, 2009. – 7с.

55. Галушкин В. В., Катков Д. И., Косьянчук В. В., Сельвесюк Н. И. Сквозная технология проектирования комплексов бортового оборудования перспективных воздушных судов / В. В. Галушкин, Д. И. Катков, В. В. Косьянчук, Н. И. Сельвесюк // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2012. - №3(128) – С. 201–209.
56. Шишкин В. В., Романов Ю. В. Интеллектуальная система регистрации отказов, анализа и корректирующих действий с использованием метода анализа подобия и метода анализа общей причины для обеспечения надежности изделий авиационной техники в процессе жизненного цикла / В. В. Шишкин, Ю. В. Романов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – №4. – С. 712-714.
57. ГОСТ 19.201-78 Единая система программной документации. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2010. – 3 с.
58. ГОСТ 34.602-89 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 12 с.
59. Мячев А. А. Интерфейсы средств вычислительной техники: Справочник / А. А. Мячев. – М. : Радио и связь, 1993 г. – 352 с.
60. РТМ 1495-75 Обмен информацией двухполярным кодом в оборудовании летательных аппаратов. – М. : Министерство радиопромышленности СССР, 1975. – 68 с.
61. ГОСТ Р 50832-95 Интерфейс магистральный последовательный волоконно-оптический системы электронных модулей. Общие требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 32 с.

62. ГОСТ 7845-92 Система вещательного телевидения. Основные параметры. Методы измерений. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2001. – 14 с.
63. ГОСТ Р 52070-2003 Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 27 с.
64. ГОСТ 18977-79 Комплексы бортового оборудования самолетов и вертолетов. Типы функциональных связей. Виды и уровни электрических сигналов. – М. : Издательство стандартов, 1979. – 10 с.
65. ГОСТ Р 54073-2010 Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – М. : Стандартинформ, 2011. – 35 с.
66. КТ-160D Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. – Жуковский : НИИ АО, 2004. – 324 с.
67. ГОСТ РВ 6601-002-2008 Оборудование бортовое авиационное. Общие требования к допустимым уровням создаваемых электромагнитных помех и методики измерения. – М. : Стандартинформ, 2009. – 41 с.
68. ГОСТ РВ 6601-001-2008 Оборудование бортовое авиационное. Общие требования к восприимчивости при воздействии электромагнитных помех и методики измерения. – М. : Стандартинформ, 2008. – 53 с.
69. ГОСТ В 20436-88 Изделия авиационной техники. Общие требования к комплексным программам обеспечения безопасности полета, надежности, контролепригодности, эксплуатационной и ремонтной технологичности. – М. : Стандартинформ, 1989. – 18 с.
70. ГОСТ В 23743-88 Изделия авиационной техники. Номенклатура показателей безопасности полета, надежности, контролепригодности, эксплуатационной и ремонтной технологичности. – М. : Стандартинформ, 1989. – 18 с.

71. ГОСТ 27.310-95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 14 с.
72. ОСТ 1 00132-97 Надежность изделий авиационной техники. Методы количественного анализа безотказности функциональных систем при проектировании самолетов и вертолетов
73. Тихоненков В. А. Конструирование и надежность измерительно-вычислительных комплексов летательных аппаратов: учебное пособие для вузов / В. А. Тихоненков, В. А. Мишин. – Ульяновск : УлГТУ, 2002. – 298 с.
74. ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 12 с.
75. Руководство по гарантии конструирования бортовой электронной аппаратуры КТ-254. – М. : ОАО «Авиаиздат», 2008. – 84 с.
76. Хакимов Д. В., Киселев С. К. Оптимизация структуры комплексов бортового оборудования летательных аппаратов на основе оптимизации функциональной структуры на ранних стадиях проектирования / Д. В. Хакимов, С. К. Киселев // Электротехнические и информационные комплексы и системы – 2016. - №2 – С. 65-69.
77. Беседин И. В. Семейство базовых модулей для построения реконфигурируемых многопроцессорных вычислительных систем со структурно-процедурной организацией вычислений / И. В. Беседин [и др.] // Научный сервис в сети Интернет: технологии распределенных вычислений : матер. всерос. науч. конф. – М. : Издательство Московского университета, 2006. – С. 47–49.
78. Хакимов Д. В. Оценка функциональной надежности комплексов авионики // Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы : сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции ИВК-2013. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – 329 с.

79. Хакимов Д. В. Критерии распределения функций между системами комплекса авионики // 13-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2014». 17-21 ноября 2014 года. Москва. Тезисы. – СПб. : Мастерская печати, 2014. – 712 с.
80. Хакимов Д. В. Функциональная надежность как критерий распределения функций между системами комплекса авионики // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования: сборник научных трудов / под ред. А. Н. Афанасьева. – Ульяновск : УлГТУ, 2014. – 228 с.
81. Парамонов П. П., Гатчин Ю. А., Жаринов И. О., Жаринов О. О. Модели композиционного проектирования авионики / П. П. Парамонов, Ю. А. Гатчин, И. О. Жаринов, О. О. Жаринов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2010. – №7 – С. 5-12.
82. Видин Б. В., Жаринов И. О., Жаринов О. О. Декомпозиционные методы в задачах распределения вычислительных ресурсов многомашинных комплексов бортовой авионики / Б. В. Видин, И. О. Жаринов, О. О. Жаринов // Информационно-управляющие системы – 2010. – №1 – С. 2-5.
83. Гранкин Б. К., Козлов В. В. Метод синтеза функциональной структуры гидравлических систем / Б. К. Гранкин, В. В. Козлов // Научный вестник МГТУ ГА – 2014. - №208 С. 36-43.
84. Хакимов Д. В., Киселев С. К. Построение и оптимизация дерева функций комплекса бортового оборудования летательного аппарата // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://kmu.ifmo.ru/collections_article/3190/postroenie_i_optimizaciya_dereva_funkciy_kompleksa_bortovogo_oborudovaniya_letatel'nogo_apparata.htm, свободный. Яз. рус.

85. Standard Performance Evaluation Corporation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.spec.org>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.06.2016).
86. Хакимов Д. В., Киселев С. К., Кандаулов В. М. Оптимизация архитектуры функций комплексов бортового оборудования на основе интегральной модульной авионики / Д. В. Хакимов, С. К. Киселев, В. М. Кандаулов // Автоматизация процессов управления – 2017. - №3 – С. 22-30.
87. Платформа ИМА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.modern-avionics.ru/design-process/development-process/systems/ima-platform/>, свободный. Яз. рус.
88. Кормен Т. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест ; пер. с англ. под ред. А. Шеня. – М.: МЦНМО, 2002. – 960 с.
89. Виленкин Н. Я. Комбинаторика / Н. Я. Виленкин – М. : «Наука», 1969. – 328 с.
90. Липский В. Комбинаторики для программистов / В. Липский ; пер. с польского под ред. А. П. Ершова. – М. : «Мир», 1988. – 200 с.
91. Хохлюк В. И. Параллельные алгоритмы целочисленной оптимизации / В. И. Хохлюк. – М. : Радио и связь, 1987 г. – 223 с.
92. Гуц А. К. Математическая логика и теория алгоритмов: учебное пособие / А. К. Гуц. – Омск : Издательство Наследие. Диалог-Сибирь, 2003. – 108 с.
93. Кофман А. Введение в прикладную комбинаторику / А. Кофман ; пер. с англ. под ред. Б. А. Севастьянова. – М. : «Наука», 1975. – 480 с.
94. Бурков В. Н. Прикладные задачи теории графов / В. Н. Бурков, Н. А. Горгидзе, С. Е. Ловецкий ; под ред. А. Я. Горгидзе. – Тбилиси : «Мецниереба», 1973 г. – 236 с.
95. Асанов М. О. Комбинаторные алгоритмы: учебное пособие / М. О. Асанов, В. В. Расин. – Екатеринбург : [б. и.], 2008. – 151 с.

96. Малюх В. Н. Введение в современные САПР: Курс лекций / В. Н. Малюх. – М. : ДМК Пресс, 2010 г. – 192 с.
97. Хакимов Д. В., Киселев С. К. Оптимизация функциональной структуры комплексов бортового оборудования летательных аппаратов / Д. В. Хакимов, С. К. Киселев // Автоматизация процессов управления – 2016. - №2 – С. 87-92.
98. Бадалов А. З., Набиев Р. Н., Мамедов А. З. Сравнительный анализ особенностей измерения вертикальной скорости / А. З. Бадалов, Р. Н. Набиев, А. З. Мамедов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2013. – №1 – С. 33-41.
99. Григорьев В. В., Козис Д. В., Коровьяков А. Н., Литвинов Ю. В. Принципы построения пилотажно-навигационных комплексов на основе интегрированной модульной авионики / В. В. Григорьев, Д. В. Козис, А. Н. Коровьяков, Ю. В. Литвинов. – Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2009. - №11 – С. 7-11.
100. 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.
101. Дегтярев А. Р. Киселев С. К. Надежность реконфигурирующихся комплексов интегрированной модульной авионики // Автоматизация процессов управления. – 2016. – Т. 43. – № 1. – С. 25–30.
102. 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.
103. 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.
104. Тарасов А. А. Методы функциональной реконфигурации отказоустойчивых систем/ А. А. Тарасов // Надежность – 2002. – № 2. – С. 29–35.
105. Тарасов А. А. Стратегии функциональной перестройки отказоустойчивых информационных систем при различных видах дегенерации / А. А. Тарасов // Безопасность информационных технологий. – 2012. – №2. – С. 22-31.
106. Джанджгава Г.И., Рогалев А.П., Бабиченко А.В., Сухоруков С. Я. Интегрированная динамически реконфигурируемая система комплексной обработки информации бортовых комплексов навигации, управления и наведения // Авиакосмическое приборостроение. – 2002. – № 6. – С. 8-14.
107. Зорин К. М. Модель и методика реконфигурации логической структуры интегрированной информационной системы : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Зорин Владимир Викторович. – СПб., 2010. – 26 с.
108. Гроль В. В., Романкевич В. А., Мораведж С.М. Об оптимизации процедуры реконфигурирования в многопроцессорных системах // Изв. Саратов. ун-та. Серия математика. Механика. Информатика – 2012. – Т. 12. – № 4. – С. 112–115.
109. Тарасов А. А. Стратегии функциональной перестройки отказоустойчивых информационных систем при различных видах деградации / А. А. Тарасов // Безопасность информационных технологий – 2012. – № 2. – С. 22–31.
110. Алексеев В. Е. Графы. Модели вычислений. Структуры данных: учебник / В. Е. Алексеев, В. А. Таланов. – Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2005. – 307 с.

111. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных. 8-е издание. / К. Дж. Дейт ; пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2005. – 1328 с.
112. Перспективы применения вертолетов Ми-8. Пилотажный комплекс для вертолета Ми-8/17. : Доклад / Скрипаль Е. Н. – Саратов : ОАО «Конструкторское бюро промышленной автоматики», 2012. – 13 с.
113. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования : учеб. для вузов / И. П. Норенков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2009. – 430 с.
114. Шенброт И. М. Проектирование вычислительных систем распределенных АСУ ТП / И. М. Шенброт, В. М. Алиев. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 88 с.
115. Гайкович И. А. Основы теории проектирования сложных технических систем / И. А. Гайкович – СПб. : НИЦ «МОРИНТЕХ», 2001. – 432 с.
116. Далека В. Д. Модели и структуры данных : учебное пособие / В. Д. Далека, А. С. Деревянко, О. Г. Кравец, Л. Е. Тимановская. – Харьков : ХГПУ, 2000. – 241 с.
117. Богатырев В.А. К распределению функциональных ресурсов в отказоустойчивых многомашинных вычислительных системах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 12. – С. 1–5.
118. Хахимов Д. В. Автоматизация процесса оценки надежности комплексов авионики летательных аппаратов // Информатика и вычислительная техника : сборник научных трудов 6-й Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых ИВТ-2014 / под общей ред. В.Н. Негоды. – Ульяновск : УлГТУ, 2014. – 502 с.
119. Хахимов Д. В., Киселев С. К. Историческое развитие и современное состояние комплексов бортового оборудования летательных аппаратов / Д. В. Хахимов, С. К. Киселев // Вестник Ульяновского государственного технического университета – 2017. - №3 – С. 42-50.

Приложение А

Массив исходных данных для построения первичной структуры функций

Наименования входных и выходных данных, а также их соответствие номерам, указанным в таблице А.1, приведены в таблице А.2.

Таблица А.1

Имя функции	Тип s_1	УГП s_2	КВР s_3	Признак замен. s_4	Входные данные X_a	Выходные данные Y_a
1 Формирование значения магнитного курса	1	3	3	0	15	110
2 Формирование значения истинного курса	1	3	7	0	14/15	109
3 Формирование значения угла крена	1	2	4	0	13	108
4 Формирование значения угла тангажа	1	2	4	0	12	107
5 Формирование значения барометрической высоты	1	2	2	0	1	103
6 Формирование значения геометрической высоты	1	3	34	0	2	102
7 Формирование значения приборной скорости	1	3	5	0	1/6	104
8 Формирование значения истинной скорости	1	2	2	0	1, 104, 8	105
9 Формирование значения путевой скорости	1	4	22	0	3, 4, 5, 9, 10, 11, 111	106
10 Формирование значения вертикальной скорости	1	3	12	0	1, 2, 3, 4, 5	101
11 Формирование значения путевого угла	1	3	8	0	10, 11, 15, 16	111

Имя функции	Тип s_1	УГП s_2	КВР s_3	Признак замен. s_4	Входные данные X_a	Выходные данные Y_a
12 Формирование значения текущих координат местоположения	1	3	28	0	15, 16, 13, 12, 105, 106	112
13 Автоматическая стабилизация барометрической высоты полета	1	3	18	0	103	113
14 Автоматическая стабилизация углового положения	1	3	15	0	15, 16, 13, 12, 111	114
15 Автоматическая координация разворота	1	3	32	0	15, 16, 13, 12, 103, 102, 104, 105, 101	115

Таблица А.2

Входные параметры функций	Номер	Выходные параметры функций	Номер
сигнал статического давления	1	знач. вертикальной скорости	101
значение временной задержки сигнала	2	знач. истинной высоты	102
значение времени полета	3	знач. бар. высоты	103
скорость ветра	4	знач. приборной скорости	104
угол ветра	5	знач. истинной скорости	105
значение таймера	6	знач. путевой скорости	106
информационный сигнал полного давления	7	значение угла танг.	107
информационный сигнал температуры воздуха	8	значение угла крена	108
значение пройденного пути	9	значение истинного курса	109
значение скорости сноса	10	значение магнитного курса	110

Входные параметры функций	Номер	Выходные параметры функций	Номер
значение угла сноса	11	знач. путевого угла	111
угол поворота гироскопа по оси "танг"	12	значения текущих координат местоположения	112
угол поворота гироскопа по оси "крен"	13	сигнал коррекции высоты полета	113
угол поворота гироскопа по оси "курс"	14	сигнал коррекции углового положения	114
сигнал магнитного курса	15	сигнал координации разворота	115
значение истинного курса	16		

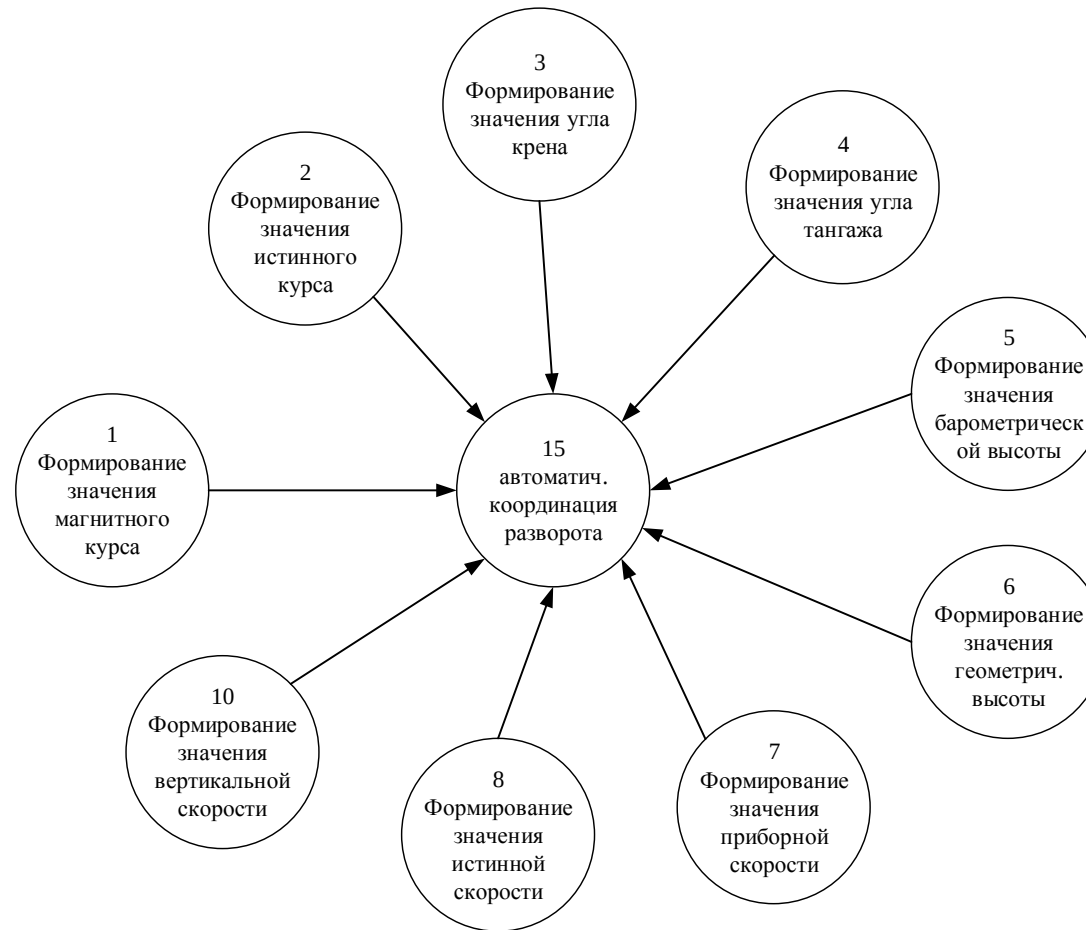
Приложение Б**Граф первичной структуры функций КБО**

Рисунок Б.1 – Первичная структура функций, подграф 1

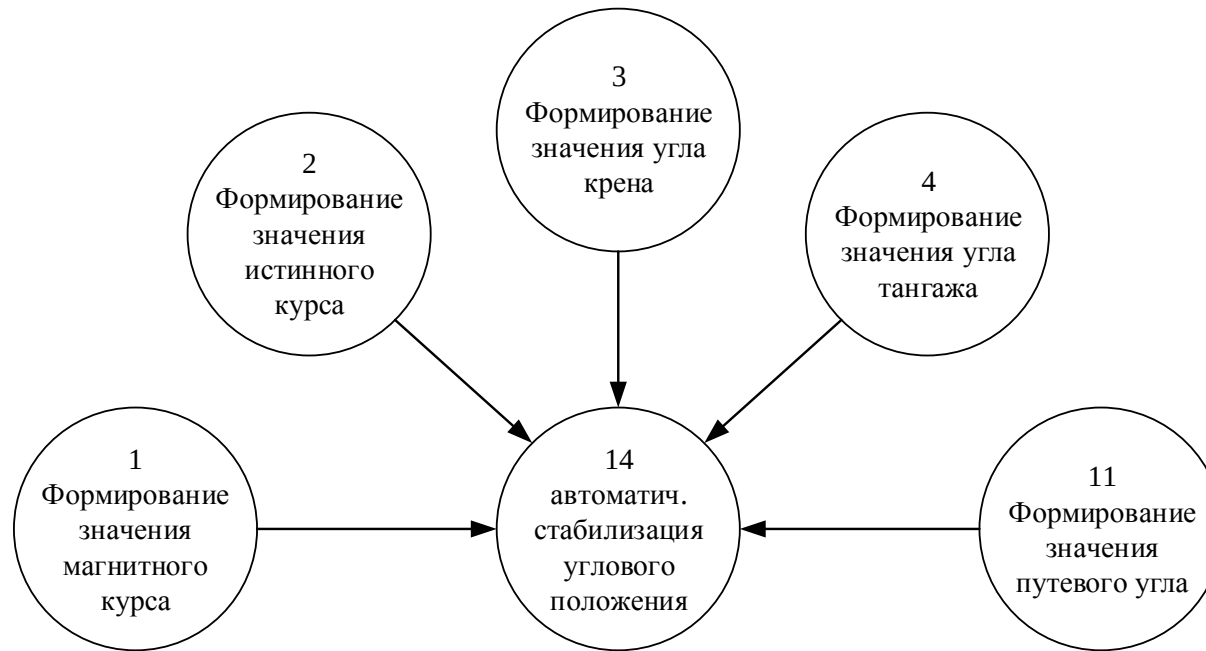


Рисунок Б.2 – Первичная структура функций, подграф 2

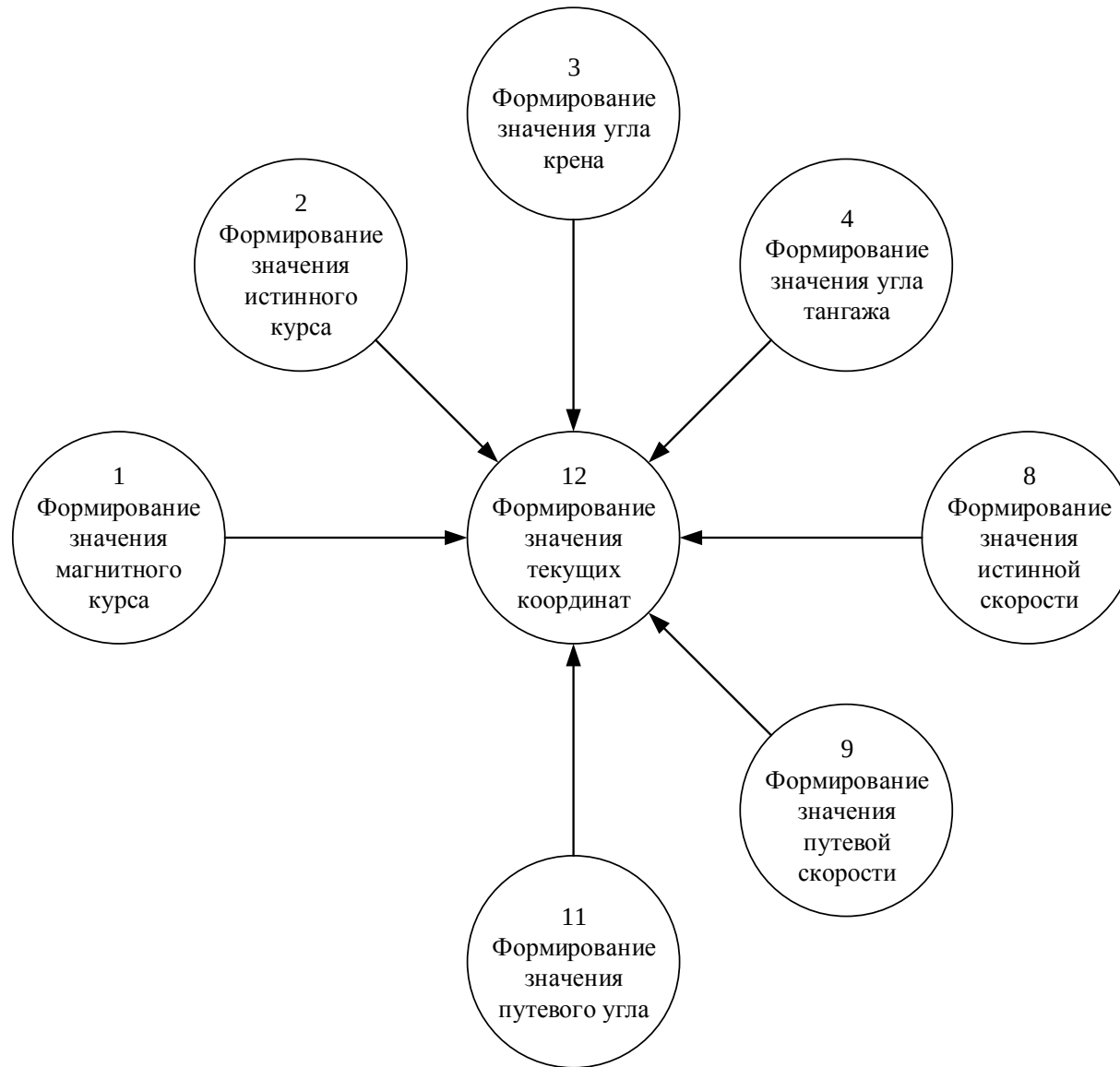


Рисунок Б.3 – Первичная структура функций, подграф 4

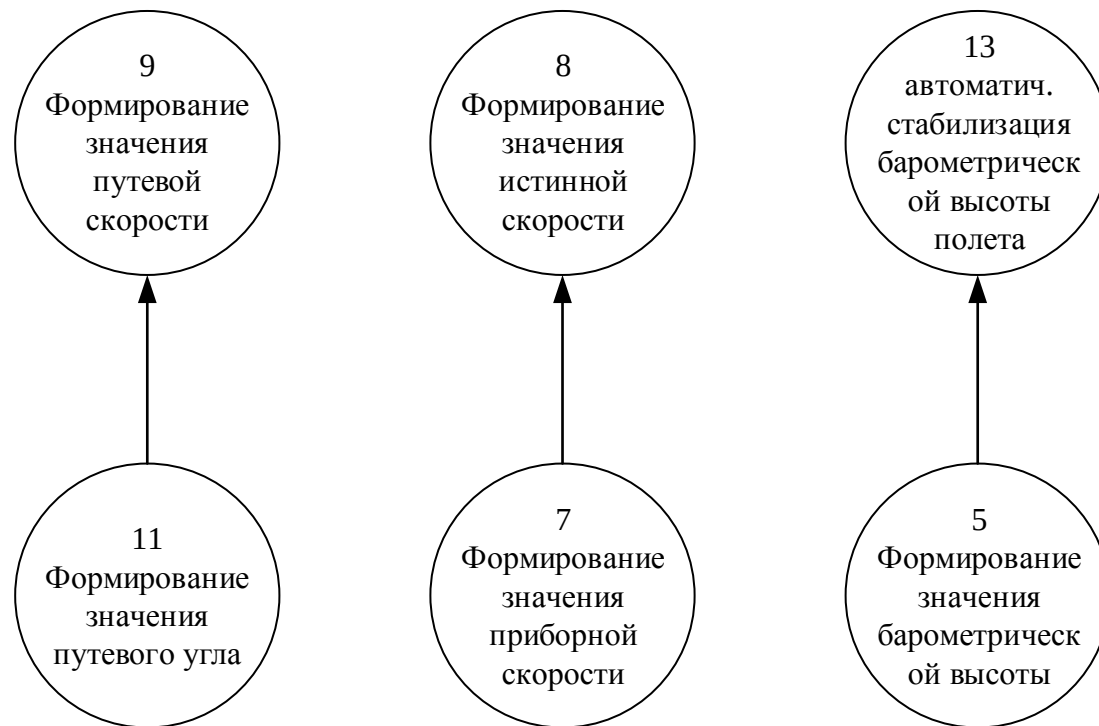


Рисунок Б.4 – Первичная структура функций, подграфы 3, 5, 6

Приложение В

Данные полученные в ходе исследования структуры функций

Таблица В.1 – результаты работы алгоритма оптимизации структуры функций

Парам.	Результаты работы алгоритма								
k _{BM}	34	34	34	34	34	34	34	34	34
S _{2кр.}	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:
	3 4 5 13 1	3 4 5 8 13 1	3 4 5 8 13 1	3 4 5 8 13 1	3 4 5 8 13 1	3 4 5 8 13 1	3 4 5 8 13 1	3 4 5 8 13 1	3 4 5 8 13 1
	Kgf = 31	Kgf = 33	Kgf = 33	Kgf = 33	Kgf = 33	Kgf = 33	Kgf = 33	Kgf = 33	Kgf = 33
	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:
	8 7	10 7 2	10 7 2 11	10 7 2 11	10 7 2 11	10 7 2 11	10 7 2 11	10 7 2 11	10 7 2 11
	Kgf = 7	Kgf = 24	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32
	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:
	15	11 14	6	6	6	6	6	6	6
	Kgf = 32	Kgf = 23	Kgf = 34	Kgf = 34	Kgf = 34	Kgf = 34	Kgf = 34	Kgf = 34	Kgf = 34
	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:
	9	6	15	15	15	15	15	15	15
	Kgf = 22	Kgf = 34	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32
	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:
	12	15	9	9	9	9	9	9	9
	Kgf = 28	Kgf = 32	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22
	Состав ГФ 6:	Состав ГФ 6:	Состав ГФ 6:	Состав ГФ 6:	Состав ГФ 6:	Состав ГФ 6:	Состав ГФ 6:	Состав ГФ 6:	Состав ГФ 6:
	10	9	12	12	12	12	12	12	12
	Kgf = 12	Kgf = 22	Kgf = 28	Kgf = 28	Kgf = 28	Kgf = 28	Kgf = 28	Kgf = 28	Kgf = 28
	Состав ГФ 7:	Состав ГФ 7:	Состав ГФ 7:	Состав ГФ 7:	Состав ГФ 7:	Состав ГФ 7:	Состав ГФ 7:	Состав ГФ 7:	Состав ГФ 7:
	14 2	12	14	14	14	14	14	14	14

[illegible]

Таблица В.2 – результаты работы алгоритма оптимизации структуры функций

[illegible]

Парам.	Результаты работы алгоритма								
R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:
	3 4 5 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7
	Kgf = 43	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45
	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:
	8 6	10	10	10 9 11	10 9 11	10 9 11	10 9 11	10 9 11	10 9 11
	Kgf = 36	Kgf = 12	Kgf = 12	Kgf = 42	Kgf = 42	Kgf = 42	Kgf = 42	Kgf = 42	Kgf = 42
	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:
	15	11 6	11 6	6	6	6	6	6	6
	Kgf = 32	Kgf = 42	Kgf = 42	Kgf = 34	Kgf = 34	Kgf = 34	Kgf = 34	Kgf = 34	Kgf = 34
	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:
	9	15	15	15	15	15	15	15	15
	Kgf = 22	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32
	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:
	12 14	9	9	12 14	12 14	12 14	12 14	12 14	12 14
	Kgf = 43	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 43	Kgf = 43	Kgf = 43	Kgf = 43	Kgf = 43	Kgf = 43
	Состав ГФ 6:	Состав ГФ 6:	Состав ГФ 6:						
	10	12 14	12 14						
	Kgf = 12	Kgf = 43	Kgf = 43						
	Состав ГФ 7:								
	11								
	Kgf = 8								
n	7	6	6	5	5	5	5	5	5
z	2	1	1	1	1	1	1	1	1
K _{AO}	405	315	315	270	270	270	270	270	270
m	23	22	22	21	21	21	21	21	21
y	2430	2205	2205	2025	2025	2025	2025	2025	2025

Таблица В.4 – результаты работы алгоритма оптимизации структуры функций

Парам.	Результаты работы алгоритма								
K_{BM}	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$S_{2кр.}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:
	3 4 5 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7
	Kgf = 43	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45
	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:
	8 6	10 6	10 6	10 6	10 6	10 6	10 6	10 6	10 6
	Kgf = 36	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 46
	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:
	15 14	11 14	11 14	11 14 9	11 14 9	11 14 9	11 14 9	11 14 9	11 14 9
	Kgf = 47	Kgf = 23	Kgf = 23	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45	Kgf = 45
	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:
	9	15	15	15	15	15	15	15	15
	Kgf = 22	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32
	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:
	12	9	9	12	12	12	12	12	12
	Kgf = 28	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 28	Kgf = 28	Kgf = 28	Kgf = 28	Kgf = 28	Kgf = 28
	Состав ГФ 6:	Состав ГФ 6:	Состав ГФ 6:						
	10	12	12						
	Kgf = 12	Kgf = 28	Kgf = 28						
	Состав ГФ 7:								
	11								
	Kgf = 8								
n	7	6	6	5	5	5	5	5	5
z	2	1	1	1	1	1	1	1	1

Парам.	Результаты работы алгоритма								
K _{AO}	450	350	350	300	300	300	300	300	300
m	18	21	21	20	20	20	20	20	20
y	1875	1850	1850	1675	1675	1675	1675	1675	1675

Таблица В.5 – результаты работы алгоритма оптимизации структуры функций

Парам.	Результаты работы алгоритма								
K _{BM}	55	55	55	55	55	55	55	55	55
S _{2кр.}	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:
	3 4 5 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7 11	3 4 5 8 13 1 2 7 11	3 4 5 8 13 1 2 7 11	3 4 5 8 13 1 2 7 11	3 4 5 8 13 1 2 7 11	3 4 5 8 13 1 2 7 11	3 4 5 8 13 1 2 7 11
	Kgf = 43	Kgf = 45	Kgf = 53	Kgf = 53	Kgf = 53	Kgf = 53	Kgf = 53	Kgf = 53	Kgf = 53
	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:
	8 6	10 6	10 6	10 6	10 6	10 6	10 6	10 6	10 6
	Kgf = 36	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 46
	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:
	15 14	11 14 12	15 14	15 14	15 14	15 14	15 14	15 14	15 14
	Kgf = 47	Kgf = 51	Kgf = 47	Kgf = 47	Kgf = 47	Kgf = 47	Kgf = 47	Kgf = 47	Kgf = 47
	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:
	9	15	9	9	9 12	9 12	9 12	9 12	9 12
	Kgf = 22	Kgf = 32	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 50	Kgf = 50	Kgf = 50	Kgf = 50	Kgf = 50
	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:					
	12	9	12	12					
	Kgf = 28	Kgf = 22	Kgf = 28	Kgf = 28					
	Состав ГФ 6:								
	10								
	Kgf = 12								

Парам.	Результаты работы алгоритма								
	Состав ГФ 7:								
	11								
	Kgf = 8								
n	7	5	5	5	4	4	4	4	4
z	2	1	1	1	1	1	1	1	1
K _{АО}	495	330	330	330	275	275	275	275	275
m	23	22	19	19	16	16	16	16	16
y	1731,19	1388,10	1293,81	1293,81	1071,19	1071,19	1071,19	1071,19	1071,19

Таблица В.6 – результаты работы алгоритма оптимизации структуры функций

Парам.	Результаты работы алгоритма								
k _{ВМ}	60	60	60	60	60	60	60	60	60
S _{2кр.}	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:
	3 4 5 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14
	Kgf = 43	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60
	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:
	8 6	10 6	10 6	10 6 11	10 6 11	10 6 11	10 6 11	10 6 11	10 6 11
	Kgf = 36	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 54	Kgf = 54	Kgf = 54	Kgf = 54	Kgf = 54	Kgf = 54
	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:
	15 12	11	11	15 12	15 12	15 12	15 12	15 12	15 12
	Kgf = 60	Kgf = 8	Kgf = 8	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60
	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:
	9	15 12	15 12	9	9	9	9	9	9
	Kgf = 22	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22

Парам.	Результаты работы алгоритма								
	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:						
	10	9	9						
	Kgf = 12	Kgf = 22	Kgf = 22						
	Состав ГФ 6:								
	14								
	Kgf = 15								
	Состав ГФ 7:								
	11								
	Kgf = 8								
n	7	5	5	4	4	4	4	4	4
z	2	1	1	1	1	1	1	1	1
K _{АО}	540	360	360	300	300	300	300	300	300
m	18	13	13	13	13	13	13	13	13
y	1964	1384	1384	1244	1244	1244	1244	1244	1244

Таблица В.7 – результаты работы алгоритма оптимизации структуры функций

Парам.	Результаты работы алгоритма								
K _{ВМ}	65	65	65	65	65	65	65	65	65
S _{2кр.}	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:
	3 4 5 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14	3 4 5 8 13 1 2 7 14
	Kgf = 43	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60
	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:
	8 6	10 6	10 6	10 6 11	10 6 11	10 6 11	10 6 11	10 6 11	10 6 11
	Kgf = 36	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 54	Kgf = 54	Kgf = 54	Kgf = 54	Kgf = 54	Kgf = 54

Парам.	Результаты работы алгоритма								
	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:
	15 12	11	11	15 12	15 12	15 12	15 12	15 12	15 12
	Kgf = 60	Kgf = 8	Kgf = 8	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60
	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:
	9	15 12	15 12	9	9	9	9	9	9
	Kgf = 22	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22
	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:						
	10	9	9						
	Kgf = 12	Kgf = 22	Kgf = 22						
	Состав ГФ 6:								
	14								
	Kgf = 15								
	Состав ГФ 7:								
	11								
	Kgf = 8								
n	7	5	5	4	4	4	4	4	4
z	2	1	1	1	1	1	1	1	1
K _{АО}	585	390	390	325	325	325	325	325	325
m	18	13	13	13	13	13	13	13	13
γ	2127,67	1499,33	1499,33	1347,67	1347,67	1347,67	1347,67	1347,67	1347,67

Таблица В.8 – результаты работы алгоритма оптимизации структуры функций

Парам.	Результаты работы алгоритма								
k _{ВМ}	70	70	70	70	70	70	70	70	70
S _{2кр.}	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Парам.	Результаты работы алгоритма								
	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:
	3 4 5 13 1 2 7	3 4 5 8 13 1 2 7 14 11	3 4 5 8 13 1 2 7 14 11	3 4 5 8 13 1 2 7 14 11	3 4 5 8 13 1 2 7 14 11	3 4 5 8 13 1 2 7 14 11	3 4 5 8 13 1 2 7 14 11	3 4 5 8 13 1 2 7 14 11	3 4 5 8 13 1 2 7 14 11
	Kgf = 43	Kgf = 68	Kgf = 68	Kgf = 68	Kgf = 68	Kgf = 68	Kgf = 68	Kgf = 68	Kgf = 68
	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:
	8 6	10 6	10 6	10 6 9	10 6 9	10 6 9	10 6 9	10 6 9	10 6 9
	Kgf = 36	Kgf = 46	Kgf = 46	Kgf = 68	Kgf = 68	Kgf = 68	Kgf = 68	Kgf = 68	Kgf = 68
	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:
	15 12	15 12	15 12	15 12	15 12	15 12	15 12	15 12	15 12
	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60
	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:						
	9	9	9						
	Kgf = 22	Kgf = 22	Kgf = 22						
	Состав ГФ 5:								
	10								
	Kgf = 12								
	Состав ГФ 6:								
	14								
	Kgf = 15								
	Состав ГФ 7:								
	11								
	Kgf = 8								
n	7	4	4	3	3	3	3	3	3
z	2	1	1	1	1	1	1	1	1
K _{AO}	630	350	350	280	280	280	280	280	280
m	18	12	12	12	12	12	12	12	12
y	2292,5	1400	1400	1242,5	1242,5	1242,5	1242,5	1242,5	1242,5

Таблица В.9 – результаты работы алгоритма оптимизации структуры функций

Парам.	Результаты работы алгоритма								
K _{BM}	75	75	75	75	75	75	75	75	75
S _{2кр.}	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:
	3 4 5 13 1 2 6	3 4 5 8 13 1 2 6	3 4 5 8 13 1 2 6	3 4 5 8 13 1 2 6	3 4 5 8 13 1 2 6	3 4 5 8 13 1 2 6	3 4 5 8 13 1 2 6	3 4 5 8 13 1 2 6	3 4 5 8 13 1 2 6
	Kgf = 72	Kgf = 74	Kgf = 74	Kgf = 74	Kgf = 74	Kgf = 74	Kgf = 74	Kgf = 74	Kgf = 74
	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:
	8 7	10 7	10 7	10 7 9 11 14	10 7 9 11 14	10 7 9 11 14	10 7 9 11 14	10 7 9 11 14	10 7 9 11 14
	Kgf = 7	Kgf = 17	Kgf = 17	Kgf = 62	Kgf = 62	Kgf = 62	Kgf = 62	Kgf = 62	Kgf = 62
	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:
	15 12 14	11 14 12	11 14 12	15 12	15 12	15 12	15 12	15 12	15 12
	Kgf = 75	Kgf = 51	Kgf = 51	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60
	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:						
	9	15	15						
	Kgf = 22	Kgf = 32	Kgf = 32						
	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:						
	10	9	9						
	Kgf = 12	Kgf = 22	Kgf = 22						
	Состав ГФ 6:								
	11								
	Kgf = 8								
n	6	5	5	3	3	3	3	3	3
z	2	1	1	1	1	1	1	1	1
K _{АО}	600	450	450	300	300	300	300	300	300
m	12	18	18	16	16	16	16	16	16
y	1800	1850	1850	1400	1400	1400	1400	1400	1400

Таблица В.10 – результаты работы алгоритма оптимизации структуры функций

Парам.	Результаты работы алгоритма								
к _{ВМ}	80	80	80	80	80	80	80	80	80
S _{2кр.}	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:
	3 4 5 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7
	Kgf = 77	Kgf = 79	Kgf = 79	Kgf = 79	Kgf = 79	Kgf = 79	Kgf = 79	Kgf = 79	Kgf = 79
	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:
	8	10	10	10 9 11 14	10 9 11 14	10 9 11 14	10 9 11 14	10 9 11 14	10 9 11 14
	Kgf = 2	Kgf = 12	Kgf = 12	Kgf = 57	Kgf = 57	Kgf = 57	Kgf = 57	Kgf = 57	Kgf = 57
	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:
	15 12 14	11 14 12	11 14 12	15 12	15 12	15 12	15 12	15 12	15 12
	Kgf = 75	Kgf = 51	Kgf = 51	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60	Kgf = 60
	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:						
	9	15	15						
	Kgf = 22	Kgf = 32	Kgf = 32						
	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:						
	10	9	9						
	Kgf = 12	Kgf = 22	Kgf = 22						
	Состав ГФ 6:								
	11								
	Kgf = 8								
n	6	5	5	3	3	3	3	3	3
z	2	1	1	1	1	1	1	1	1
K _{АО}	640	480	480	320	320	320	320	320	320
m	14	16	16	15	15	15	15	15	15
y	2680	2700	2700	2300	2300	2300	2300	2300	3040

Таблица В.11 – результаты работы алгоритма оптимизации структуры функций

Парам.	Результаты работы алгоритма								
к _{ВМ}	85	85	85	85	85	85	85	85	85
S _{2кр.}	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:
	3 4 5 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7
	Kgf = 77	Kgf = 79	Kgf = 79	Kgf = 79	Kgf = 79	Kgf = 79	Kgf = 79	Kgf = 79	Kgf = 79
	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:
	8	10	10	10 9 11 14 12	10 9 11 14 12	10 9 11 14 12	10 9 11 14 12	10 9 11 14 12	10 9 11 14 12
	Kgf = 2	Kgf = 12	Kgf = 12	Kgf = 85	Kgf = 85	Kgf = 85	Kgf = 85	Kgf = 85	Kgf = 85
	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:
	15 12 14	11 14 12	11 14 12	15	15	15	15	15	15
	Kgf = 75	Kgf = 51	Kgf = 51	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32
	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:						
	9	15	15						
	Kgf = 22	Kgf = 32	Kgf = 32						
	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:						
	10	9	9						
	Kgf = 12	Kgf = 22	Kgf = 22						
	Состав ГФ 6:								
	11								
	Kgf = 8								
n	6	5	5	3	3	3	3	3	3
z	2	1	1	1	1	1	1	1	1
K _{АО}	680	510	510	340	340	340	340	340	340
m	14	16	16	14	14	14	14	14	14
y	2720	2730	2730	2200	2200	2200	2200	2200	3060

Таблица В.12 – результаты работы алгоритма оптимизации структуры функций

Парам.	Результаты работы алгоритма								
K_{BM}	90	90	90	90	90	90	90	90	90
$S_{2кр.}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:
	3 4 5 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7 11	3 4 5 8 13 1 2 6 7 11	3 4 5 8 13 1 2 6 7 11	3 4 5 8 13 1 2 6 7 11	3 4 5 8 13 1 2 6 7 11	3 4 5 8 13 1 2 6 7 11	3 4 5 8 13 1 2 6 7 11
	Kgf = 77	Kgf = 79	Kgf = 87	Kgf = 87	Kgf = 87	Kgf = 87	Kgf = 87	Kgf = 87	Kgf = 87
	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:
	8	10	10	10 9 14 12	10 9 14 12	10 9 14 12	10 9 14 12	10 9 14 12	10 9 14 12
	Kgf = 2	Kgf = 12	Kgf = 12	Kgf = 77	Kgf = 77	Kgf = 77	Kgf = 77	Kgf = 77	Kgf = 77
	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:
	15 12 14	11 14 12	15 12 14	15	15	15	15	15	15
	Kgf = 75	Kgf = 51	Kgf = 75	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32
	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:						
	9	15	9						
	Kgf = 22	Kgf = 32	Kgf = 22						
	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:							
	10	9							
	Kgf = 12	Kgf = 22							
	Состав ГФ 6:								
	11								
	Kgf = 8								
n	6	5	4	3	3	3	3	3	3
z	2	1	1	1	1	1	1	1	1
K_{AO}	720	540	450	360	360	360	360	360	360
m	14	16	12	14	14	14	14	14	14

Парам.	Результаты работы алгоритма								
y	2760	2760	2130	2220	2220	2220	2220	2220	1980

Таблица В.13 – результаты работы алгоритма оптимизации структуры функций

Парам.	Результаты работы алгоритма								
k _{BM}	95	95	95	95	95	95	95	95	95
S _{2кр.}	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:
	3 4 5 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14
	Kgf = 77	Kgf = 94	Kgf = 94	Kgf = 94	Kgf = 94	Kgf = 94	Kgf = 94	Kgf = 94	Kgf = 94
	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:
	8	10	10	10 9 11 12	10 9 11 12	10 9 11 12	10 9 11 12	10 9 11 12	10 9 11 12
	Kgf = 2	Kgf = 12	Kgf = 12	Kgf = 70	Kgf = 70	Kgf = 70	Kgf = 70	Kgf = 70	Kgf = 70
	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:
	15 12 14	11	11	15	15	15	15	15	15
	Kgf = 75	Kgf = 8	Kgf = 8	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32
	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:						
	9	15 12	15 12						
	Kgf = 22	Kgf = 60	Kgf = 60						
	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:						
	10	9	9						
	Kgf = 12	Kgf = 22	Kgf = 22						
	Состав ГФ 6:								
	11								
	Kgf = 8								
n	6	5	5	3	3	3	3	3	3

Парам.	Результаты работы алгоритма								
z	2	1	1	1	1	1	1	1	1
K _{АО}	760	570	570	380	380	380	380	380	380
m	14	12	12	15	15	15	15	15	15
y	2800	2310	2310	2360	2360	2360	2360	2360	2660

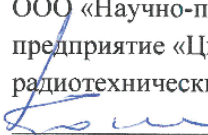
Таблица В.14 – результаты работы алгоритма оптимизации структуры функций

Парам.	Результаты работы алгоритма								
k _{ВМ}	100	100	100	100	100	100	100	100	100
S _{2кр.}	2	2	2	2	2	2	2	2	2
R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:	Состав ГФ 1:
	3 4 5 13 1 2 6 7	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14	3 4 5 8 13 1 2 6 7 14
	Kgf = 77	Kgf = 94	Kgf = 94	Kgf = 94	Kgf = 94	Kgf = 94	Kgf = 94	Kgf = 94	Kgf = 94
	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:	Состав ГФ 2:
	8	10	10	10 9 11 12	10 9 11 12	10 9 11 12	10 9 11 12	10 9 11 12	10 9 11 12
	Kgf = 2	Kgf = 12	Kgf = 12	Kgf = 70	Kgf = 70	Kgf = 70	Kgf = 70	Kgf = 70	Kgf = 70
	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:	Состав ГФ 3:
	15 12 14	11	11	15	15	15	15	15	15
	Kgf = 75	Kgf = 8	Kgf = 8	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32	Kgf = 32
	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:	Состав ГФ 4:						
	9	15 12	15 12						
	Kgf = 22	Kgf = 60	Kgf = 60						
	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:	Состав ГФ 5:						
	10	9	9						
	Kgf = 12	Kgf = 22	Kgf = 22						
	Состав ГФ 6:								

Парам.	Результаты работы алгоритма								
	11								
	Kgf = 8								
n	6	5	5	3	3	3	3	3	3
z	2	1	1	1	1	1	1	1	1
K _{AO}	800	600	600	400	400	400	400	400	400
m	14	12	12	15	15	15	15	15	15
y	2840	2340	2340	2380	2380	2380	2380	2380	2800

Приложение Г

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Научно-производственное
предприятие «Цифровые
радиотехнические системы»
 Е. Л. Карапетян
«20» ноября 2017 г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы Хакимова Дмитрия Валерьевича, выполненной на тему «Автоматизация процесса проектирования структуры функций комплексов бортового оборудования построенных на принципах интегральной модульной авионики» в разработках ООО «Научно-производственное предприятие «Цифровые радиотехнические системы»

Настоящий акт подтверждает, что ряд результатов, полученных в диссертационной работе Хакимова Д. В., применен при разработке аэродромного радиолокационного комплекса «Валдай», в частности:

- была использована математическая модель структуры функций;
- был использован алгоритм построения структуры функций;
- на основе построенной модели структуры функций АРЛК «Валдай» была выполнена оценка эффективности использования ряда составных частей серийного производства.

Использование научно-обоснованных технических решений по методологии проектирования структуры функций изделия, использованных при разработке АРЛК «Валдай» позволило определить необходимость доработки некоторых составных частей комплекса с целью снижения его общей аппаратной и программной избыточности, упрощения структуры и снижения себестоимости.

Заместитель генерального директора
по исследованиям и разработке –
Генеральный конструктор



В. В. Шифрин