

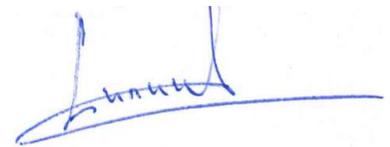
**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (МАИ)**

---

*На правах рукописи*

УДК: 681.518.3+629.5.05+004.051



**Силин Никита Денисович**

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ  
ДЛЯ ЗАДАЧ ЭРГОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ  
СТАТИЧЕСКОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ БОРТОВЫХ СИСТЕМ**

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка  
информации, статистика (технические науки)

**Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Научный руководитель:

К. Т. Н., доцент

Неретин Е. С.

г. Москва, 2024 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ .....	16
1.1 Анализ бортовых систем отображения информации гражданского воздушного судна .....	16
1.2 Анализ эргономических требований, предъявляемых к системам отображения информации .....	21
1.3 Анализ подходов, методов и средств эргономической оценки и верификации систем отображения информации .....	25
1.3.1 Подход к эргономической оценке статической графической информации с привлечением экспертной группы .....	25
1.3.2 Подход к верификации статической графической информации в соответствии с Р-4754А «Руководство по разработке воздушных судов гражданской авиации и систем».....	30
1.3.3 Подход к верификации статической графической информации в соответствии с КТ-178С «Квалификационные требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники».....	34
1.3.4 Подход к эргономической оценке статической графической информации с применением методики «Резервы внимания».....	36
1.3.5 Комплексы и инструменты верификации статической графической информации .....	37
1.3.6 Подход к эргономической оценке статической графической информации с использованием данных видеоокулографии .....	40
1.3.7 Подход к эргономической оценке статической графической информации с использованием данных частоты сердечных сокращений .....	41
1.3.8 Подход к эргономической оценке статической графической информации с применением технологий виртуальной реальности .....	41
1.4 Постановка задачи исследования .....	41
1.5 Выводы по Главе 1 .....	45
2. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ, МЕТОДИЧЕСКОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭРГОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	49
2.1 Архитектура системы поддержки принятия решения.....	49

2.2 Модуль обработки исходных данных .....	51
2.3 Методическое и функциональное обеспечение расчетного модуля для задач эргономической оценки статической графической информации .....	51
2.3.1 Анализ критериев эргономической оценки.....	51
2.3.3 Комплексная методика расчета эргономических характеристик статической графической информации .....	70
2.4 Методическое обеспечение модуля поддержки принятия решения для задач эргономической оценки статической графической информации .....	78
2.4.1 Выявление «доминирующей» и «доминируемой» альтернатив .....	78
2.4.2 Обзор современных методов поддержки принятия решения в задачах многокритериального выбора.....	81
2.4.3 Сравнительный обзор современных методов поддержки принятия решения в задачах многокритериального выбора .....	107
2.4.4 Методика сравнительной оценки и приоритизации альтернативных вариантов статической графической информации с применением метода уверенных суждений для задач поддержки принятия решения.....	115
2.4.5 Формирование результатов работы модуля поддержки принятия решения для задач эргономической оценки статической графической информации .....	118
2.5 Выводы по Главе 2 .....	119
<b>ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭРГОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ.....</b>	<b>122</b>
3.1 Концепция создания современных бортовых систем отображения информации .....	122
3.2 Алгоритмическое обеспечение модуля обработки исходных данных для задач эргономической оценки статической графической информации .....	129
3.3 Алгоритмическое обеспечение расчетного модуля для задач эргономической оценки статической графической информации .....	131
3.3.1 Алгоритмическое обеспечение функции расчета визуальных характеристик статической графической информации .....	131
3.3.2 Алгоритмическое обеспечение функции расчета пространственно-временных характеристик статической графической информации .....	135
3.3.3 Алгоритмическое обеспечение функции учета психологических принципов при проектировании статической графической информации .....	141

3.3.4 Алгоритмическое обеспечение комплексной методики расчета эргономических характеристик статической графической информации.....	143
3.4 Алгоритмическое обеспечение модуля поддержки принятия решения для задач эргономической оценки статической графической информации .....	145
3.5 Программное обеспечение системы поддержки принятия решения.....	152
3.5.1 Определение множества способов учета неопределенности в модуле поддержки принятия решения .....	152
3.5.2 Программная реализация системы поддержки принятия решения .....	154
3.6 Техническое обеспечение системы поддержки принятия решения .....	161
3.7 Выводы по Главе 3 .....	161
4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭРГОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ .....	163
4.1 Разработка альтернативных вариантов статической графической информации для оценки эффективности предложенного решения .....	163
4.2 Оценка эффективности разработанной системы поддержки принятия решения для задач эргономической оценки статической графической информации .....	166
4.2.1 Проведение эргономической оценки с применением системы поддержки принятия решения .....	166
4.2.2 Проведение эргономической оценки с привлечение экспертной группы	168
4.3 Выводы по Главе 4 .....	180
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	183
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	185
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	188

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Безопасность полетов гражданских воздушных судов (ВС) является основным фактором, учитываемым на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) создания систем, аппаратуры и программного обеспечения (ПО), предназначенных для перспективных комплексов бортового оборудования (КБО).

Одной из основных причин авиационных происшествий появления продолжает оставаться человеческий фактор [1 – 3] в процессе взаимодействия экипажа с элементами управления ВС. Несмотря на то, что количество авиационных происшествий постоянно уменьшается, их уровень остается неприемлемым.

На современных ВС основным средством человеко-машинного взаимодействия в эргатической системе «Пилот – ВС» являются широкоформатные дисплеи, которые принято называть системами отображения информации (СОИ), входящие в состав информационно-управляющего поля (ИУП) кабины экипажа, являющейся наиболее функционально нагруженной бортовой системой гражданского ВС. Основное количество ошибочных действий пилотов при взаимодействии с ВС происходит в процессе анализа, обработки и манипуляции графической информации (ГИ) на СОИ. Большинство из них возникают при попытке экипажа на особо загруженных участках полета отреагировать управляющими воздействиями на факторы окружающей среды или изменение поведения и параметров ВС. При таких условиях отображаемая ГИ может быть неправильно интерпретирована из-за непредсказуемости, внезапности и срочности и способствовать развитию неблагоприятной ситуации во время полета [4].

В перспективных КБО реализован функционал, позволяющий автоматизировать процесс управления и снизить рабочую нагрузку на экипаж. Однако, его применение может привести к излишней уверенности экипажа. Использовать данные системы следует лишь для облегчения рутинной умственной работы пилота, связанной с расчетами, и ни в коем случае не исключать пилота из процесса управления ВС, контроля за пилотированием и навигационной обстановкой. Исключение экипажа из системы «Пилот – ВС» недопустимо, так как контроль за

процессом пилотирования должен быть непрерывным, и в экстренных ситуациях управление самолетом всегда должно оставаться за пилотом.

Экипаж во время всего полета взаимодействует с СОИ, на котором одновременно отображаются высотные и скоростные характеристики, данные от навигационных систем, состояние топливной системы, параметры состояния самолетных систем, информация о плане полета и данные самолетовождения и т. д. При полете в условиях автопилотирования экипаж обязан постоянно проверять положение ВС по пилотажным и навигационным приборам, высотомерам, указателям скорости, авиагоризонту и индикаторам курсовых углов. Быстро меняющаяся ситуация в полете требует от пилотов высокой организации визуальной работы, при которой необходимо оперативно проанализировать, обработать и выявить нужные элементы ГИ бортовых систем для своевременного и правильного принятия решений. Данный аспект накладывает большую ответственность на инженеров СОИ, поскольку они должны учесть все условия и требования для того, чтобы пилоты могли быстрого и эффективно обнаружить необходимые визуальные элементы из большого множества с учетом ограниченных психофизиологических возможностей человека [5].

При разработке ГИ особое внимание уделяется наполнению, форме отображения и визуальным свойствам ее статических элементов (статическая текстовая информация, кнопки выбора и переключения данных, поля ввода, выпадающие списки, всплывающие окна и т. д.), поскольку они являются основным интерактивным слоем человеко-машинного взаимодействия в эргатической системе «Пилот – ВС», графически описывают функционал реализованной самолетной системы, а также, не завися от конкретного этапа полета индицируются постоянно на СОИ.

На ранней стадии эргономической компоновки практически невозможно определить максимально эффективное решение и учесть в единственном варианте исполнения все тонкости оптимального представления статической ГИ. Для

устранения данной сложности на практике создается множество альтернативных вариантов, учитывающие различные аспекты эффективного представления ГИ: логику отображения, внешние виды, цвета, стили, шрифты, пространственное расположение, влияющие на визуальную, моторную и когнитивную нагрузки на экипаж [6, 7]. В работах [8 – 10] приведены возможные подходы к оценке эффективности ГИ, оптимизации цветового решения при ее проектировании, а также учету психологических аспектов зрительного восприятия, которые могут быть применены инженерами в процессе разработки визуальной составляющей бортовых систем.

Для определения наилучшей альтернативы статических элементов ГИ из всего разработанного множества необходимо проводить комплексную эргономическую оценку эффективности каждого варианта [11]. Существующие на сегодняшний день современные подходы, методы и средства в части эргономической оценки статической ГИ на бортовых СОИ предоставляют широкие возможности, но основываются на определении точечных показателей, что не позволяет комплексно подойти к исследованию и оценке эффективности ГИ, или предлагают проведение оценки с привлечением экспертной группы, что является субъективным и времязатратным процессом на подготовку, сбор, формализацию экспертного мнения и проведение самой экспертизы. Стоит отметить, что неоптимальное и некачественное решение с точки зрения представления статической ГИ может влиять на безопасность полета, поскольку повышает сложность взаимодействия пилотов с ней. В связи с этим, разработка комплексной методики оценки эффективности статической ГИ является особо актуальной задачей, поскольку позволит рассмотреть большинство аспектов отображения и взаимодействия с ГИ с учетом психофизиологических способностей пилота [5].

Использование комплексной методики эргономической оценки позволит вычислить показатели основных оценочных критериев альтернативных вариантов статической ГИ, по которым возможно осуществить определение наилучшей

альтернативы с точки зрения эффективного представления. Определение процесса и подхода к поиску наилучшей альтернативы, которая будет лежать в основе разрабатываемой СОИ, также является важной задачей, поскольку потенциальные ошибки в принятии неоптимальных решений на раннем этапе эргономической компоновки могут повлечь за собой увеличение финансовых и временных ресурсов, нести риски доработок или отказа от выбранной альтернативы, а в случае допуска данной альтернативы на борт ВС может усложнить человеко-машинное взаимодействия с ней, тем самым понизив уровень безопасности полета. На помощь в определении наилучшей альтернативы в условиях многокритериальности приходят методы многокритериального выбора (поддержки принятия решения), которые зачастую реализованы в функционале систем поддержки принятия решений (СППР). Под процессом принятия решения в задаче настоящего исследования считается идентификация альтернативных вариантов исполнения статической ГИ и выбора среди них оптимального решения, основанного на ценностях и предпочтениях лиц, принимающего решение (ЛПР). Термин «оптимальность» имеет смысл с позиции ЛПР, которое, основываясь на своем опыте, делает выводы о выборе одного из предложенных вариантов таким образом, чтобы в итоге остался наиболее рациональный для ЛПР способ отображения статической ГИ, который оценивается этим же лицом по предварительно определенным критериям.

При существующем многообразии методов многокритериального выбора существует сложность в определении подходящего, который позволит повысить эффективность принятия решения за счет минимизации влияния человеческого фактора на результаты сравнительной оценки, проявляющееся в процессах назначения весовых коэффициентов и индексов согласия, попарном сравнении, согласовании экспертных мнений, построении функции полезности и т. д.; уменьшить временные затраты на проведение сравнительной оценки, которые требуются при формировании компетентной экспертной группы, а также сборе и интерпретации полученного экспертного мнения (экспертных оценок (ЭО)); учета

неформализованных мнений ЛПР, которые могут возникнуть в процессе анализа альтернативных вариантов; своей понятности ЛПР. Выбор трудного для понимания ЛПР метода, результатам которого он не будет доверять или требующего значительных временных затрат на проведение сравнительной оценки, может существенно усложнить процесс принятия решения, поэтому выявление наиболее подходящего метода многокритериального выбора для определения оптимального варианта исполнения статической ГИ по результатам эргономической экспертизы является актуальной задачей. Стоит отметить, что существующие СППР, которые предназначены только для выявления наилучшего решения из реализованного множества и не предназначенные для автоматизированного проведения комплексной эргономической оценки эффективности статической ГИ не позволяют полноценно решить поставленную задачу настоящего исследования, поскольку большинство эргономических показателей для статической ГИ отсутствуют в паспортах проектах СОИ и их необходимо формализовано рассчитывать для каждой альтернативы.

Учитывая тот факт, что в настоящее время присутствует постоянный рост количества статической ГИ, необходимой для предоставления пилотам во время полета, тогда как их психофизиологические возможности ограничены [12], считается актуальной задачей создание СППР, позволяющей автоматизировано произвести комплексную эргономическую оценку эффективности статической ГИ бортовых систем и определить наилучший вариант, позволяющий снизить временные затраты и количество ошибочных действий и пилотов при взаимодействии с ГИ в процессе выполнения полетного задания, тем самым повысить уровень безопасности полета.

**Степень проработанности темы исследования.** В развитие направления оценки эффективности графических интерфейсов существенные вклад внесли С. Уэйншек, В. М. Алефиренко, Д. Раскин, А. А. Харкевич, Б. С. Горячкин, В.В. Диковицкий, А. С. Звенигородский. А. Купер, В. Головач, Р. Торес, С. Ф. Сергеев, Ю. Г. Емельянова., А. В. Вострых., И. А. Пономарев, С. Е. Shannon, К. S. Park, V. L. Hartley, С. Stickel, М. Ebner. Исследованию теории и методов многокритериального

выбора и принятия решений посвящены работы авторов С. А. Пиявского, В. В. Малышева, С. И. Голубева, К. И. Сыпало, Д. А. Разумова, Т. Саати, Б. Руа, В. Парета, О. И. Ларичева, Д. В. Панова, П. Фишберна, Ю. Б. Гемейера, В. В. Подиновского.

**Цель диссертационной работы** – повышение уровня безопасности полетов за счет выявления наилучшего варианта исполнения статической ГИ бортовых систем на основании комплексной эргономической оценки эффективности.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены **задачи**:

- анализа бортовых СОИ и предъявляемых к ним эргономических требований;
- анализа современных подходов, методов и средств оценки эффективности статической ГИ бортовых систем;
- разработки архитектуры СППР, обеспечивающую автоматизированную комплексную эргономическую оценку статической ГИ бортовых систем и поддержку принятия решения ЛПР по определению наилучшей альтернативы;
- анализа существующих критериев эргономической оценки статической ГИ и формирования формализованных оценочных критериев для комплексной эргономической оценки эффективности статической ГИ бортовых систем;
- разработки методического и алгоритмического обеспечения комплексной оценки эффективности статической ГИ, учитывающее визуальные характеристики, пространственно-временные характеристики и учет психологических принципов;
- анализа часто применяемых методов поддержки принятия решения в задачах многокритериального выбора;
- разработки методического и алгоритмического обеспечения поддержки принятия решений ЛПР для задач многокритериального сравнения и приоритизации альтернативных вариантов статической ГИ по результатам эргономической оценки;
- разработки и тестирования программного обеспечения (ПО), реализующее предложенные алгоритмы, позволяющее моделировать работу СППР;
- оценки эффективности предложенного решения.

**Объект исследования** – бортовые СОИ гражданского ВС.

**Предмет исследования** – методическое и алгоритмическое обеспечение, предназначенные для проведения комплексной эргономической оценки эффективности статической ГИ бортовых систем и сравнительной оценки альтернативных вариантов.

**Методология и методы исследования:** системный анализ, теория принятия решения в задачах многокритериального выбора, методы экспертных оценок, комбинаторики, теории, проектирования сложных технических систем (информационных), теории вероятностей, инженерной психологии и эргономики.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана новая методика оценки эффективности статической ГИ бортовых систем, базирующаяся на формализованном определении количественных эргономических показателей по независимым направлениям: визуальные характеристики, пространственно-временные характеристики, учет психологических принципов при проектировании ГИ; в методике присутствует перечень оценочных критериев, впервые предложенных для оценки статической ГИ бортовых систем.

2. Разработано алгоритмическое обеспечение для решения задач поддержки принятия решений ЛПР, основанное на методе уверенных суждений ранее не использовавшегося для многокритериальной оценки альтернатив статической ГИ бортовых систем, позволяющее ранжировать альтернативы по вероятности их доминирования над остальными при учете всего множества способов учета неопределенностей.

3. Разработана архитектура СППР, обеспечивающая автоматизированные расчет эргономической оценки эффективности статической ГИ бортовых систем в соответствии с предложенной методикой и поддержку принятия решения ЛПР на основании эргономических показателей с применением метода уверенных суждений, позволяющая снизить временные затраты и субъективное влияние на результаты

сравнительной оценки; анализ предметной области позволяет утверждать, что подобные решения в настоящее время отсутствуют.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика эргономической оценки эффективности статической ГИ бортовых систем, базирующаяся на формализованном определении количественных эргономических показателей по независимым направлениям: визуальные и пространственно-временные характеристики, учет психологических принципов при проектировании ГИ.

2. Алгоритмическое обеспечение для решения задач поддержки принятия решений ЛПР, основанное на методе уверенных суждений ранее не использовавшегося для многокритериальной оценки альтернатив статической ГИ бортовых систем, позволяющее ранжировать альтернативы по вероятности их доминирования над остальными при учете всего множества способов учета неопределенностей.

3. Архитектура СППР, обеспечивающая автоматизированные расчеты эргономической оценки эффективности статической ГИ бортовых систем в соответствии с предложенной методикой и поддержку принятия решения ЛПР на основании эргономических показателей с применением метода уверенных суждений, позволяющая снизить субъективное влияние на результаты сравнительной оценки.

4. Результаты моделирования СППР, подтвердившие достоверность полученных в работе теоретических выводов.

**Практическая значимость работы.** Применение результатов диссертационной работы позволяет повысить уровень безопасности полетов за счет автоматизированного выявления наилучшего варианта представления статической ГИ бортовых систем на основании комплексной эргономической оценки эффективности, позволяющего снизить временные затраты и количество ошибочных действий пилотов при взаимодействии со статической ГИ в процессе выполнения полетного задания. Предложенное решение подходит для статической ГИ всех типов бортовых

СОИ, которые сочетают в себе концепцию интегрированной модульной авионики и использование при проектировании функции отображения ГИ авиационного стандарта ARINC 661.

**Достоверность результатов** подтверждается корректным применением математического аппарата и их экспериментальной проверкой.

**Внедрение результатов.** Основные полученные результаты внедрены в работу филиала ПАО «Яковлев» – Центр комплексирования по проекту «Разработка комплекса бортового радиоэлектронного оборудования самолета МС-21», ООО «ДС «БАРС» по проекту «Разработка комплекса бортового оборудования для среднемагистрального самолета SJ-100» и в учебный процесс на кафедре 703 «Системное проектирование авиакomплексов» Института №7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» МАИ, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

**Апробация работы.** Основные положения работы апробированы на следующих конференциях:

- 1) XLVII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (Россия, г. Москва, 2021 г.);
- 2) 13-й Всероссийский конкурс «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Россия, г. Москва, 2021 г.);
- 3) X Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации» (Россия, г. Иркутск, 2021 г.);
- 4) 20-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Россия, г. Москва, 2021 г.);
- 5) XI Национальная научно-техническая конференция «Союз машиностроителей России» (Россия, г. Москва, 2021 г.);
- 6) XLVIII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (Россия, г. Москва, 2022 г.);

7) XI Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации» (Россия, г. Иркутск, 2022 г.);

8) 14-й Всероссийский конкурс «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Россия, г. Москва, 2022 г.);

9) 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Россия, г. Москва, 2022 г.);

Также ключевые результаты работы опубликованы в виде:

– 2 тезисов докладов в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus;

– 3 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации;

– 11 тезисов в изданиях, индексируемых в Российском индексе научного цитирования.

**Структура и объем работы.** Диссертация включает в себя введение, четыре основных раздела, заключение, список используемой литературы, список сокращений и условных обозначений. Общий объем работы составляет 204 страниц, включая 34 рисунков, 12 таблиц, 137 формул. Список использованных источников содержит 160 наименований.

**В первой главе** проведен аналитический обзор вариантов исполнения бортовых СОИ, входящих в состав КБО гражданских ВС, предъявляемых к ним эргономических требований. Помимо этого, проанализированы существующие подходы, средства и инструменты оценки эффективности и верификации статической ГИ бортовых систем, основанные на ЭО; на оценке точечных аспектов представления ГИ, а также критериях, косвенно связанных с оценкой эффективности представления статической ГИ; определении соответствия процессам разработки и верификации на этапах ЖЦ ГИ.

**Во второй главе** разработана архитектура СППР для решения задачи повышения уровня безопасности полета за счет выявления наилучшего варианта исполнения статической ГИ на основании эргономической оценки, состоящая из модуля обработки исходных данных (ИД), модуля расчета эргономических характеристик и модуля поддержки принятия решения (МППР), в т. ч. описаны ее функции, методическое и алгоритмическое обеспечение. Для создания расчетного модуля и МППР рассмотрены существующие критерии оценки статической ГИ, проведен сравнительный обзор часто применяемых методов поддержки принятия решения в задачах многокритериального выбора, выделены преимущества и недостатки для каждого подхода.

**В третьей главе** описано алгоритмическое обеспечение разработанных модулей СППР (модуля обработки ИД, модуля расчета эргономических характеристик, основанного на разработанной комплексной методике расчета эргономических характеристик статической ГИ бортовых систем, МППР, в основе которого лежит метод уверенных суждений для поддержки принятия решения ЛПР). Разработано программное обеспечение (ПО), реализующее разработанные алгоритмы и моделирующее работу СППР. Проведено тестирование разработанного решения и отражены его итоги.

**В четвертой главе** проведена оценка эффективности предложенного решения на 6 альтернативных вариантах статической ГИ путем сравнения итогов работы СППР с дополнительно проведенной эргономической экспертизой с привлечение летной экспертной группы, основанной на методе попарного сравнения. Отражены получившиеся результаты оценки.

**В заключении** диссертационной работы приведены основные выводы и результаты.

## 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 Анализ бортовых систем отображения информации гражданского воздушного судна

Большое количество специалистов в области разработки СОИ подчеркивают, что создание эффективного представления ГИ требует научного подхода и научных методов [13 – 16].

Широкоизвестные исследования в области инженерной психологии и эргономики показывают, что основную часть информации (около 80 %) экипаж ВС получает посредством визуального канала (через органы зрения), поэтому вопрос эффективного представления статической ГИ бортовых систем крайне важен и актуален. Такое представление не может и не должно быть исключительно интуитивным, а значит, необходимы формальные методики, модели и алгоритмы, позволяющие эффективно реализовать представление визуальной составляющей. Воспринимая визуальные сигналы от СОИ, пилот оценивает и контролирует параметры и общее состояние ВС, сравнивает полученные данные с необходимыми, анализирует возможные способы действий на события в окружающей среде или изменение характеристик ВС, принимает решение и выполняет управляющие действия. Таким образом, СОИ является оборудованием, которое обеспечивает экипажу высокий уровень ситуационной уверенности, увеличивая эффективность управления и увеличивая уровень безопасность полета. При взаимодействии с СОИ экипаж контролирует значительный перечень параметров:

- параметры высотно-скоростных характеристик и ограничения аэродинамики при полете ВС;
- состояние воздушной обстановки вокруг ВС, используя данные от УВД и системы предотвращения столкновений;
- пространственное положение ВС;
- данные самолетовождения

- навигационные данные, включающие курс, направление ветра и отклонение от заданного положения;
- активный, запасной, модифицированный планы полета, информацию о маршруте;
- схемы взлета и посадки, заход на посадку и режим ожидания в воздухе;
- расчет и прогнозирование значения веса ВС на каждом этапе полета, включая этап перед запуском двигателей и расходом топлива;
- данные о режимах управления полетом и тяге двигателей;
- навигационные параметры траектории полета;
- параметры и состояние общесамолетных систем.

В настоящее время наблюдается непрерывное увеличение объема статической ГИ, которую нужно отображать на экране интерфейса пилоту, что требует размещения на современных кабинах большого числа широкоформатных дисплеев. Вместе с набором различных устройств управления они образуют информационно-управляющее поле (ИУП), которое является одним из наиболее функционально насыщенных элементов бортового оборудования (рисунки 1.1 – 1.3).

Для снижения нагрузки на экипаж, при разработке статической ГИ инженерами тратится значительное количество усилий на создания альтернативных вариантов, учитывающие все аспекты эффективности ее отображения: интуитивно понятную логику отображения информации, ее внешнего вида, цветов, стилей шрифтов, положения и других, влияющих на когнитивную нагрузку на экипаж [6, 7].



Рисунок 1.1 Информационно-управляющее поле самолета MS-21



Рисунок 1.2. Информационно-управляющее поле самолета SSJ-100



Рисунок 1.3. Информационно-управляющее поле самолета A380

При стандартной конфигурации ИУП на левом и правом СОИ (внешних) располагается основной пилотажный кадр (PFD) и индикатор горизонтальной обстановки (HSI) (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4. Индикатор PFD и HSI

Остальные индикаторы являются многофункциональными (МФИ), позволяющие осуществить конфигурацию отображаемой на них информации в различных вариантах (в зависимости от заданных настроек). Вся необходимые данные для пилотирования ВС, содержится нижеперечисленных навигационных кадрах:

- Синоптический (SYN). Содержащую в себе данные о разных системах ВС, в число которых могут входить система управления, система кондиционирования воздуха, противообледенительная система, топливная система и т. д.
- Комплексный индикатор навигационной обстановки (ND) в разных режимах отображения.
- Кадр контрольных проверок (CHKL).
- Кадр, содержащую сводную информацию о состоянии самолетных систем (STATUS).
- Виртуальный пульт управления вычислительной системой самолетовождения (FMS VCP).

- Виртуальный пульт управления радиосредствами (RMS VCP).
- Кадр отображения предупреждающих сообщений и параметров работы авиадвигателей (EWD). На данном кадре располагаются данные о механизации крыла, температурные показатели, зона с графическими уведомлениями об отказах самолетных систем и возможные (рекомендательные) действия экипажа.

Примеры некоторых из перечисленных кадров показаны на рисунках 1.5, 1.6.



Рисунок 1.5. Индикация навигационного кадра (ND) и кадра отображения параметров двигателя и предупреждающих сообщений (EWD)



Рисунок 1.6. Индикация синоптического кадра (SYN) и навигационного кадра (ND) с форматом отображения «ROSE»

На рисунке 1.7 приведен пример стандартной конфигурации ИУП.

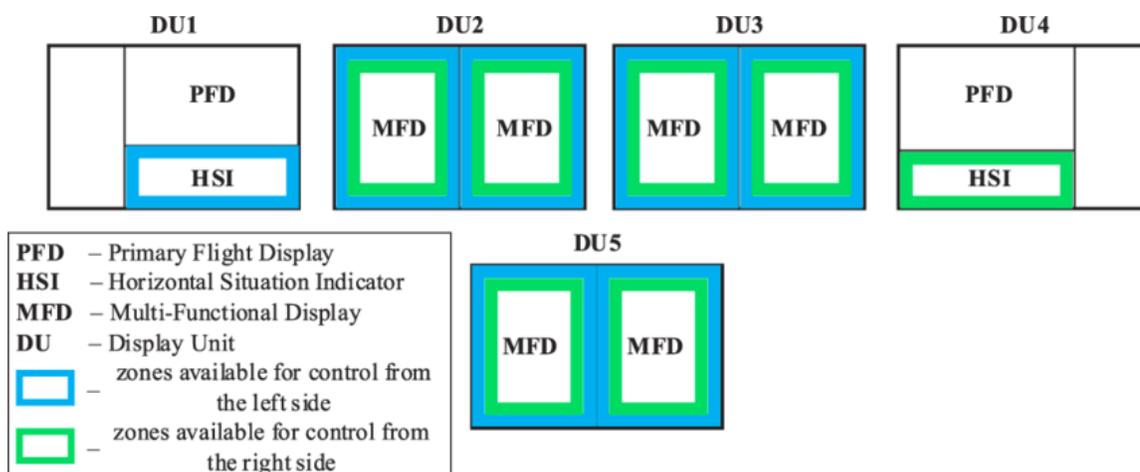


Рисунок 1.7. Стандартная конфигурация информационно-управляющего поля

В работе [17] представлена архитектура имитационного комплекса системы индикации перспективного ВС в составе стенда прототипирования, которая позволяет на ранней стадии разработки валидировать логику, варианты исполнения ГИ, проводить эргономическую оценку ИУП кабины экипажа, что позволяет снизить материально-временные затраты в процессе создания ВС.

## 1.2 Анализ эргономических требований, предъявляемых к системам отображения информации

Анализ существующих российских и международных стандартов выявил документы, ориентированные на применение эргономических аспектов при разработке СОИ прикладных программных продуктов. Например, в стандартах [18, 19] указаны рекомендации для проектирования СОИ, покрывающие множество аспектов взаимодействия человека с системой, а также направленные на наиболее эффективное взаимодействие системы «человек–машина».

В список применяемых в международных стандартах можно отнести документы [20 – 27]. Российские аналоги стандартов эргономики, применяемых при разработке прикладных программных изделий с СОИ [28 – 36].

В [37] указано, что основное количество авиационных происшествий и катастроф происходит в процессе взаимодействия пилотов с неудачными и неэффективными технологиями, применяемые в составе КБО, поэтому точное понимание психофизиологических возможностей и ограничений пилота, его

поведения в условиях эксплуатации ВС является ключевым для обеспечения безопасности полетов.

В авиационной промышленности одним из документов, содержащих эргономические положения в виде рекомендаций является ИКАО 9806 [37], описывающий характеристики взаимодействия человека и ГИ, которая должна обладать «дружественными» качествами: актуальность, точность, формат и оформление, словарный запас, ясность системы обозначений.

Основным документом в российской нормативной базе, содержащий эргономические положения для ГИ и бортовых СОИ в целом является руководство Р-25-11А [38]. Данный нормативный документ содержит рекомендации, которые в большинстве своем носят качественный характер, по конструкции, размещению, интеграции и сертификации СОИ самолетов транспортной категории. Пример представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Требования Р-25-11А в части используемых цветовых решений.

Параметр	Требование
Назначение	Цвета, используемые для одной цели, не должны применяться для другой цели, т. к. это может повлечь их некорректную интерпретацию.
Количество	Рекомендуется применять 6 или менее цветов.
Различимость	Цвета должны быть различимы во всем диапазоне размеров, форм и движений элементов и иметь достаточное разделение по хроматичности относительно других при всех ожидаемых условиях освещенности и эксплуатации.
Яркость	Недопустимо требовать от экипажа умения различать уровни яркости одного цвета, чтобы определить его смысл.

<p>Нерекомендуемые комбинации</p>	<p>Необходимо избегать цветовых комбинаций, одинаковых по яркости (например, темно-синего на черном, желтого на белом). Также не рекомендуются сочетания:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– насыщенный красный и голубой;</li> <li>– насыщенный красный и зеленый;</li> <li>– насыщенный голубой и зеленый;</li> <li>– насыщенный желтый и зеленый;</li> <li>– желтый на фиолетовом;</li> <li>– желтый на зеленом;</li> <li>– желтый на белом;</li> <li>– фиолетовый на зеленом;</li> <li>– зеленый на белом;</li> <li>– голубой на черном;</li> <li>– красный на черном.</li> </ul>
<p>Рекомендуемое кодирование элементов</p>	<p>Рекомендуется придерживаться следующих цветов для кодирования элементов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– аварийные сигналы: красный;</li> <li>– границы режимов полета или работы системы, превышения: красный / желтый / янтарный;</li> <li>– предупреждения – желтый / янтарный;</li> <li>– шкалы, циферблаты, связанные с ними информационные элементы: белый;</li> <li>– земля: коричневый;</li> <li>– небо: голубой;</li> <li>– включенные режимы / нормальные состояния: зеленый;</li> </ul>

	– разделительные линии, единицы измерения: светло коричневый.
Фон	Фоновый цвет (например, серый) не должен препятствовать восприятию налагаемых на него элементов.
Фоновая текстура	Применение текстуры для создания фона не должно ни приводить к потере удобочитаемости символов, налагаемых на нее, ни увеличивать визуальное загромождение или время восприятия информации
Прозрачность	Использование прозрачности должно быть минимизировано во избежание увеличения времени или некорректной интерпретации информации.

Приведенная выше документация с эргономическими требованиями обладает рядом особенностей, которые наряду с тем, что большинство разработчиков ГИ в первую очередь имеют компетенции в области программирования и не являются специалистами в области эргономики (могут не обладать опытом для учета тонкостей и деталей при эргономической экспертизе), могут привести к разработке неэффективного варианта отображения статической ГИ, который увеличит временные и финансовые затраты на доработку альтернативы, а также может усложнить человеко-машинное взаимодействие с ней. К данным особенностям можно отнести характер рекомендаций, которые в большинстве являются не количественными, а качественными, как приведено в таблице 1.1. Помимо этого, стандарты могут содержать возможные, но не единственные решения, что на практике вызывает случаи, при которых итоговый вариант статической ГИ определяется на основании ЭО или проектных решений, которые могут отличаться от рекомендаций.

По итогу многочисленных исследований было выявлено, что игнорирование эргономических требований приводит к существенным недостаткам при разработке бортовых СОИ, которые могут стать причиной ошибочных действий пилотов, что

приведет к невыполнению полетных заданий и авиационным происшествиям [39]. Помимо этого, инженерами ведутся работы по созданию методологий обнаружения ошибок, при проектировании систем индикации в части представления статической ГИ, а также выявлению и предотвращению обнаружения данных ошибок [40, 41].

### **1.3 Анализ подходов, методов и средств эргономической оценки и верификации систем отображения информации**

Постоянное увеличение количества отображаемой статической ГИ бортовых систем современных КБО делает актуальными исследования по проведению эргономической оценки, эффективному и оптимальной представлению, форме ее подачи [42], а также поддержке принятия решения в выборе наиболее оптимального варианта из всего разработанного множества с минимальной визуальной, когнитивной и моторной нагрузками, информационной загруженностью для членов экипажа, улучшенной ситуационную осведомленностью [43, 44]. Оценка эффективности графических элементов, отображаемых на СОИ, на основе которой производится выбор итогового варианта реализации всей ГИ, осуществляется объективным или субъективным подходом. На практике известны случаи проведения обеих оценок [45, 46]. Так же встречается использование инвазивных технических средств при проведении эргономической оценки ГИ бортовых систем.

На сегодняшний момент разрабатывается большое количество стендов прототипирования и имитационных комплексов, позволяющие проводить эргономическую оценку статической ГИ бортовых систем [47 – 49]. Инженеры исследуют различные подходы, позволяющие реализовать те или иные практические аспекты для увеличения возможностей более детального анализа и точной экспертизы.

#### **1.3.1 Подход к эргономической оценке статической графической информации с привлечением экспертной группы**

Для выполнения экспертизы необходимо сформировать группу квалифицированных специалистов, которые хорошо знают предмет экспертизы,

обладают достаточным опытом и способны делать обоснованные объективные выводы. К ЛПР предъявляются критерии отбора [50]:

- высокая общая осведомленность;
- глубокие знания в оцениваемой сфере;
- умение точно представлять изучаемый объект;
- интерес к анализируемым аспектам проблемы;
- опыт работы либо исследования в оцениваемой области;
- устойчивость оценок со временем без дополнительных данных, которые могут повлиять на оценку.

Решения, предложенные данными специалистами на основе своего опыта и квалификации, называют методами ЭО. Стоит заметить, что в авиационной промышленности данный метод является одним из самых часто применяемых при разработке, оптимизации, оценке эффективности и сравнительной оценке альтернатив статической ГИ. Причина этому – негативное влияние неэффективного представления статической ГИ на человеко-машинное взаимодействие с ним и, следовательно, на безопасность полета. Таким образом, летные эксперты определяют свои ЭО по тому или иному решению статической ГИ и выдвигают итоговое заключение по одобрению данного изменения или нет.

В таблице 1.2. указан пример одного из вариантов классификаций подходов получения экспертной оценок [50].

Таблица 1.2. Классификация подходов получения экспертной оценок

Подходы получения ЭО		
С учетом коллективной работы	С учетом индивидуального экспертного мнения	Частично коллегиальная работа
Совещания (метод "Комиссий")	Анкетирование: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Элементарные суждения</li> </ul>	

	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Группировка</li> <li>2. Ранжирования</li> <li>3. Парные сравнения</li> <li>4. Множественные сравнения</li> </ol> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Вероятностные оценки</li> <li>• Балльные оценки</li> <li>• Количественные оценки</li> </ul>	
Метод "Мозговой атаки"	Анкетирование с участием интервьюера	
Метод "Суда"	Интервью <ul style="list-style-type: none"> <li>• Свободная беседа</li> <li>• Интервью по типу "вопрос-ответ"</li> <li>• Метод "прекрасного допроса"</li> </ul>	
Деловые игры и сценарии	Другие методы	
Дерево целей		
Другие методы		

Описания методов получения экспертной оценки представлены ниже.

#### *Коллективная работы экспертной группы*

Данные методы получения ЭО основываются на коллективном обсуждении текущей проблемы по результатам которого принимается итоговое решение. В определенных случаях данную группу методов называют прямым получением общего мнения. Основное преимущество получения оценки такими методами заключается в возможности всестороннего рассмотрения объекта исследования. К недостаткам можно отнести сложность прихода к единому мнению, наличие авторитетных мнений среди определенных экспертов, трудности при сборе необходимой информации по объекту исследования.

### *Индивидуальное мнение членов экспертной группы*

Ключевое отличие подходов индивидуального мнения от коллективных заключается в том, что в первом способе осуществляться предварительное исследование объекта каждым экспертом отдельно, без какого-либо взаимодействия между собой. После окончания сбора информации она анализируется совместно всей экспертной группой. Такие методы обладают следующими преимуществами – оперативность исследования и возможность получения частной оценки основываясь на индивидуальных навыках каждого из экспертов. Недостатком указанных подходов считается достаточно частое формирование необъективных оценок.

### *Частично коллегиальная работа экспертов*

Данный способ получения оценок может совмещать в себе как методы коллективной работы экспертной группы, так и методы получения индивидуального мнения членов экспертной группы.

Независимо от выбранного метода получения ЭО, итоговый результат будет зависеть от того, насколько корректно подобранная экспертная группа. Оценка качества эксперта является достаточно сложной и многогранной проблемой [51, 52]. Из основных методов определения компетентности экспертов можно выделить:

- документационный метод, предполагающий оценку компетенции экспертной группы на основании числа публикаций и ссылок на работы конкретного эксперта, стаж, ученная степень и тд;
- тестовый метод, в основе которого лежит выбор экспертов по результатам решенных ими тестовых задач;
- методы взаимооценки и самооценки экспертов;
- метод непротиворечивости суждений эксперта [53];
- метод определения компетентности экспертов по исследуемой проблеме с применением формулы [50]:

$$K_{ki} = \frac{K_{ai} + K_{oci}}{K_{a\max} + K_{oc\max}}, \quad (1.1)$$

где  $K_{ai}$  – коэффициент аргументации;  $K_{oci}$  – коэффициент осведомленности.

По результатам полученных ЭО необходимо провести их обработку, которая состоять из следующих этапов:

1) определяется уровень компетенции экспертной группы и полученная обобщенная оценка;

2) при наличии нескольких вариантов экспертных мнений производится процесс их ранжирования, а также определяется зависимость между ними;

3) результативность метода ЭО в большей степени обеспечивается степенью согласованности мнений всех экспертов. Для этого проводится оценка согласованности экспертов с помощью коэффициентов ранговой корреляции и конкордации [54];

4) если в исследовании выявляются ошибки, то вычисляется оценка их допущения;

5) создается модель свойств исследуемого объекта на основании полученной экспертной оценки;

6) собираются данные всего процесса исследования для формирования окончательного отчета по результатам работы.

Несмотря на частоту использование и преимущества данного метода при эргономической экспертизе статической ГИ на бортовых СОИ, он обладает существенными недостатками:

- требует больших затрат временных ресурсов на формирования компетентной экспертной группы в исследуемой тематике, проведения объемных исследований с многочисленными анкетами, сборе и анализе ЭО, что зачастую невозможно реализовать в приемлемые сроки;

- эксперты должны опираться только на собственный опыт и мысли, нет возможности развить чью-то идею;

- наличие субъективизма при выставлении оценок, который влияет на точность, надежность результата исследования и может повлиять на выбор неоптимального решения, что будет влиять на безопасность полета;
- в авиационной промышленности оценка эффективности или верификация статической ГИ должны осуществляться на сертификационных стендах, которые ограничены в количестве, что требует дополнительных значительных временных ресурсов.

### **1.3.2 Подход к верификации статической графической информации в соответствии с Р-4754А «Руководство по разработке воздушных судов гражданской авиации и систем»**

Подход к проведению процесса «Верификация» подробно расписан в руководстве по разработке воздушных судов гражданской авиации и систем Р-4754А [55]. Назначением процесса верификация является обнаружение и регистрация ошибок, которые могли быть привнесены в других процессах ЖЦ ВС или системы. По данному руководству процесс «Верификация» состоит из набора мероприятий, назначением которых является верификация того, что реализация разрабатываемого объекта удовлетворяет требованиям с учетом предусмотренных условий эксплуатации. Для верификации ВС и вновь разрабатываемых бортовых систем могут быть применены четыре основных метода:

- a. Инспекция или рассмотрение
- b. Анализ
- c. Тестирование или демонстрация
- d. Опыт эксплуатации

Ниже рассмотрим подробно каждый из указанных мероприятий процесса «Верификация».

#### *Мероприятие «Инспекция или рассмотрение»*

Инспекция или рассмотрение – это специальным образом организованное рассмотрение (визуальное исследование) данных ЖЦ разрабатываемого объекта

исследования для верификации того, что заложенные требования удовлетворены в инкременте этого объекта или на конечном его этапе. Целью данных методов является обнаружение и регистрация проблем, рассматриваемых данных всего ЖЦ продукта. Обычно при проведении инспекции (рассмотрения) объекта исследования указываются перечень ИД (план верификации, эксплуатационные / функциональные / нефункциональные требования к системе и т.д.), проверочные перечни (чек-листы) или подобные средства, содержащие контрольный перечень вопросов для верификации, список получившихся замечаний в ходе проверки. Основным типом инспекции (рассмотрения) является инспекция того, что система или элемент соответствуют установленной физической реализации и конструктивным характеристикам.

Процесс инспекции (рассмотрения) фиксируется в отчетной форме и в случае необходимости передается для доработки объекта исследования. На текущий момент есть большое количество инструментов для проведения верификации указанным методом, одним из которых является система регистрации проблем и управления изменениями «Redmine».

#### *Мероприятие «Анализ»*

Анализ обеспечивает очевидность соответствия системы разработанным на нее требованиям при детальном рассмотрении ее заявленных функциональных и эксплуатационных возможностей, аспектов безопасности. Анализ должен включать оценку того, как система или элемент будут функционировать в нормальных и ненормальных условиях. Одним из таких анализов является анализ полноты покрытия требований, который позволяет провести контроль полноты покрытия по документу «Матрица трассируемости», содержащая информацию о трассировках требований.

#### *Мероприятие «Моделирование»*

Метод «Моделирование» используется в процессе верификации СТС для оценивания параметров и особенностей системы на начальных стадиях проектирования. Процесс представляет собой этапы вычислений и тестирования,

однако моделирование поведения детерминированных систем может также быть полностью вычислительным. Данный подход актуален тогда, когда требуется получать данные о проверке системы не только при конкретном наборе входных значений или поведении, а на всех уровнях системы. Основа метода заключается в демонстрации того, что система соответствует установленному тестовому сценарию. Для этого используются формальные подходы – создаются математические модели объектов и выдвигаемых к ним условий, затем проводится логический анализ их совместимости. Эффективность подхода зависит от точности моделей (степени их подобия реальному продукту и условиям).

Наиболее известным инструментом, содержащий в себе также функцию моделирования систем авионики, является российская разработка «MASIW». Инструмент задействует языки «REAL» и «AADL» для фиксации требований и отображения модели архитектурной структуры. Возможности «MASIW» многообразны и позволяют охватывать большую часть процессов ЖЦ продукта, включая подготовку отчетной документации, результатов тестирования и причин возможных отклонений [56].

#### *Мероприятие «Тестирование или демонстрация»*

В основе метода тестирование (демонстрация) лежит подтверждение соответствия ожидаемого и фактического поведения системы или элемента на определенном заранее конечном наборе тестовых сценариев. Рассмотрение готовности к тестированию устанавливает применимость тестовых примеров для проверки требований к объекту. Можно выделить две основные цели указанного метода:

– Продемонстрировать, что реализация объекта выполняет заложенные функции. По итогу тестирования данных функций получается оценка по критериям «Прошел/Не прошел», установленным в требованиях.

– Подтвердить, что реализованный объект не выполняет непредусмотренных функций, которые могут влиять на безопасность. При

определении непредусмотренного функционирования системы или элемента, или побочных эффектов может применяться неформальное тестирование и особая внимательность при обычном тестировании. Обнаруженные в ходе тестирования замечания должны быть зарегистрированы, корректирующие действия отслеживаться, а для доработанной системы или элемента проведено повторное тестирование.

Для тестирования (демонстрации) систем и элементов, входящих в состав КБО, зачастую применяются контрольно-диагностические комплексы (КДК), состоящие из программно-аппаратного средств с функцией регистрации выходных данных, обработанных по результатам полученных данных на входе. К основным функциям данных комплексов можно отнести осуществление информационного обмена с исследуемой системой или элементов по различным интерфейсам передачи данных, например, дискретные сигналы, данные по авиационным интерфейсам МКИО [57], семейства стандартов ARINC [58 – 60], и дальнейшая обработка полученных результатов.

Одним из наиболее известных инструментов типа КДК является «ФРЕГАТ». Функционал инструмента позволяет производить контроль устройств ввода/вывода; имитировать информационные потоки/сигналы, транслируемые по авиационным интерфейсам семейства ARINC [58 – 60]; обрабатывать получившие на входе данные, выполнять тестовую процедуру и производит оценку корректность работы системы; формировать отчетность результатов диагностирования и сведений об объекте контроля.

#### *Мероприятие «Опыт эксплуатации»*

Одним из методов получения верификационного зачета на изделие является основание оценки объекта и установки его на борт, а также свидетельств удовлетворительного опыта эксплуатации такой же системы на другом ВС. Применение данного метод обязывает верификаторов использовать документированный опыт эксплуатации совместно с инженерными и

эксплуатационными оценками для того, чтобы доказать, что все потенциальные значительные отказы устранены при этих установках на борту.

### **1.3.3 Подход к верификации статической графической информации в соответствии с КТ-178С «Квалификационные требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники»**

Мероприятия процесса верификации статической ГИ бортовых систем можно произвести в соответствии с документом «Квалификационные требования к ПО бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники» КТ-178С [61] / DO-178С [62], если рассматривать ГИ не как графическую составляющую, а как ПО. В данном случае, процесс верификации будет выявлять техническую оценку выходных данных процессов планирования, разработки и верификации ПО. Для достижения целей процесса верификации предусмотрены мероприятия рассмотрений, анализов и тестов, которые распределяются на:

- Рассмотрение и анализы ПО.
- Тестирование ПО.

Ниже рассмотрим подробно каждый из указанных мероприятий процесса «Верификация».

#### *Мероприятие «Рассмотрение и анализы ПО»*

Рассмотрение и анализы ПО проводятся применительно к выходным данным разработки ПО (требования высокого уровня к ПО, требования низкого уровня к ПО, архитектура ПО, Исходный Код, данные процесса интеграции) и отличаются тем, что рассмотрение дают качественную оценку правильности, а анализы повторно воспроизводимое свидетельство правильности.

Мероприятия рассмотрений и анализов позволяют обнаружить и зарегистрировать несоответствия в объектах, которые могли быть допущены в процессе их разработки. Данные мероприятия необходимы для подтверждения того,

что разработанные объекты достигают целей КТ-178С [61] / DO-178С [62]. Для каждого уровня данных разработки ПО существуют отдельные перечни целей. Например, при разработке требований высокого уровня к ПО необходимо учитывать, что они должны быть точными и непротиворечивыми. Целью данного требования является подтверждение, что каждое требование высокого уровня к ПО точно сформулировано, имеет однозначное толкование, достаточно детализировано и не противоречит другому требованию такого же уровня. Если рассмотреть Исходный Код, то одним из требований при его разработке является соответствие архитектуре ПО. Основная цель – подтвердить, что данный объект соответствует потокам данных и управления, которые заложены в архитектуре ПО.

#### *Мероприятие «Тестирование ПО»*

Данное мероприятие позволяет продемонстрировать, что ПО удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям, а ошибки, которые могли привести к недопустимым отказным состояниям устранены. Целями мероприятия является подтверждение, что:

- Исполняемый Объектный Код соответствует требованиям высокого уровня.
- Исполняемый Объектный Код является робастным по отношению к требованиям высокого уровня.
- Исполняемый Объектный Код соответствует требованиям низкого уровня.
- Исполняемый Объектный Код является робастным по отношению к требованиям низкого уровня.
- Исполняемый Объектный Код является совместимым с целевым вычислителем.

В процессе тестирования ПО проводят тестовые примеры в допустимом диапазоне и тестовые примеры на робастность,

Помимо указанного, к тестированию ПО относят следующие анализы:

- анализ покрытия требований тестами, при котором формируется матрица трассируемости с целью контроля полноты их охвата в процессе верификации;
- анализ структурного покрытия, определяющий какая структура кода, включая интерфейсы между компонентами, не была выполнена тестовыми процедурами, основанными на требованиях
- анализ тестового покрытия, состоящий из анализа покрытия требований и анализа структурного покрытия.

Известными инструментами верификации, позволяющие произвести заваленные анализы в КТ-178С [61] / DO-178С [62] являются инструменты семейства «Certi»:

- CertiCover – детерминированный инструмент верификации ПО, позволяющий собрать данные по структурному покрытию при выполнении тестов. Помимо этого, инструмент формирует протокол о покрытии исходного кода ПО для дальнейшего выполнения анализа и выполняет анализ потоков данных и потоков управления.
- CertiTime – детерминированный инструмент верификации ПО, позволяющий выполнить оценку наихудшего случая времени исполнения.
- CertiStack – детерминированный инструмент верификации ПО, позволяющий выполнить анализ памяти.

#### **1.3.4 Подход к эргономической оценке статической графической информации с применением методики «Резервы внимания»**

В работе [63] проведена наземная оценка выявления оптимальной альтернативы ГИ на базе диалогово-моделирующего комплекса кабины экипажа вертолетов с целью выявления загруженности летчика процессом пилотирования. В основе оценки лежала методика «Резервы внимания», реализуемая с помощью аппаратуры «Физиолог-М».

В процессе исследований структуры распределения внимания летчика регистрировались направления взгляда с помощью прибора «Нас». После окончания эксперимента с летчиком проводилось интервью для определения особенностей взаимодействия с оцениваемыми вариантами ГИ, возможных недостатков или предложений по оптимизации эргономических характеристик.

Применяемые частные оценочные критерии эффективности:

- показатели точности и загруженности пилотирования, включая средние значения и величины среднеквадратичных отклонений от заданных параметров, а также коэффициент загруженности;
- характеристики восприятия и анализа данных, отраженные в показателях глазодвигательной активности пилота, таких как время контроля параметра и продолжительность фиксации взгляда на СОИ;
- субъективная оценка пилотом способов представления индицируемых параметров на СОИ.

Анализ статистически значимых различий между полученными показателями, описывающими глазодвигательную активность летчика, осуществляется с применением критерия «t-Стьюдента».

### **1.3.5 Комплексы и инструменты верификации статической графической информации**

Современные тенденции развития СТС привело к необходимости разработки гибких и удобных комплексных решений для проведения автоматизированной верификации систем и ее элементов. Особая сложность заключалась в учете и удовлетворении правил отраслевых стандартов, нормативной документации, а также соблюдение строгих требований сертифицирующих органов. Это задача является достаточно сложной, требующая применения специализированного инструментария.

Наиболее распространенными на практике комплексами инструментами верификации систем, элементов и ПО являются:

### *Инструмент «ANSYS SCADE»*

Семейство продуктов «ANSYS SCADE» включает набор инструментов модельно-ориентированной разработки критического по безопасности встраиваемого ПО. Данный комплекс позволяет поддерживать весь процесс разработки и верификации.

В инструментах продукта «ANSYS SCADE» используются специальные программные средства и сертифицированные генераторы кода, позволяющие инженерам не допускать ошибок в процессе разработке кода при соблюдении строгих стандартов сертификации. Основная технология, применяемая в данном инструменте, является модельно-ориентированный подход (МОП). МОП позволяет повысить эффективность труда разработчиков путем автоматизации ряда этапов и сократить затраты на валидацию, верификацию и сертификацию всего объекта разработки.

Инструменты продукта «ANSYS SCADE» широко применяются во всех отраслях промышленности – от проектирования системы управления ВС или пульта управления атомной станции до создания человеко-машинного интерфейса автомобиля [64]. К числу программных пакетов «ANSYS SCADE» относятся:

– SCADE Architect – интегрированная среда проектирования систем с высокими требованиями к надежности и безопасности с поддержкой процессов, промышленных стандартов P-4754A, ISO 26262 и EN 50126.

– SCADE Display – инструмент для проектирования встраиваемой графической составляющей, индикации и человеко-машинного интерфейса, а также сертифицированной генерации кода для критических по безопасности систем.

– SCADE LifeCycle – решение для управления всего ЖЦ ПО, в том числе обеспечения трассируемости требований.

– SCADE Suite представляет собой МОП для разработки алгоритмов управления и логики работы систем, верификации и интеграции систем и ПО, а также сертифицированной генерации кода.

– SCADe Test – инструмент для разработки и выполнения тестовых сценариев на основе требований к ПО, верификации и валидации встраиваемого ПО и человеко-машинного интерфейса, создания документации о результатах тестирования.

– SCADe Solutions for ARINC 661 Compliant Systems – набор инструментов и шаблонов для проектирования и моделирования авиационной индикации в соответствии со стандартом ARINC 661 [65].

– ANSYS SCADe Suite Design Verifier для проведения формальной верификации.

#### *Инструмент «MATLAB & Simulink»*

Подход реализации в инструменте «MATLAB & Simulink» также основан на МОП для достижения процессов валидации, верификации, автогенерация кода и отчетов с учетом требований нормативной документации и отраслевых стандартов. Широко известным примером использования данного инструмента при проектировании систем ВС является разработка системы подачи топлива гражданского ВС Airbus A380 [66].

При верификации систем, входящих в состав КБО применяют:

– Simulink Test – интегрированная платформа, осуществляющая автоматизированное тестирование на протяжении всего процесса проектирования.

– System Composer – средство для определения и анализа архитектур для системного проектирования на основе МОП;

– Simulink Coverage – инструмент, позволяющий проанализировать покрытия модели и кода, сгенерированного в среде Simulink;

– Simulink Requirements – инструмент управления требованиями при разработке ПО;

– Simulink Design Verifier – средство, применяющееся для выявления ошибок проектирования в моделях, разработанных на основе формальных подходов.

### **1.3.6 Подход к эргономической оценке статической графической информации с использованием данных видеоокулографии**

В настоящее время айтрекинг (айтрекинг так же называют видеоокулографией), является популярным способом исследования оценки зрительного внимания и общего анализа при взаимодействии человека-оператора с СОИ [67]. Причиной тому является объективные исследования большинства психофизиологических процессов человека по таким параметрам, как движений глаз (в динамике морганий и изменении данных человека), повышение усталости, увеличение когнитивной нагрузке, появление эмоциональные реакции и др.

Айтрекеры часто включают в себя аппаратную часть, подключенную к компьютеру, и ПО.

Принцип работы устройства следующий:

- в айтрекер интегрирована инфракрасная подсветка;
- подсветка отражается в глазах пользователя;
- камера айтрекера фиксирует эти отражения;
- после обработки и вычислений определяется положение взгляда.

Для того чтобы система айтрекинга работала максимально точно, она должна детально изучить глаза оператора. Для этого выполняют калибровку устройства. Во время калибровки айтрекер анализирует отражение света от глаз оператора. Калибровка выполняется путем отслеживания взгляда за движущимся объектом, будь то видео или другой графический элемент, перемещающийся по интерфейсу. После этого данные калибровки соединяются с трехмерной моделью человеческого глаза, формируя оптимальное изображение «eye tracking».

Для проведения исследований целесообразнее использовать стационарные айтрекеры по следующим причин:

- более высокая точность фиксации взгляда по сравнению с головными;
- головной айтрекер не всегда удобен в эксплуатации и может быть неудобен оператору, что может изменить результаты исследования;

– стационарный айтрекер позволяет более надежно, точно и просто произвести калибровку по отношению к оцениваемому изображению.

### **1.3.7 Подход к эргономической оценке статической графической информации с использованием данных частоты сердечных сокращений**

Одним из подходов к эргономической оценке статической ГИ бортовых систем может служить оценка на МФИ ВС, основанная на исследовании показателей частоты сердечных сокращений (ЧСС) пилота при выполнении различных полетных задач и на разных этапах полета [63]. Данный подход задействует показатель, косвенно связанный с эффективностью представления статической ГИ и основан исследовании предпочтение отдается тому альтернативному варианту, при которой у оператора была зафиксирован наименьший показатель ЧСС.

Ключевым недостатком указанного подхода является тот факт, что фиксируемый показатель может изменяться по самым различным причинам, не связанным с эффективностью представления ГИ.

### **1.3.8 Подход к эргономической оценке статической графической информации с применением технологий виртуальной реальности**

В настоящее время инженерами практикуется использование технологий виртуальной реальности для создания эффекта наибольшего погружения у пилота в процесс пилотирования ВС. В работе [68] предложены принципы создания стендового оборудования для проведения верификации СОИ с применением данной технологии.

В основе подхода лежит анализ резервов внимания оператора, учитывающее такие показатели, как: средние время фиксации и значение частоты перемещения взгляда оператора, общее суммарное относительное время фиксации и т. д.

## **1.4 Постановка задачи исследования**

Основной причиной, вызывающей или способствовавшей авиапроисшествию является наличие человеческого фактора в процессе взаимодействия с ВС [1 – 3]. В связи с этим, повышение надежности функционирования бортового эргатического

комплекса «Пилот – ВС» и, как следствие, повышение уровня безопасности полета за счет выявления и использование наилучшего варианта исполнения статической ГИ бортовых систем по результатам эргономической оценки, позволяющего сократить временные ресурсы и количество ошибочных действий у пилотов является особо актуальной задачей. Количество ошибок при управлении ВС напрямую зависят от визуальной, когнитивной и моторной нагрузок на пилота во время полета, поскольку отсутствие интуитивно понятного и не перенагруженного представления статической ГИ чрезмерно утомляет и раздражает экипаж, что способствует задержке реакции и пропуску информации. Этому свидетельствует аксиома о потенциальной опасности деятельности оператора «Реакция человека на внешние раздражения может быть ошибочной и сопровождаться антропогенно-техногенными опасностями». Для предотвращения ошибочной реакции пользователя его внимание следует ограничить от источников раздражения [69].

Стоит отметить, что задачи настоящего исследования направлены на оценку эффективности и выбор оптимального варианта исполнения статических элементов ГИ в перечень которых входят: статическая текстовая информация (метки), кнопки выбора и переключения данных, поля ввода, контейнеры, выпадающие списки, всплывающие окна и т. д. Данные элементы составляют основную часть большего количества самолетных систем, имеющие графическую реализацию (вычислительная система самолетовождения, состояние системы управления двигателями, состояние топливной системы, состояние системы автоматического регулирования давления и т. д.). Основная особенность данных элементов заключается в том, что они индицируются постоянно на СОИ, не завися от режима полета или состояния ВС, поэтому их конфигурация и визуальные свойства не зависят от внешних факторов. В связи с тем, что экипаж на протяжении всего полета взаимодействует со статическими элементами, их проработанность в части эффективного представления должна занимать особое внимание, а итоговая реализация подвергаться комплексной оценке.

Динамические элементы ГИ, а также их характеристики в диссертационной работе не рассматриваются.

Анализ предметной области показал, что в настоящее время существует большое количество методов, средств и инструментов оценки эффективности и верификации статической ГИ, основанных на анализе точечных эргономических характеристик, привлечение экспертной группы, использование интегральных комплексов. Стоит заметить, то большинство из этих средств направлены на:

- точечную оценку, которая не является комплексным исследованием и не позволяют в полной мере оценить эффективность всех аспектов отображения статической ГИ и взаимодействия пилотов с ней;
- выявлении критерия, порой меняющегося по независимым от способа и качества отображения статической ГИ причинам, что также не дает объективной и детальной оценки;
- оценку соответствия процессам разработки и верификации статической ГИ, которые не демонстрируют ее эффективность представления.

Таким образом, по причине отсутствия комплексного подхода к эргономической оценке эффективности статической ГИ бортовых систем в указанных методах и средствах при их применении существует вероятность упущения различных аспектов отображения ГИ, а, следовательно, они не могут позволить провести оценку максимально детально, например, учесть психологические возможности пилотов или требования стандартов и регламентирующей документации [38, 55, 57, 61, 62, 70, 71].

Помимо этого, на текущий момент отсутствуют решения, которые предназначаются не только для расчета эргономических характеристик статической ГИ бортовых систем, но и могут помочь ЛПР в принятии решения по выбору оптимальной альтернативы исполнения ГИ среди существующих. Особое внимание стоит отметить, что системы, которые осуществляют поддержку принятия решений, но не содержат в себе расчетных модулей по определения эргономических

показателей ГИ так же не позволяют полноценно решить задачу настоящего исследования, которая заключается в выявлении наиболее рационального варианта исполнения ГИ по результатам эргономической оценки. Причиной этому является необходимость рассчитывать данные показатели для каждой отдельной ГИ по заранее определенному математическому аппарату из-за отсутствия большинства эргономических характеристик в паспортах проектах СОИ.

Одним из эффективных подходов к решению описанной выше проблемы, является создание комплексной методики эргономической оценки эффективности статической ГИ бортовых систем по результатам которой будет осуществлена поддержка принятия решения, реализованной в СППР. Данная СППР позволит автоматизировано, детально и в короткие сроки провести оценку эффективности статической ГИ с которой пилот взаимодействует при управлении ВС по направлениям, затрагивающие максимальное количество аспектов представления, выявить неоптимальные и неэффективные варианты исполнения и помочь в принятии решения ЛПР по определению наилучшей альтернативы ГИ. Для наиболее эффективной работы СППР в части помощи в принятии решения, она должна быть основана на понятном для ЛПР методе многокритериального выбора, вызывающего у него максимальное доверия к полученным результатам многокритериального выбора, позволять минимизировать влияние субъективизма на результаты сравнительной оценки, сокращать временные затраты на проведения данной оценки, а также предоставлять ЛПР не только наилучшую альтернативу, но и упорядочивать все множество альтернатив для более детального анализа.

Для учета всех вышеуказанных требований необходимо решить следующий ряд исследовательских задач:

– Разработать архитектуру СППР, позволяющую обрабатывать ИД, рассчитывать эргономические показатели альтернатив и производить поддержку принятия решения ЛПР для решения задач сравнительной оценки.

- Проанализировать существующие оценочные критерии эргономических характеристик и способов их расчета; определить перечень формализованных оценочных критериев, затрагивающие визуальные и пространственно-временные характеристики статической ГИ, а также, позволяющие проверить насколько учтены психологические принципы при проектировании ГИ.
- Разработать комплексную методику и алгоритмы эргономической оценки эффективности статической ГИ бортовых систем.
- Определить метод многокритериального выбора, позволяющий осуществлять поддержку принятия решения ЛПР по выявлению наилучшей альтернативы статической ГИ из множества разработанных, а также приоритизации всего множества альтернатив.
- Разработать методическое и алгоритмическое обеспечение поддержки принятия решения для задач сравнительной оценки статической ГИ бортовых СОИ.
- Разработать программную реализацию всех предложенных алгоритмов, позволяющую моделировать работу СППР.
- Осуществить тестирование и оценку эффективности предложенного решения на множестве альтернатив ГИ, с целью подтверждения ее работоспособности и эффективности.

### **1.5 Выводы по Главе 1**

1. Проведен аналитический обзор бортовых СОИ, входящих в состав КБО гражданских ВС, предъявляемых к ним эргономических требований. Выявлено, что в большинстве своем, эргономические положения носят качественный характер. Помимо этого, нормативная документация содержит возможные, но не единственные решения, например, в [38] указан перечень возможных решений в части общих характеристик индикаторов, которые не являются единственно возможными, что на практике зачастую приводит к определению финального варианта исполнения на основании суждений экспертной группы или проектных решений под конкретный вид

ВС, которые могут отличаться от рекомендаций. Учитывая то, что разработчики ГИ бортовых систем могут не иметь опыта и навыков в эргономической экспертизе, использование данных эргономических положений может привести к разработке неэффективного решения, которое в свою очередь увеличит временные и финансовые затраты на переработку спроектированного варианта исполнения ГИ, а также усложнит человеко-машинное взаимодействие с ним и понизит уровень безопасности полета.

2. Проведен сравнительный анализ используемых подходов оценки статической ГИ бортовых систем. Показано, что большинство известных на сегодняшний день решений основаны:

- на ЭО, что требует значительных временных ресурсов на формирование компетентной экспертной группы, сбор и интерпретацию результатов, а также является субъективным методом;

- расчетах точечных оценочных критериев, что не позволяет комплексно оценить эффективность представления статической ГИ, или критериях, косвенно связанных или не связанных с эффективностью представления ГИ (оценка эффективности по ЧСС пилота, глазодвигательной активности пилота);

- выявлении соблюдения процессов разработки в соответствии с нормативной документацией, которое не позволит оценить эффективность отображения статической ГИ.

Рассмотрены подходы верификации на основе руководства «Р-4754А» и квалификационных требований «КТ-178С». Далее представлены результаты рассмотрения:

- Использование интегральных комплексов позволит провести эргономическую оценку, но требует больших финансовых затрат на приобретение ПО, а также может требовать специализированных настроек, которые могут отличаться для разных альтернативных вариантов реализации ГИ.

– В основе методов инспекции и рассмотрения, лежит экспертная проверка объекта исследования по вопросам контрольных проверочных перечней (КПП), большинство которых основаны на проверке соответствия стандартам разработки и верификации. Привлечение людских ресурсов является накладывает долю субъективизма на результаты сравнительной оценки, а также влечет за собой увеличение временных затрат на формирование группы, сбор и анализ оценок.

– Методы анализа, тестирования или демонстрации является способами проверки объект, позволяющие определить удовлетворение определенных его свойств, предъявляемых системными требованиями или нормативной документации. Существующие решения в основном нацелены на определение точечных аспектов работы системы (корректность и скорость передачи информации, реакция оператора при взаимодействии с системой), и не рассматривают оценку эффективности самой ГИ. Помимо этого, большинство из существующих комплексов не позволяют оценить работоспособность и эффективность всей системы сразу.

– Метод моделирования (в т. ч. разработка тестового окружения для эргономической оценки с применением виртуальной реальности), позволяет провести оценку параметров системы на ранних этапах разработки, однако результаты такого тестирования существенно зависят от поведения моделей системы. Помимо этого, данный подход подразумевает разработку сложного математического доказательства формальной модели, требующую значительных финансовых затрат.

В связи с этим сделаны выводы о недостаточности существующих методов и подходов для проведения комплексной оценки эффективности статической ГИ бортовых СОИ, а также функциональности существующих средств.

Поставлена задача разработки СППР, позволяющая повысить уровень безопасности полета за счет выявления наилучшего варианта исполнения статической ГИ бортовых систем, на основании автоматизированной комплексной методики эргономической оценки эффективности по показателям визуальных и

пространственно-временные характеристик ГИ, а также проверку учета психологических принципов при проектировании ГИ.

## **2. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ, МЕТОДИЧЕСКОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭРГОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

### **2.1 Архитектура системы поддержки принятия решения**

СППР предназначена для поддержки принятия решения ЛПР в задачах многокритериальных сравнений и оценок эффективности объекта исследования. Многокритериальность подразумевает, что результаты принятых решений оцениваются по совокупности множества критериев, рассматриваемых одновременно. Информационная сложность определяется необходимостью учета большого объема данных, обработка которых без помощи современной вычислительных комплексов практически невыполнима. При данных условиях число возможных решений весьма велико, и выбор наиболее рационального из них, без всестороннего анализа может приводить к грубым ошибкам [72].

Для проектирования архитектуры СППР необходимо определить функции, которые должны выполняться данной системой:

- Обработать ИД в виде структуры файла определения (ФО) пользовательского приложения (ПП) альтернативного варианта исполнения ГИ.
- Производить автоматизированный расчет эргономических характеристик по направлениям: визуальные и пространственно-временных характеристики, учет психологических принципов при проектировании ГИ.
- Осуществлять поддержку принятия решения ЛПР в определении наилучшего решения из всего множества альтернативных вариантов исполнения, а также проранжировать все альтернативы.
- Формировать результаты работы СППР для принятия решения по результатам сравнительной оценки.

Разработанная архитектура СППР представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1. Архитектура системы поддержки принятия решения

Разработанная СППР состоит из трех модулей:

- модуль обработки ИД;
- модуль расчета эргономических характеристик (далее – расчетный модуль);
- модуль поддержки принятия решения (МППР).

Модуль обработки ИД предназначен для обработки загруженных ИД, представленных в ФО ПП оцениваемых альтернативных вариантов исполнения ГИ.

Расчетный модуль обеспечивает решение задачи анализа системы, т.е. осуществляет расчет показателей эффективности, основанных на эргономических характеристиках каждого альтернативного варианта статической ГИ бортовых систем систем (визуальные характеристики, пространственно-временные характеристики, учет психологических принципов при проектировании статической ГИ) по заранее обработанным данным в ПП.

МППР служит для обработки полученных расчетных значений эргономических характеристик, учета условий ранжирования (учет возможного преимущества одних

критериев над другими, одних альтернатив на другими), приоритизации альтернативных вариантов в соответствии с полученными данными и условиями заложенного в него метода многокритериального выбора, а также вывода получившихся результатов:

- 1) Список приоритизированных альтернативных вариантов по их рассчитанным рейтингам.
- 2) Значения рассчитанных рейтингов и оценочных критериев эргономической оценки каждой альтернативы.
- 3) Общую диаграмму результатов проведенной сравнительной оценки на основании эргономических показателей.

## **2.2 Модуль обработки исходных данных**

Основная функция модуля обработки ИД – обработка (анализ и систематизация) и подготовка данных из структур альтернатив ФО ПП для дальнейшего использования их в расчетном модуле. Входными данными для текущего модуля являются ФО ПП.

Модуль обработки ИД производит анализ ФО ПП и определяет следующие параметры:

- 1) Общее количество визуальных элементов на текущей альтернативе.
- 2) Типы, свойства и атрибуты элементов.

В случаях обнаружения ошибок при обработке ИД модуль должен генерировать сообщение об ошибках с отображением на устройство вывода информации оператору.

## **2.3 Методическое и функциональное обеспечение расчетного модуля для задач эргономической оценки статической графической информации**

### **2.3.1 Анализ критериев эргономической оценки**

Вопрос построения СППР для задачи выявления наилучшего варианта исполнения статической ГИ на основании эргономической оценки эффективности представляется достаточно сложным и противоречивым, поэтому в первую очередь

следует определить подходящие оценочные критерии эффективности и способы их расчета для статической ГИ бортовых систем с учетом требований нормативной документации.

Для учета большинства аспектов эффективности представления статической ГИ необходимо осуществлять комплексный оценочный подход, поскольку затруднительно предложить какой-то один интегральный численный показатель или шкалу качества, позволяющий дать полное представление о ее свойствах и характеристиках. Представляется рациональным разработать комплексную методику, основанную на множестве оценочных критериев, позволяющую дать разностороннюю оценку эффективности статической ГИ бортовых систем.

Во многих работах [73 – 77] посвященных проектированию современных СОИ показано, что одной из основных причин неудовлетворительной эффективности ГИ является отсутствие комплексного подхода оценки. Исследования в области разработки данных комплексных подходов, проектирования современных инструментальных средств проведения оценки сделает возможным ЛПР проводить детализированную эргономическую оценку, затрагивая большее количество аспектов отображения, совершать обоснованный выбор оптимальной альтернативы исполнения, что повлияет на качество процесса верификации, повышения оперативных показателей работы ЛПР, инженеров по разработке, а также повысить надежность эргатической системы «Пилот – ВС», что в свою очередь позволит повысить уровень безопасности полета.

Анализ существующих оценочных критериев для эргономической оценки ГИ [78 – 94, 99, 100, 103] позволил выделить применяемые методы и метрики для оценки ГИ. Ниже приведены результаты анализа.

1. *Критерий «Информативность».* Провести оценку информативности СОИ в части ГИ можно с помощью формулы Горячкина Б. С. [86]:

$$I = \sum_{k=1}^m E_k \quad (2.1)$$

где  $E_k$  – частота воспроизведения элемента  $k$  множества визуальных буквенных символов,  $m$  – общее количество элементов множества визуальных буквенных символов.

2. *Критерий «Наглядность».* Наглядность СОИ может достигаться с помощью специальных методов кодирования, таких как использование различных вариантов алфавитов кодовых символов [95]. Чтобы определить данный критерий, необходимо из выбранного визуального информационно-управляющего элемента (ВИУЭ) выделить свойства, которые могут отражать его сложность. Формула Диковицкого В. В. позволяет провести эти расчеты [87]:

$$V_{obv} = \sum_{l=1}^L p(l), \quad (2.2)$$

где  $L$  – общее число иерархических уровней ВИУЭ на СОИ;  $p(l)$  – функция, характеризующая вероятность нахождения искомого ВИУЭ во всей области СОИ.

Множество групп ВИУЭ на СОИ  $l$  – го уровня в навигационной структуре

$$p(l) : \Gamma^l \rightarrow (0, 1]; \Gamma^l = \{G_i^l\}, \quad (2.3)$$

где  $G_i^l$  –  $i$ -я группа ВИУЭ  $l$  – го уровня в навигационной структуре. Или  $p(l) = p(G_i^l) = \max_{a \in P^l} w(a)$ , где  $a$  – идентифицирующий атрибут,  $w(a) \in [0, 1]$  – нормированный вес атрибута  $a$ ,  $P^l = \{p_i^l\}$  – все множество свойств у ВИУЭ, используемых для формирования навигационной структуры СОИ.

3. *Критерий «Лаконичность».* Под лаконичностью ГИ понимается полезность информации, которую она отображает. У управляющего визуального объекта должны быть представлены его существенные свойства, а остальные предоставляться по требованию или вовсе не быть представлены. Для определения данного критерия используется формула Шенона К. Е. [82]:

$$Y = \frac{I_u}{V_d}, \quad (2.4)$$

где  $I_u$  – объем полезной информации,  $V_d$  – объем предоставляемых данных.

4. *Критерий «Поисковая активность информации»*. Определение показателя поисковой активности у человека-оператора при взаимодействии со статической ГИ показывает сложность построения графической архитектуры конкретного СОИ. Оператор при выполнении задачи с помощью зрительного анализатора производит поиск необходимой информации, визуального элемента, который обладает заранее известными признаками – цветовое оформление, форма элемента, его функционально и т.д. Для определения указанного критерия необходимо воспользоваться формулой Алифиренко В. М. [80]:

$$W_{Tact} = \sum_{i=1}^{n_p} (t_m + t_{fi}), \quad (2.5)$$

где  $t_m$  – время перемещения  $i$ -го взора,  $t_{fi}$  – время  $i$ -ой фиксации взора,  $n$  – общее количество шагов поиска требуемого объекта.

5. *Критерий «Ценность»*. Данный критерий позволяет определить полезность статической ГИ для решения поставленной задачи. Учитывая данный критерий при проектировании ГИ можно оптимизировать количество общего информационного потока при взаимодействии членов экипажа ВС с СОИ. Критерий определяется следующим образом [83]:

$$P_c = \log_2 \frac{h_1}{h_0}, \quad (2.6)$$

где  $h_1$  – вероятность успешного решения поставленной задачи после получения сообщения,  $h_0$  – вероятность успешного решения поставленной задачи до получения сообщения.

6. *Критерий «Целостность»*. Исследования в области инженерной психологии и эргономики не раз подтверждали тот факт, что человек при взаимодействии с СОИ эффективнее воспринимает ГИ, если она спроектирована с учетом принципов

целостности и законченности [96]. Существуют законы визуального восприятия, которые побуждают оператора воспринимать группу объектов как целостный образ. К ним можно отнести:

- принцип «продолжения» – человек воспринимает визуальные элементы более связано между собой, если они расположены на прямой или кривой линии, чем элементы, которые имеют иное расположение;
- принцип «симметрии» – человек склонен воспринимать визуальные элементы как симметричные формы, образованные вокруг условных центров;
- принцип «содержательности» – те изображения, которые представлены не в однозначном виде на СОИ, человек интерпретирует как простейшие из возможных форм или как комбинации простейших форм;
- принцип «замкнутости» – человек воспринимает комбинацию разрозненных визуальных элементов как узнаваемую ему форму, так как мозг «дополняет» форму до законченной фигуры.

Данный критерий определяется по следующей формуле [91]:

$$Q_{int} = x_1 * M + x_2 * F + x_3 * O + x_4 * L, \quad (2.7)$$

где  $x_i$  – весовой коэффициент значимости, который определяет, насколько данный оценочный критерий важен по сравнению с другими;

Нагрузка на индикатор, определяемая следующим образом:

$$M = \frac{Q_p}{Q_o}, \quad (2.8)$$

где  $Q_p$  – число индикаторов СОИ, включенных в замкнутый цикл,  $Q_o$  – общее число индикаторов СОИ;

Формула для расчета сложности графической архитектуры индикаторов СОИ:

$$F = \frac{Q_F}{Q_U + Q_O}, \quad (2.9)$$

где  $Q_F$  – число индикаторов СОИ, объединенных в группу;  $Q_U$  – число групп индикаторов СОИ,  $Q_E$  – общее количество индикаторов СОИ;

Симметричность расположения индикаторов СОИ определяется по формуле:

$$O = \frac{Q_s}{Q_o}, \quad (2.10)$$

где  $Q_s$ - число индикаторов СОИ, скомпонованных в соответствии с принципом «симметрии»,  $Q_o$ - общее число индикаторов СОИ;

Показатель компоновки индикаторов СОИ определяется:

$$L = \frac{Q_t}{Q_o}, \quad (2.11)$$

где  $Q_t$  - число индикаторов СОИ, скомпонованных в соответствии с принципом «продолжение»,  $Q_o$ - общее число индикаторов СОИ.

7. *Критерий «Структурность».* Структурность ГИ подробно описывается в направлении «Гештальтпсихология» и является ее свойством, позволяющее воспринимать оператору визуальный объект как в качестве совокупности его подсистем, параметров, ВИУЭ [6, 97]. Определить текущий параметр можно с помощью вычисления количественного критерия  $W_{str}$  оценки восприятия визуальной информации по формуле Звенигородского-Коломыйцева [91]:

$$W_{str} = k_1 * B + k_2 * Z + k_3 * L + k_4 * S \quad (2.12)$$

где  $k$  – весовые коэффициенты, определяющие приоритетность определенного гештальт-принципа при оценке эффективности восприятия, при условии:

$$\sum_{i=1}^4 k_i, k_i = \frac{4 - i + 1}{\sum_{i=1}^4 i}, \quad (2.13)$$

К гештальт-принципам можно отнести:

- принцип «близости» – визуальные элементы, расположенные близко друг к другу, воспринимаются более связанными, чем те, что находятся на некотором расстоянии;
- принцип «схожести» – визуальные элементы с похожими визуальными характеристиками воспринимаются более связанными, чем те, которые выглядят по-разному;

- принцип «общей зоны» – визуальные элементы, расположенные в пределах одной области, воспринимаются как группа;
- принцип «продолжения» – визуальные элементы, выстроенные по прямой или плавно изогнутой линии, воспринимаются более взаимосвязанными, чем те, что расположены случайно или по ломаной линии.

Таким образом,

$$B = N_b / N_o, \quad (2.14)$$

где  $N_b$  – количество визуальных элементов на СОИ, спроектированных по принципу «близости»;  $N_o$  – общее количество визуальных элементов;

$$Z = N_z / N_o, \quad (2.15)$$

где  $N_z$  – количество визуальных элементов на СОИ, спроектированных по принципу «общей зоны»;  $N_o$  – общее количество визуальных элементов;

$$L = N_L / N_o, \quad (2.16)$$

где  $N_L$  – количество визуальных элементов на СОИ, спроектированных по принципу «продолжения»;

$$S = N_s / N_o, \quad (2.17)$$

где  $N_s$  – количество визуальных элементов на СОИ, спроектированных по принципу «схожести».

8. *Критерий «Когнитивная нагрузка».* Одним из ключевых показателей эффективности эргономической оптимизации [98] может служить степень соответствия инженерно-психологических характеристик человека-оператора и эргономических параметров статической ГИ. Этот показатель соответствия может быть оценен с помощью методов эргономической экспертизы, которая предназначена для объективной оценки эргономических аспектов создаваемой СТС. Цель такой экспертизы – выявление и формирование рекомендаций, требований и предложений,

направленных на оптимизацию СОИ, взаимодействия человека-оператора и вычислительной системы.

При оценке эффективности статической ГИ особое внимание стоит уделять психологическим аспектам восприятия информации человеком. В частности, достижения когнитивной психологии помогают спроектировать ГИ таким образом, чтобы она была соответствовала психологическим возможностям и ограничениям целевой аудитории [15].

В диссертационной работе предлагается использовать критерий «Когнитивная нагрузка», основанный на принципах когнитивной теории восприятия информации, который, наряду с целостностью и структурностью, позволяет определить насколько в текущем альтернативном варианте статической ГИ учтены аспекты когнитивной психологии. В работе [6] описано применение данных принципов для оценки вычислительной системы самолетовождения. Вычислить данный критерий можно по следующей формуле:

$$W_{cl} = k_1 * Q + k_2 * A + k_3 * Z, \quad (2.18)$$

где  $k$  – весовые коэффициенты, определяющие приоритетность определенных принципов когнитивной теории восприятия информации при оценке эффективности восприятия.

К принципам когнитивной теории можно отнести:

– принцип «пространственного примыкания» – человек-оператор воспринимает визуальную информацию лучше, когда соответствующая инфографика и текст расположены близко друг к другу, а не далеко на интерфейсе. Когда инфографика и текст представлены вдали друг от друга, возникает дополнительная нагрузка на память оператора, что способствует понижению уровня производительности понимания. Таким образом, предлагается в рамках данного принципа использовать для допустимой области – область ясного видения оператора, составляющая 240 px на 180 px по данным инженерной психологии;

– принцип «временного примыкания» – человек-оператор воспринимает визуальную информацию лучше, когда соответствующая инфографика и текст представлены одновременно, а не последовательно;

– принцип «предварительной подготовки» – человек-оператор воспринимает визуальную информацию более эффективно, когда он предварительно знает основные термины и их определения. Операторы будут перегружены под влиянием графического интерфейса, на котором используется много новых терминов.

Таким образом,

$$Q = N_q / N_o, \quad (2.19)$$

где  $N_q$  – количество визуальных элементов на СОИ, спроектированных по принципу «пространственного примыкания»;  $N_o$  – общее количество визуальных элементов;

$$A = N_A / N_o, \quad (2.20)$$

где  $N_A$  – количество визуальных элементов на СОИ, спроектированных по принципу «временного примыкания»;  $N_o$  – общее количество визуальных элементов;

$$Z = N_z / N_o, \quad (2.21)$$

где  $N_z$  – количество визуальных элементов на СОИ, спроектированных по принципу «предварительной подготовки»,  $N_o$  – общее количество визуальных элементов.

9. *Критерий «Сигнализируемость».* Исследования в области эргономики не раз подтверждали, что оператору легче выполнять поставленные задачи манипулируя ГИ на СОИ, если на ней присутствуют подсказки. Таким образом, критерий направлен на анализ учета функций поддержки оператору при проектировании ГИ.

10. *Критерий «Количество перерабатываемой человеком-оператором ГИ».* Критерий определяется следующим образом [82]:

$$P_1 = - \sum_{i=1}^N h_i \log_2 H_i, \quad (2.22)$$

где  $N$  – число возможных состояний ВИУЭ на СОИ;  $H_i$  – вероятность появления  $i$  – го сигнала.

11. *Критерий «Количество перерабатываемой человеком-оператором ГИ при равновероятном поступлении сигналов».* В данном случае количество перерабатываемой информации определяется по формуле Хартли Р. В. [85]

$$H = \log_2 N = n \log_2 m, \quad (2.23)$$

где,  $N$  – число возможных состояний ВИУЭ на СОИ,  $m$  – общее число индикаторов СОИ,  $n$  – число ВИУЭ на СОИ.

12. *Критерий «Времязатраты на принятие решения управляя СОИ» (закон Хика).* С помощью закона Хика [99] можно определить необходимое человеко-оператору время для определения оптимального альтернативного варианта из конечного множества: увеличение количества вариантов увеличит время принятия решения логарифмически. Если учитывать  $n$  равновероятных альтернатив, среднее время реакции,  $T$  необходимое для выбора из вариантов, составляет приблизительно:

$$T = b * \log_2(n + 1), \quad (2.24)$$

где  $b$  – константа, которую можно определить эмпирически, подогнав линию к измеренным данным (на практике принято брать  $b = 150$ ),  $n$  – значение вероятности выбора конкретного альтернативного варианта.

13. *Критерий «Визуальная простота».* *Вариант 1.* Критерий рассчитывается следующим образом:

$$W_{vs} = \frac{1}{C}, \quad (2.25)$$

где  $C$  – сложность Комбер-Мэтбл [100] взаимного пространственного расположения элементов на СОИ, определяемая:

$$C = -N_{pr} \sum_{i=1}^{N_{pr}} H_i \log_2 H_i, \quad (2.26)$$

где  $N_{pr}$  – общее число свойств у ВИУЭ: размеры элемента вертикальные и горизонтальные, удаленность от края окна СОИ (как правило от верхнего или

бокового),  $n$  – общее количество классов (уникальных размеров или расстояний),  $n_i$  – общее количество свойств у ВИУЭ на СОИ  $i$ -го класса,  $H_i = \frac{n_i}{n}$  – пропорция  $i$ -го класса.

14. *Критерий «Визуальная простота». Вариант 2.* Критерий определяется по формуле Стикела-Эбнера-Холзингера [88]:

$$X = AOS, \quad (2.27)$$

где  $A$  – общее число ВИУЭ на СОИ;  $O$  – общее число групповых разделений отдельных ВИУЭ на СОИ;  $S$  – общий показатель суммарной энтропии по цветовому пространству для СОИ формата RGB.

15. *Критерий «Информационная насыщенность СОИ».* Определить критерий можно следующим способом [86]:

$$\Delta = \frac{I}{S}, \quad (2.28)$$

где  $I$  – общая информативность СОИ,  $S$  – площадь полезной поверхности СОИ.

16. *Критерий «Селективность СОИ».* Селективность – это способность системы распознавать сигнал опасности на экране СОИ по его длительности, положению, размеру, цвету и другим параметрам [101]. Используя формулу, предложенную в статье [79], можно оценить эффективность обнаружения сигнала на СОИ:

$$P_{sel} = \max(I_{inf}(t, s)) = \max(I_B(t, s) - 2 * I_A(t, s)), \quad (2.29)$$

где  $I_{inf}$  – значение информационной функции Вичевской Ю. А. [102] в пределах сигнала опасности,  $t, s$  – смещение относительно центра экрана СОИ;

$$I_X(t, s) = \iint_{A(t,s)} F(x - t, y - s) dx dy, \quad (2.30)$$

$$I_Y(t, s) = \iint_{B(t,s)} F(x - t, y - s) dx dy, \quad (2.31)$$

где  $F$  – исходная ГИ на СОИ,  $X$  – общая площадь СОИ,  $Y$  – общая площадь отдельного окна СОИ,  $x, y$  – показатели координат центра окна СОИ.

17. Критерий «Ситуационная интерпретируемость». Вычисление критерия «Ситуационная интерпретируемость» позволит определить объем ГИ, которая осведомляет пилота о текущем состоянии системы в целом, подсистем, параметров системы. Определяется данный параметр с помощью формулы Кузнецова Л. А. [103]:

$$\Phi_{int} = 1 - |R|, \quad (2.32)$$

где  $R$  – коэффициент корреляции Кузнецова Л. А, прибегая к которому можно провести оценку статической близости заданным и эталонным вариантами ГИ. Значение  $R$  определяется следующим образом:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i^Y - H^Y)(H_i^L - H^L)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i^Y - H^Y)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i^L - H^L)^2}}, \quad (2.33)$$

где  $n$  – количество сегментов;  $H_i^Y, H_i^L$  – показатели энтропии  $i$ -го сегмента эталонного варианта и идентифицируемого образа визуального (информационно-управляющего) элемента на СОИ;  $H^Y, H^L$  – показатели средней энтропии эталонного варианта и идентифицируемого образа визуального (информационно-управляющего) элемента на СОИ.

Поскольку каждый фрагмент ГИ обладает своей энтропией, то суммарное значения можно вычислить по формуле:

$$H_i = - \sum_i^n p_i \log_2 p_i, \quad (2.34)$$

где  $n$  – количество фрагментов,  $p_i$  – удельная насыщенность цвета  $i$ -го фрагмента, которую можно найти по формуле:

$$p_i = \frac{\sum_{j=1}^k R_j^i + \sum_{j=1}^k G_j^i + \sum_{j=1}^k B_j^i}{\sum_{j=1}^O R_j^i + \sum_{j=1}^O G_j^i + \sum_{j=1}^O B_j^i}, \quad (2.35)$$

где  $R_j^i, G_j^i, B_j^i$  – величины интенсивностей красного, зеленого и синего цветов для каждого пикселя  $i$ -го фрагмента,  $k$  – количество пикселей в данном фрагменте,  $O$  – общее количество пикселей на всем исследуемом участке СОИ.

В случае необходимости определить суммарную энтропию СОИ, можно воспользоваться следующей формулой:

$$E = \sum_{i=2}^n H_i \quad (2.36)$$

18. *Критерий «Избыточность».* Определение данного показателя осуществляется с применением формулы Парка К. С. [84]:

$$r = 1 - \frac{H_1}{H_{max}}, \quad (2.37)$$

где  $H_1$  – количество перерабатываемой человеком-оператором ГИ, определяемое по формуле Шеннона К. Е., указанной в определении критерия «Количество перерабатываемой человеком-оператором ГИ»;  $H_{max}$  – показатель максимальной энтропии.

19. *Критерий «Сложность информационного (зрительного) поиска».* Для нахождения зрительным анализатором заданной по определенным признакам информации, человеку-оператору требуется затратить время информационного поиска. Таким образом, сложность статической ГИ можно определить, оценив среднее время информационного поиска на выбранной альтернативе. Для этого применяется следующая формула [79, 101]:

$$W_{ts} = \frac{n + a}{a * c(M + 1)} * t_{fx}, \quad (2.38)$$

где  $n$  – общий количество ВИУЭ на альтернативе СОИ;  $a$  – объем визуальной информации, ограниченный  $6 \pm 2$  визуальными элементами на СОИ и пространственными свойствами зрительного анализатора в  $4^\circ$ - $10^\circ$  – угловой размер центрального поля зрения [73, 101];  $c$  – за эталонное значение принято брать 1000,  $M$  – количество объектов, обладающих заданным для поиска признаком;  $t_{fx}$  – продолжительность зрительной фиксации. При условиях однородности ВИУЭ на

конкретном СОИ и конкретной задачи показатель  $t_{fx}$  относительно постоянен и является характеристикой данных, представленных в [101].

20. *Критерий «Поисково-информационная нагрузка».* Показатель помогает определить объем информации, которая была обработана человеком-оператором в процессе поиска на СОИ по определенным параметрам ВИУЭ следующим образом [78, 92]:

$$W_{II} = -N_v \left[ \frac{v}{w} \log_2 \frac{v}{w} + \left( 1 - \frac{v}{w} \right) * \log_2 \left( 1 - \frac{v}{w} \right) \right], \quad (2.39)$$

где  $N_v$  – среднее количество шагов при поиске визуального элемента;  $v$  – общее количество ВИУЭ;  $w$  – общее количество ВИУЭ на СОИ. Граничные значения  $N_v$  могут быть найдены исходя из предположений о двух способах поиска: хаотичном и построчном сканировании:

Для хаотичного анализа:

$$N_v = w \sum_{k=1}^v 1/k \quad (2.40)$$

Для построчного анализа:

$$W_{II} = 0.5 * v * w \left[ \frac{v}{w} \log_2 \frac{v}{w} + \left( 1 - \frac{v}{w} \right) * \log_2 \left( 1 - \frac{v}{w} \right) \right], \quad (2.41)$$

21. *Критерий «Избыточная функциональность».* Показатель определяет значение реализованных функций на СОИ, необходимых для решения поставленных задач и вычисляется следующим образом [78]:

$$ln = \frac{N_f}{N_t}, \quad (2.42)$$

где  $N_f$  – общее количество функций,  $N_t$  – количество решаемых задач.

22. *Критерий «Дихотомия скорости и точности» (закон Фиттса).* Определение критерия «Дихотомия скорости и точности» (закон Фиттса) [89] дает количественную оценку дихотомии скорости и точности: скорость реакции человека-оператора зависит прямопропорционально от расстояния до визуального элемента

управления и обратнопропорционально зависимости от его размера. Закон позволяет произвести оценку по следующей формуле:

$$t_{cp} = a + b * \log_2 \left( 1 + \frac{D}{W} \right), \quad (2.43)$$

где  $t_{cp}$  – среднее время на действие пользователя,  $a$ ,  $b$  – экспериментальные величины, характеризующие среднее время начала реакции и скорость перемещения манипулятора соответственно (на практике используются  $a = 50$ ,  $b = 15$ ),  $D$  – расстояние до центра визуального элемента управления,  $W$  – ширина элемента вдоль оси движения.

23. *Критерий «Предсказуемость».* В работе [92] рассматривается критерий, описывающий скорость взаимодействия оператора с ГИ при передаче данных от устройств отображения к устройствам управления. Этот критерий можно вычислить по формуле, предложенной Алифиренко В.М. [80]:

$$W_{Tp} = - \left( \tau_{op} + \sum_{i=1}^n \tau_{mi} \right), \quad (2.44)$$

где  $\tau_{mi}$  – время задержки (обработки) информации в  $i$  – ом блоке системы,  $n$  – общее количество блоков системы,  $\tau_{op}$  – время задержки (обработки) информации, определяющееся следующим образом:

$$\tau_{op} = a + b * H, \quad (2.45)$$

где  $a$  – время простой реакции,  $b$  – время переработки одной единицы информации,  $H$  – объем информации, перерабатываемой человеком-оператором.

24. *Критерий «Геометрическое соответствие».* Данный критерий позволяет произвести анализ пропорций геометрических сторон ВИУЭ прямоугольной формы путем сопоставления значений сторон у текущего элемента с эталонным вариантом и получить коэффициент геометрического соответствия [92]. За эталонное значение предлагается взять отношение «1:1.618» как «золотое» сечение.

25. *Критерий «Управляемость».* Данный критерий описывает количество способов активации ВИУЭ и скорости их активации [92]. Вычисляется указанный показатель по следующей формуле:

$$W_{contr} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{N_{fi}}{N_{alt_i}} * v_{a_i} \right), \quad (2.46)$$

где  $N_{fi}$  – общее число информационно-управляющих виджетов в определенной окне СОИ;  $N_{alt_i}$  – общее количество альтернатив активации ВИУЭ на СОИ;  $v_{a_i}$  – скорость активации ВИУЭ (принято брать 1 секунду);  $n$  – общее количество ВИУЭ на СОИ.

26. *Критерий «Время выполнения поставленной задачи» (семейства методов «GOMS»).* Применения методов из семейства «GOMS» (Goals, Operators, Methods, and Selection Rules – Цели, Операторы, Методы и Правила выбора) позволяет смоделировать выполнения поставленной задачи человеком-оператором и на основе полученных данных произвести оценку эффективности ГИ по количеству затраченного времени выполнения задачи. Стоит заметить, что в случае привлечения экспертной группы данный метод не учитывает психологические факторы, такие как усталость, стресс и эмоциональное состояние пользователя, что может сказаться на результате. Если осуществляется автоматизированная сравнительная оценка альтернатив, то данное семейство методов не дает возможности для гибкости и экспериментирования, что важно при разработке и улучшении ГИ. Помимо этого, использование указанного метода может быть неэффективным в случае различия функционала и сравниваемых альтернатив.

Ключевая концепция подхода заключается в том, что все операции, выполняемые оператором с ГИ, можно рассматривать как набор стандартных компонентов. Для этих компонентов можно провести измерение времени их выполнения на контрольной группе и получить статистические данные для оценки времени выполнения каждого базового действия. Анализ эффективности ГИ возможен путем деления конкретной задачи на ее подзадачи и вычисления среднего

значения времени выполнения основной задачи. Наиболее подходящая альтернатива – та, при которой пилот тратит меньше времени на выполнение задачи.

Основные принципы метода [104, 105]:

Goals – то, чего стремится достичь оператор на различных уровнях абстракции.

Operators – элементарные моторные действия (манипуляции), используемые оператором на СОИ для достижения целей. Операторы не разложимы и определено, что пользователю требуется определенное количество времени для выполнения каждого оператора.

Methods – описание процедуры для достижения целей. Метод является алгоритмом, помогающим пилоту запомнить последовательность подцелей и операторов, необходимых для достижения желаемой цели. Например, один из способов достижения цели «Перейти на следующий навигационный раздел» - переместить курсор на элемент «Следующая страница» и нажать управляющий элемент. Другой способ достижения той же цели - с помощью средств управления вне СОИ.

Selection Rules – определяют, какие методы следует использовать для решения поставленной задачи в зависимости от контекста и представлены в виде условного оператора.

В таблице 2.1 указаны значения, применяемые на практике расчета эффективности СОИ.

Таблица 2.1. Обозначение операторов по методу GOMS

Действие	Оператор	Время
Время, необходимое для того, чтобы нажать клавишу	Y	0.28 (сек)
Последовательность нажатий клавиш	J(n)	n*Y (сек)

Время, необходимое пользователю для того, чтобы указать на какую-то позицию на экране СОИ с помощью манипулятора	P	1.1 (сек)
Время, необходимое пользователю, чтобы нажать или отпустить кнопку манипулятора	B	0.1 (сек)
Время, необходимое пользователю, чтобы сделать один клик манипулятором	S	0.2 (сек)
Время, необходимое пользователю для того, чтобы переместить руку с клавиатуры на манипулятор	N	0.4 (сек)
Время, необходимое пользователю для того, чтобы умственно подготовиться к следующему шагу	L	1.2 (сек)
Время, в течение которого пользователь должен ожидать ответ системы	O	0.1 (сек)

По результатам анализа существующих подходов оценки эффективности ГИ, можно сделать вывод, что для обеспечения комплексной оценки эффективности статической ГИ, обладающую необходимой практической значимостью, необходимо разработать методику, основанную на использовании того количества критериев, которое позволяет охватить большинство аспектов эффективного представления. Однако, по причинам многогранности статической ГИ на бортовых СОИ, неактуальности некоторых существующих подходов оценки статической ГИ, оценки функционального ПО, имеющего графический функционал, а также наличия требований нормативной и регламентирующей документации к разработке, верификации бортовых систем и ПО, в частности отображение визуальной оставляющей (использования цветового решения, шрифтов, аббревиатур, кодов и т.д.) [38, 55, 61, 62, 70, 106], статическая ГИ на бортовых системах не может быть оценена

по всему перечню критериев, описанных ранее. Наличие указанных ограничений, выполнения и соблюдение которых обязательно в процессе создания бортового оборудования, а также основываясь на исследовании предметной области, опыте разработки бортовых СОИ и статической ГИ, отображаемой на них, суждениях экспертной группы, а также рассмотренные ранее подходы и критерии оценки представляется рациональным разработать методику эргономической оценки ГИ по следующим независимым направлениям:

- Оценка визуальных характеристики статической ГИ.
- Оценка пространственно-временных характеристики статической ГИ.
- Учета психологических принципов при проектировании статической ГИ.

Данное разделение по направлениям позволит охватить максимальное количество аспектов не только отображения визуальной составляющей на СОИ, но и взаимодействия пилота с ней.

Стоит выделить, что настоящая диссертационная работа направлена на исследование статических элементов ГИ, которые индицируются на СОИ постоянно и конфигурация, свойства и характеристики отображения которых не зависят от режима полета ВС. Динамическая ГИ с ее свойствами, например, частота обновления данных, коррелирующая с режимом полета ВС, в исследовании не рассматривается. По результатам сравнительного анализа выявлено, что применение большинства критериев нецелесообразно или невозможно для статических элементов ГИ по причине их неформализованности, направленности на исследование свойств функционального ПО, а также из-за существования перечня строгих требований нормативной документации, ограничивающих возможности инженеров в использовании некоторых подходов при разработке статической ГИ (например, в использовании цветового решения).

Проведя сравнительный анализ существующих формализованных критериев оценки статической ГИ, а также дополнив данный перечень критериями оценки визуальных свойств статической ГИ и учета психологических принципов при

проектировании ГИ, основанных на когнитивной теории восприятия визуальной информации человеком, предлагается реализация комплексной методики оценки эффективности со следующими оценочными критериями:

1. Визуальные характеристики, направленные на исследование характеристик визуального представления статической ГИ: «Геометрическое соответствие», «Унификация».

2. Пространственно-временные характеристики, направленные на исследование объема, скорости и времени при взаимодействии и обработке статической ГИ: «Управляемость», «Визуальная простота», «Сложность информационного (зрительного) поиска», «Предсказуемость», «Поисково-информационная нагрузка», «Поисковая активность информации».

3. Учет психологических принципов, направленные на исследование принципов когнитивной теории восприятия информации: «Когнитивная нагрузка», «Сигнализируемость».

Методика, содержащая данный перечень частных показателей эффективности ранее не использовалась для эргономической оценки эффективности статической ГИ на бортовых СОИ, однако ее применение позволит более комплексно осуществить оценку.

Таким образом, существует группа показателей эффективности  $w_k, k = \overline{1, K}$ , где  $K$  – общее количество показателей эффективности (для данного исследования определено 10 показателей). Данные частные показатели образуют векторный показатель эффективности  $W = |w_k|_K = |w_k|_{10}$ .

### **2.3.3 Комплексная методика расчета эргономических характеристик статической графической информации**

Расчетный модуль при получении ИД от модуля обработки ИД должен производить расчет числовых показателей по определенным ранее критериям оценки визуальных характеристик, пространственно-временных характеристик, учета

психологических принципов при проектировании статической ГИ в соответствии с предложенной методикой. Работу расчетного модуля можно представить в виде алгоритма, состоящего из 4 последовательных шагов, где первые 3 шага относятся к методике оценки эффективности и являются функциями расчета эргономических показателей, а последний осуществляет передачу рассчитанных данных в МППР. Блок-схема разработанного алгоритма расчетного модуля представлена на рисунке 2.2.

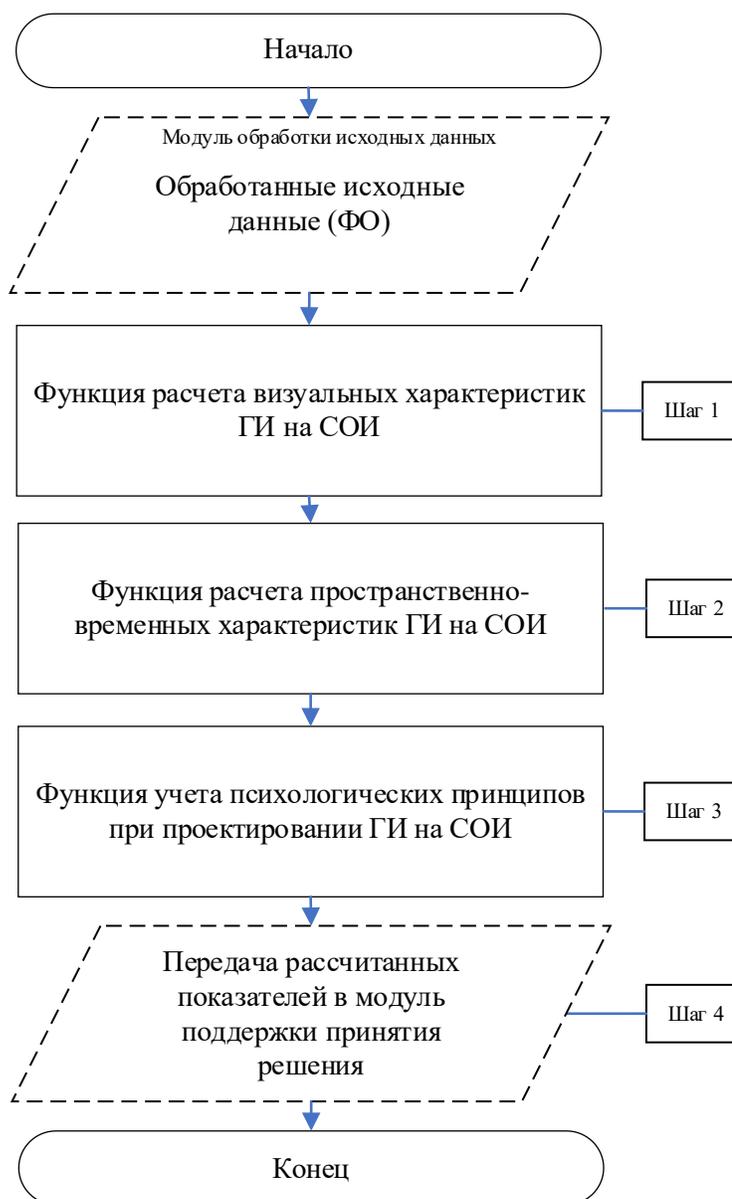


Рисунок 2.2. Блок-схема алгоритма работы расчетного модуля

### 2.3.3.1 Функция расчета визуальных характеристик статической графической информации

Одними из основных средств взаимодействия пилота с ВС являются СОИ с отображаемой ГИ, поэтому неоптимальные, раздражительные, интуитивно непонятные пилотам варианты исполнения статической ГИ (элементы управления, статическая текстовая информация и т.д.) могут привести к повышению уровня когнитивной, моторной и визуальной нагрузок, что в свою очередь может способствовать понижению уровня безопасности полета. Таким образом, при проектировании альтернатив статической ГИ необходимо учитывать, что визуальная составляющая должна быть понятна, однозначна и легкодоступной для всех членов экипажа.

На шаге 1 алгоритма, представленного на рисунке 2.2, выполняется функция расчета визуальных характеристик статической ГИ. В расчете используются:

1) Оценка геометрического соответствия статических элементов ГИ заключается в представлении их в прямоугольной форме, анализе высоты и ширины каждого элемента, сравнения полученных значений родительского и дочернего элемента с эталонным значением «золотого сечения» 1.618 (для практических целей зачастую ограничиваются приближительным значением  $\approx 1.6$ ). Вычисление показателя отношения сторон родительского и дочернего элементов осуществляется по следующим формулам:

$$R_H = \frac{H_p + H_d}{H_p}, \quad (2.47)$$

$$R_W = \frac{W_p + W_d}{W_p}, \quad (2.48)$$

где  $R_H, R_W$  – показатель отношения высот и широт ВИУЭ соответственно,  $H_p, H_d$  – высота родительского и дочернего элемента соответственно,  $W_p, W_d$  – широта родительского и дочернего элемента соответственно.

2) Оценка унификации визуальных свойств статических элементов ГИ заключается в анализе схожести свойств однотипных объектов, расчет коэффициентов унификации каждого отдельного свойства у объекта и вычислении общего коэффициента унификации всего СОИ  $W_u$  по следующей формуле:

$$W_u = S_s * C_i * F_t * A_e, \quad (2.49)$$

где  $S_s$  - коэффициент унификации визуальных стилей элементов (графические элементы имеют набор стилей, изменяемый во время выполнения, который позволяет устанавливать и изменять внешний вид),  $C_i$  – коэффициент унификации цветового решения элементов,  $F_t$  – коэффициент унификации шрифта,  $A_e$  - коэффициент унификации выравнивания текста относительно центра ВИУЭ.

### 2.3.3.2 Функция расчета пространственно-временных характеристик статической графической информации

Учет пространственно-временных характеристик статической ГИ в процессе разработки и верификации является особо важной задачей, поскольку при возникновении нештатных ситуациях, например, отказ двигателя, потеря высоты, турбулентность, столкновение с птицами, от пилотов требуется быстрые и корректные действия в оценке произошедшей ситуации и принятие соответствующих мер. В таких случаях неэффективно спроектированная статическая ГИ в части пространственно-временных характеристик может увеличить время, затраченное на выполнение необходимых манипуляций для предотвращения возникшей ситуации, что может способствовать более опасным последствиям.

На шаге 2 алгоритма, представленного на рисунке 2.2, выполняется функция расчета пространственно-временных характеристик статической ГИ. В расчете используются:

1) Оценка управляемости статических элементов ГИ, которая заключается в анализе количества способов и скорости активации ВИУЭ, вычислении коэффициента управляемости всего СОИ  $W_{contr}$  по формуле 2.46.

Стоит отметить, что чем выше рассчитанный показатель коэффициента управляемости ГИ, тем проще пилоту взаимодействовать в части управления с конкретной альтернативой СОИ.

2) Оценка визуальной простоты статических элементов ГИ заключается в анализе количества свойств у каждого ВИУЭ (уникальных размеров и расстояний) и определение коэффициента визуальной простоты ГИ  $W_{vs}$  по формуле 2.25

3) Оценка сложности информационного (зрительного) поиска статических элементов ГИ осуществляется определением среднего времени информационного поиска человека-оператора на выбранной альтернативе. Показатель сложности информационного поиска  $W_{ts}$  определяется по формуле 2.38.

Под показателем  $a$  в формуле 2.38 принято считать число визуальных элементов, находящихся на площади, ограниченной  $10^\circ \times 10^\circ$  в горизонтальной и вертикальной плоскостях, но на практике принято, что не более  $6 \pm 2$  элемента. Если в поле зрения пилота, ограниченного  $10^\circ \times 10^\circ$  находятся не более 6 элементов, то  $a$  не меняется, в противном случае  $a = 6$ . Минимальным значением является величина равная 4, поскольку данное экспериментальное количество ВИУЭ легко запоминается каждым человеком-оператором [86]. В силу однородности ВИУЭ, показатель  $t_{fx}$  относительно постоянен и может быть принят равным значению из экспериментальных результатов [101]:

- поиск условных знаков – 300 мс,
- поиск объекта СОИ – 370 мс,
- чтение буквенного или числового знака – 310 мс,
- поиск элементарных геометрических фигур – 200 мс,
- фиксация загорания индикатора СОИ – 280 мс.

4) Оценка предсказуемости статической ГИ вычисляется на основе показателя скорости взаимодействия пилота с визуальными элементами при передаче информации от индикатора на органы управления. Вычисляется коэффициент

предсказуемости СОИ по формуле 2.44, которую можно представить следующим образом:

$$\tau_{op} = z + b * H = z + \frac{H}{V_{оп}}, \quad (2.50)$$

где  $z$  – время простой реакции (теоретически значения  $z$  находятся в пределах от 0,2 до 0,6, в зависимости от вида реакции),  $b$  – время задержки (обработки) двоичной единицы информации,  $H$  – количество информации, перерабатываемой человеком-оператором, определяемое по следующей формуле [79, 101]:

$$H = \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i, \quad (2.51)$$

где  $P_i$  – вероятность появления  $i$ -го сигнала;  $n$  – общее число различных сигналов. При равновероятном поступлении сигналов количество перерабатываемой человеком информации достигает максимальной величины:

$$H = \log_2 n \quad (2.52)$$

$V_{оп}$  – скорость переработки информации оператором, определяемое по формуле:

$$V_{оп} = \frac{\Delta H}{\Delta \tau} = \frac{4 - 2}{1,8 - 1,0} = \frac{2}{0,8} = 2,5 \text{ дв. ед. с.} \quad (2.53)$$

В [79, 101] представлен график, по которому можно наблюдать зависимость  $V_{оп} = \frac{\Delta H}{\Delta \tau}$ .

5) Оценка поисково-информационной нагрузки статических элементов ГИ осуществляется анализом среднего количество шагов при поиске необходимого элемента с определенными параметрами на СОИ и вычислении объема информации, обработанной человеком-оператором в процессе поиска. Коэффициент поисково-информационной нагрузки СОИ по формуле 2.39. Для построчного поиска используется нахождение коэффициента поисково-информационной нагрузки СОИ определяется по формуле 2.41.

6) Оценка поисковой активности информации (статических элементов ГИ) заключается в определении коэффициента поисковой активности информации на

основе анализе времени  $i$ -го фиксации взора пилота  $t_{fi}$  (используют экспериментальные значения [101, 107]):

- поиск условных знаков – 300 мс,
- поиск объекта СОИ – 370 мс,
- чтение буквенного или числового знака – 310 мс,
- поиск элементарных геометрических фигур – 200 мс,
- фиксация загорания индикатора СОИ – 280 мс.

времени перемещения  $i$ -го взора  $t_m$  (зависит от угла скачка взора оператора и при использовании экспериментальных значений  $t_{fi}$ , будет эквивалентна 1) и общего количества шагов поиска требуемого ВИУЭ с заранее известными признаками и свойствами (цветовое оформление, форма элемента, его функционально и т.д.). Для определения коэффициента поисковой активности информации на СОИ используется формула 2.5.

### **2.3.3.3 Функция учета психологических принципов при проектировании статической графической информации**

В процессе оценки эффективности статической ГИ бортовых систем особое значение имеет психологический аспект восприятия визуальной информации пилотом. В связи с этим, необходимо проверять соответствие отображения статической ГИ психологическим возможностям целевой аудитории, для которой она предназначена [15]. В [108] представлены выводы по вопросам эффективного представления ГИ:

- «Язык» ПО (способ взаимодействия человека и системы) должен быть интуитивно понятен пользователю, таким образом, отказ от применения стандартизированных подходов к проектированию ГИ в большинстве случаев следует рассматривать как недостаток, чем как достоинство.

- Использование знакомых и/или ранее встречавшихся пользователю элементов на ГИ позволяет значительно сократить время, которое он тратит на понимание СОИ и привыкание к нему.
- Пилоты взаимодействуют с СОИ для достижения некоторой задачи, поэтому особо ценен тот вариант исполнения ГИ, который обеспечивает эффективное и рациональное решение этой задач.

На шаге 3 алгоритма, представленного на рисунке 2.2, выполняется функция учета психологических принципов при проектировании статической ГИ. В расчете используются:

1) Оценка когнитивной нагрузки статических элементов ГИ заключается в анализе учета принципов когнитивной теории при проектировании ВИУЭ и определения коэффициента когнитивной нагрузки  $W_{cl}$  в соответствии с формулой 2.18. В случае, если по мнению ЛПР все критерии одинаково важны, то весовые показатели равны между собой и их сумма равняется 1.

$Q_{cl}$  – коэффициент учета принципа «пространственного примыкания», определяющийся по формуле 2.19.  $A_{cl}$  – коэффициент учета принципа «временного примыкания» определяющийся по формуле 2.20.  $Z_{cl}$  – коэффициент учета принципа «предварительной подготовки» определяющийся по формуле 2.21.

2) Оценка сигнализируемости статических элементов ГИ заключается в анализе учета функций поддержки оператору при взаимодействии с системой и определения коэффициента сигнализируемости  $W_s$  по следующей формуле:

$$W_s = N_s / N_o, \quad (2.54)$$

где  $N_o$  – общее количество визуальных элементов,  $N_s$  – количество визуальных элементов на альтернативе с учтенным принципом «сигнализируемости» при проектировании.

## 2.4 Методическое обеспечение модуля поддержки принятия решения для задач эргономической оценки статической графической информации

### 2.4.1 Выявление «доминирующей» и «доминируемой» альтернатив

На начальном этапе поддержки принятия решения ЛПР необходимо определить наличие «доминирующей» альтернативы варианта исполнения ГИ  $u^D \in U$  среди всего имеющегося множества. Альтернативу принято считать «доминирующей», если она превосходит иные альтернативы, содержащиеся в множестве  $U$ , по всем частным показателям  $w_k(u)$ ,  $k = \overline{1, K}$  векторного критерия эффективности  $W$ . Процесс поиска «доминирующей» альтернативы следующий [109]:

1) Произвести расчет  $K$  частных задач оптимизации со скалярными критериями:

$$u_k^* = \arg \min_{u \in U} (\max) w_k(u), \quad k = \overline{1, K} \quad (2.55)$$

Итогом расчета будет являться перечень альтернативных вариантов  $u_k^*$ ,  $k = \overline{1, K}$ , оптимальные по каждому частному показателю эффективности  $w_k(u)$ ,  $k = \overline{1, K}$ .

2) Произвести сравнение полученных решений. Если по всем частным показателям эффективности оптимальной оказывается одна и та же альтернатива  $u^D \equiv u^*$ , то она является «доминирующей». Данное сравнение можно записать в виде условия:

$$u_1^* = u_2^* = \dots = u_K^* \equiv u^D \quad (2.56)$$

Такая альтернатива рассматривается как строго оптимальная по заданному векторному критерию эффективности  $W$ . На данном этапе задача векторной оптимизации заканчивается.

На практике «доминирующая» альтернатива встречается достаточно редко, однако проверка ее наличия должна осуществляться. При ее выявлении процесс принятия решения по определению оптимальной альтернативы станет еще более оперативным.

В случае отсутствия «доминирующей» альтернативы принято осуществлять поиск и исключение из множества  $U$  «худшую» альтернативу. Альтернативу принято считать «худшей» («доминируемой»)  $u^X \in U$ , если она уступает хотя бы одной иной альтернативе из того же множества по всем частным показателям  $w_k(u)$ ,  $k = \overline{1, K}$  векторного критерия эффективности  $W$ .

«Худших» альтернативных решений может быть несколько, поскольку при исключении одного наихудшего, за место него может появиться следующее, которое доминировало над ней, но уступает остальным. Таким образом, двигаясь в данном направлении последовательного исключения «худших» альтернатив появляется множество «не худших» альтернатив, которые являются «конкурирующие» друг для друга. «Не худшие» альтернативы отличаются от «худших» («доминируемых») тем, что каждая из них превосходит все «не худшие» решения, совместно образующие множество  $U^{\Pi}$ , по хотя бы одному скалярному показателю эффективности, но уступает им по остальным. Иначе, значение каждого частного показателя эффективности не может быть улучшено без ухудшения других показателей. Данное множество «не худших» альтернатив с математической точки зрения принято называть «Парето-оптимальным» множеством  $U^{\Pi}$ .

Для определения «Парето-оптимального» множества на практике часто используют решения задач условной оптимизации методом множителей Лагранжа с ограничениями типа «равенство». В общем виде алгоритм решения таких задач можно представить, как решение задачи векторной оптимизации [109]:

1. Предположим, что существует два скалярных показателя эффективности у исследуемого объекта. Задается набор дискретных значений вектора  $w_{1i}$ ,  $i = \overline{1, N}$  с некоторым шагом  $\Delta w_1$  на интервале значений критерия  $w_1$  от точки  $w_1^*(u_1^*)$ , оптимальной по первому критерию, до точки  $\tilde{w}_1^*(u_2^*)$ , соответствующей альтернативе  $u_2^*$ , обеспечивающий оптимум второго критерия.

2. Решается задача условной оптимизации для каждого значения  $w_{1i}$ ,  $i = \overline{1, N}$  при ограничении  $w_1(u) = w_{1i}$ :

$$w_1^* = \arg \max_{u \in U} w_2(u) \quad (2.57)$$

3. Далее текущая задача сводится к задаче безусловной оптимизации с помощью метода множителей Лагранжа:

$$\{u_2^*, \lambda^*\} = \arg \max_{u \in U, \lambda} (w_2(u) + \lambda(w_1(u) - w_{1i})) \quad (2.58)$$

4. Получаем результаты решения данной задачи для всех точек  $u_i^{\Pi}, i = \overline{1, N}$  в виде совокупности пар  $\{w_{1i}^{\Pi}(u_i^{\Pi}), w_{2i}^{\Pi}(u_i^{\Pi})\}, i = \overline{1, N}$  значений оценочных показателей. Данные пары считаются дискретной аппроксимацией «Парето-оптимального» множества  $U^{\Pi}$ . Таким образом, некоторые полученные дискретные точки не будут принадлежать  $U^{\Pi}$ , при условии если граница области достижимости не является строго выпуклой. Применив процедуру парных сравнений можно убрать точки, которые оказались «худшими» и тем самым сформировать «Парето-оптимальное» множество  $U^{\Pi}$ .

Выявление «худших» альтернатив целесообразно проводить, поскольку таким образом можно на ранней стадии сравнительной оценки избавиться от заведомо «худших» альтернатив, уменьшив общее количество альтернатив и ускорив процесс принятия решения.

Как правило, множество  $U^{\Pi}$  содержит меньшее количество альтернативных вариантов чем множество  $U$ , но все же не единственное. В связи с этим, выявление «худших» альтернатив и формирование множества  $U^{\Pi}$  не является финальным этапом решения задачи векторной оптимизации.

Для определения единственного оптимального (или рационального) решения необходимо перейти к выбору метода поддержки принятия решения, позволяющего решить задачу многокритериального выбора.

#### **2.4.2 Обзор современных методов поддержки принятия решения в задачах многокритериального выбора**

В процессе принятия решений в задачах сравнительной оценки статической ГИ возникает проблема постоянного роста временных затрат, а также ЛПР. Кроме того, все более серьезнее становятся последствия принятия неудачных и неоптимальных решений. Это связано с тем, что современные СОИ представляют собой функционально нагруженные СТС, содержащие в себе большой объем ГИ. Для принятия решения по оптимальной альтернативе должен использоваться объемный перечень критериев при котором опыт и интуиция ЛПР не всегда оказываются в состоянии обеспечить выбор наилучшего решения. Для решения этой проблемы необходимо обратиться к направлению «Теория принятия решений», целью которой является помочь ЛПР понять свои предпочтения относительно возможных последствий выбора альтернатив [110].

Одной из ключевых особенностей статической ГИ является их многокритериальность. Это означает, что качество функционирования и эффективность взаимодействия человека с ней зависят от множества выходных параметров. Поэтому при проектировании, верификации, валидации и сравнении различных вариантов реализации необходимо учитывать влияние каждого из этих параметров на объект в целом [111].

Как показано в разделе 2.2 настоящей Главы для проведения комплексной эргономической оценки необходимо использовать перечень критериев оценки, что делает задачу оценки эффективности ГИ многоцелевой. Помимо этого, реализация одного варианта исполнения не является оптимальной по причине сложности учета всех необходимых характеристик в одной альтернативе. Поэтому, при разработке моделей и прототипов инженеры уделяют особое внимание созданию множества альтернативных представлений ГИ для последующего сравнения и определения наиболее рационального и эффективного варианта.

Для получения таких альтернатив задачах многокритериального выбора специалисты используют методы поддержки принятия решений. На сегодняшний день существует большое количество методов, позволяющих сделать более обоснованный выбор в условиях неопределенности и получить оптимальные результаты сравнительной оценки. Стоит отметить, что все описанные далее методы доказали свою эффективность на практике в различных областях и направлениях. Они успешно применяются в науке, технике, экономике, политике, медицине и многих других сферах. Выбор определенного метода зависит от специфики и особенностей решаемой задачи. Например, для оптимизации бизнес-процессов может использоваться метод анализа иерархий, а для выбора оптимального маршрута движения транспорта метод динамического программирования. Важно отметить, что каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, поэтому выбор конкретного, который лучше всего подходит для решения текущей задачи является актуальной задачей.

Один из возможных способов классификации данных методов по различным признакам представлен далее [112]:

1. По виду отображения  $f$ . Отображение множества  $S$  (*множество решений*) и  $K$  (*множество критериев*) может иметь детерминированный, вероятностный или неопределенный характер, в зависимости от чего задачи многокритериального выбора подразделяются на задачи в условиях риска и задачи в условиях неопределенности.

2. По насыщенности множества  $K$  (*множество критериев*). Множество критериев выбора может содержать один элемент или несколько, что дает основание определить задачи принятия решений как задачи со скалярным критерием или задачи с векторным критерием (многокритериальное принятие решений).

3. По типу системы предпочтения  $P$  (*система предпочтений ЛПП*), которые могут быть индивидуальные или коллективные [113, 114].

Далее приведены современные и часто используемые методы многокритериального выбора в задачах оценки СТС:

### 1. Принцип Парето

Принцип Парето является одним из способов решения многокритериальных задач, основная суть которого заключается в последовательном исключении из неформального анализа оцениваемых альтернатив, которые заведомо являются неоптимальными в рамках исследуемой задачи. В результате остается множество «не улучшаемых» векторов, которое называется множеством Парето (P). Данный принцип используется в случае равнозначности оценочных критериев.

Предположим, что сделан некоторый выбор  $x^*$ , и присутствует иной  $x^{**}$ , что для всех частных оценочных критериев эффективности существует:

$$f_i(x^{**}) \geq f_i(x^*), i = 1, \dots, n, \quad (2.59)$$

с обязательным условием, что, хотя бы одно из неравенств строго выполняется. Очевидно, что выбор  $x^*$  предпочтительнее выбора  $x^{**}$  и, следовательно, все вектора  $x^{**}$ , удовлетворяющие этому условию, могут быть исключены из анализа. Таким образом, для анализа остаются те вектора, которые не имеют более предпочтительных векторов.

Вектор называется «не улучшаемым» вектором результатов (вектором Парето), если:

$$f_i(x^{**}) = f_i(x^*), i = 1, \dots, n \quad (2.60)$$

Необходимо отметить, что принцип Парето не выделяет в результате единственное оптимальное решение, а лишь позволяет сузить множество допустимых альтернативных вариантов, предоставляя ЛПР осуществлять окончательный выбор на основе своего опыта.

В работе [115] подробно описан пример принципа Парето: при наличии двух целевых однозначных функций  $f_1(x), f_2(x)$  значению  $x$  будет соответствовать одна точка на плоскости  $(f_1, f_2)$ . Тогда,  $f_1 = f_1(x), f_2 = f_2(x)$  будут определять параметрически некоторую кривую  $a, b, c, d, e, g, f$  на этой плоскости (рисунок 2.3). При данном подходе, множеству Парето не будет соответствовать  $cd$ , по причине того, что для каждой точки данного участка  $A$  существует точка  $A^*$  участка  $bc$ , в

которой значение целевой функции  $f_1$  меньше, чем в точке  $A$ . По такому же принципу должны быть исключены из анализа участки  $de$  и  $gh$ . К данному множеству при описанном случае относятся участки  $ac$  и  $eg$ , тогда как  $e$  также должна быть исключена.

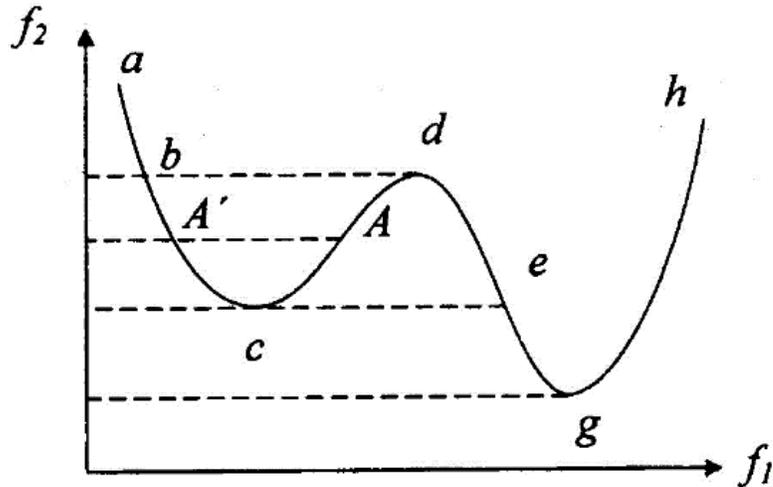


Рисунок 2.3. Множество Парето

Таким образом, принцип Парето заключается в том, что в качестве оптимального решения исследуемой задачи следует выбирать только тот вектор  $x$ , который принадлежит множеству Парето  $x^* \in P$ . Как было сказано ранее в данном случае получается не единственное оптимальное решение, а множество допустимых альтернатив. В большинстве случаев такая постановка вопроса значительно влияет на качество принимаемого решения, поскольку, сужая множество допустимых альтернативных вариантов, снижается неопределенность выбора, но оставшаяся неопределенность в конечном итоге разрешается за счет наличия экспертного мнения. Однако, если существует формализованный скалярный критерий для принятия решения  $f_{\text{пр}}(x)$ , то задача выбора финального решения может быть решена на основе условия:

$$x^* = \arg \min_{x \in P} f_{\text{пр}}(x), \quad (2.61)$$

где  $P$  – множество Парето для функций  $f_i(x)$ ,  $i = 1, \dots, m$ , на допустимом множестве векторов  $x \in X$ .

## 2. Метод MAUT

Метод MAUT (многокритериальная теория полезности) подробно описан в работах [112, 116 – 120]. В основе метода лежит анализ полезности различных атрибутов объекта исследования. Используется для оценки альтернативных вариантов решений с учетом нескольких критериев, которые определяются ЛПР, посредством формализации полученных заранее ЭО. По результатам формализации критериев получается однокритериальная функция полезности.

Главной задачей подхода является формирование условий (аксиом), которым должна соответствовать функция полезности. Это дает возможность провести математическое доказательство существования функции полезности. Особенности метода:

- формируется функция полезности, которая основывается на аксиомах и имеет математическое обоснование;
- перечень из этих аксиом проверяются в ходе обсуждения с ЛПР.

В MAUT аксиомы различаются на общего типа и специфичные. К первой группе относятся:

- 1) аксиомы, в которых устанавливаются отношения между альтернативами:
 
$$(U(A) > U(B) > U(C)); \quad (2.62)$$
- 2) аксиомы транзитивности;
- 3) аксиомы, в которых функция полезности непрерывна.

К следующей группе могут быть определены условия (аксиомы) независимости по полезности, разности и предпочтению.

В рамках MAUT каждое решение оценивается по нескольким критериям, которые могут быть как качественными, так и количественными. Каждый критерий имеет свой вес, отражающий его значимость для достижения цели. Затем критерии объединяются в единую функцию полезности, определяющую общую ценность каждого варианта решения.

Данный метод можно реализовать по теореме Кинни Р., согласно которой при соблюдении аксиомы предпочтения и независимости полезности сформированную функцию полезности можно считать аддитивной [121]:

$$U(x) = \sum_{i=1}^N w_i U_i(x) \text{ при } \sum_{i=1}^N w_i = 1, \quad (2.63)$$

или мультипликативной:

$$1 + kU(x) = \prod_{i=1}^N (1 + kw_i U_i(x)) \text{ при } \sum_{i=1}^N w_i \neq 1 \quad (2.64)$$

где  $U, U_i$  – функции полезности, изменяющиеся в диапазоне от 0 до 1;  $w_i$  – коэффициент важности (веса) критериев при  $0 < w_i < 1$ ; коэффициент  $k > -1$ .

К преимуществам метода MAUT можно отнести:

- 1) возможность учета множества факторов при принятии решений;
- 2) построение единой математической теории, позволяющей обосновать конкретный вид общей функции полезности в зависимости от предпочтений ЛПР;
- 3) несмотря на ресурсозатратные процесс построения общей функции полезности, полученный результат позволяет оценить любые (в том числе и вновь появляющиеся) альтернативы.

К недостаткам можно отнести:

- 1) метод требует достаточно высокой квалификации специалистов, которые будут проводить анализ данных и формировать функцию полезности;
- 2) метод может быть сложным для понимания обычными пользователями;
- 3) предполагается (неявно), что ЛПР может произвести точные количественные измерения, что является ошибкой. Исследования в области психологии человека показали, что нет надежного способа количественного измерения весов критериев [122].
- 4) в процессе применения указанного метода ЛПР необходимо назначать все основные параметры без возможности провести детальные исследования проблемы

привычным для человека методом «проб и ошибок». Как отмечается в работе [123], сложно предположить, что все полезности и вероятности находятся в головах ЛПР в ожидании, что их извлекут оттуда;

5) является очень трудоемким и ресурсозатратным.

### *3. Метод анализа иерархий*

Метод анализа иерархий (МАИ) является современным математическим методом, основанным на системном подходе, который применяется для разрешения сложных задач многокритериального выбора [112, 124 – 128]. МАИ не предполагает наличия единственно верного решения, а предоставляет ЛПР несколько возможных вариантов, каждый из которых обладает своими особенностями, преимуществами и недостатками.

МАИ был разработан исследователями Р. Беллманом, Б. Н. Бруком и В. Н. Бурковым, но наибольшую популярность он приобрел благодаря научным трудам Т. Саати, которые наиболее широко раскрыли потенциал этого метода, что способствовало его широкому практическому применению в большом спектре направлений – от государственного управления до производства СТС и т.д. Такая универсальность МАИ объясняется тем, что он сочетает в себе не только математические, но и психологические аспекты изучаемой проблемы. Метод позволяет наглядно и просто представить сложную проблему в виде иерархии простых шагов, сравнить различные альтернативы и оценить количественно каждую из них в том числе с применением специализированных программных продуктов [129].

Суть указанного метода заключается в построении иерархии оценки решений через разложение проблемы на все более простые составляющие. МАИ включает в себя процесс определения приоритетов на основе субъективных мнений экспертов, а также применение парного сравнения ЭО на основе определенной шкалы баллов. Основные шаги метода:

1) Разработка модели исследуемой задачи в формате иерархии (рисунок 2.4), содержащую цель, возможные альтернативы, достижения и частные оценочные критерии для эффективности вариантов исполнения.

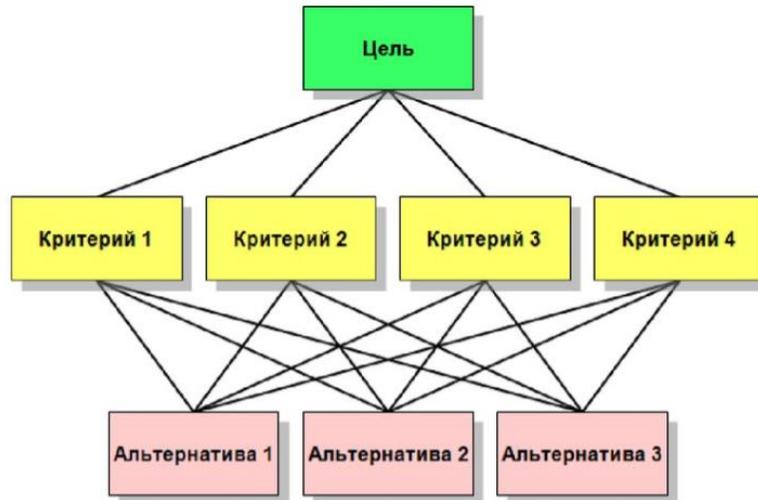


Рисунок 2.4. Структура метода в виде иерархии

2) Определение степеней важности всех используемых элементов применяя парные сравнения альтернатив:

а. В иерархии определяют два типа элементов – «родители» и «потомки». «Потомки» влияют на соответствующие элементы вышестоящего уровня иерархии, которые являются их «родителями».

б. Для всех дочерних элементов разрабатываются матрицы парных сравнений.

с. Для каждого «родителя» строится квадратная матрица размерностью, равной числу элементов  $n$  более низкого уровня  $(A_1, A_2, \dots, A_n)$ , являющегося его «родителем».

д. Когда элементы  $(A_1, A_2, \dots, A_n)$  могут быть оценены количественно по определенному показателю, их парное сравнение возможно, путем сопоставления количественных значений этого параметра для каждого элемента  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ . Соответственно, в матрицах устанавливаются отношения между этими числовыми значениями. Если значения  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$  неизвестны, то парное сравнение  $(A_1, A_2, \dots,$

$A_n$ ) выполняется на основе субъективного мнения лица, принимающего решение, которое оценивается численно по шкале относительной значимости (1 - равнозначная важность, 3 - умеренное превосходство одного над другим, 5 - значительное превосходство одного над другим и т.д.).

е. Правила сравнений:

– Если  $A_i$  доминирует над  $A_j$ , то клетка на пересечении строки  $A_i$ , и столбца  $A_j$ , заполняется числовым значением в соответствии с заданной шкалой относительной важности, а клетка на пересечении строки  $A_j$ , и столбца  $A_i$ , - обратной к этому значению дробью.

$$\text{Если } a_{ij} = \alpha, \text{ то } a_{ji} = \frac{1}{\alpha}, \alpha \neq 0 \quad (2.65)$$

– Если элемент  $A_j$ , доминирует над элементом  $A_i$ , то в клетку на пересечении строки  $A_j$ , и столбца  $A_i$ , устанавливается показатель относительной важности, а в клетку на пересечении строки  $A_i$ , и столбца  $A_j$ , его обратная величина.

– Если элементы  $A_i$ , и  $A_j$  идентичные, то во две клетки попадают единицы. Иными словами  $A_i$  одинаково важно  $A_j$ , то  $a_{ij} = 1, a_{ji} = 1$

$$A = \begin{vmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{vmatrix} \quad (2.66)$$

3) Формирование общих приоритетов альтернатив путем линейной свертки приоритетов элементов на иерархии;

4) Проверка суждений на согласованность:

– Если анализируется матрица с результатами, полученными с помощью точных физических измерений, то значения элементов матрицы порядковые. Если объект 1, предпочтительнее объекта 2, в  $n$  раз, а объект 2, предпочтительнее объекта 3 в 1 раз, то объект 1, предпочтительнее объекта 3 в  $n \cdot 1$ .

– На практике количественная (кардинальная) и транзитивная (порядковая) согласованность может нарушаться, так как человеческие ощущения трудно выразить математической формулой. На практике достигнуть такого уровня точности экспертизы сложно, в связи с этим определяется показатель различия индексов согласованности для произвольной и заполненной ЛПР матрицы.

– Для повышения равномерности в числовых интервалах, независимо от того, какое число  $a$  мы выбираем для сравнения  $i$ -го элемента с  $J$ -м,  $a_{ji}$  приписывается значение обратной величины, т. е.  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ . Таким образом, если один элемент в  $a$  раз лучше другого, то последний только в  $1/a$  раз лучше первого.

5) Формирования итогового решения по оптимальной альтернативе.

МАИ позволяет произвести оценку качества экспертизы по показателю «Индекс непротиворечивости» (ИН) по следующей формуле:

$$\text{ИН} = (\beta_{max} - n)/(n - 1), \quad (2.67)$$

где  $n$  — количество элементов сравнения. ИН коррелирует с показателем «случайной непротиворечивости» (СН), который рассчитывается на основе усреднения серии произвольных выборок из матрицы  $A$ .

Для получения показателя индекса относительной непротиворечивости (ОН) необходимо ИН разделить на значение, соответствующее случайной согласованности матрицы того же порядка. Допустимым считается, если ОН не превышает 10%.

Достоинства метода:

1) Гибкость. Метод позволяет учитывать множество аспекты, которое могут влиять на исследование СТС.

2) Системный подход. МАИ позволяет рассматривать СТС как сложные иерархические структуры, что способствует более глубокому пониманию их функционирования и взаимодействия между элементами.

3) Объективность. МАИ использует математические методы для обработки данных и определения приоритетов, что уменьшает субъективность в оценке.

4) МАИ дает возможность эффективно переходить от вербальных описаний к числовым параметрам объектов, однако на каждом этапе иерархии целей формируются матрицы ЭО. Таким образом, ЛПР вместо общих понятий «хорошо/плохо» и т.д. получает набор чисел для сравнения, который полностью зависит от субъективного мнения экспертов.

Несмотря на значительные преимущества данного метода, он обладает и рядом недостатков:

1) Требуется большого объема данных. Для эффективного применения МАИ требуется наличие достаточного количества данных о СТС и ее компонентах. Помимо этого, в МАИ не предусмотрены средства для проверки достоверности самих данных.

2) Точность результатов МАИ зависит от качества обработанных данных.

3) МАИ может быть менее эффективным при работе с динамическими с очень сложными структурами или большим количеством параметров системами, такими как ГИ бортовых СОИ, по причине ресурсозатратной процедуры выполнения (большое количество экспертов, значительные временные затраты).

4) Результаты МАИ сильно зависят от качества ЭО, поэтому важно привлекать квалифицированных экспертов, что порой является труднодостижимой задачей. При этом, МАИ позволяет только оценить исследуемые альтернативы, но не произвести интерпретацию полученных рейтингов, что накладывает большую ответственность на ЛПР.

5) МАИ не предполагает использование оценок типа «более важно/менее важно», что может быть особо актуально при большом количестве критериев. Данное ограничение влияет на то, что в процессе перевода полученных экспертных мнений в цифровой формат с использованием балльных шкал присутствует большая доля субъективизма полученных оценок, что влияет на процедуры попарных сравнений.

6) Требуется значительных временных затрат на формирование компетентной экспертной группы, сбор и интерпретацию экспертных мнений, что может быть критичным на производстве бортовых систем.

#### 4. Метод уступок (компромиссов)

Метод уступок или компромиссов относится к категории прямых методов, для решения многокритериальной задачи которым требуется большое количество внешней информации об исследуемом объекте. Помимо этого, в указанном методе используется заранее определенные приоритеты критериев принятия решений. Применение метода позволяет определить альтернативный вариант с наивысшим значением основного критерия оценки и установление минимально допустимого уровня у данного критерия [11, 130, 131]. Из конечного числа отобранных таким образом альтернатив выбирается та, которая обеспечивает максимальное или минимальное (в зависимости от направления оптимизации) значение и последующее ограничение рассматриваемых альтернатив путем определения допустимого отклонения от выбранного оптимума по второму критерию. Подобные действия проводятся для анализа последующие критерии, пока не останется единственная оптимальная альтернатива. Алгоритм метода [130]:

1) Необходимо упорядочить частные критерии оптимальности в порядке убывания их важности, затем определить минимальное значение первого критерия (т.е. решается однокритериальная задача оптимизации). Итоговый вариант должен располагаться в области допустимых решений и соответствовать требованиям и ограничениям исследуемой задачи:

$$f_1(x) \rightarrow \min, \quad (2.68)$$

$$x \in D, \quad (2.69)$$

$$g_i(x) \leq b_i, i = 1, \dots, n, \quad (2.70)$$

$$lb \leq x \leq ub, \quad (2.71)$$

где  $D$  – область допустимых решений;  $x$  – вектор значений оптимизируемых переменных  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;  $F(x)$  – векторная целевая функция частных критериев оптимальности  $f_k(x) (k = 1, \dots, K)$ ;  $g(x)$  – совокупность ограничений в виде линейных и нелинейных равенств и неравенств, характеризующих требования;

$lb$  и  $ub$  – нижняя и верхняя границы изменения значений вектора оптимизируемых переменных соответственно.

2) На следующем шаге по результатам анализа решения из прошлого пункта назначается допустимое отклонение (уступка) первого критерия ( $\Delta_1 > 0$ ) от его оптимального значения  $f_1(x^*)$  и решается задача поиска оптимального решения для второго критерия при условии, что отклонение первого критерия от его оптимального значения не должно превышать величины принятой уступки:

$$f_2(x) \rightarrow \min, \quad (2.72)$$

$$f_1(x) \geq f_1(x^*) - \Delta_1, \quad (2.73)$$

$$x \in D, \quad (2.74)$$

$$g_i(x) \leq b_i, i = 1, \dots, n, \quad (2.75)$$

$$lb \leq x \leq ub, \quad (2.76)$$

3) Далее назначается уступка по второму критерию ( $\Delta_2 > 0$ ), которая вместе с  $\Delta_1$  используется при решении задачи поиска оптимального решения для третьего частного критерия оптимальности:

$$f_3(x) \rightarrow \min, \quad (2.77)$$

$$f_1(x) \geq f_1(x^*) - \Delta_1, \quad (2.78)$$

$$f_2(x) \geq f_2(x^*) - \Delta_2, \quad (2.79)$$

$$x \in D, \quad (2.80)$$

$$g_i(x) \leq b_i, i = 1, \dots, n, \quad (2.81)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (2.82)$$

4) Аналогичным образом назначается уступка по третьему критерию ( $\Delta_3 > 0$ ), которая вместе с  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  используется при решении задачи поиска оптимального решения для четвертого критерия:

$$f_4(x) \rightarrow \min, \quad (2.83)$$

$$f_1(x) \geq f_1(x^*) - \Delta_1, \quad (2.84)$$

$$f_2(x) \geq f_2(x^*) - \Delta_2, \quad (2.85)$$

$$f_3(x) \geq f_3(x^*) - \Delta_3, \quad (2.86)$$

$$x \in D, \quad (2.87)$$

$$g_i(x) \leq b_i, i = 1, \dots, n, \quad (2.88)$$

$$lb \leq x \leq ub, \quad (2.89)$$

Процедуры назначения уступок для частных критериев повторяются до тех пор, пока не будет найдено оптимальное значение последнего по важности критерия  $f_n(x^*)$ .

Приведя пример процедуры метода можно увидеть, что итогом расчета является только одна оптимальная альтернатива без упорядочивание остальных, что может быть полезным при дальнейшем исследовании. Для получения следующей по предпочтительности для ЛПР альтернативы, необходимо повторить описанный процесс указанного метода со всеми альтернативными вариантами исполнения кроме оптимальной, возможно, используя дополнительную информацию для назначения новых уступок по критериям оценки.

К преимуществам метода можно отнести:

- 1) Возможность детального анализа частных критериев оптимальности, а также численная оценка их влияния на значения оптимизируемых переменных и показатели.
- 2) Возможность установления приоритетов между критериями, что делает его полезным в ситуациях, где некоторые критерии имеют большее значение, чем другие.

Основными недостатками являются:

- 1) Отсутствие упорядоченности по своей предпочтительности для ЛПР альтернативных вариантов исполнения.
- 2) Большая зависимость итогового результата исследования от параметров метода, которыми пользуется ЛПР в процессе решения. Это может привести к получению не одного, а несколько оптимальных вариантов решения и требует

дальнейшего анализа с дополнительной информацией для выбора лучшей альтернативы из полученных.

3) Метод уступок может быть сложно применим в ситуациях, где критерии сильно коррелируют друг с другом.

### *Методы семейства ELECTRE*

Семейство ELECTRE принадлежат семейству методов теории принятия решений, построенных на анализе доминирования альтернатив. Они часто применяются для сужения множества Парето для возможности получения определенного количества альтернативных вариантов исполнения, и далее, используя дополнительную информацию, находится оптимальное решение. Авторами данных методов являются группа ученых под руководством Б. Руа [11, 132 – 135].

Методы ELECTRE можно классифицировать по поколениям [136]:

1) Первое поколение (ELECTRE или ELECTRE 1) учитывает только превосходство или эквивалентность в парном критериальном сравнении альтернатив.

2) Методы, входящие во второе поколение (ELECTRE II) позволяют оценить степень отличия одного критериального показателя от другого при проведении процедуры парного сравнения существующих альтернатив.

Далее представлены отличия поколений методов ELECTRE.

Смоделируем ситуацию, при которой даны два альтернативных варианта исполнения  $X$  и  $Y$ . При чем, существует гипотеза ЛПР, что альтернатива  $X$  превосходит альтернативу  $Y$ . Тогда множество  $M$ , состоящее из  $N$  критериев, можно разделить на три подмножества:

- 1)  $M^+$  - подмножество критериев, по которым  $X$  предпочтительнее  $Y$ .
- 2)  $M^-$  - подмножество критериев, по которым  $Y$  предпочтительнее  $X$ .
- 3)  $M^=$  - подмножество критериев, по которым  $Y$  равноценно  $X$ .

Следующим шагом необходимо сформировать индекс согласия (ИС) с выдвинутой гипотезой о том, что альтернатива X превосходит альтернативу Y. Данный показатель рассчитывается на основе выставленных весовых показателей для критериев оценки. Расчет ИС для семейств ELECTRE I и ELECTRE II представлен в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Определение индекса согласия

ELECTRE I	ELECTRE II
Индекс согласия (ИС) равен отношению суммы весов критериев оценки из подмножеств $M^+$ и $M^-$ к общей сумме весов [133]. Вычисление представлено в формуле 2.90.	Индекс согласия (ИС) равен отношению суммы весов критериев оценки из подмножества $M^+$ к сумме весов критериев оценки из подмножества $M^-$ . Вычисление представлено в формуле 2.91.

$$ИС_{ALT AB} = \frac{\sum_{i \in M^+, M^-} W_i}{\sum_{i=M}^N W_i}, \quad (2.90)$$

$$ИС_{ALT AB} = \frac{\sum_{i=M^+}^N W_i}{\sum_{i=M^-}^N W_i} \quad (2.91)$$

В основе определения индекса несогласия (ИН) с учетом выдвинутой гипотезы лежит принцип «противоречивого» критерия по которому альтернатива Y в наибольшей степени превосходит альтернативу X. Расчет данного критерия происходит одинаково для I и II семейства методов.

Для учета возможной разницы длин шкал критериев оценки альтернатив X и Y необходимо отнести разность оценок Y и X к длине наибольшей шкалы:

$$ИН_{ALT AB} = \max_{i \in M^-} \left| \frac{J_Y^i - J_X^i}{U_i} \right|, \quad (2.92)$$

где  $J_X^i$  и  $J_Y^i$  – оценки альтернативных вариантов решений X и Y по i-му критерию,  $U_i$  – длина шкалы i-го критерия.

В таблице 2.4 приведены свойства ИС и ИН.

Таблица 2.4. Свойства индекса согласия и индекса несогласия

Свойства ИС	Свойства ИН
1) $0 \leq \text{ИС}_{ALT AB} \leq 1$ ; 2) $\text{ИС}_{ALT AB} = 1$ , если подмножества $M^+$ и $M^-$ пусты; $\text{ИС}_{ALT AB}$ сохраняет значение, если происходит замена одного критерия оценки на несколько, но имеющих то же общее весовое значение	1) $0 \leq \text{ИН}_{ALT AB} \leq 1$ ; $\text{ИН}_{ALT AB}$ не изменяет значение при введении более детальной шкалы по $i$ -му критерию оценки при неизменной длине

ИС и ИН необходимы для дальнейшего построения матриц ИС и ИН для исследуемых альтернативных вариантов. После попарного сравнения всех альтернатив необходимо построить граф, в котором направленная дуга будет означать превосходство одного альтернативного варианта исполнения над другим, и наоборот, отсутствие дуги будет являться несравнимостью всех альтернатив при назначенных уровнях согласия/несогласия.

Основным преимуществом данного метода является возможность использовать степень превосходства одного варианта исполнения над другим и не разделять все исследуемые варианты на отдельные подгруппы, для которых могут требоваться индивидуальные подходы.

Недостатки метода:

- 1) Зависимость итогов метода от присваиваемых индексов и шкал критериев оценки.
- 2) Метод ELECTRE может быть подвержен субъективности, так как он зависит от предварительных оценок и предпочтений, установленных ЛПР.

*Методы, основанные на свертывании (скаляризации) критериев оценки*

В данной группе методов выделяют следующие [115, 137]:

1) Метод выделения основного критерия и перевода вспомогательных критериев в разряд ограничений.

Данный метод часто используется в задачах многокритериальной оптимизации при получении компромиссных экспертных мнений по доминированию одного критерия над остальными. Для использования метода необходимо назначить допустимые границы  $f_i^*$  для вспомогательных критериев оценки.

Применения данного метода для сведения многокритериальной задачи оптимизации к однокритериальной оптимизации с набором ограничений приводит задачу к следующему виду:

$$x^* = \arg \min f_1(x) \quad (2.93)$$

При выполнении следующих условий:

$$f_2 \leq f_2^*, f_3 \leq f_3^*, \dots, f_m \leq f_m^*, \quad (2.94)$$

2) Метод Гермейера или метод линейной свертки критериев.

Метод Гермейера отличается от описанного выше метода тем, что он предполагает переход от  $m$  критериев  $f_i(x), i = \overline{1, m}$  к одному критерию  $f(x)$  в случаях, когда ЛПР не удастся однозначно выделить наиболее приоритетный критерий оценки альтернативы из перечня существующих. Критерий  $f(x)$  имеет следующий вид:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i f_i(x), \quad (2.95)$$

где  $\alpha_i$  – перечень коэффициентов, отражающих важность соответствующего критерия и уравнивающие весь набор критериев между собой путем ранжирования по их важности с использованием методов ЭО критериев.

Данный метод не только сравнивает критерии, но также и их приоритеты или «веса» критериев. Как правило, весовые коэффициенты  $\alpha_i$  задаются положительными, и нормированными, например:

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0 \quad (2.96)$$

Основным этапом указанного метода является сведение многокритериальной задачи до однокритериальной, а также устранение неопределенности путем назначения ЛПР коэффициентов  $\alpha_i$ . Важно отметить, что сама процедура определения и расстановки весовых показателей критериям оценки не является строго формализованной процедурой и зачастую проводится с привлечением экспертной группы, которая оценивает и структурирует их.

Стоит выделить, что метод Гермейера, точно также, как и метод выделения основного критерия и перевода вспомогательных критериев в разряд ограничений подвержен субъективизму, связанному с распределением весовых коэффициентов между несколькими основными критериями оценки. Как показывает практика [112, 124], не редко возникают ситуации, в которых при назначении коэффициентов  $\alpha_i$  у ЛПР возникают различные мнения. В таких случаях находят компромиссное решение, используя метод анкетирования или фокус-групп, с последующим переводом полученных вербальных показателей важности критериев в их числовые эквиваленты. Это предполагает постепенное приближение к удовлетворительному решению всех ЛПР в ходе согласовательных процедур для различных значений  $\alpha_i$  [138].

### *Метод Фишберна*

Указанный метод базируется на использовании формул Фишберна и является одним из методов приоритизации сравниваемых вариантов решений [139]. Процесс ранжирования происходит не в ходе исследования, а на основе статистических данных, что увеличивает точность прогнозирования, по сравнению с иными методами ранжирования и назначения баллов.

Используя формулы данного подхода определяются весовые показатели у оценочных критериев, при условии, если присутствуют дополнительная информация о показателях. Используя экспертные мнения показатели могут быть упорядочены по степени убывания их значимости:  $x_1 \geq x_2 \geq \dots \geq x_n$ . В данном случае весовые коэффициенты предпочтений критериев оценки альтернатив образуют убывающую арифметическую прогрессию и определяются по первой формуле Фишберна:

$$k_i = \frac{2(n - i + 1)}{n(n + 1)}, i = 1 \dots n, \quad (2.97)$$

где  $n$  – количество показателей,  $i$  – ранг отдельного показателя.

Далее пример для 5 показателей:

$$n=5, k_1 = \frac{1}{3}, k_2 = \frac{4}{15}, k_3 = \frac{1}{5}, k_4 = \frac{2}{15}, k_5 = \frac{1}{15} \quad (2.98)$$

В случае необходимости можно усилить линейное упорядочение:

$$\begin{aligned} 20ck_1 &\geq k_2 + k_3 + \dots + k_n \\ k_2 &\geq k_3 + k_4 \dots + k_n \\ k_{n-1} &= k_n \end{aligned} \quad (2.99)$$

Исходя из полученного, весовые коэффициенты предпочтений критериев оценки образуют убывающую геометрическую прогрессию. Значения коэффициентов можно рассчитать по второй формуле Фишборна:

$$k_i = \frac{2^{n-i}}{2^n - i}, i = 1 \dots m, \quad (2.100)$$

Вернувшись к 5 показателям:

$$n=5, k_1 = \frac{16}{31}, k_2 = \frac{8}{31}, k_3 = \frac{4}{31}, k_4 = \frac{2}{31}, k_5 = \frac{1}{31} \quad (2.101)$$

В случае, когда относительно весовых коэффициентов известны интервальные соотношения упорядочения:  $x_i \leq k_i \leq y_i, i = 1 \dots n$ , используется третья формула Фишборна:

$$k_i = x_i + \frac{1 - \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)} * (y_i - x_i), i = 1 \dots n, \quad (2.102)$$

где  $x_i \leq k_i \leq y_i$ ,  $\sum_{i=1}^n a_i \leq 1$ ,  $\sum_{i=1}^n y_i \geq 1$  – интервалы возможных значений для весовых коэффициентов, предложенных на основании экспертных суждений. В данном случае, помимо ранжирования, требуется также экспертная информация относительно интервалов возможных значений.

Метод Фишборна имеет следующие преимущества:

- 1) Не требуется проводить опрос экспертов и обрабатывать его результаты.
- 2) Отсутствуют ограничительные условия реализации.
- 3) Есть возможность учета дополнительной информации о показателях.
- 4) Не требуется программная реализация со сложным алгоритмом перебора.

Необходимо отметить, что данный метод имеет также следующие недостатки:

- 1) Весовые коэффициенты рассчитываются на основании выданной оценки, без учета информации о том или ином показателе.
- 2) В связи с тем, что указанный метод основывается на положениях линейной свертки критериев, он не подходит для оценки самих критериев по их степени важности (обычно прибегают к установке показателей на основе опыта ЛПР или методом попарного сравнения элементов).
- 3) Близким по значению показателям соответствуют веса с большим отличием по значению.
- 4) Имеет низкий прирост по точности относительно простого усреднения индивидуальных показателей;
- 5) Сложность численной оценки предпочтений критериев оценки. Метод требует определения приоритетности и однозначную иерархию по отношению друг к другу по всему перечню критериев оценки, что сделать достаточно трудно, если решается задача оценки сложной технической системы, такой как СОИ в составе КБО.
- 6) Присутствует доля субъективизма в процедуре назначения весовых показателей.

### *Метод максиминной свертки критериев*

Особенностью метода максиминной свертки критериев является то, что значение целевой функции зависит от конкретного частного критерия оптимальности, который в данном случае имеет максимальное значение соответствующей функции критерия. Указанный метод зачастую используется в случаях, когда  $x \in X$  и множество  $X$  является непрерывным. Алгоритм метода начинается с формирования ЛПР, зачастую субъективным образом, группы контрольных показателей  $f_i^*, i = \overline{1, m}$ , которые представляют собой оценки для соответствующих целевых критериев оптимальности [115, 140]:

$$f_i(x) \leq f_i^*, i = \overline{1, m} \quad (2.103)$$

Основной мерой приближения к каждому из показателей  $f_i^*$  используется функция максимума:

$$f(x) = \max_{i=\overline{1, m}} \left[ \frac{f_i(x)}{f_i^*} \right] \quad (2.104)$$

В этом случае задачу скалярной оптимизации можно свести к:

$$x^* = \arg \min_x \max_{i=\overline{1, m}} \left[ \frac{f_i(x)}{f_i^*} \right] \quad (2.105)$$

Исходя из этого, неопределенность целей в процессе нахождения экстремума редуцируется за счет поиска гарантирующего решения в смысле максимального приближения к  $f_i^*$ .

### *Метод квадратичной свертки критериев*

Метод квадратичной свертки критериев является альтернативным способом метода максиминной свертки для решения задачи редукции критериев, который можно представить в следующем виде [115]:

$$f(x) = \sum_1^m \left( \frac{f_i(x) - f_i^*}{f_i^*} \right)^2 \quad (2.106)$$

*Метод, основанный на использовании «абсолютного минимума»*

В задачах многокритериальной оптимизации где необходимо сформировать числовые значения для исходных критериев оптимальности  $f_i^*$  часто прибегают к методу, основанному на использовании «абсолютного минимума». Суть метода заключается в решении нескольких однокритериальных задач следующего вида [115]:

$$x_*^i = \arg \min_x f_i(x), i = \overline{1, m} \quad (2.107)$$

При этом совокупность значений  $x_*^i = \min_x f_i(x) = f_i(x_*^i)$  на всем множестве исходных критериев представляет собой определенную точку, называемую «абсолютным минимумом». Условиями достижения данной точки является совпадение всех  $x_*^i$ . В иных случаях принято рассматривать определенное приближение к этому абсолютному максимуму. Как правило вводят скалярную функцию, которая определяет степень приближения. С ее помощью можно использовать скалярный критерий оптимальности. Такой функцией может служить квадратичная форма вида:

$$f(x) = \sum_{i,j=1}^m (f_i(x) - f_i^*) \lambda_{ij} (f_j(x) - f_j^*), \quad (2.108)$$

где  $\lambda_{ij}$  – элементы некоторой положительно-определенной матрицы.

*Метод уверенных суждений*

Основная идея уверенных суждений (МУС) заключается в рассмотрении не одной конкретной линейной свертки оценочных критериев, а всего множества этих сверток, которые моделируют все возможные экспертные мнения, а, следовательно, учитывают все возможные способы учета неопределенности, которое при установленной структуре оценочной функции описывается всем множеством

допустимых значений вектора весовых коэффициентов критериев [11, 141 – 144]. В качестве основной структуры данной функции применяется свертка критериев Гермейера, в связи с тем, что она имеет свойство идентифицировать любые парето-оптимальные решения в классе непрерывных оценочных функций [145]. Исходя из вышесказанного, функция ценности для альтернативных вариантов исполнения будет выглядеть следующим образом [11]:

$$f(u) = \sum_{k=1}^K a^k w_k(u), k \quad (2.109)$$

$$= \overline{1, K}$$

$$a^k \geq 0, \quad (2.110)$$

$$\sum_j a^k = 1 \quad (2.111)$$

В МУС считается, что весовые коэффициенты неопределенны и принято рассматривать множество всех возможных способов учета неопределенности. Наилучшим вариантом исполнения статической ГИ будет тот, который выигрывает иные альтернативы по оценочной функции при всех способах учета неопределенностей при всех уникальных комбинациях весовых коэффициентов линейных свертки в диапазоне [0; 1].

У большинства методов, описанных ранее, присутствуют недостатки, связанные с влиянием человеческого фактора на процесс сравнительной оценки путем назначения весовых коэффициентов, индексов согласия и несогласия, попарного сравнения и т.д. В МУС этот недостаток устранен, поскольку при принятии решения используется все множество способов учета неопределенности. ЛПР не требуется выбирать структуру оценочной функции и конкретные значения весовых коэффициентов. Субъективность, которая является правом ЛПР, а не требованием МУС включается по его желанию через два вида его уверенных суждений [144, 146]:

*Уверенное суждение первого типа.* ЛПР имеет право сформировать группы важности и распределить между ними частные критерии: «k1, k2 важные, критерии k3, k4 имеет наименьшую важность» (качественное сравнение).

*Уверенное суждение второго типа.* ЛПР имеет право сформировать пары парето-несравнимых векторов частных критериев, в отношении которых он уверен, что один из векторов лучше другого.

Указанные суждения легко формулируются в виде ограничений на возможные значения весовых коэффициентов, которые сужают множество. Введение данных утверждений достаточно для расчета значений двух комплексных критериев «Жесткий рейтинг» и «Мягкий рейтинг» для каждого альтернативного варианта с учетом неустраняемой неопределенности.

Под критерием «Жесткий рейтинг» подразумевается доля весовых коэффициентов из всего допустимого множества весов, при которых данный вариант оказывается лучшим по сравнению с остальными при их оценке по свертке Гермейера, использующей эти коэффициенты. То есть, в МУС при расчете жесткого рейтинга учитывают отношение суммы всех случаев, когда альтернативный вариант статической ГИ бортовых систем имеет более выигрышную оценку (частоты выигрышей) по числу всех реализаций. Этот комплексный критерий обозначается как «RG» и рассчитывается по следующей формуле:

$$RG_i = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N B_{il}}{K}, \quad (2.112)$$

где  $i \in [1, L], l \in [1, N]$ ,  $N$  – число альтернатив,  $L$  – число вариантов реализации вектора коэффициентов линейной свертки  $a^k$  (количество переборов). Если после учета неопределенности лучшими оказались несколько альтернативных вариантов, например  $Q$ , то в жестком рейтинге каждого из них в числителе прибавляется  $B_{il} = 1/Q$ , иначе не  $B_{il} = 1$ .

*Мягкий рейтинг* «RM» альтернативного варианта показывает его сравнительную эффективность по сравнению с решениями, оказавшимися

наилучшими при различных учетах неопределенности. Иными словами, данный показатель представляет собой среднее значение свертки Гермейера, применяемой при всех допустимых коэффициентах. Данный критерий будет полезен в случаях, когда требуется выявить среднюю предпочтительность альтернативы по сравнению с другими вариантами, а также, если значения жестких рейтинги альтернативных вариантов оказались почти одинаковыми или равными нулю. Данный показатель рассчитывается по формуле:

$$RM_i = \frac{\sum_{l=1}^L \frac{f_{il}}{\max f_{il}}}{K}, \quad (2.113)$$

где  $i \in [1, L], l \in [1, N]$ ,  $N$  – число альтернатив,  $L$  – число вариантов реализации вектора коэффициентов линейной свертки  $a^k$  (число переборов).

Последним этапом метода является признание ЛПР, что возможности дальнейшего снижения неопределенности за счет его уверенных суждений исчерпаны. Итоговым результатом оценки является оптимальное решение с наилучшим показателем жесткого рейтинга. Если таких решений несколько, то в качестве оптимального выбирается альтернатива с наилучшим показателем мягкого рейтинга.

К особенностям данного метода стоит отнести необходимость в разработке ПО, позволяющего реализовать определение и вычисление всего множества способов учета неопределенности. Современные технологии позволяют устранить данную особенность в виде СППР, одна из которых предложена в настоящем исследовании.

К основным преимуществам МУС можно отнести:

- 1) отсутствие субъективизма в процессе установки количественных показателей. В иных методах данными показателями являются весовые коэффициенты, индексы согласия, порог уступок и т.д.;
- 2) метод обладает максимально возможной объективностью, поскольку не применяет искусственных приемов, направленных на полную формализацию задачи

путем поиска оптимального единственного способа учета неопределенности. За место этого учитывается все множество таких способов;

3) в методе отсутствуют ресурсозатратные этапы парных сравнений. Вместо них предлагается использовать формирование уверенных суждений у ЛПР, процедура получения которых достаточно понятна и проста;

4) позволяет не только выявлять оптимальную альтернативу, но и упорядочивать все множество альтернатив;

5) при необходимости позволяет учитывать неформализованные мнения и суждения ЛПР, которые возникают в процессе анализа ГИ.

### **2.4.3 Сравнительный обзор современных методов поддержки принятия решения в задачах многокритериального выбора**

Как показал анализ, проведенный в разделе 2.4.2 настоящей Главы, существует большое количество методов поддержки принятия решения ЛПР в задачах многокритериального выбора, применяющиеся на сегодняшний день. Каждый из указанных методов является универсальным и не раз доказал свою эффективность при решении определенных задач, о чем свидетельствуют выводы во многих научных работах, посвященных методам многокритериальной оптимизации [112, 115, 124, 144, 147, 148].

Для определения подходящего метода для СППР в задачах принятия решений при проведении эргономической оценки необходимо учесть специфику решаемой задачи в части количества критериев оценки, допущении доли субъективности в принятии решения, плановой трудоемкости исследований, наличия квалифицированных исследователей, качество ЭО, допустимых временных затрат и т.д. Бортовые СОИ в составе КБО является особенно функционально нагруженной СТС, качество разработки и валидации которой напрямую влияет на безопасность полета ВС. В связи с этим, цена неоптимального или ошибочного выбора статической ГИ для нее при принятии решения может привести к повышению когнитивной,

визуальной и моторной нагрузки на пилотов до критических значений во время выполнения полета, что в свою очередь увеличивает вероятность ошибочных действий экипажа. В связи с тем, что человеческий фактор является основной причиной авиапроисшествий, то уменьшение количества ошибочных действий экипажа может существенно увеличить безопасность полета [1 – 3].

Для детального анализа эффективности всех альтернативных вариантов исполнения статической ГИ бортовых систем, количество которых может не ограничиваться на производстве и превышать 8-10 систем, необходимо проводить комплексную (многокритериальную) оценку эффективности, на основании полученных данных проводить ранжирование альтернатив и принимать решение об оптимальном варианте для использования на СОИ в составе КБО. Все эти условия накладывают требования на использование большинства существующих методов поддержки принятия решений в задачах многокритериального выбора.

1) Метод MAUT. Метод основывается на использовании аксиом различной природы. ЛПР естественным образом формирует список предположений и допущений по взаимосвязям между критериями при формировании функции ценности. Основная сложность заключается в том, что ЛПР должен изначально задать точные количественные значения всех основных параметров, что является достаточно сложной задачей. Данное действие вносит долю субъективизма в рассматриваемый подход. Кроме того, подход MAUT является очень ресурсозатратным по времени и не позволяет провести исследования проблемы привычным для человека методом «проб и ошибок», что усложняет процесс принятия решения.

2) МАИ является систематическим подходом иерархического представления элементов, определяющих суть исследуемой задачи. Он включает в себя декомпозицию проблемы на более простые компоненты и обработку последовательности суждений ЛПР путем парных сравнений.

Особенности МАИ заключаются в том, что при использовании в задачах больших размеров, таких как многокритериальная оценка эффективности статической

ГИ бортовых систем, возникают сложности, связанные с преодолением субъективности шкальных числовых характеристик. Кроме того, становится практически невозможным оценить степень достоверности полученных результатов и интерпретировать ЭО, которые заполняют многочисленные анкеты, в приемлемые сроки. Процедура анкетирования часто затягивается на несколько месяцев, что недопустимо при разработке систем бортового оборудования для ВС.

Результатом применения МАИ является приоритизация альтернативных вариантов без возможности интерпретации рейтингов с помощью самого метода. Более того, добавление в сравнительную оценку ранее не применяемый не доминирующий вариант может привести к изменению предпочтений относительно двух ранее заданными вариантами.

3) Семейство методов ELECTRE. Данные методы похожи на подход MAUT, однако, согласно определению, они являются практически полной его противоположностью, поскольку не используют теорию полезности при сравнении альтернатив. Несмотря на такие его достоинства, поэтапное выявление предпочтений ЛПР, в процессе назначения уровней согласия и несогласия, а также использование отношения несравнимости, которое позволяет выделить пары альтернатив с противоречивыми оценками, методы ELECTRE обладает и существенными недостатками. Поскольку ELECTRE основаны на принципе сужения множества альтернатив путем изменения индексов согласия и несогласия, то в процессе расстановки индексов, ЛПР может отбрасывать некоторые особенности альтернатив в интересах получения единственного оптимального по ему мнению решения. Процедура назначения ЛПР весов является субъективной, времязатратной и трудоемкой. Помимо этого, процесс упорядочивания альтернатив является итеративным и основан на повторения процедуры исключением лучших вариантов, что ограничивает возможность эксперта указывать, насколько одна альтернатива превосходит другую.

4) Метод уступок (компромиссов). В методе присутствует большая доля субъективизма, которая проявляется в установке субъективных мнений ЛПР, формирование которых, как описано ранее, является правом ЛПР. Помимо наличия человеческого фактора при использовании данного метода стоит учесть, что по итогу решения задачи будет отсутствовать упорядоченность по своей предпочтительности для ЛПР альтернативных вариантов исполнения, что в некоторых случаях может быть полезным для экспертной группы. Кроме того, сложности при использовании данного метода могут возникнуть в ситуациях, когда критерии оценки альтернатив сильно коррелируют между собой, что может встречаться при оценке статической ГИ.

5) Метод линейной свертки критериев. Линейная свертка является одним из часто используемых методов для решения многокритериальных задач, определяющим полезность для ЛПР. Ее простота и легкость интерпретации результатов оценки делают ее популярной. Процедура этого метода довольно проста и сводится к преобразованию критериев в скалярные значения путем присвоения им коэффициентов важности. Стоит выделить, что данный подход наиболее подходит для задач, в которых частные показатели эффективности близкие по масштабу значения величины. Если есть большое количество разнообразных частных критериев, то часто трудно определить окончательный набор весовых показателей на основе субъективных мнений экспертов. Установка данных весовых коэффициентов происходит с привлечением экспертной группы или используя методы распределения важности весов, что является субъективной процедурой. Помимо этого, возникает проблема численной оценки экспертных предпочтений, так как если критериев оценки большое количество, то ЛПР достаточно сложно однозначно расставить числовые значения весов в виде строгого отношения каждого критерия к друг другу из всего перечня имеющихся.

б) Метод максиминной свертки критериев. Максиминный показатель обеспечивает наилучшее (наименьшее) отклонение наихудшего (наибольшего) из локальных критериев оптимальности от его оптимального значения. Однако,

решение, полученное в результате минимизации критериев, не всегда является не улучшаемым ни по одному из локальных критериев, то есть не всегда принадлежит множеству Парето. Кроме того, как и в методе линейной свертки критериев, данный подход является субъективным из-за установки весовых коэффициентов экспертной группой. Эти коэффициенты должны быть точно определены для установления приоритетов критериев оценки, что не всегда является простой задачей.

7) Группа методов, основанных на уменьшении количества критериев путем использования одного из них в качестве основного. Эти методы напрямую зависят от субъективного выбора и определения ЛПР основного критерия и весовых коэффициентов, причем с высокой точностью, что может потребовать значительного количества времени как на подготовку экспертной группы с определенными компетенциями, так и на процесс согласования и установки весовых критериев.

Как известно, в основе процесса принятия любого решения лежит человек или небольшая группа людей. Это связано с тем, что самая простая двухкритериальная задача принятия решения, математически не имеет замкнутого решения. Поэтому ЛПР должно дополнить постановку проблемы таким образом, чтобы она стала содержательно замкнутой, что в конечном итоге позволит прийти к единственному оптимальному с точки зрения ЛПР решению. Обладая необходимыми полномочиями и пониманием исследуемой задачи, ЛПР формализует свое понимание в виде строго логической, как правило математической, процедуры, которая приводит к однозначному окончательному решению. Таким образом, любой существующий метод поддержки принятия решений направлен на выявление способа учета неопределенности, присущего ЛПР в исследуемой задаче.

Исходя из этого, при выборе метода необходимо учитывать, чтобы он был понятен ЛПР, не ограничивал его возможности по принятию решения из-за специфических особенностей самого метода, не требовал от него квалификации, и не выходил за рамки его обычной компетенции. В статье [116] утверждается, что методов, соответствующих всем этим требованиям, не существует. Можно провести

аналогию с методом «Линейная свертка», который популярен в решении многокритериальных задач. Он прост для понимания ЛПР, но может пропускать Парето-оптимальные решения и предполагает, что ЛПР может точно указать количественные значения весовых коэффициентов свертки, что практически нереализуемо [144].

Таким образом, несмотря на то, что вышеупомянутые подходы обладают рядом достоинств, практически все они имеют особенности, которые могут повлиять на окончательный выбор и привести к выбору неоптимальной альтернативы, тем самым отрицательно повлиять на безопасность полета. Большинство рассмотренных подходов имеют следующие основные недостатки, согласно источникам [116, 138, 146]:

1) Большинство подходов зависят от участия экспертной группы, что, в свою очередь, накладывает долю субъективизма на правила формирования комплексного критерия, назначение весовых коэффициентов частных оценочных критериев, назначение индексов согласия и несогласия, построение функции полезности, попарное сопоставление частных критериев, результат численной интерпретации оценок и, следовательно, на итоговый результат выбора. Кроме того, зачастую не удается в ограниченные сроки собрать необходимое количество компетентных экспертов, которые могут взять на себя ответственность на определение показателей коэффициентов характеристик свертки, что влияет на увеличение времени на принятие решения, возможному срыву сроков создания и поставки на ВС СТС, таких как СОИ в составе КБО, потере финансовых средств и т.д.

2) Они потенциально могут игнорировать некоторые полезные с точки зрения оптимальности по Парето варианты решений, что может существенно повлиять на оптимальный выбор.

3) Сложность интерпретации полученных экспертных предпочтений в связи с тем, что ЛПР легче проводить сравнения, опираясь не на количественные значения, а на оценки «лучше/хуже», «обычный/важный/наиболее важный» и т.д. В силу этого

качество подхода, степень доверия или недоверия к имеющимся оценкам сравнения альтернатив, полученным с помощью него, рассматривается в значительной степени и с позиций его независимости от субъективного фактора или способности сведения степень влияния этого фактора к минимуму.

В последнее время учеными проводятся исследования по выявлению оптимального метода многокритериального выбора. Такие ученые как Пиявский С. А., Малышев В. В., Голубев С. И., Сыпало К. И., Разумов Д. А в своих научных трудах выделяли желательные условия, которыми должны обладать современные методы многокритериального выбора [11, 141, 143 – 146]:

- минимизировать влияние субъективизма на результаты сравнительной оценки, которое может проявляется в процессах назначения весовых коэффициентов/индексов согласия, попарного сравнения, согласования экспертных мнений, построения функции полезности и т.д.;

- быть понятным ЛПР, не сужать его возможностей за счет особенностей метода и не предполагать наличия у ЛПР квалификации, выходящей за рамки его обычных компетенций;

- не требовать обязательного формирования экспертной группы, которая согласиться брать на себя ответственность за установление весовых коэффициентов;

- быть экономным с точки зрения затрат временных, позволяя проводить сравнительную оценку без траты времени на все этапы получения ЭО.

- при необходимости позволять учитывать неформализованные мнения и суждения ЛПР, которые возникают в процессе анализа статической графической информации;

- позволять не только выявлять оптимальную альтернативу, но и упорядочивать все множество альтернативных вариантов;

- имел максимальное доверие ЛПР к полученным по результатам его выполнения данным.

Одним из методов, удовлетворяющий вышесказанным условиям является метод уверенных суждений [116, 143, 144]. МУС является гибким методом, позволяющий выйти ЛПР за рамки выстраивания полного последовательного ряда предпочтений на всем множестве критериев, и в случае необходимости устанавливать суждения точно для нескольких критериев, опираясь на оценки качественные оценки «лучше/хуже». Неопределенность в оценках суждений и их возможные вариации должны быть учтены в модели оценки альтернативного варианта исполнения ГИ на СОИ, поскольку реальные мнения экспертов зачастую сложно интерпретировать однозначно, и они могут быть распределены в широком спектре оценок. Использование МУС дает возможность ЛПР опираться на все множество допустимых способов учета неопределенности, определенных с применением современных вычислительных комплексов, не требуя от него конкретного выбора способа.

Основная идея МУС заключается в рассмотрении не одной конкретной линейной свертки с определенной экспертами степенью важности каждого критерия, а совокупности всех возможных сверток при всех возможных комбинациях весовых коэффициентов в диапазоне  $[0, 1]$ , которые позволяют смоделировать все множество экспертных мнений или способов учета этих мнений.

В современных научных трудах [11, 144, 149] не раз была доказана эффективность данного метода при решении задач многокритериального выбора в задачах оценки СТС, например, в процессе создания обликового проектирования авиационно-ракетной техники. МУС обладает преимуществом перед другими рассматриваемыми методами, так как не предполагает использование необязательных дополнительных допущений, по большей части субъективных, а также позволяет исследовать все множество возможных способов учета неопределенности. В задачах, где цена неоптимального выбора при принятии решения может привести к катастрофе, таких как эффективность представлении статической ГИ бортовых систем, необходимо использовать метод, который лишен недостатков, описанных по результату сравнительного обзора в настоящей Главе. В связи с этим, в качестве

основного метода многокритериального выбора в задачах сравнительной оценки определения наилучшей альтернативы статической ГИ бортовых систем по результатам эргономической оценки был выбран МУС.

#### **2.4.4 Методика сравнительной оценки и приоритизации альтернативных вариантов статической графической информации с применением метода уверенных суждений для задач поддержки принятия решения**

*Постановка задачи.* Существует дискретное множество альтернативных вариантов исполнения статической ГИ бортовых систем  $A = \{a_i\}, i = \overline{1, m}$ , с учетом  $a_i \in A$ . Тогда, вектор-функция получаемых частных скалярных критериев оптимальности будет выглядеть следующим образом:

$$f(a) = \{f_j(a_i)\}, j = \overline{1, n} \quad (2.114)$$

*Требуется* среди всего допустимого множества определить оптимальный альтернативный вариант исполнения статической ГИ бортовых систем  $\hat{a} \in A$ , который по выбранным в методике критериям оценки и сравнения будет наиболее предпочтительней остальных альтернатив.

Как уже было указано в МУС для учета неопределенности используется линейная свертка критериев, так как она является наиболее простым и часто используемым методом учета неопределенности. Широкоизвестная проблема определения весовых коэффициентов для оценочных критериев с привлечением экспертной группы в данном методе решается путем оценки не конкретной линейной свертки критериев, а совокупности всех возможных сверток при всех возможных весовых коэффициентах, составляющая множество допустимых способов учета неопределенности [141]. Таким образом, в МУС для принятия решения используется учет непосредственно всего множества линейных сверток критериев (учета неопределенности), которые позволяют учесть все допустимое множество показателей вектор-функции при всех возможных весовых коэффициентах критериев и тем самым, смоделировать весь перечень мнений ЛПР.

Как уже было ранее указано, применение линейной свертки оценочных критериев связано с тем, что она позволяет идентифицировать все Парето-оптимальные решения в классе непрерывных оценочных функций [145].

Алгоритм МУС можно представить следующим образом [141, 144, 146]:

На начальном этапе определения наилучшей альтернативы  $u^0 \in U$  (где  $U$  – все множество существующих альтернатив осуществляется нормализация всех оценочных частных критериев  $w_k(u)$ ,  $k = \overline{1, K}$  векторного критерия эффективности  $W$  путем поиска наибольшего (max) и наименьшего (min) значения для каждого критерия, и далее расчета для каждого варианта решения нового показателя  $w_k(u)_{stand}$ :

- для критериев, которые максимизируются, нормализованные критерии определяются по формуле:

$$w_k(u)_{stand} = \frac{(w_k(u) - w_k(u)_{min})}{(w_k(u)_{max} - w_k(u)_{min})}; \quad (2.115)$$

- для критериев, которые минимизируются, нормализованные критерии определяются по формуле:

$$w_k(u)_{stand} = 1 - \frac{(w_k(u) - w_k(u)_{min})}{(w_k(u)_{max} - w_k(u)_{min})} \quad (2.116)$$

Далее задается дискретность шага перебора для весовых коэффициентов линейной свертки  $a^k$  путем учета всего множества способов учета неопределенности по заданному интервалу перебора в диапазоне  $[0, 1]$ . Принцип расчета заключается в переборе возможных уникальных комбинаций реализаций весовых коэффициентов  $a^k$  для критерия  $w_k(u)$  с учетом  $\sum_i^n a^k = 1$ . Распределение значений  $a^k$  осуществляется путем формирования комбинаций перебора по всему возможному множеству реализаций  $a^k$  при условии «1- $a^k$ » для дробления оставшегося диапазона.

Шаг перебора значений весовых коэффициентов линейных сверток может быть произвольный и чем его значение будет меньше, тем более точный получится результат, согласно принципам теории вероятности.

Следующим шагом является вычисление всего множества оценочных функций альтернативных вариантов исполнения с учетом заданных ранее условий. Пример оценочной функции на формуле 2.109.

На следующем этапе ЛПР вводит уверенные суждения 1 и/или 2 типа, тем самым сужая множество неопределенностей в решаемой задаче. Стоит выделить, что введение уверенных суждений является лишь правом ЛПР, а не обязательным условием в МУС. Введение суждение 1 типа позволяет распределить частные критерии по группам важности, например, критерий «a1» менее важный, а критерии «a2» и «a4» имеет максимальную важность. Введение суждение 2 типа позволяет приоритизировать один из векторов частных критериев над другим (например, альтернативный вариант 1 лучше, чем альтернативный вариант 4).

Далее вычисляются рейтинги альтернативных вариантов исполнения статической ГИ, которые зависят от оценочной функции конкретной альтернативы. Стоит заметить, что в каждом сценарии сравнительной оценки побеждает та альтернатива, оценочная функция которой при данной комбинации вектора весовых коэффициентов линейной свертки оказалась максимальной.

Основным рейтингом является доля (частота), с которой текущая альтернатива оказалась наилучшей при использовании всех допустимых в исследуемой задаче способов учета неопределенности комплексной эргономической оценки (жесткий рейтинг), определяемый по формуле 2.112 и среднюю сравнительную эффективности текущего альтернативного варианта исполнения ГИ по сравнению с остальными альтернативными вариантам, которые оказались рациональнее других при различных способах учета неопределенности (мягкий рейтинг), определяемый по формуле 2.113.

На финальном этапе методики ЛПР необходимо признать, что дальнейшее уменьшение неопределенности за счет введение его суждений исчерпаны и

наилучшая альтернативна статической ГИ. Данная альтернатива будет иметь наибольшее значение показателя «Жесткий рейтинг» по сравнению с иными вариантами. Если ЛППР не удалось определить лучший вариант по жесткому рейтингу (например, наилучших вариантов более одного), то в качестве наиболее рационального решения выбирается альтернатива с наибольшим значением показателя «Мягкий рейтинг».

Таким образом, определение рейтингов альтернативных вариантов позволяет по-новому производить выявление оптимального решения статической ГИ бортовых систем и приоритизацию ее альтернативных вариантов на основании выявления вероятности выигрыша альтернативы ГИ при всех возможных способах учета неопределенности или средней сравнительной предпочтительности текущего варианта по сравнению с остальными. Анализ предметной области позволяет утверждать, что на текущий момент МУС не применялся в составе СППР для поддержки принятия решения в определении наилучшего варианта исполнения статической ГИ бортовых систем по результатам эргономической оценки.

#### **2.4.5 Формирование результатов работы модуля поддержки принятия решения для задач эргономической оценки статической графической информации**

В подзадачи МППР входит формирование и выдача информации о результатах проведенных расчетов и сравнений в рамках задачи выявления наилучшей альтернативы статической ГИ бортовых систем по результатам эргономической оценки в отчетной форме на устройство вывода информации.

Для корректного выполнения указанной задачи, необходимо иметь следующие расчетные данные:

- 1) Результаты сравнения альтернативных вариантов исполнения ГИ.
- 2) Результаты оценочных критериев.

По итогу отработки МППР формируются результаты работы СППР содержащие следующие данные:

- 1) Лучший альтернативный вариант исполнения статической ГИ.
- 2) Результаты ранжирования всего множества альтернатив.
- 3) Рассчитанные показатели оценочных критериев и рейтингов.
- 4) Общая диаграмма результатов.

## **2.5 Выводы по Главе 2**

В главе 2 разработана архитектура СППР для решения задач повышения уровня безопасности полета за счет выявления наилучшей альтернативы статической ГИ по результатам эргономической оценки.

Для создания расчетного модуля и МППР рассмотрены существующие оценочные критерии и способы их расчета, проанализированы часто применяемые методы поддержки принятия решения в задачах многокритериального выбора, выделены преимущества и недостатки для каждого подхода.

В ходе исследования:

- 1) Разработана архитектура СППР, состоящая из модулей обработки ИД, модуля расчета эргономических характеристик и МППР, в т. ч. описаны ее функции.
- 2) Проведен сравнительный анализ оценочных эргономических критериев и способов их расчета. Выявлено, что основное количество существующих показателей не подходят для оценки статической ГИ бортовых систем по причинам: присутствует неформализованные подходы, применение которых может дать неточные, субъективные оценки, которые необязательно будут описывать причину выявленных несоответствий; направленные на исследования свойств функционального ПО с наличием графического функционала, не предоставляющие эргономические оценки эффективного представления ГИ; направлены на анализ свойств, которые ограничены авиационными стандартами [38, 55, 61, 62, 70, 106].
- 3) На основании анализов определены актуальные показатели, позволяющие провести комплексную эргономическую оценку статической ГИ бортовых систем по направлениям:

- a) оценка визуальных характеристики статической ГИ;
  - b) оценка пространственно-временных характеристики статической ГИ;
  - c) учет психологических принципов при проектировании статической ГИ.
- 4) Разработаны методическое и функциональные обеспечение проведения комплексной эргономической оценки по определенным направлениям визуальных характеристик, пространственно-временных характеристик, учета психологических принципов при проектировании ГИ, результатами применения которых являются числовые показатели эффективности исследуемых альтернативных вариантов исполнения ГИ.
- 5) Проведен сравнительный обзор часто применяемых методов поддержки принятия решения в задачах многокритериального выбора. По результатам предложен метод уверенных суждений в качестве основного для МППР по следующим выводам:
- a) Использование МУС позволит минимизировать влияние субъективизма на результаты сравнительной оценки, которое может проявляется в процессах назначения весовых коэффициентов и индексов согласия, попарного сравнения, согласования экспертных мнений, построения функции полезности и т.д., по причине отсутствия обязательного участия ЛПР в установке суждений.
  - b) Метод позволяет учитывать неформализованные мнения и суждения ЛПР, которые могут возникнуть в процессе анализа и сравнительной оценки ГИ.
  - c) МУС не требует обязательного формирования экспертной группы, которая согласиться брать на себя ответственность за установление весовых коэффициентов.
  - d) Позволяет не только выявлять оптимальную альтернативу, но и упорядочивать все множество альтернатив.
  - e) Понятен ЛПР и не предполагает наличия у него квалификации, выходящей за рамки его обычных компетенций.

б) Продемонстрировано методическое обеспечение поддержки принятия решения ЛПР для задач многокритериального сравнения и приоритизации альтернативных вариантов исполнения статической ГИ бортовых систем по результатам эргономической оценки с применением МУС. В основе методики лежит выявление вероятности выигрыша альтернативы ГИ при всех возможных способах учета неопределенности или средней сравнительной предпочтительности текущего варианта по сравнению с остальными.

### **ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭРГОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

В рамках настоящего исследования для верификации разработанного методического и функционального обеспечения было создано программно-алгоритмическое обеспечение с учетом модульного принципа разработки в соответствии с определенной архитектурой СППР. Данное ПО включает в себя все архитектурные модули СППР:

- Модуль обработки ИД.
- Модуль расчета эргономических характеристик.
- МППР.

#### **3.1 Концепция создания современных бортовых систем отображения информации**

Современные бортовые СОИ гражданских ВС проектируются в соответствии с концепцией интегрированной модульной авионики, основной подход которой заключается в выделении трех логических разделов:

- функциональное ПО [150];
- функция отображения данных в соответствии со стандартом ARINC 661 [151];
- функция реконфигурации форматов индикации.

Рассмотрение, анализ и оценка функционального ПО и функции реконфигурации форматов индикации в настоящей работе не проводится, поскольку данные направления выходят за рамки поставленных задач в исследовании.

ARINC 661 [151] – стандарт, целью которого является нормализация определения системы индикации кабины пилота и связи между системой отображения кабины пилота и ПП, которые управляют функциями авионики самолета. ПП, как

указано в стандарте, представляет собой самолетную функцию, отвечающую за логику графического приложения ARINC 661. Определение графического интерфейса полностью определено в двоичных ФО (англ. – Definition Files (DF)) [65]. Функция отображения данных реализована в соответствии с указанным стандартом, который регламентирует правила и критерии взаимодействия между СОИ и ПП (англ. – User Application (UA)), определяет визуальную составляющую форматов индикации на СОИ в составе КБО. Помимо этого, ARINC 661 определяет набор простейших визуальных элементов (виджетов), которые необходимы для взаимодействия пилота с СОИ, предписывая использование стандартизованных ВИУЭ. Данный стандарт призван упорядочить разработку систем экранной индикации кабины экипажа и упростить взаимодействие с ПП, которые управляют функциями самолетных систем и авионики.

Применение данного стандарта позволяет сократить временные и финансовые расходы на создании ГИ за счет [151, 152]:

- 1) регламентированного и стандартизированного протокола взаимодействия ПП и систем индикации, который дает возможность привлекать к проектированию, разработке, валидации и верификации СОИ подрядчиков без дополнительных ресурсных затрат на создание новых интерфейсных протоколов;
- 2) применения архитектуры, позволяющей производить изменения логики отображения ГИ без влияния функции управления отображением информации на функцию формирования изображения на индикаторах и наоборот, тем самым сокращения временных и финансовых затрат на прохождение процессов валидации, верификации и сертификации компонентов систем;
- 3) определения в стандарте унифицированных ВИУЭ, позволяющих не затрачивать ресурсы на разработку новых элементов.

Стандарт ARINC 661 часто используют при разработки графических страниц СОИ, с помощью которых пилоты осуществляют взаимодействие с авиационными системами (система самолетовождения, система управления радиосредствами,

система управление двигателями, топливная система и др.). Одним из перспективных направлений развития систем индикации гражданской авиационной техники является его применение ко всем отображаемым форматам.

ФО в двоичный формате или XML (для простоты управления структурой ФО стандарт ARINC 661 определил связанное с ФО определение XML) определяет определение СОИ для пользовательского интерфейса одного ПП. Структура ФО состоит из уникальных ВИУЭ, их идентификаторов, типов (например, «A661\_LABEL», «A661\_ACTIVE\_AREA»), свойств (атрибутов) с заявленными при проектировании значениями (например, «WidgetIdent», «PosX», «PosY», «RotationAngle»). Приведенные в Главе 2 оценочные критерии эффективности статической ГИ предлагаются к использованию для оценки данных, представленные в ФО ПП.

ФО выглядит следующим образом (для удобства приведенный пример представлен на языке разметки «XML»):

```
«</model>
```

```
<a661_layer>
```

```
  <model>
```

```
    <prop name="LayerId" value="6"/>
```

```
    <prop name="ContextNumber" value="52"/>
```

```
    <prop name="Height" value="5000"/>
```

```
    <prop name="Width" value="7500"/>
```

```
  </model>
```

```
<a661_widget name="FLY_BY" type="A661_BASIC_CONTAINER">
```

```
  <model>
```

```
    <prop name="WidgetIdent" value="542" />
```

```
    <prop name="Enable" value="A661_TRUE" />
```

```
    <prop name="Visible" value="A661_TRUE" />
```

```
    <prop name="PosX" value="0" />
```

```
<prop name="PosY" value="1856" />
```

```
</model>>
```

Библиотека ВИУЭ обширна и содержит элементы, используемые в вычислительной технике. Так, например, при проектировании можно использовать надписи (метки), кнопки, списки, контейнеры, области прокрутки, меню, поля редактирования и т.д. В таблице 3.1 представлен перечень часто используемых ВИУЭ («виджетов») из библиотек в соответствии с ARINC 661 [151]. Таблица 3.2 содержит список часто используемых свойств («атрибутов») разрабатываемых графических элементов пользовательского интерфейса.

Таблица 3.1 Список часто используемых виджетов ARINC 661.

Тип виджета	Идентификатор виджета ARINC661	Описание
Контейнеры		
Панель	A661_PANEL	Обрезанный прямоугольный контейнер
Базовый контейнер	A661_BASIC_CONTAINER	Прозрачный контейнер, позволяющий изменять положение группы виджетов
Взаимоисключающий контейнер	A661_MUTUALLY_EXCLUSIVE_CONTAINER	Прозрачный контейнер, который позволяет изменять его текущий видимый дочерний элемент среди своего списка дочерних элементов
Контейнер для изменение положения	A661_TRANSLATION_CONTAINER	Прозрачный контейнер, позволяющий изменять положение группы виджетов,

		аналогично базовому виджету Container.
Контейнер для вращения	A661_ROTATION_CONTAINER	Прозрачный контейнер, позволяющий вращать группу виджетов.
Графические виджеты		
Дугообразный круг	A661_GP_ARC_CIRCLE	Дугообразный круг (может быть полным кругом)
Дугообразный эллипс	A661_GP_ARC_ELLIPSE	Дугообразный эллипс (может быть полным эллипсом)
Область с круговой заливкой	A661_GP_CROWN	Область с круговой заливкой (ограниченная двумя дугообразными окружностями)
Прямоугольник	A661_GP_RECTANGLE	Прямоугольник
Строка,	A661_GP_LINE	Строка, координаты которой выражены в координатах x, y
Линия	A661_GP_LINE_POLAR	Линия, координаты которой выражены в полярных координатах
Ломаная линия	A661_GP_POLYLINE	Ломаная линия
Треугольник	A661_GP_TRIANGLE	Треугольник
Метка	A661_LABEL	Метка
Интерактивные виджеты		
Кнопка	A661_PUSH_BUTTON	Кнопка
Кнопка	A661_PICTURE_PUSH_BUTTON	Кнопка, которая может использовать значок

Кнопка переключения	A661_TOGGLE_BUTTON	Кнопка переключения
Кнопка переключения	A661_PICTURE_TOGGLE_BUTTON	Кнопка переключения, которая может использовать значок для двух своих состояний
Кнопка с более чем одним состоянием	A661_MULTI_STATE_BUTTON	Кнопка с более чем одним состоянием (представьте ее как переключатель, который может иметь более двух состояний)
Кнопка проверки	A661_CHECK_BUTTON	Кнопка проверки
Поле со списком	A661_COMBO_BOX	Поле со списком
Список прокрутки	A661_SCROLL_LIST	Прокручиваемый список из нескольких элементов
Окно ввода	A661_EDIT_BOX_TEXT	Окно редактирования, позволяющее изменять текст
Окно ввода	A661_EDIT_BOX_NUMERIC	Окно редактирования, позволяющее изменять числовое значение
Поле редактирования (скрытое)	A661_EDIT_BOX_MASKED	Поле редактирования с маской, указывающей, какие символы можно изменять
Активная область	A661_ACTIVE_AREA	Прозрачная прямоугольная область, определяющая интерактивную область
Курсор	A661_CURSOR_OVER	Прозрачная прямоугольная область, которая отправляет положение курсора в

		области. Обратите внимание, что событие отправляется независимо от любого события щелчка по курсору, и оно не проглатывает события курсора для виджетов, которые находятся под этим.
Виджеты карты		
Горизонтальная карта	A661_MAPHORZ	Верхний виджет горизонтальной карты.
Горизонтальная карта	A661_MAPHORZ_SOURCE	Виджет горизонтальной карты, который задает систему координат.
Горизонтальная карта	A661_MAPHORZ_ITEMLIST	Виджет горизонтальной карты, содержащий элементы карты.

Таблица 3.2 Список часто используемых свойств (атрибутов) виджетов ARINC 661.

Свойство (атрибут) виджета	Описание
maxLength	Указывает на атрибут, определяющий максимальную длину строки
maxSize	Указывает на атрибут, определяющий максимальный размер массива
pad	Определяет, должен ли этот атрибут быть дополнен до 32-битной границы (по умолчанию true). Часть атрибутов (например, "A661_STRING" в A661_TOGGLE_BUTTON) не дополнены. В этом случае заполнение будет выполнено для

	следующего первого атрибута, который определен как дополняемый.
ColorIndex	Указывает выбранное цветовое решение у данного виджета.
type	Указывает, тип виджета. Так же используется ли виджет во время выполнения, разработки или и то, и другое.
WidgetIdent	Указывает уникальный идентификатор виджета.
PosX, PosY	Указывает координаты X, Y верхнего левого угла виджета/слоя относительно основного слоя.
SizeX, SizeY	Указывает геометрические размеры X, Y виджета .
StyleSet	Указывает используемый визуальный стиль у виджета.
Font	Указывает используемый шрифт.
RotationAngle	Указывает угол поворота виджета.
Alignment	Указывает способ выравнивания текста относительно центра виджета.
NextFocusedWidget	Указывает наличия способа подсветки следующего виджета.
Height	Указывает высоту основного слоя.
Width	Указывает ширину основного слоя.
OpeningMode	Указывает способ раскрытия виджета

### **3.2 Алгоритмическое обеспечение модуля обработки исходных данных для задач эргономической оценки статической графической информации**

Для реализации модуля обработки ИД разработано ПО, состоящее из функции обработки ИД. Данная функция осуществляет сбор, обработку и подготовку данных по загруженным в СППР ФО. При обнаружении ошибок в процессе обработки ФО, модуль ИД оповещает об этом оператора путем индикации сообщения об ошибках с отображением на устройство вывода информации.

Блок-схема функции обработки ИД представлена на рисунке 3.1.

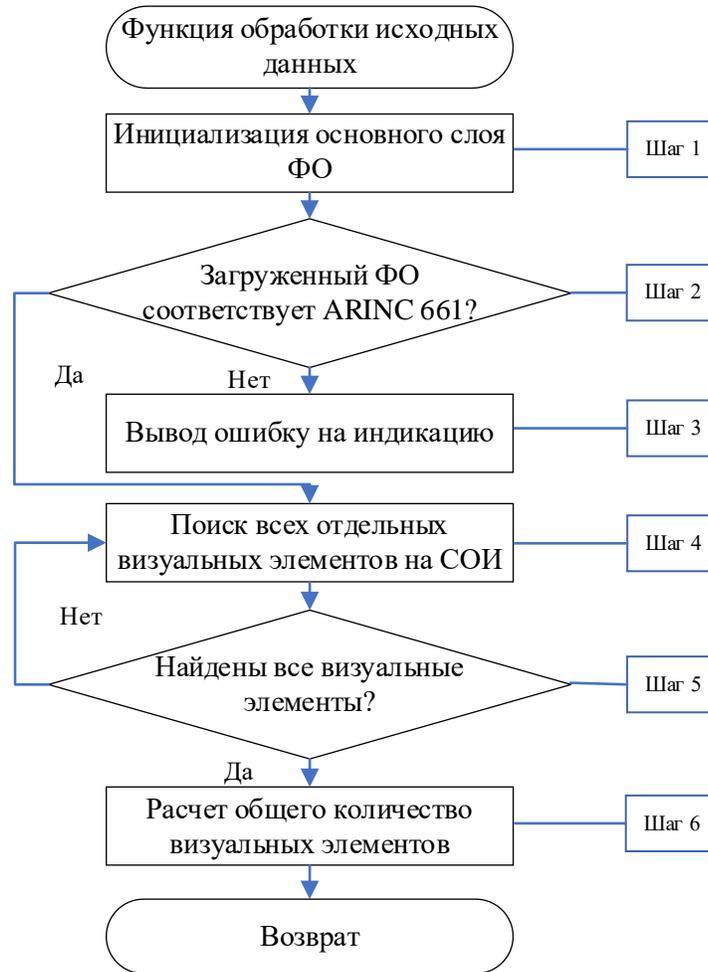


Рисунок 3.1. Блок-схема функции обработки ИД

Итоговый алгоритм функции обработки ИД представлен в следующем виде:

Шаг 1. Инициализация основного слоя каждого альтернативного варианта ФО.

Шаг 2. Проверка соответствия загруженного ФО авиационному стандарту ARINC 661 [151]. Объектами проверки являются структура данных, использованные типы ВИУЭ, свойства (атрибуты) ВИУЭ. Если ФО не соответствует заявленному стандарту, то переход к шагу 3, иначе переход к шагу 4.

Шаг 3. Вывод на индикацию экрана оператора ошибки обработки ИД.

Шаг 4. Поиск всех отдельных визуальных элементов на альтернативе. При проектировании могут использоваться ВИУЭ «контейнеры», которые содержат вложенные элементы, с которыми пилот может взаимодействовать. Процесс поиска заключается в анализе ФО в соответствии с программным интерфейсом объектной

модели документа (представляется деревом узлов, где каждый может является элементом или разнотипным атрибутом. Узлы имеют связь «родительский-дочерний»).

Шаг 5. Проверка на нахождение всего количества ВИУЭ в конкретной альтернативе. Объектами проверки являются объявления ВИУЭ по структуре ФО. Проверка осуществляется путем перебора заявленных в ФО тегах ВИУЭ и подсчет сравнения полученного количества. В случае безошибочного определения всего количества ВИУЭ переход к шагу 6, иначе возврат к шагу 4.

Шаг 6. Расчет общего количества визуальных элементов, содержащихся в конкретной альтернативе для использования в расчетном модуле. Расчет производится по количеству заявленных в структуре ФО визуальных элементов.

### **3.3 Алгоритмическое обеспечение расчетного модуля для задач эргономической оценки статической графической информации**

Для расчетного модуля разработано ПО, разделенное на функции в соответствии с основными шагами методики расчета эргономических характеристик статической ГИ бортовых систем и состоит из:

- Функции расчета визуальных характеристик статической ГИ.
- Функции расчета пространственно-временных характеристик статической ГИ.
- Функции учета психологических принципов при проектировании статической ГИ.

#### **3.3.1 Алгоритмическое обеспечение функции расчета визуальных характеристик статической графической информации**

*Функция расчета визуальных характеристик статической ГИ* позволяет произвести расчет критериев «Геометрическое соответствие» и «Унификация». Итогом выполнения функции будет считаться сформированный перечень числовых

показателей для проведения дальнейшей оценки визуальных характеристик каждого альтернативного варианта.

Блок-схема функции расчета визуальных характеристик статической ГИ представлена на рисунке 3.2.

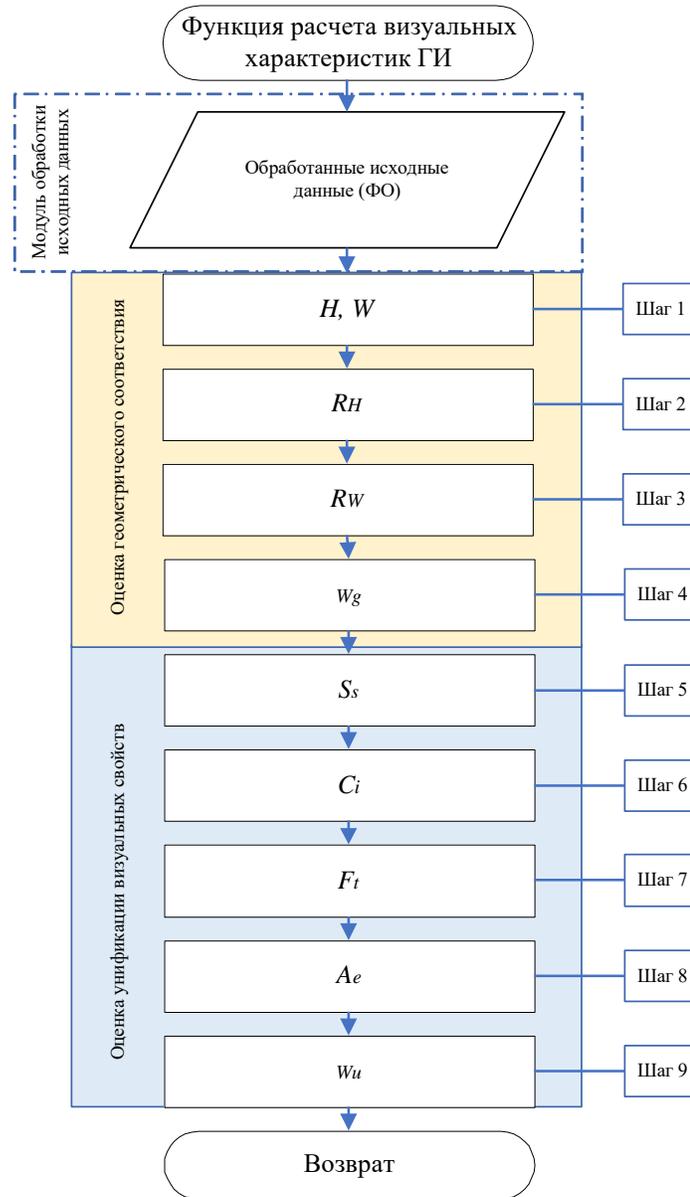


Рисунок 3.2. Блок-схема функции расчета визуальных характеристик статической ГИ

Итоговый алгоритм функции оценки графических характеристик статических элементов ГИ выглядит следующим образом:

Шаг 1. Вычисление значений высоты  $H$  и широты  $W$  визуального элемента по анализу свойств (атрибутов) «SizeX», «SizeY».

Шаг 2. Вычисление  $R_H$  показателя отношения высоты родительского и дочернего ВИУЭ по формуле 2.47.

Шаг 3. Вычисление  $R_W$  показателя отношения широты родительского и дочернего ВИУЭ по формуле 2.48.

Шаг 4. Вычисление коэффициента единого геометрического соответствия ВИУЭ  $W_g$  при условиях:

$$\begin{cases} \text{Если } (R_H = 1.6) \text{ И } (R_W = 1.6), \text{ То } (W_g = 1) \\ \text{Иначе если } (R_H \neq 1.6) \text{ И } (R_W = 1.6), \text{ То } (W_g = 0.5) \\ \text{Иначе если } (R_H = 1.6) \text{ И } (R_W \neq 1.6), \text{ То } (W_g = 0.5) \\ \text{Иначе } (W_g = 0.2) \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $R_H, R_W$  – показатель отношения высот и широт ВИУЭ соответственно,  $H_p, H_d$  – высота родительского и дочернего элемента соответственно,  $W_p, W_d$  – широта родительского и дочернего элемента соответственно.

Шаг 5. Вычисление коэффициента унификации визуальных стилей ВИУЭ  $S_s$  путем анализа используемого визуального стиля у каждого однотипного визуального элемента по значению у атрибута «Styleset» с учетом следующих условий:

$$\begin{cases} \text{Если } (N_{P1} = 1), \text{ То } (S_s = 1) \\ \text{Иначе если } (1 < N_{P1} < 7), \text{ То } (S_s = 0.5), \\ \text{Иначе } (S_s = 0.2) \end{cases} \quad (3.2)$$

где  $N_{P1}$  – количество используемых визуальных стилей. Наличие различных стилей ВИУЭ на одном графическом окне СОИ способствует увеличению визуальной нагрузки на оператора, так как на поиск ВИУЭ с определенными признаками будет затрачиваться большее количество времени. Таким образом, предлагается за оптимальное количество стилей на одном СОИ выбрать «1», а максимальным допустимым «7» по аналогии с рекомендованным количеством цветовых решений [38, 153, 154].

Шаг 6. Вычисление коэффициента унификации цветового решения ВИУЭ  $C_i$  путем анализа используемого цветового решения у каждого визуального элемента по значению у атрибута «ColorIndex» с учетом следующих условий:

$$\begin{cases} \text{Если } (1 < N_{P2} < 7), \text{ То } (C_i = 1) \\ \text{Иначе } (C_i = 0.2), \end{cases} \quad (3.3)$$

где  $N_{P2}$  – количество используемых цветовых решений. В работах [38, 151, 154] показано, что пилот эффективнее воспринимает статической ГИ, если количество цветовых решений на отображаемом графическом окне ограничено «7».

Шаг 7. Вычисление коэффициента унификации шрифтов путем анализа используемых шрифтов  $F_t$  по значению у атрибута «Font» с учетом следующих условий:

$$\begin{cases} \text{Если } (N_{P3} = 1), \text{ То } (F_t = 1) \\ \text{Иначе } (F_t = 0.2) \end{cases} \quad (3.4)$$

где  $N_{P3}$  – количество используемых шрифтов. Широкоизвестные исследования в области инженерной психологии показывают, чем меньше в современных информационных системах используются различных типов шрифтов, тем более эффективно с ними взаимодействуют пользователи. Таким образом, при проектировании статической ГИ рекомендуется сократить число используемых шрифтов до оптимального значения, равному «1».

Шаг 8. Вычисление коэффициента унификации выравнивания текста относительно центра элемента  $A_e$  путем анализа используемых способов выравнивания каждого текста с учетом следующих условий:

$$\begin{cases} \text{Если } (N_{P4} = 1), \text{ То } (A_e = 1) \\ \text{Иначе если } (N_{P4} = 2), \text{ То } (A_e = 0.5) \\ \text{Иначе } (A_e = 0.2) \end{cases} \quad (3.5)$$

где  $N_{P4}$  – количество способов выравнивания текста относительно центра элемента. На практике применяются 3 типа выравнивания текстовой информации – по центру элемента, по левому или правому краю. Одновременное применение трех способов выравнивания на одном графической окне СОИ способствует увеличению времени поиска необходимого текста. В связи с этим, предлагается за оптимальное количество способов выравнивания взять «1», а максимально разрешенное «2».

Шаг 9. Вычисление коэффициента унификации ВИУЭ на СОИ  $W_u$  по формуле 2.49.

### **3.3.2 Алгоритмическое обеспечение функции расчета пространственно-временных характеристик статической графической информации**

*Функция расчета пространственно-временных характеристик статической ГИ* позволяет произвести расчет критериев «Управляемость», «Визуальная простота», «Сложность информационного (зрительного) поиска», «Предсказуемость», «Поисково-информационная нагрузка», «Поисковая активность информации». Итогом выполнения функции будет считаться сформированный перечень числовых показателей для проведения дальнейшей оценки пространственно-временных характеристик каждого альтернативного варианта.

Блок-схема функции расчета пространственно-временных характеристик статической ГИ представлена на рисунке 3.3.

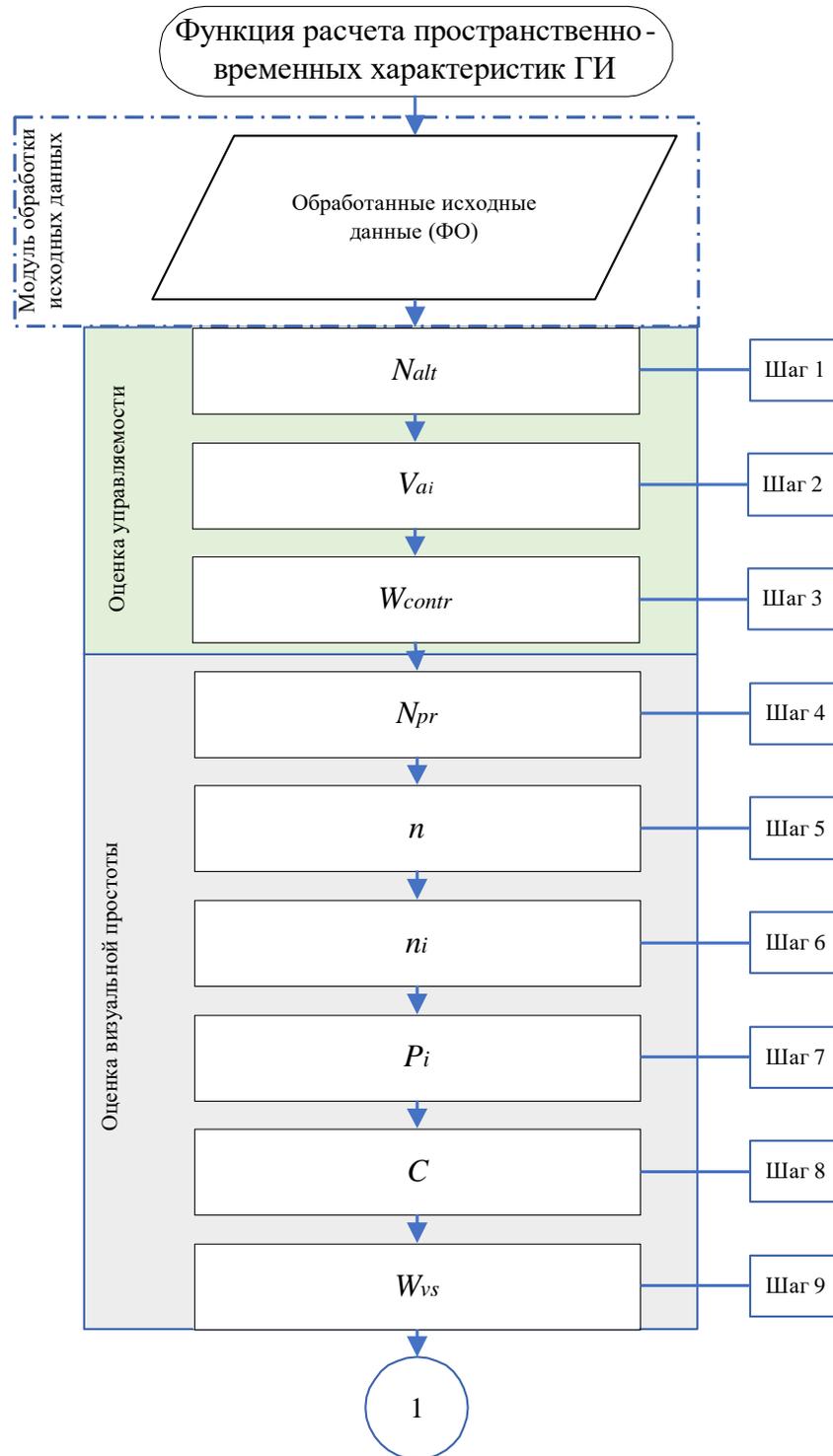


Рисунок 3.3. Блок-схема функции расчета пространственно-временных характеристик статической ГИ

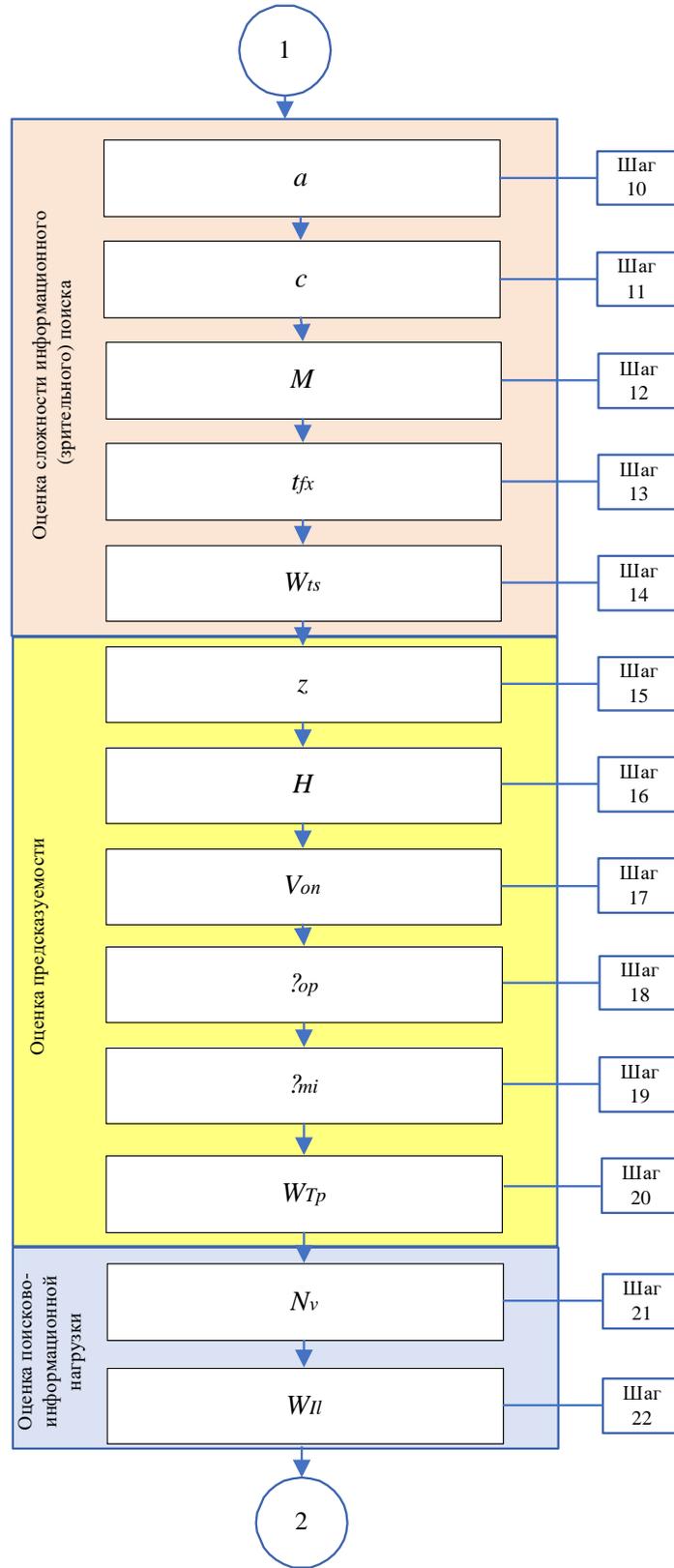


Рисунок 3.3. Блок-схема функции расчета пространственно-временных характеристик статической ГИ (продолжение)

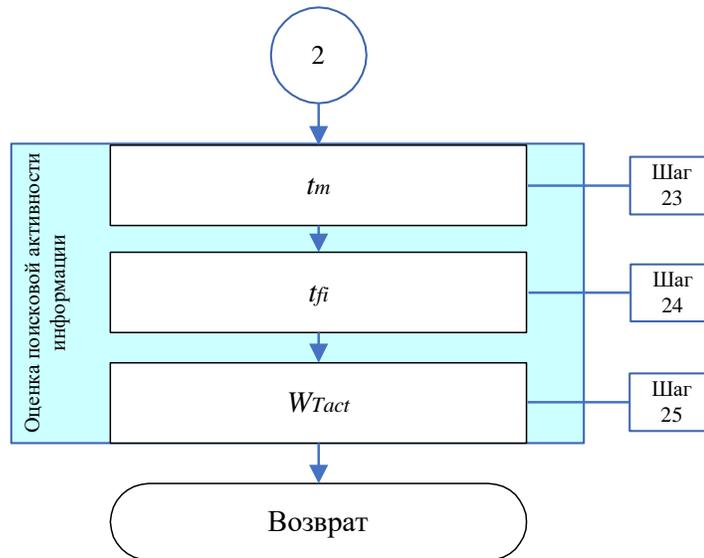


Рисунок 3.3. Блок-схема функции расчета пространственно-временных характеристик статической ГИ (продолжение)

Итоговый алгоритм функции оценки пространственно-временных характеристик статических элементов ГИ на СОИ выглядит следующим образом:

Шаг 1. Определение  $N_{alt}$  – количество способов активации каждого ВИУЭ, заложенных стандартом ARINC661, стандартом на проектирование, и установленных в ФО. Количество способов активации зависит от типа ВИУЭ, например, тип «PUSH\_BUTTON» имеет один способ активации – нажатие на него, в то время как «MultiStateButton» является ВИУЭ с более чем одним состоянием, если спроектировать его как переключатель, который может иметь более двух способов активации.

Шаг 2. Расчет  $v_{a_i}$  – показатель скорости активации ВИУЭ. За эталонное значение была взята скорость активации равной 1 секунде.

Шаг 3. Расчет коэффициента управляемости  $W_{contr}$  по формуле 2.46. Данный показатель прямо влияет на простоту управления исследуемым вариантом исполнения, чем выше показатель, тем текущий альтернативный вариант более управляемый для пилота.

Шаг 4. Определение  $N_{pr}$  – количество свойств (атрибутов) (вертикальные и горизонтальные размеры, удаленность от верхнего или бокового края графического окна СОИ и т.д.).

Шаг 5. Определение  $n$  – количество классов (количество уникальных размеров или расстояний) ВИУЭ.

Шаг 6. Определение  $n_i$  – количество свойств ВИУЭ  $i$ -го класса.

Для определения показателей в шагах 4, 5, 6 производится анализ свойств (атрибутов) заложенных стандартом ARINC661, стандартом на проектирование, и установленных в ФО.

Шаг 7. Расчет  $P_i$  – пропорция  $i$ -го класса как отношение общего количества классов (количество уникальных размеров или расстояний) ВИУЭ к количеству свойств ВИУЭ  $i$ -го класса,

Шаг 8. Расчет показателя сложности Комбер-Мэтбли по формуле 2.26.

Шаг 9. Расчет показателя визуальной простоты ГИ  $W_{vs}$  по формуле 2.25.

Шаг 10. Расчет  $a$  – объем визуальной информации на СОИ с учетом ограничений зрительного анализатора человека в  $4^\circ$ - $10^\circ$  (угловой размер центрального поля зрения [73, 101]). Под объемом зрительного восприятия берется количество ВИУЭ, одновременно попадающих в зону, ограниченную углом  $10^\circ$  в горизонтальной и вертикальной плоскостях (но не более  $6 \pm 2$ ). В случае, когда в поле зрения пилота находится число элементов не более 6, то на практике объем зрительного восприятия приравнивают к  $a$ , иначе он принимается равным 6. Минимальным значением является величина равная 4, поскольку данное экспериментальное количество ВИУЭ легко запоминается каждым человеком-оператором [86].

Шаг 11. Расчет показателя  $c$  (на практике применяют значение 1000 как эталонное).

Шаг 12. Определение показателя  $M$  – количество ВИУЭ, обладающих необходимыми признаками для поиска. В такую группу будут входить

функциональные элементы, которыми оператор может манипулировать (интерактивно взаимодействовать), и которые привлекают его визуальное внимание, например, тип названия полей ввода.

Шаг 13. Расчет показателя  $t_{fx}$  – продолжительность зрительной фиксации. В силу однородности ВИУЭ, показатель  $t_{fx}$  относительно постоянен и может быть принят равным значению из экспериментальных результатов [101]:

- ii. поиск условных знаков – 300 мс,
- iii. поиск объекта СОИ – 370 мс,
- iv. чтение буквенного или числового знака – 310 мс,
- v. поиск элементарных геометрических фигур – 200 мс,
- vi. фиксация загорания индикатора СОИ – 280 мс.

Шаг 14. Расчет показателя сложности информационного (зрительного) поиска  $W_{ts}$  по формуле 2.38.

Шаг 15. Расчет показателя  $z$  – время простой реакции, теоретические значения которой находятся в пределах от 0,2 до 0,6 и зависят от вида реакции.

Шаг 16. Расчет показателя  $H$  – количество информации, перерабатываемой оператором по формуле 2.51, 2.52.

Шаг 17. Расчет показателя  $V_{оп}$  – скорость переработки человеком информации по формуле 2.53.

Шаг 18. Расчет показателя  $\tau_{op}$  – количество времени на обработку информации по формуле 2.50.

Шаг 19. Расчет показателя  $\tau_{mi}$  – время задержки (обработки) информации в  $i$ -ом блоке системы (для большинства технических элементов данное значение известно и приводятся в паспортных данных на устройство).

Шаг 20. Расчет показателя предсказуемости  $W_{Tp}$  по формуле 2.44.

Шаг 21. Определение  $v$  – количество ВИУЭ, обладающих необходимыми признаками для поиска. В такую группу будут входить функциональные элементы,

которыми оператор может манипулировать (интерактивно взаимодействовать), и которые привлекают его визуальное внимание, например, тип названия полей ввода.

Шаг 22. Расчет показателя поисково-информационной нагрузки  $W_{II}$  по формуле 2.41.

Шаг 23. Расчет показателя  $t_m$  – время перемещения  $i$ -го взора (определяется углом скачка взора оператора и при использовании экспериментальных значений для времени  $i$ -го фиксации взора пилота, будет эквивалентна 1).

Шаг 24. Расчет показателя  $t_{fi}$  – время  $i$ -го фиксации взора пилота в соответствии с экспериментальными значениями [101, 107] из Шага 13.

Шаг 25. Расчет показателя поисковой активности информации  $W_{Tact}$  по формуле 2.5.

### **3.3.3 Алгоритмическое обеспечение функции учета психологических принципов при проектировании статической графической информации**

*Функция учета психологических принципов при проектировании статической ГИ* позволяет произвести расчет критериев «Когнитивная нагрузка», «Сигнализируемость». Итогом выполнения функции будет считаться сформированный перечень числовых показателей для проведения дальнейшего определения учета психологических принципов при проектировании статической ГИ каждого альтернативного варианта.

Блок-схема функции учета психологических принципов при проектировании статической ГИ представлена на рисунке 3.4.

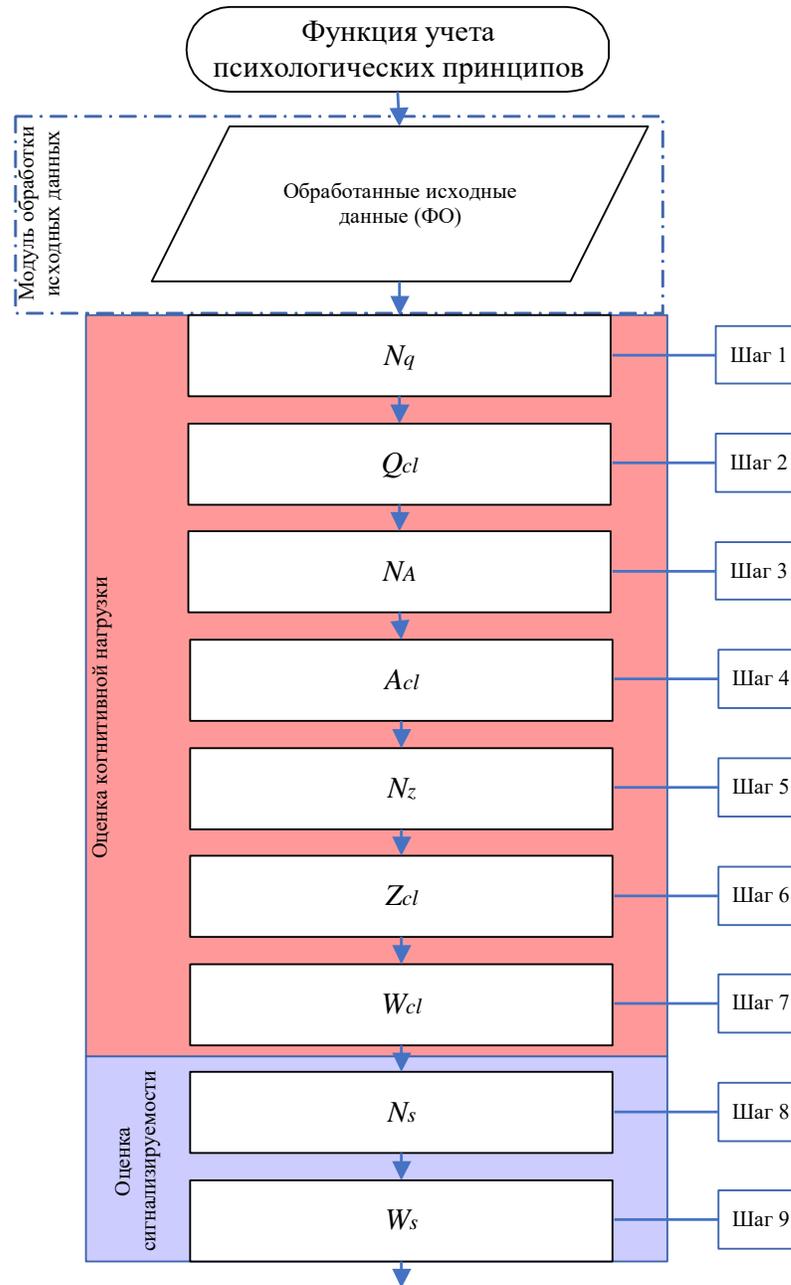


Рисунок 3.4. Блок-схема функции учета психологических принципов при проектировании статической ГИ

Итоговый алгоритм функции учета психологических принципов при проектировании статических элементов ГИ на СОИ выглядит следующим образом:

Шаг 1. Определение  $N_q$  – количество визуальных элементов на альтернативе, спроектированных по принципу «пространственного примыкания». Анализу подвергаются геометрические и пространственные свойства у типов ВИУЭ «PICTURE\_PUSH\_BUTTON» и «LABEL».

Шаг 2. Вычисление  $Q_{cl}$  – коэффициент учета принципа «пространственного примыкания» по формуле 2.19.

Шаг 3. Определение  $N_A$  – количество визуальных элементов на альтернативе, спроектированных по принципу «временного примыкания». Анализу подвергаются временные свойства у типов ВИУЭ «PICTURE\_PUSH\_BUTTON» и «LABEL».

Шаг 4. Расчет показателя  $A_{cl}$  – коэффициент учета принципа «временного примыкания» по формуле 2.20.

Шаг 5. Определение  $N_Z$  – количество визуальных элементов на альтернативе, спроектированных по принципу «предварительной подготовки». Анализу подвергается свойство «LabelString» у типов всех типов ВИУЭ на соответствие используемых текстовых символов, аббревиатур, сокращений и кодов нормативному документу «Правила аэронавигационного обслуживания. Сокращения и коды ИКАО» [155].

Шаг 6. Расчет показателя  $Z_{cl}$  – коэффициент учета принципа «предварительной подготовки» по формуле 2.21.

Шаг 7. Расчет показателя когнитивной нагрузки  $W_{cl}$  по формуле 2.19.

Шаг 8. Определение  $N_S$  – количество визуальных элементов на альтернативе с учтенным принципом сигнализируемости при проектировании. Анализу подвергается свойство «AutomaticFocusMotion» у всех типов ВИУЭ, функционал которых предполагает наличие указанного свойства.

Шаг 9. Расчет показателя сигнализируемости СОИ  $W_S$  по формуле 2.54.

### **3.3.4 Алгоритмическое обеспечение комплексной методики расчета эргономических характеристик статической графической информации**

В Главе 2 настоящего исследования представлена комплексная методика расчета эргономических характеристик статической ГИ бортовых систем, содержащая в себе описание проведение расчета параметров по функциям. На рисунке 3.5 схематично представлена комплексной методики расчета эргономических

характеристик статической ГИ в виде блок-схемы алгоритма той же методики, но с описанием расчетных критериев.

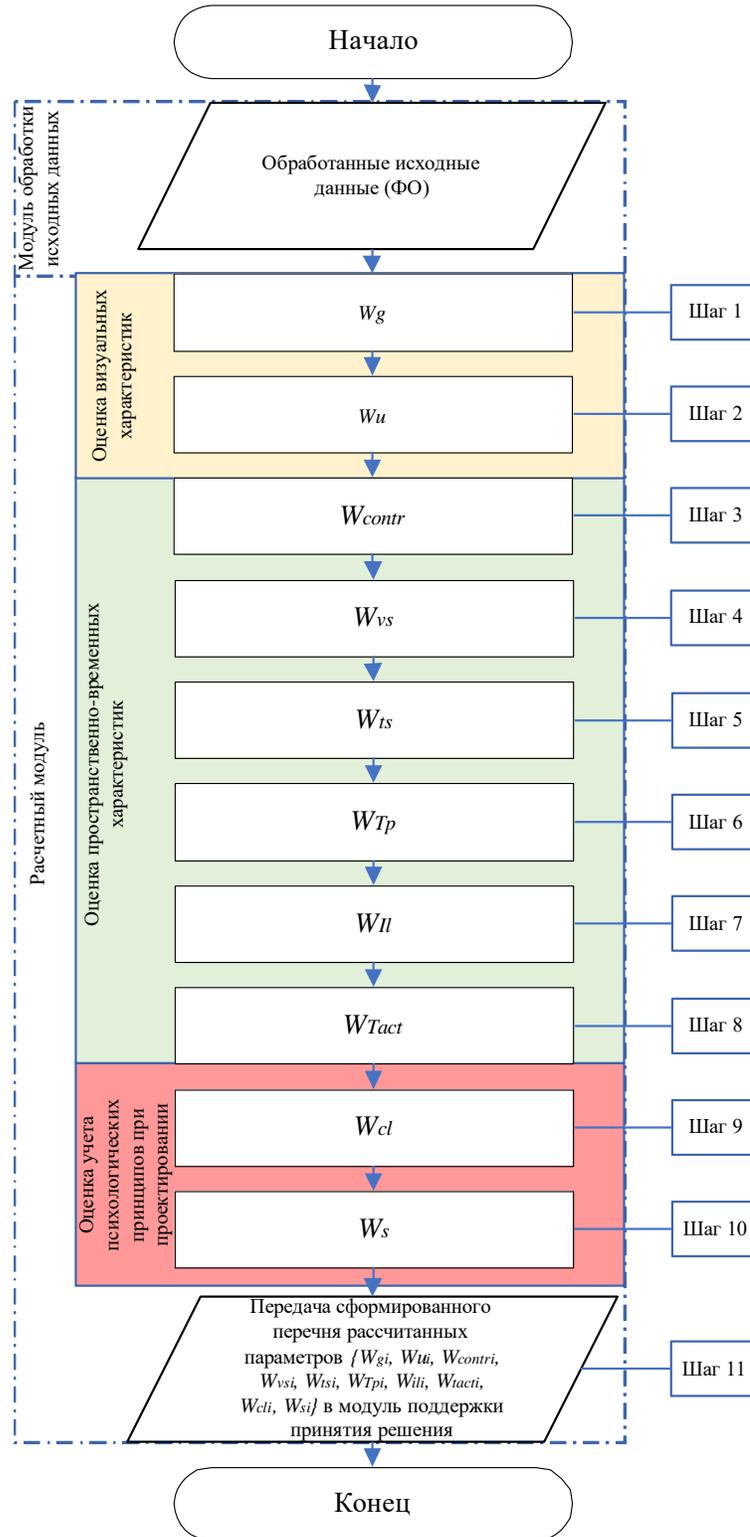


Рисунок 3.5. Блок-схема алгоритма комплексной методики расчета эргономических характеристик статической ГИ

Итоговый алгоритм комплексной методики расчета эргономических характеристик статической ГИ выглядит следующим образом:

Шаг 1. Вычисление коэффициента единого геометрического соответствия ВИУЭ  $W_g$  при условиях 3.1.

Шаг 2. Вычисление коэффициента унификации ВИУЭ  $W_u$  по формуле 2.49.

Подробный расчет Шагов 1 и 2 приведен в разделе 3.2.1.

Шаг 3. Вычисление коэффициента управляемости  $W_{contr}$  по формуле 2.46.

Шаг 4. Вычисление коэффициента визуальной простоты ГИ  $W_{vs}$  по формуле 2.25.

Шаг 5. Вычисление коэффициента сложности информационного (зрительного) поиска  $W_{ts}$  по формуле 2.38.

Шаг 6. Вычисление коэффициента предсказуемости СОИ  $W_{Tp}$  по формуле 2.44.

Шаг 7. Вычисление коэффициента поисково-информационной нагрузки  $W_{ll}$  по формуле 2.39.

Шаг 8. Вычисление коэффициента поисковой активности информации на  $WT_{act}$  по формуле 2.5.

Подробный расчет Шагов 3 – 8 приведен в разделе 3.2.2.

Шаг 9. Вычисление коэффициента когнитивной нагрузки  $W_{cl}$  по формуле 2.19.

Шаг 10. Вычисление коэффициента сигнализируемости  $W_s$  по формуле 2.54.

Подробный расчет Шагов 9 и 10 приведен в разделе 3.2.3.

Шаг 11. Выполняется передача сформированного перечня рассчитанных параметров  $\{W_{gi}, W_{ui}, W_{contri}, W_{vsi}, W_{tsi}, W_{Tpi}, W_{li}, W_{tacti}, W_{cli}, W_{si}\}$  по каждому альтернативному варианту исполнения в МППР.

### **3.4 Алгоритмическое обеспечение модуля поддержки принятия решения для задач эргономической оценки статической графической информации**

На первом этапе осуществляется выявление «доминирующей» альтернативы из всего сравниваемого множества вариантов исполнения статической ГИ по формулам

2.55, 2.56. «Доминирующая» альтернатива та, которая превосходит иные альтернативы по всем частным показателям эффективности  $(u), k = \overline{1, K}$  векторного критерия эффективности  $W$ . При наличии такого решения оно является строго оптимальным и итоговым вариантом, на котором ЛПР может остановить проведение сравнительной оценки.

В случае отсутствия «доминирующей» альтернативы осуществляется выявление «худших» альтернатив, для сужения множества  $U$  до  $U^{\Pi}$ . Определение «худших» альтернатив проводится до тех пор, пока не останутся альтернативы, значения каждого критерия которых не может быть улучшено без ухудшения других.

Для определения единственного наилучшего варианта исполнения статической ГИ решается задача многокритериального выбора в соответствии с МУС, лежащего в основе МППР. Основной принцип данного метода заключается в учете всего множества способов учета неопределенности, которые позволяют учесть все допустимое множество показателей вектор-функции при всех возможных весовых коэффициентов критериев и тем самым, смоделировать весь перечень мнений ЛПР. Подробная методика применения указанного метода для задачи эргономической оценки представлен в разделе 2.4.4 настоящего исследования.

Блок-схема методики применения метода уверенных суждений для задач поддержки принятия решения определения оптимальной альтернативы статической ГИ бортовых систем по результатам эргономической оценки представлена на рисунке 3.6.

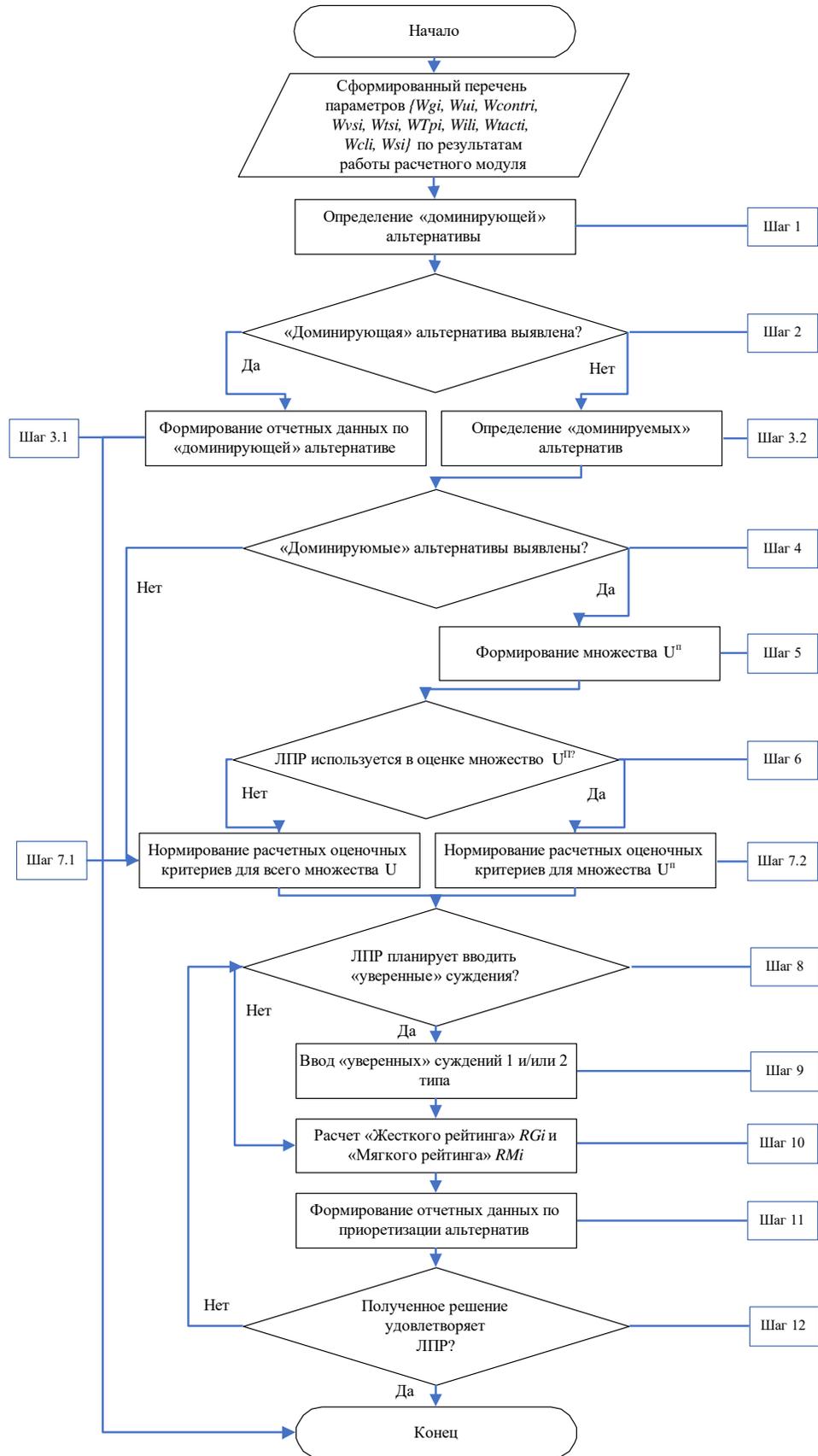


Рисунок 3.6. Блок-схема алгоритма работы МППР

Итоговый алгоритм применения МУС для решения задач поддержки принятия решения выглядит следующим образом:

Шаг 1. Первым этапом является определение «доминирующей» альтернативы из всего множества сравниваемых вариантов исполнения в соответствии с указанной процедурой в пункте 2.4.1 по формулам 2.55, 2.56.

Шаг 2. Проверка наличия «доминирующей» альтернативы по значениям частных оценочных критериев. Если «доминирующая» альтернатива найдена, переход к шагу 3.1, иначе переход к шагу 3.2.

Шаг 3.1 Формирование ответных данных по «доминирующей» альтернативе в виде идентификатора альтернативы и показателей частных оценочных критериев.

Шаг 3.2. Определение «доминируемых» альтернатив из всего множества сравниваемых вариантов исполнения в соответствии с указанной процедурой в пункте 2.4.1 по формулам 2.57, 2.58.

Шаг 4. Проверка наличия «доминирующей» альтернативы по значениям частных оценочных критериев. Если «доминирующие» альтернативы найдены, переход к шагу 5, иначе переход к шагу 7.1.

Шаг 5. Формирование «Парето-оптимального» множества путем исключения из него множества «доминируемых» («худших») альтернатив. В данном множестве существуют «не худшие» альтернативы, у которых значение каждого частного показателя эффективности не может быть улучшено без ухудшения других показателей.

Шаг 6. Выбирается определенное множество альтернатив для дальнейшей сравнительной оценки. Если оператором выбрано все множество альтернатив, переход к шагу 7.1, если выбрано «Парето-оптимальное» множество переход к шагу 7.2.

Шаг 7.1 Производится процедура нормирования рассчитанных показателей оценочных критериев  $\{W_{gi}, W_{ui}, W_{contri}, W_{vsi}, W_{tsi}, W_{Tpi}, W_{ili}, W_{tacti}, W_{cli}, W_{si}\}$  для все множество альтернатив по формулам 2.115, 2.116.

Шаг 7.2 Производится процедура нормирования рассчитанных показателей оценочных критериев  $\{W_{gi}, W_{ui}, W_{contri}, W_{vsi}, W_{tsi}, W_{Tpi}, W_{ili}, W_{tacti}, W_{cli}, W_{si}\}$  для «Парето-оптимального» множества альтернатив по формулам 2.115, 2.116.

Шаг 8. На данном шаге ЛПР необходимо принять решение по необходимости ввода уверенных суждений. Данные суждения позволяют выделить значимость критериев или альтернатив между собой. Как было описано ранее, введение данных суждений не является обязательным условием в МУС, а лишь правом ЛПР. Если ЛПР принял положительное решения по необходимости ввода суждений, осуществляется переход к шагу 3, иначе к шагу 4.

Шаг 9. Вводятся уверенные суждения ЛПР первого и/или второго типа, тем самым сужая множество неопределенностей до «неустранимой». Детальное описание суждений приводится в Главе 2.

Шаг 10. Осуществляется расчет показателей «Жесткий рейтинг» и «Мягкий рейтинг» для всех альтернативных вариантов исполнения статической ГИ бортовых систем по формулам 2.112, 2.113 с учетом заданных ЛПР условий сравнительной оценки.

Шаг 11. На данном этапе формируется отчет с результатами проведенных расчетов и сравнений по приоритизации альтернативных вариантов.

Шаг 12. На данном шаге ЛПР должен принять решения по полученным результатам приоритизации и выборе наилучшей альтернативы. В случае введения суждения он так же должен признать, что возможности дальнейшего снижения неопределенности за счет его уверенных суждений исчерпаны. Если ЛПР принял положительное решения по рассчитанной альтернативе, то алгоритм работы МППР считается завершенным, если нет, то возврат к шагу 2 для возможности ввести иные уверенные суждения или отказать от их ввода.

Далее приведен демонстрационный пример решения задачи сравнительной оценки альтернативных вариантов статической ГИ бортовых систем по критериям «Управляемость» (K1) и «Визуальная простота» (K2) (критерии имеют тренд на

максимум) с использованием МУС. В оценке учувствуют 3 альтернативы статической ГИ. Для демонстрации шаг перебора был выбран  $J = 0,25$ . Для обхода всех оценочных случаев требуется провести 5 сценариев.

#### Сценарий 1.

	Альтернатива ГИ1		Альтернатива ГИ2		Альтернатива ГИ3	
	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Критерий оценки	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Вычисленное значение ( $w_k(u)$ )	3,42	0,35	2,34	0,18	3,89	0,29
Нормированное значение ( $w_k(u)_{stand}$ )	0,69	1	0	0	1	0,64
Весовые коэффициенты линейной свертки ( $a^k$ )	0	1	0	1	0	1
Значение оценочной функции ( $f(u)$ )	1		0		0,64	
Результат сравнения	Выигрыш		Проигрыш		Проигрыш	

#### Сценарий 2.

	Альтернатива ГИ1		Альтернатива ГИ2		Альтернатива ГИ3	
	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Критерий оценки	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Вычисленное значение ( $w_k(u)$ )	3,42	0,35	2,34	0,18	3,89	0,29
Нормированное значение ( $w_k(u)_{stand}$ )	0,69	1	0	0	1	0,64
Весовые коэффициенты линейной свертки ( $a^k$ )	0,25	0,75	0,25	0,75	0,25	0,75
Значение оценочной функции ( $f(u)$ )	0,9225		0		0,73	
Результат сравнения	Выигрыш		Проигрыш		Проигрыш	

#### Сценарий 3.

	Альтернатива ГИ1		Альтернатива ГИ2		Альтернатива ГИ3	
	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Критерий оценки	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Вычисленное значение ( $w_k(u)$ )	3,42	0,35	2,34	0,18	3,89	0,29

Нормированное значение ( $w_k(u)_{stand}$ )	0,69	1	0	0	1	0,64
Весовые коэффициенты линейной свертки ( $a^k$ )	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Значение оценочной функции ( $f(u)$ )	0,845		0		0,82	
Результат сравнения	Выигрыш		Проигрыш		Проигрыш	

## Сценарий 4.

	Альтернатива ГИ1		Альтернатива ГИ2		Альтернатива ГИ3	
	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Критерий оценки	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Вычисленное значение ( $w_k(u)$ )	3,42	0,35	2,34	0,18	3,89	0,29
Нормированное значение ( $w_k(u)_{stand}$ )	0,69	1	0	0	1	0,64
Весовые коэффициенты линейной свертки ( $a^k$ )	0,75	0,25	0,75	0,25	0,75	0,25
Значение оценочной функции ( $f(u)$ )	0,7675		0		0,91	
Результат сравнения	Проигрыш		Проигрыш		Выигрыш	

## Сценарий 5.

	Альтернатива ГИ1		Альтернатива ГИ2		Альтернатива ГИ3	
	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Критерий оценки	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Вычисленное значение ( $w_k(u)$ )	3,42	0,35	2,34	0,18	3,89	0,29
Нормированное значение ( $w_k(u)_{stand}$ )	0,69	1	0	0	1	0,64
Весовые коэффициенты линейной свертки ( $a^k$ )	1	0	1	0	1	0
Значение оценочной функции ( $f(u)$ )	0,69		0		1	
Результат сравнения	Проигрыш		Проигрыш		Выигрыш	

По результатам проведенной оценки было выявлено, что альтернатива «ГИ1» лидирует по количеству (частоте) выигрышей и ее жесткий рейтинг равен  $RG_{ГИ1} =$

0,6 (3 победы из 5 сценариев). Жесткий рейтинг альтернативы «ГИЗ»  $RG_{ГИЗ} = 0,4$  (2 победы из 5 сценариев), она находится на втором месте. Самой неэффективной с точки зрения управляемости и визуальной простоты стала альтернатива «ГИ2» с жестким рейтингом  $RG_{ГИ2} = 0$  (0 побед из 5 сценариев). Как было ранее замечено, количество выигрышей у альтернативы определяется по максимальному значению оценочной функции (показателя линейной свертки) с учетом нормированных значений, определяемой по формуле 2.122.

Стоит заметить, ЛПР имеет право ввести суждения, в которых он уверен. Если рассмотреть случай, при котором ЛПР вводит суждение, что коэффициенты линейной свертки  $k_1 \neq k_2$ , то такое условие изменит итоговый результат сравнения по причине выбывания неподходящих под условия суждения сценарии, в данном случае сценария №3. Показатели жестких рейтингов альтернатив «ГИ1» и «ГИ2» будут равны  $RG_{ГИ1} = RG_{ГИ2} = 0,5$  (в обоих случаях одинаковое количество побед) и для определения наилучшей альтернативы необходимо дополнительно вычислять мягкий рейтинг.

### **3.5 Программное обеспечение системы поддержки принятия решения**

#### **3.5.1 Определение множества способов учета неопределенности в модуле поддержки принятия решения**

При разработке ПО для реализации МППР стоит учитывать особенность выбранного метода поддержки принятия решения МУС в части использования всего множества весовых коэффициентов для линейных сверток (оценочных функций), которые моделируют все возможные экспертные мнения. Способ формирования данного множества должен осуществляться с применением правил комбинаторики для нахождения возможных уникальных комбинаций весовых коэффициентов.

В разделе 3.4 был рассмотрен демонстрационный пример применения МУС для оценки альтернатив ГИ по двум оценочным критериям и с шагом перебора значений весовых коэффициентов оценочных линейных сверток (оценочных функций)  $J = 0,25$ . Используя данный шаг перебора было получено 5 неповторяющихся сценариев

обхода всех оценочных случаев  $(0,1; 0.25,0.75; 0.5,0.5; 0.75,0.25; 1,0)$ . В [138] продемонстрировано множество неповторяющихся комбинаций весовых показателей с шагом перебора 0.2 для 3 оценочных показателей и 6 дискретных значений коэффициентов. По результатам определения данного множества получилась 21 уникальная комбинация (сценарий). Таким образом, уменьшая шаг перебора будет получаться более точный результат, но увеличиваться набор сценариев, что в свою очередь увеличивает время проведения оценки. Сложностью будет являться реализация всего множества линейных сверток (оценочных функций) при установке небольшого шага дробления весовых коэффициентов. В связи с этим, предложенная программная реализация основана на рекурсивной процедуре, позволяющая вызывать саму себя. Помимо этого, для сокращения временных затрат на сравнительную оценку в части вычисления множества оценочных функций применяются параллельные вычисления на различных потоках процессора.

Зачастую для сравнительного анализа СТС необходимо использовать большое количество оценочных критериев и уменьшить шаг перебора обхода всех оценочных случаев в диапазоне  $[0, 1]$ . Для определения точного значения количества уникальных сценариев обхода всех оценочных случаев в указанном диапазоне необходимо воспользоваться правилами комбинаторики в части выделенного типа задач на определение количества сочетаний с повторениями. Основой целью данной задачи является определение при наличии  $n$  объектов различных классов количества различных  $m$ -комбинаций (различие хотя бы в одном коэффициенте), которые можно получить путем перебора коэффициентов. Подсчет числа сочетаний с повторениями осуществляется по формуле [156]:

$$\bar{C}_n^m = \frac{(m+n-1)!}{m!(n-1)!} = C_{m+n-1}^m \quad (3.6)$$

Рассмотрев формулу 3.6 для задачи настоящего исследования, можно провести аналогию, что  $n$  – количество оценочных критериев,  $m$  – количество разновидностей классов объекта. В данном случае, под разновидностью классов понимается

количество уникальных переборов определенного шага дробления на диапазоне  $[0, 1]$ . Тогда формулу 3.6 можно записать в следующем виде:

$$N_C = \frac{\left(\frac{1}{J} + n - 1\right)!}{(n - 1)! * \left(\frac{1}{J}\right)!} \quad (3.7)$$

где  $N_C$  – максимальное количество способов учета неопределенности (значений весовых коэффициентов оценочных линейных),  $J$  – шаг перебора значений весовых коэффициентов оценочных линейных свертков (оценочных функций) способов учета неопределенности,  $n$  – количество оценочных критериев.

### 3.5.2 Программная реализация системы поддержки принятия решения

Для реализации разработанных в настоящем исследовании алгоритмов разработано ПО, позволяющее моделировать работу СППР. Графический интерфейс начально экрана СППР представлен на рисунке № 3.7.

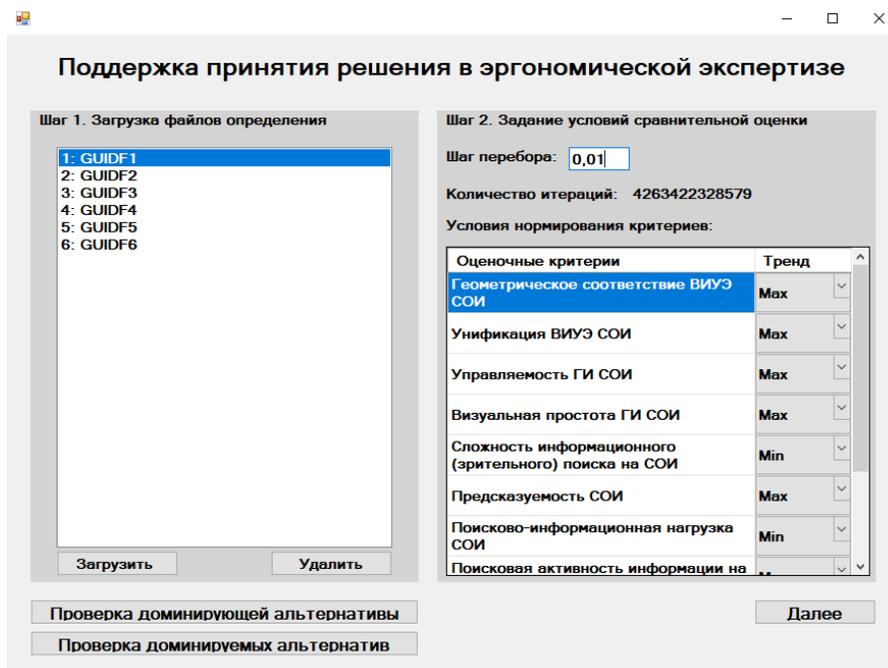


Рисунок 3.7. Начальный экран системы поддержки принятия решения

На текущем этапе оператор загружает альтернативные варианты исполнения графических приложений в виде ФО, реализованных в соответствии с авиационным стандартом ARINC 661 [151] при разработке функции отображения данных, и задает

условия для проведения сравнительной оценки, а именно шаг перебора весовых коэффициентов линейной свертки в диапазоне  $[0, 1]$  (при установке шага перебора высчитывается количество итераций сравнительной оценки и выводится в соответствующей строке «Количество итераций») и условия нормирования оценочных критериев (минимизация или максимизация критерия).

По желанию оператора может осуществляться проверка наличия «доминирующей» и «доминируемых» альтернатив по нажатию на кнопки «Проверка доминирующей альтернативы» и «Проверка доминируемых альтернатив» в соответствии с процедурами раздела 2.4.1.

При наличии «доминирующей» альтернативы оператору индицируются итоги ее поиска в виде идентификатора альтернативы и численных показателей оценочных критериев. Итоги поиска отображены на рисунке 3.8.

Поддержка принятия решения в эргономической экспертизе								
Доминирующая альтернатива								
	Геометрическое соответствие ВИУЗ СОИ	Унификация ВИУЗ СОИ	Управляемость ГИ СОИ	Поисковая активность информации на СОИ	Сложность информационного (зрительного) поиска на СОИ	Когнитивная нагрузка ВИУЗ СОИ	Сигнализируемос ВИУЗ СОИ	Поисков активност информ на СОИ
** 1: GUIDF1	89,1	0,05	0,99	305,4	204	0,9	0,9647	305,4

Выгрузить отчет в PDF

На главную

Рисунок 3.8. Результаты поиска доминирующей альтернативы

В случае отсутствия «доминирующей» альтернативы оператор осуществляет проверку на наличие «доминируемых» вариантов. При наличии таких индицируются результаты их поиска в виде идентификатора альтернатив и численных показателей оценочных критериев. Помимо этого, оператор может определить конкретное множество альтернатив и использовать его при дальнейшей сравнительной оценки – все множество альтернатив или «Парето-оптимальное» множество альтернатив. Итоги поиска отображены на рисунке 3.9.

**Поддержка принятия решения в эргономической экспертизе**

**Доминируемые альтернативы**

	Геометрическое соответствие ВИУЗ ССИ	Уязвимость ВИУЗ ССИ	Управляемость ГИ ССИ	Поисковая активность информации на ССИ	Сложность информационного (зрительного) поиска на ССИ	Когнитивная нагрузка ВИУЗ ССИ	Сигнализируемос ВИУЗ ССИ	Поисков активност информации на ССИ
1: GUIDF1	89,1	0,05	0,99	305,4	204	0,9	0,9647	305,4

Использовать все множество альтернатив  
 Использовать "Парето-оптимальное" множество

Выгрузить отчет в PDF  
 На главную

Рисунок 3.9. Результаты поиска доминируемых альтернатив

Отсутствие «доминирующей» и «доминируемых» альтернатив сопровождается индикацией в виде ошибки поиска, которые приведены на рисунках 3.10 и 3.11.

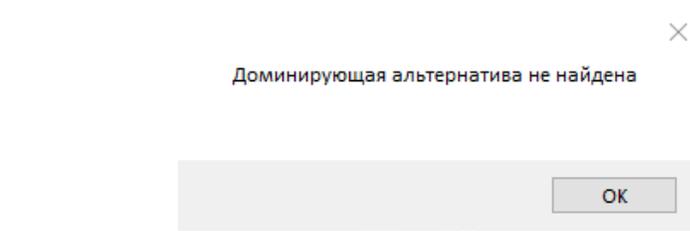


Рисунок 3.10. Формат ошибки при отсутствии «доминирующей» альтернативы

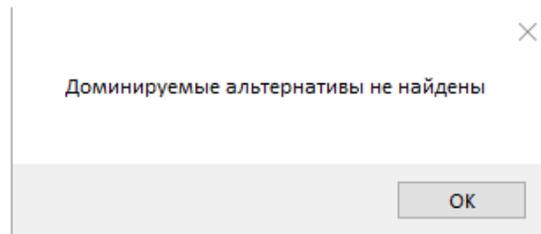


Рисунок 3.11. Формат ошибки при отсутствии «доминируемых» альтернатив

При наличии поврежденного загруженного ФО или не соблюдении условий проведения сравнительной оценки с помощью разработанного решения, а именно, реализация ФО не в соответствии со стандартом ARINC 661 [151], СППР индицирует сообщение об ошибке. При некорректном вводе шага перебора СППР аналогичным образом индицирует сообщение об ошибке. Форматы ошибок представлены на рисунках 3.12, 3.13.

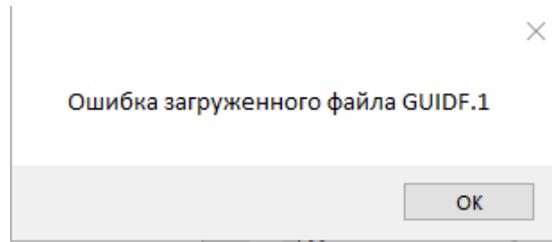


Рисунок 3.12. Формат ошибки при обработке ИД

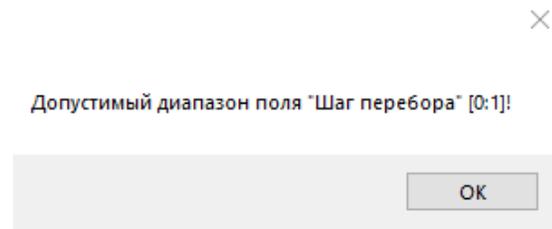


Рисунок 3.13. Формат ошибки при вводе некорректного шага перебора

На рисунках 3.14, 3.15 представлена графическая реализация задания уверенных суждений ЛПР первого и второго типа. Введение суждений первого типа позволяет выставить приоритет между оценочных критериев, второго типа, приоритет между загруженных альтернативных вариантов ФО.

Текущий шаг не является обязательным по условиям МУС и может быть пропущен [116, 143, 144].

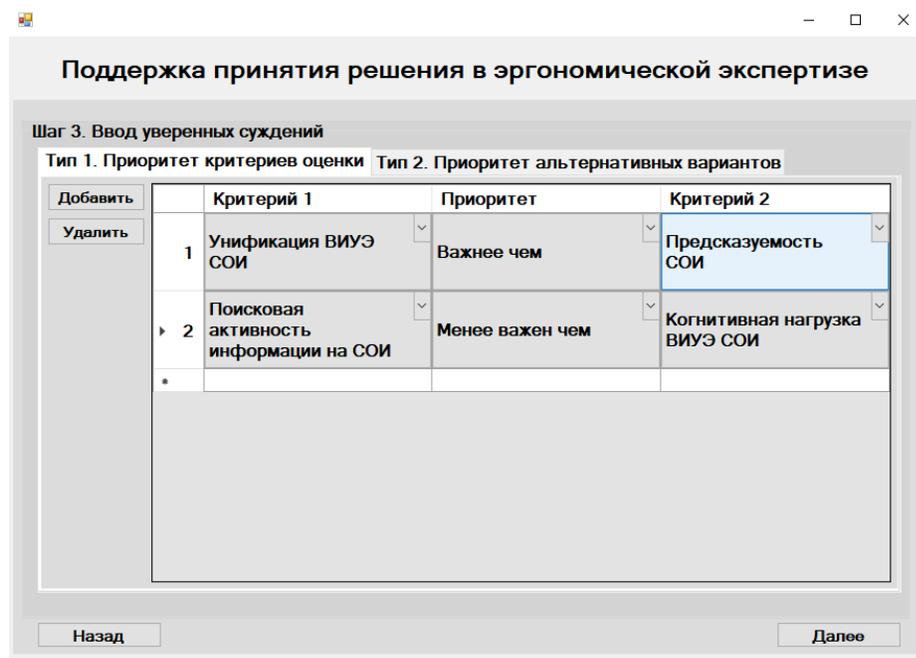


Рисунок 3.14. Установка уверенных суждений первого типа

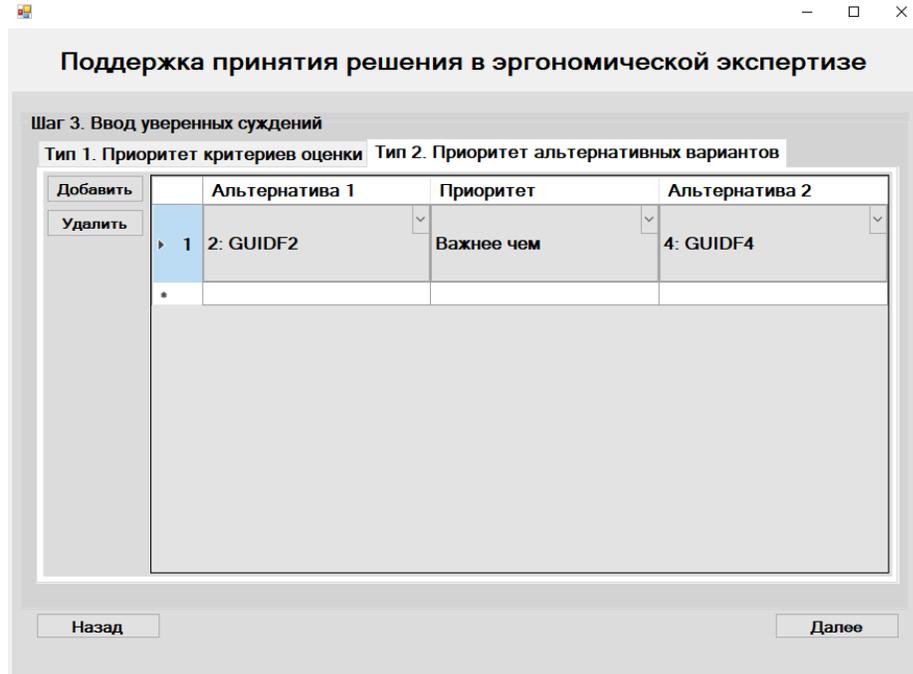


Рисунок 3.15. Установка уверенных суждений второго типа

Результаты работы СППР по итогам сравнительной оценки без заданных уверенных суждений представлены на рисунках 3.16, 3.17.



Рисунок 3.16. Рассчитанный «Мягкий рейтинг» альтернатив



Рисунок 3.17. Рассчитанный «Жесткий рейтинг» альтернатив

Далее предлагается смоделировать случай, при котором ЛПР своим желанием вводит уверенные суждения: критерий «Унификация» является наиболее важным критерия «Геометрическое соответствие», критерий «Когнитивная нагрузка» является наиболее важным критерия «Поисковая активность информации». Остальные условия оценки остались прежними. Результаты изменений отображены на рисунке 3.18, 3.19.

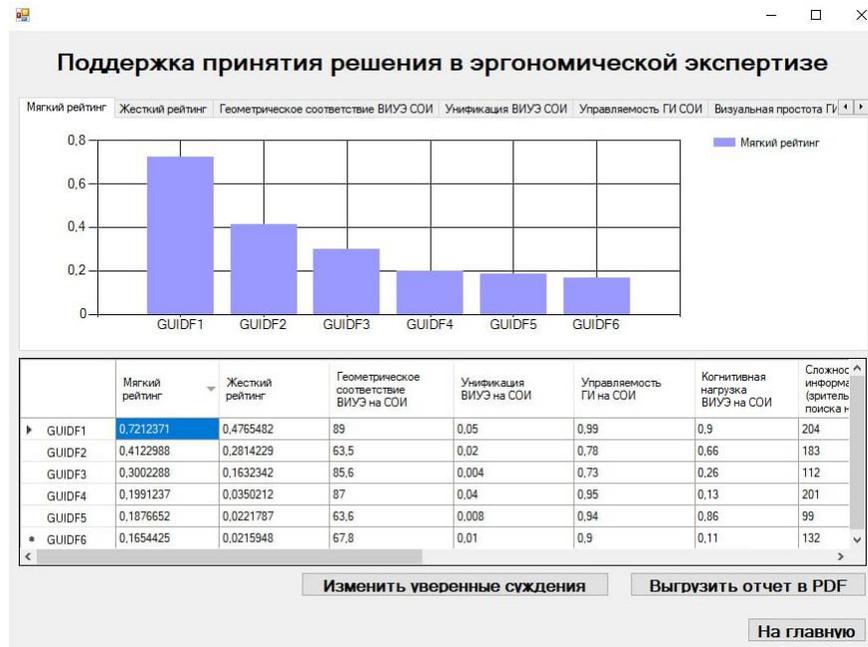


Рисунок 3.18. Рассчитанный «Мягкий рейтинг» альтернатив



Рисунок 3.19. Рассчитанный «Жесткий рейтинг» альтернатив

Как можно заметить, результаты сравнения альтернатив изменились благодаря введенным ЛПР суждениям. Часть случаев, не попадающие под введенные суждения выбыли из сценариев. Таким образом, ЛПР задав свои предпочтения может изменять результаты сравнения до тех пор, пока возможности дальнейшего снижения неопределенности за счет его уверенных суждений не будут исчерпаны.

Оператору предоставляется возможность увидеть результаты по расчету рейтингов альтернативных вариантов «Жесткий рейтинг» и «Мягкий рейтинг», а также всех оценочных критериев в формате графиков и таблиц. Для удобства пользования, в нижней части графического окна СППР постоянно индицируется таблица значений по всем рассчитанным рейтингам и критериям. При необходимости увидеть визуальный график конкретного показателя оператор может с помощью переключателя вывести на графическое окно интересующий его критерий.

Помимо этого, для удобства хранения и использования полученных данных предусмотрена возможность выгружать результаты работы СППР в отчетную форму формата «PDF».

В случае неудовлетворения итоговой альтернативой ЛПП может вернуться к шагу ввода суждений и изменяет свой выбор.

### **3.6 Техническое обеспечение системы поддержки принятия решения**

Разработка и отладка ПО проведены на ПК, обладающем следующими характеристиками:

- Процессор Intel Core i9-14900K.
- Оперативная память 16 Гб.
- Жесткий диск SSD 512 Гб.
- Видеокарта Intel Iris Xe Graphics G7 80EUs (в качестве видеопамати используется разделяемая - часть оперативной памяти в размере от 1 Гб).

В качестве среды разработки используется Microsoft Visual Studio Community 2022 (64-разрядная версия) с расширением C++ Windows Forms for VS 2022 .NET. Для формирования отчетов по результатам работы программы выполняется с помощью Microsoft Office 2019.

Минимальные системные требования к техническому обеспечению:

- 64-разрядная операционная система (Windows 10 и старше).
- Не менее 1.6 ГГц тактовой частоты процессора с поддержкой инструкций SSE2, SSE3, SSE4.2.
- 4 Гб оперативной памяти.
- 512 мБ свободного места на жестком диске.
- установленные пакета Microsoft .NET SDK 8.0 (x64).

### **3.7 Выводы по Главе 3**

1. Разработано алгоритмическое обеспечение модуля обработки ИД, позволяющее осуществить обработку и подготовку ИД по загруженным в СППР ФО, разработанным в соответствии авиационным стандартом ARINC 661 [151], уведомить

оператора об обнаружении ошибок в процессе обработки ФО путем индикации сообщения об ошибках устройство вывода информации.

2. Разработано алгоритмическое обеспечение комплексной методики расчета эргономических характеристик статической ГИ бортовых систем, обеспечивающее автоматизированное определение оценочных критериев по направлениям: визуальные характеристики; пространственно-временных характеристики; учет психологические принципы при проектировании статической ГИ.

3) Разработано алгоритмическое обеспечение МППР, основанное на применении МУС для задачи поддержки решения, позволяющий автоматизировано определять наилучший альтернативный вариант исполнения статической ГИ и приоритизировать весь перечень решений по показателям «Жесткий рейтинг» и «Мягкий рейтинг», полученных по результатам расчета эргономических оценочных критериев. Помимо этого, МППР формирует результаты работы СППР по итогам сравнительной оценки в отчетной форме и индицирует ее оператору на устройство вывода информации.

4) Разработано ПО, реализующее разработанные алгоритмы, позволяющее моделировать работу СППР. Для удобства взаимодействия с оператором разработанное решение имеет человеко-машинный интерфейс в интуитивно понятной форме, не требующий от ЛПР компетенций в области программирования.

## **4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭРГНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

### **4.1 Разработка альтернативных вариантов статической графической информации для оценки эффективности предложенного решения**

Для демонстрации эффективности предложенного решения были спроектированы альтернативные варианты статической ГИ в соответствии с регламентирующими стандартами [38, 61, 62, 71], определяющие мероприятия и цели, выполнение которых необходимо для одобрения авиационными властями и допуску к процессу сертификации ВС. Для достижения требуемых целей применялся модельно-ориентированный подход (МОП), в соответствии с которым, различные программные аспекты системы, использующиеся для поддержания процесса разработки или верификации ПО, заменяются их абстрактным представлением, то есть моделью. МОП регламентируется руководством [157, 158], являющийся дополнением к [61, 62]. Согласно требованиям данных документов для использования модели, в процессе разработки ПО, она должна обладать следующими свойствами:

- быть полностью описанной с помощью явно определенной нотации моделирования, как графической, так и текстовой;
- содержать требования к ПО и/или описание архитектуры ПО;
- ее форма и тип позволяет проводить непосредственный анализ и оценку функционирования в процессах разработки и верификации ПО.

Для разработки статической ГИ с применением МОП применялся программный комплекс «ANSYS SCADE». Модели, разработанные с его помощью, удовлетворяют требованиям [157, 158] и представляют собой требования низкого уровня и/или описание архитектуры ПО, из которых потом может быть в автоматическом режиме сгенерирован исходный код или описание проекта ПО, являющийся одним из самых трудозатратных артефактов разработки [159].

Помимо учета требований регламентирующей документации [61, 62, 157, 158], разработка ПО осуществлялась с применением авиационного стандарта ARINC 661 [151] и руководства P-25-11A [38].

Перед разработкой альтернатив статической ГИ необходимо было определить систему, входящую в состав КБО и имеющую СОИ для человеко-машинного взаимодействия, содержащую в себе значительную функциональную нагрузку, реализованную в части статической ГИ для более детального анализа эргономических характеристик. Под указанные требования подходит вычислительная система самолетовождения (ВСС), поскольку она является наиболее функционально нагруженной системой в части человеко-машинного взаимодействия, основными задачами которой является:

- автоматическая и ручная настройка радиосредств с дальнейшей выдачей информации на индикацию по принятым настройкам;
- задание элементов плана полета (взлетно-посадочные полосы, пункты взлета и прибытия, промежуточные пункты маршрута), условий полета, весовых данных;
- выдача информации для отображения активного, вторичного, модифицированного плана полета;
- выдача информации по ближайшему положению аэропортов, зон ожидания для отображения;
- задание параметров для этапов набора высоты, круиза и снижения;
- вычисление и инициализация ЛТХ ВС;
- выдача информации для отображения характеристик отказов системы;
- индикация сообщений, принятых от диспетчерских служб управления воздушным движением;
- индикация данных бортового журнала.

Проведя анализ графического функционала, реализованного на современных бортовых ВСС, были предложены 6 альтернативных решений, которые будут

использованы для сравнительной оценки. Указанные альтернативы отличаются наполнением информационных кадров управления в части количества визуальных элементов, их свойств и атрибутов отображения, расположения, возможности управления, обратной реакции и т.д. Стоит заметить, что весь графический функционал распределен по навигационным разделам для уменьшения визуальной нагрузки на операторов. Примеры информационных страниц на предложенных ВСС отображены на рисунке 4.1.

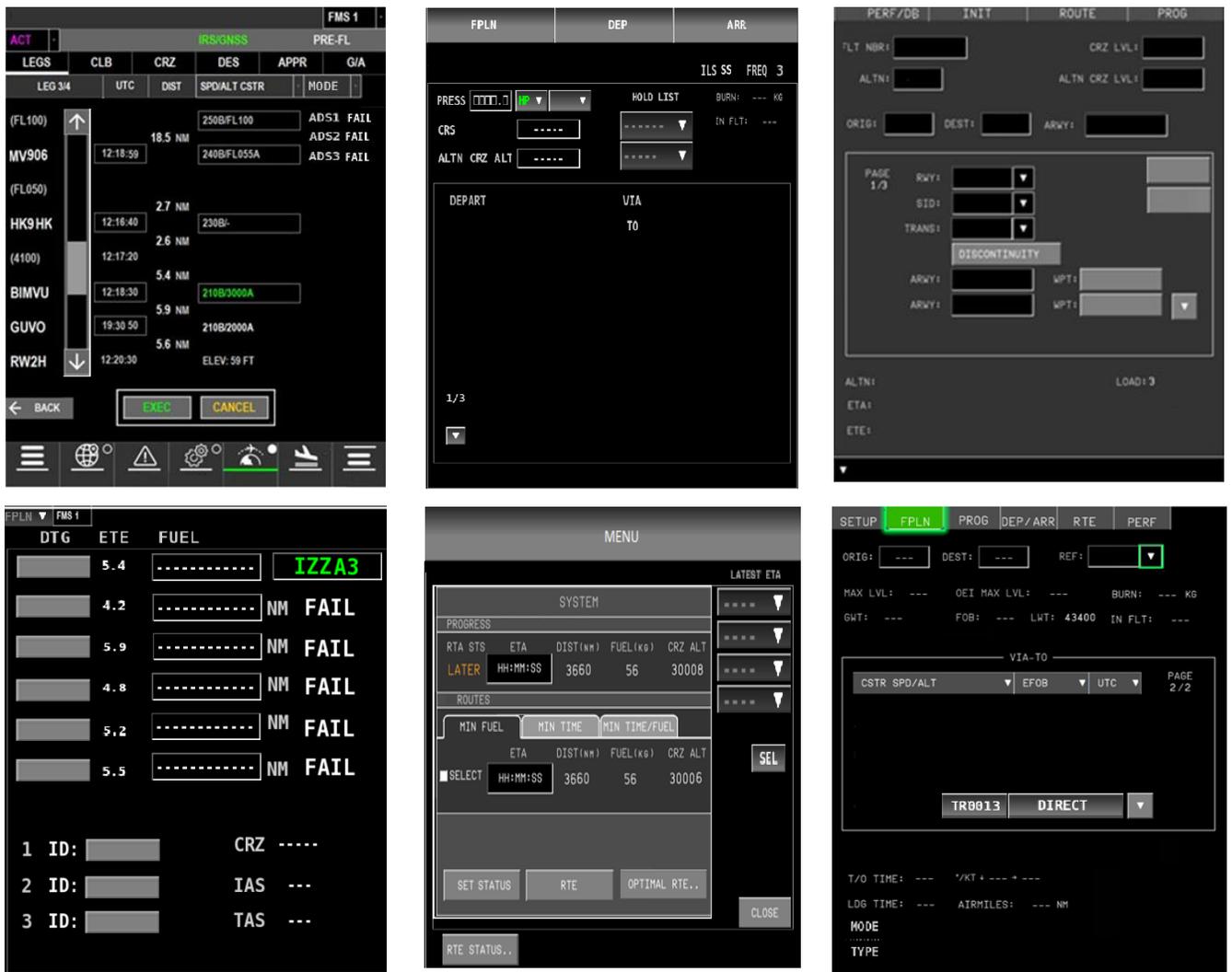


Рисунок 4.1. Информационные кадры ВСС

## 4.2 Оценка эффективности разработанной системы поддержки принятия решения для задач эргономической оценки статической графической информации

### 4.2.1 Проведение эргономической оценки с применением системы поддержки принятия решения

Эргономическая оценка с применением разработанной СППР осуществлялась на 6 альтернативных вариантах исполнения статической ГИ. Шаги загрузки ФО и установки условий сравнительной оценки представлены на рисунке 4.2. Условия оценки устанавливались следующие:

- 1) Шаг перебора – 0.01.
- 2) Максимизировались критерии: «Геометрическое соответствие», «Унификация», «Управляемость», «Визуальная простота», «Предсказуемость», «Сигнализируемость».
- 3) Минимизировались критерии: «Сложность информационного (зрительного) поиска», «Поисково-информационная нагрузка», «Поисковая активность информации», «Когнитивная нагрузка».

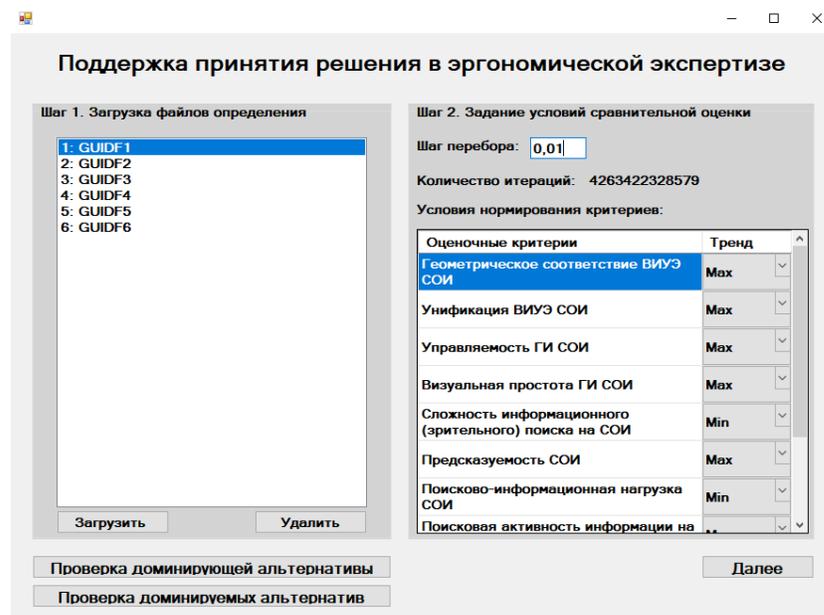


Рисунок 4.2. Установка условий сравнительной оценки

- 4) Уверенные суждение ЛПР на текущей итерации оценки не задавались.

На рисунках 4.3, 4.4 продемонстрированы результаты работы СППР по итогам сравнительной оценки по критериям «Жесткий рейтинг» и «Мягкий рейтинг».



Рисунок 4.3. Результаты сравнительной оценки по жесткому рейтингу



Рисунок 4.4. Результаты сравнительной оценки по мягкому рейтингу

Итоги сравнительной оценки с применением СППР приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Итоги сравнительной оценки с применением СППР.

Место	Идентификатор альтернативы	Жесткий рейтинг	Мягкий рейтинг
1	GUIDF1	0.5152145	0.8851339
2	GUIDF2	0.2054856	0.6021452
3	GUIDF3	0.1033724	0.4125554
4	GUIDF4	0.0915894	0.4129477
5	GUIDF5	0.0789411	0.3966574
6	GUIDF6	0.0053970	0.3212468

По результатам сравнительной оценки наилучшим решением по показателю «Жесткий рейтинг» оказалась альтернатива с идентификатором «GUIDF1».

Важно отметить, что разработанное ПО, позволяющее моделировать работу СППР выполнено в среде «Microsoft Visual Studio» с использованием языка программирования C++, что делает ее интуитивно понятной для ЛПР, проводящего сравнительную оценку и не требующая у оператора компетенций в области программирования.

#### **4.2.2 Проведение эргономической оценки с привлечение экспертной группы**

Для оценки эффективности разработанного решения предлагается произвести дополнительную эргономическую экспертизу с привлечением экспертной группы по определению оптимального решения из спроектированных альтернатив. За основу метода выбора оптимальной альтернативы был взят метод парных сравнений, который отличается от использованного в СППР и основан на анкетировании экспертов, получении и обработки ЭО.

Стоит отметить, что в авиационной промышленности процессы разработки и оптимизации ГИ, в том числе статических элементов ГИ, а также эргономическая экспертиза и сравнительная оценка координируются и согласовываются с летными экспертами. Итоговое решение за внедрение, удаление или выбор определенного

решения выдвигает данная группа экспертов. Причиной этому является негативное влияние неэффективного варианта исполнения статической ГИ при человеко-машинном взаимодействии на безопасность полета. Таким образом, сформировав экспертную группу, в которую будут входить опытные специалисты с соответствующим уровнем квалификации (пилоты, специалисты по эргономике, разработчики ГИ бортовых систем), проведя эргономическую экспертизу, получив ее результаты и сравнив с результатами работы СППР можно сделать вывод об эффективности разработанного решения. Получив одинаковые или близкие результаты можно считать, что предложенное решение является эффективным способом повышения уровня безопасности полета за счет выявления наилучшей альтернативы статической ГИ по результатам эргономической оценки, поскольку позволяет моделировать мнение летных экспертов (итоги ее работы сходятся с ЭО летных экспертов, которые на практике являются решающими), но основана на более детальном и формализованном анализе, который позволяет без временных затрат на все этапы проведения экспертизы выявить оптимальное решение и приоритезировать альтернативы, снизив влияние человеческого фактора на результаты сравнительной оценки благодаря применению МУС, который не обязывает ЛПР вводить свои суждения, а лишь наделяет его правом.

#### **4.2.2.1 Формирование требований к экспертной группы**

При формировании экспертной группы к ее членам применялись критерии отбора [160]:

- 1) высокая квалификация в области исследования;
- 2) публикации в престижных журналах, наличие патентов и авторских свидетельств;
- 3) экспертный опыт в разработке и/или эргономической экспертизе ГИ бортовых систем;

- 4) наличие опыта работы в преподавательской или инструкторской деятельности по подготовке пилотов гражданской авиации / в управлении ВС в должности командира воздушного судна или второго пилота;
- 5) отсутствие личной заинтересованности в результатах экспертного заключения;
- 6) наличие опыт практической работы в области разработки и/или эргономической экспертизы ГИ бортовых систем не менее 5 лет;
- 7) наличие опыт практической работы в сфере пилотирования ВС не менее 10 лет.

Исходя из указанных выше критериев к экспертной группе можно сформировать следующий вывод. В экспертную группа должны входить представители большинства профессиональных групп, принимающих участие в создании ГИ бортовых систем на всех шагах ЖЦ (все этапы разработки требований, в том числе взаимодействия с пилотной группой, разработка, верификации/валидации/эргономическая экспертиза, внедрение).

Окончательный выбор участника для экспертной группы происходит по удовлетворению максимального количества критериев отбора (указанные критерии имеют одинаковый приоритет).

Таким образом, в группу проведения эргономического исследования вариантов статической ГИ бортовых систем и дальнейшего определения оптимальной альтернативы из существующих вошли 2 линейных пилота различных авиакомпаний, 2 пилота-испытателя, 1 пилот-инструктор, 3 эксперта в области эргономической оценки ИУП кабины экипажа, 1 инженер по разработке ГИ бортовых систем, 1 инженер по верификации ГИ бортовых систем. В таблице 4.1 отабражена критериальная характеристика экспертов. Слева направо представлены критерии отбора экспертов, номера которых соответствуют нумерации критериев в начале раздела 4.2.2.1.

Таблица 4.1. Критериальная характеристика участников экспертной группы

Эксперт	1	2	3	4	5	6	7
Линейный пилот N1	+			+	+		+
Линейный пилот N2	+			+	+		+
Пилот-испытатель N1	+	+	+	+	+		+
Пилот-испытатель N2	+		+	+	+		+
Пилот-инструктор	+		+	+			+
Эксперт в эргономической экспертизе N1	+	+	+		+	+	
Эксперт в эргономической экспертизе N2	+	+	+		+	+	
Эксперт в эргономической экспертизе N3	+	+	+		+	+	
Инженер-разработчик	+	+	+		+	+	
Инженер-верификатор	+		+		+	+	

На практике считается, что объективная экспертная оценка дана в том случае, если мнения экспертов согласованы, т.е. близки по смыслу. Степень согласованности участников экспертной группы можно оценить по величине коэффициента конкордации, который вычисляется по следующей формуле:

$$w = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (4.1)$$

где  $m$  – число участников экспертной группы,  $n$  – число объектов экспертизы,  $S$  – сумма квадратов рангов, вычисляется по формуле:

$$S = \sum_{j=1}^n d_j^2, \quad (4.2)$$

где  $d$  – расставленные ранги суждений, вычисляется по формуле:

$$d_j = 0.5m(n + 1) - \sum_{i=1}^m x_{ij}, j = 1, \dots, n \quad (4.3)$$

Значения  $w$  заключены на отрезке  $[0;1]$ . Считается, что если  $w \leq 0.3$ , то мнения участников экспертной группы не согласованы и в таком случае следует пересмотреть состав экспертной группы и повторить экспертизу. Если  $0.3 < w \leq 0.7$ , то присутствует средняя согласованность мнений. Если  $0.7 < w \leq 1$ , то наблюдается высокая согласованность мнений.

#### 4.2.2.2 Проведение экспертной эргономической оценки

Как было ранее указано, для получения экспертной оценки по альтернативным вариантам статической ГИ бортовых систем и выбора наилучшего решения предлагается проводить анкетирования экспертной группы. Участники группы оценивают альтернативы в соответствии с заданными оценочными критериями.

Данное исследование проводится путем стендового моделирования на современных имитационных стендах КБО, где экспертной группе для снижения вероятности возникновения неточностей при оценке предлагается попарно оценить за раз два различных альтернативных объекта статической ГИ. Во время проведения экспертизы имитировался полет ВС с этапами взлета, крейсерского полета и посадки.

Рассмотрим способ более подробно. Каждому участнику экспертной группы предлагается выбрать из двух альтернативных вариантов наиболее предпочтительный относительно критериев (вопросов) выбора. Данный выбор совершается на основании экспертного мнения. Таким образом результатом сравнения двух альтернативных вариантов  $a_i$  и  $a_j$  может быть один из следующих возможных исходов:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при условии } a_i > a_j \\ 0, & \text{при условии } a_i < a_j \end{cases} \quad (4.4)$$

Для определения количества способов представления объектов в парах используется следующая формула:

$$L = \frac{n(n-1)}{2}, \quad (4.5)$$

где  $n$  – общее число вариантов.

По итогам выставления оценок получается матрица парных сравнений, которую называют «турнирная матрица»:

$$W = \{w_{ij}, i, j = 1, \dots, n; i \neq j\} \quad (4.6)$$

Данная матрица является обратно-симметричной:

$$w_{ji} = 1 - w_{ij} \quad (4.7)$$

Далее определяется степень предпочтительности каждого альтернативного варианта  $r_i, i = 1, \dots, n$  просуммировав значения  $w_{ij}$  в каждой строке турнирной таблицы по формуле 4.8:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (4.8)$$

Для визуального представления турнирной таблицы приведен демонстрационный пример в таблице 4.2. Объектами исследования являются 4 альтернативных варианта представления статической ГИ:  $a_1, a_2, a_3, a_4$ .  $N$  – количество членов, входящую в экспертную группу.

Таблица 4.2. Демонстрационный пример турнирной таблицы

Альтернативы ГИ	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$r_i$
$a_1$	-	1	1	1	<b>3</b>
$a_2$	0	-	1	1	<b>2</b>
$a_3$	0	0	-	1	<b>1</b>
$a_4$	0	0	0	-	<b>0</b>

Собственные таблицы  $W^m, m = 1, \dots, N$  с элементами  $\{w_{ij}^m, i, j = 1, \dots, n; i \neq j\}$  аналогичного типа таблицы 4.2 заполнялись всеми экспертами. По итогу обобщения экспертных мнений строилась суммарная матрица парных сравнений  $W^\Sigma$  с элементами  $\{w_{ij}^\Sigma, i, j = 1, \dots, n; i \neq j\}$ . Данные элементы определяются по формуле:

$$w_{ij}^\Sigma = \sum_{m=1}^N w_{ij}^m \quad (4.9)$$

В связи с этим, вычисление  $w_{ij}^{\Sigma}$  осуществляется из расчета числа случаев, при которых участники экспертной группы определяли альтернативу  $a_i$  как наиболее предпочтительную, чем  $a_j$ . Следовательно, определение числа экспертов, оценивших альтернативу  $a_j$  как более предпочтительную осуществляется по формуле:

$$w_{ji}^{\Sigma} = N - w_{ij}^{\Sigma} \quad (4.10)$$

Следующим шагом осуществлялось нормирование матрицы  $w_{ij}^{\Sigma}$ . Элементы нормированной матрицы  $w_{ijnorm}^{\Sigma}$  выражают долю случаев, при которых альтернатива  $a_i$  оказалась наиболее предпочтительнее:

$$w_{ijnorm}^{\Sigma} = \frac{1}{N} w_{ij}^{\Sigma}, i, j = 1, \dots, n; i \quad (4.11)$$

Оценку предпочтительности конкретной альтернативы можно рассматривать как его суммарную относительную предпочтительность:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_{ijnorm}^{\Sigma}, i = 1, \dots, n \quad (4.12)$$

Или как нормированную предпочтительность:

$$r_{inorm} = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}, i = 1, \dots, n \quad (4.13)$$

Сравнение различных вариантов отображения статической ГИ ВСС участниками экспертной группы осуществлялось по результатам проведения тестовых сценариев. Данные сценарии формировались с учетом определенных в настоящем исследовании оценочных критериев. Далее частично приведен перечень тестовых сценариев, позволяющий экспертной группе взаимодействовать с альтернативами ГИ и выставлять оценки:

- оценить субъективную удовлетворенность визуальных элементов на СОИ (в данной оценке предлагаются альтернативы с унифицированными свойствами ГИ и с отсутствием данного принципа; спроектированные по с учетом пропорции сторон «1.6» и с иными значениями);

- оценить субъективную удовлетворенность текстовой информации (коды, сокращения, аббревиатуры);
- оценить субъективную удовлетворенность количества подсказок;
- оценить субъективную удовлетворенность способов подсказок;
- на этапе предварительной подготовки задать активный план полета из аэропорта вылета «UUEE» в аэропорт прилета «UDD»;
- на этапе предварительной подготовки задать маршрут пилота (был заранее загружен в базу данных пилота) из аэропорта вылета «ULLI» в аэропорт прилета «UUBW»;
- на этапе предварительной подготовки добавить пункты маршрута «TURAL», «ROPAM» в активный план полета;
- на этапе предварительной подготовки изменить значение скорости принятия решения при взлете «V1» удалив предыдущее;
- на этапе предварительной подготовки изменить положение закрылков на посадке путем изменения их конфигурации;
- на этапе предварительной подготовки осуществить переход по всем навигационным вкладкам меню;
- на этапе предварительной подготовки найти визуальный элемент ввода «CRZ ALT» для задачи вертикальной навигации;
- на этапе предварительной подготовки задать все весовые параметры для расчета топливо-временной задачи.

Во время проведения экспертизы регистрировались значения показателей, позволяющие оценить эргономичность ГИ с ней, в т. ч. насколько оператору эффективно взаимодействовать с ГИ с точки зрения когнитивной, моторной и визуальной нагрузок. В перечень данных показателей вошли – затраченное время на выполнение полетных задач (тестовых сценариев), количество совершенных пилотом моторных ошибок, а также проводилось интервью с каждым членом экспертной

группой о субъективной удовлетворенности альтернативой. Данные показатели являются ключевыми в обеспечении безопасности полета, так как позволяют выявлять потенциальные риски, связанные с взаимодействием пилотов с ГИ. Например, информационно перенагруженная или интуитивно непонятная статическая ГИ может замедлить реакцию пилота на аварийную ситуацию или на экстренную команду от диспетчера, что может привести к серьезным последствиям. В перечень тестовых сценариев входили ситуации, требующие срочных ответных действий со стороны экипажа с графическим функционалом ВСС, позволяя наложить на эксперта дополнительную нагрузку в виде ограничения времени на выполнения задания. Частичный перечень данных сценариев представлен далее:

- в процессе имитации полета при получении команды от диспетчера экстренно осуществить формирование зоны ожидания на ближайшую точку плана полета;
- в процессе имитации полета при получении команды от диспетчера экстренно осуществить спрямление на точку вне плана полета «DMD»;
- в процессе имитации полета при получении команды от диспетчера экстренно осуществить смену эшелона на «FL150»;
- в процессе имитации полета при получении команды от диспетчера экстренно осуществить задание точки полета по координатам «N55.31.71E038.15.00»;
- в процессе имитации полета экстренно осуществить смену активного плана полета на вторичный;
- в процессе имитации полета экстренно осуществить задания режима прибытия в заданное время в заданную точку «UUWW».

Стоит отметить, что разработанные альтернативы статической ГИ формировались таким образом, чтобы пути выполнения одинаковых тестовых сценариев на всех альтернативах были различны в части сложности поиска необходимых элементов, количества способов взаимодействия со статическими элементами ГИ, их расположение и количество, свойства, наличия или отсутствия

визуальных надписей, наличия подсказок и т.д. Всего было задействовано 85 тестовых сценариев, позволяющие провести исследования альтернативных вариантов статической ГИ по перечню критериев. Полученные итоги эргономической экспертизы всех альтернативных вариантов приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Итоги эргономической экспертизы.

Место	Идентификатор альтернативы
1	GUIDF1
2	GUIDF2
3	GUIDF3
4	GUIDF4
5	GUIDF6
6	GUIDF5

В процессе эргономической экспертизы вычислялись коэффициенты конкордации по формуле 4.1 для определения согласованности экспертных мнений. Все показатели превышали порог, необходимый для сохранения экспертной группы без изменения.

По итогам экспертизы можно увидеть предпочтение альтернативного варианта исполнения с идентификатором «GUIDF1». Данное представление статической ГИ было определено как наиболее оптимальное и по результатам работы разработанной СППР без заранее введенных уверенных суждений ЛПР.

При анализе результатов сравнительной оценки работы СППР и экспертной группы можно заметить, что итоги совпадают в определении наилучшей альтернативы, а отличие заключается в распределении последних двух альтернативных вариантов «GUIDF5», «GUIDF6» между 5 и 6 местом. Помимо этого, в процессе использования разработанного решения исключены этапы формирования экспертной группы, анкетирование экспертов, анализ и интерпретация экспертного мнения, которые требуют значительных временных затрат. Временные затраты на сравнительную оценку с применением СППР составили ~ 12 минут. Эргономическая

экспертиза осуществлялась в течении 90 часов непрерывной работы на множестве имитационных стендах КБО (+10 часов на обработку ЭО и подготовку результатов).

В таблице 4.4 частично указаны показатели временных затрат и количества человеческих ошибок, получившихся по результатам проведенных испытаний на имитационных стендах КБО при условиях, требующих срочных действий экипажа в части манипуляций статической ГИ на наиболее нагруженном этапе полета – посадка ВС. Суммарное количество посадок ВС – 150 этапов.

Таблица 4.4. Показатели временных затрат и количества ошибок при взаимодействии с альтернативами статической ГИ.

Тестовый сценарий	Альтернатива	Среднее количество времени (сек)	Среднее количество ошибочных действий
в процессе имитации полета при получении команды от диспетчера экстренно осуществить формирование зоны ожидания на ближайшую точку плана полета	GUIDF1	64,9	3,5
	GUIDF2	100,3	5,2
	GUIDF3	132,2	7,6
	GUIDF4	153,1	8,5
	GUIDF5	175,2	9,1
	GUIDF6	159,7	8,7
в процессе имитации полета при получении команды от диспетчера экстренно осуществить спрямление на точку вне плана полета «DMD»	GUIDF1	42,1	6,1
	GUIDF2	65,1	9,8
	GUIDF3	89,2	11,7
	GUIDF4	191,1	13,5
	GUIDF5	149,3	14
	GUIDF6	138,7	15,1
в процессе имитации полета при получении команды от диспетчера	GUIDF1	18,1	3
	GUIDF2	26,7	4,9

экстренно осуществить смену эшелона на «FL150»	GUIDF3	39,4	6,1
	GUIDF4	44,5	6,9
	GUIDF5	57,5	7,8
	GUIDF6	55,2	7,4
в процессе имитации полета при получении команды от диспетчера экстренно осуществить задание точки полета по координатам «N55.31.71E038.15.00»	GUIDF1	92,2	12,1
	GUIDF2	148,9	16,8
	GUIDF3	168,2	18,1
	GUIDF4	191,7	23,3
	GUIDF5	212,9	28,1
	GUIDF6	209,7	27,4
в процессе имитации полета экстренно осуществить смену активного плана полета на вторичный	GUIDF1	11,2	3
	GUIDF2	19,1	4,7
	GUIDF3	22,1	6,9
	GUIDF4	26,2	8,4
	GUIDF5	30,7	11,4
	GUIDF6	33,2	9,9
в процессе имитации полета экстренно осуществить задания режима прибытия в заданное время в заданную точку «UUWW»	GUIDF1	120,2	18,1
	GUIDF2	187,8	26,9
	GUIDF3	221,7	34
	GUIDF4	256,2	41,1
	GUIDF5	292,4	55,2
	GUIDF6	270,3	48,8

По результатам анализа количества затраченного времени и ошибочных действий пилотов при взаимодействии со статической ГИ в процессе посадки ВС было выявлено, что наилучшая альтернатива «GUIDF1» позволила сократить временные затраты на выполнение команды от диспетчера по сравнению со следующей расположившейся альтернативой «GUIDF2» на 54%, 55%, 48%, 60%, 70%,

56% и ошибочные действия на 50%, 60%, 63%, 39%, 56%, 48% (по 6 выборочным сценариям). Проведенные интервью подтвердили наибольшую субъективную удовлетворенность участников экспертной группы в альтернативе «GUIDF1».

Таким образом, предложенное решение выявило альтернативу статической ГИ, которая позволила сократить временные затраты, а также уменьшить количество ошибочных действий при выполнении полетных задач по сравнению с остальными. Уменьшение количества ошибочных действий снижает риск возникновения нештатных ситуаций в полете. Каждая ошибка увеличивает вероятность аварийной ситуации, поэтому снижение их количества напрямую связано с увеличением безопасности полета. Быстрое и эффективное выполнение полетного задания также способствует повышению безопасности полета. Чем быстрее пилоты реагируют на изменение условий полета, тем больше шансов избежать аварийной ситуации или минимизировать ее последствия. Кроме того, быстрая реакция и выполнение необходимых маневров позволяет экономить ресурсы (например, топливо), что также положительно сказывается на безопасности полета.

Объединив оба фактора, можно сделать вывод, что сокращение ошибочных действий пилотов и временных затрат на выполнение полетного задания повышает уровень безопасности полета за счет уменьшения риска возникновения аварийных ситуаций по причине моторных ошибок, повышению готовности к чрезвычайным ситуациям, снижению нагрузки на пилотов (уменьшение стресса и усталости), что также скажется на точности пилотирования ВС.

### **4.3 Выводы по Главе 4**

Для подтверждения эффективности предложенного решения проведена дополнительная эргономическая экспертиза с участием высококвалифицированных экспертов по выявлению наилучшего решения статической ГИ среди множества альтернативных вариантов. Результаты данной экспертизы совпали с полученными результатами СППР по автоматизированному определению наилучшей альтернативы на основании эргономической оценки эффективности и в большинстве совпали по

приоритизации всего множества альтернатив. Выявленная альтернатива позволила сократить временные затраты и количество ошибочных действий пилотов при взаимодействии со статической ГИ бортовой системы ВСС в процессе выполнения полетного задания на наиболее нагруженном этапе полета – посадка ВС.

Помимо этого, применение разработанной СППР по сравнению с наиболее часто используемым на практике экспертным методом позволило сократить временные ресурсы на эргономическую оценку и выявление наилучшей альтернативы. Совокупное время на указанные задачи сократилось более чем на 90% за счет отсутствия необходимости формирования экспертной группы, анкетирования, сбора и обработки ЭО. Необходимо выделить, что оценка эффективности и верификация статической ГИ бортовых систем должны осуществляться на сертифицированных стендах КБО, которые ограничены в количестве, а также могут быть заняты другими специалистами, что будет требовать дополнительных временных затрат на проведение исследования, которые на практике могут быть ограничены из-за производственной необходимости.

Стоит учитывать, что на результаты экспертизы могут повлиять психофизиологические способности экспертов (усталость, стресс и т. д.). Данные особенности не распространяются на предложенную СППР, тем самым точность и качество ее вычислений всегда одинаково высокие. Помимо этого, предложенное решение позволило сократить количество до одного человека (оператора СППР).

Таким образом, предложенное решение является эффективным способом повышения уровня безопасности полетов за счет определения наилучшей альтернативы статической ГИ по результатам эргономической оценки, так как:

1. выявило аналогичную альтернативу, которой отдали предпочтения эксперты (оценки которых на практике являются ключевыми), позволяющую сократить временные затраты и количество ошибочных действий у пилотов при взаимодействии со статической ГИ;

2. повысило скорость принятия решение в задачах сравнительной оценки за счет снижения времени на этапы получения ЭО;
3. повысило надежность итоговых результатов и снизило их погрешность за счет уменьшения субъективного влияния на сравнительную оценку.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Далее приведены основные результаты и выводы, полученные в ходе диссертационного исследования:

1. Проведен анализ современных бортовых СОИ и предъявляемых к ним эргономических требований.
2. Проанализированы современные подходы, методы и средства эргономической оценки статической ГИ бортовых систем.
3. Разработана архитектура СППР, обеспечивающая автоматизированную комплексную эргономическую оценку статической ГИ бортовых систем и поддержку принятия решения ЛПР по определению наилучшего варианта и приоритизации всего множества альтернатив.
4. По результатам сравнительного анализа существующих критериев эргономической оценки выявлены формализованные показатели для комплексной оценки эффективности статической ГИ; предложены критерии оценки унификации визуальных свойств и учета психологических принципов при проектировании ГИ.
5. Разработаны методическое и алгоритмическое обеспечение комплексной эргономической оценки эффективности статической ГИ по независимым направлениям: визуальные характеристики, пространственно-временные характеристики, учет психологических принципов при проектировании ГИ, в т. ч. описаны их функции.
6. Проведен сравнительный обзор часто применяемых методов поддержки принятия решения. По результатам обзора предложен метод уверенных суждений в качестве основного для поддержки принятия решения.
7. Разработано методическое и алгоритмическое обеспечение поддержки принятия решения для задач сравнительной оценки в части определения наилучшей альтернативы, а также приоритизации существующего множества альтернатив.
8. Разработаны алгоритмы, реализующие шаги модулей предложенной СППР.

9. Разработано ПО, реализующее разработанные алгоритмы и позволяющее моделировать работу СППР.

10. Проведено тестирование разработанной СППР на 6 альтернативах статической ГИ, подтвердившее ее адекватность и работоспособность.

11. Проведена оценка эффективности предложенного решения, по результатам которой выявлено, что данное решение определило альтернативу статической ГИ, позволяющую сократить временные затраты и количество ошибочных действий у пилотов при взаимодействии с ГИ в процессе выполнения полетного задания, а также сократить временные затраты на задачи сравнительной оценки, увеличить точность и уменьшить погрешность результатов за счет снижения субъективного влияния на них.

12. Результаты диссертационной работы внедрены в работу филиала ПАО «Яковлев» – Центр комплексирования по проекту «Разработка комплекса бортового радиоэлектронного оборудования самолета МС-21», ООО «ДС «БАРС» по проекту «Разработка комплекса бортового оборудования для среднемагистрального самолета SJ-100» и в учебный процесс кафедры 703 «Системное проектирование авиакomплексов» Института № 7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» МАИ, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

- 3D – Трехмерное пространство (англ. – Three Dimensional)
- ARINC – Корпорация «Авиационное радио», разрабатывающая стандарты авиационных интерфейсов (англ. – Aeronautical Radio, Incorporated)
- CHKL – Кадр контрольных проверок (англ. – Checklists)
- ELECTRE – Метод «Исключение и выбор, отражающие реальность» (англ. – Elimination Et Choix Traduisant la Realite)
- EWD – Кадр отображения параметров двигателя и предупреждающих сообщений (англ. – Engine and Warning Display)
- FMS VCP – Виртуальный пульт управления системой самолетовождения (англ. – Flight Management System Virtual Control Panel)
- HIS – Индикатор горизонтальной обстановки (англ. – Horizontal Situation Indicator)
- ISO – Международная организация по стандартизации (англ. – International Organization for Standardization)
- MAUT – Метод «Многокритериальная теория полезности» (англ. – Multi-Attribute Utility Theory)
- ND – Навигационный дисплей (англ. – Navigation display)
- PDF – Межплатформенный открытый формат электронных документов (англ. – Portable Document Format)
- PFD – Основной пилотажный кадр (англ. – Primary Flight Display)
- RMS VCP – Виртуальный пульт управления радиосредствами (англ. – Radio Management System Virtual Control Panel)
- STATUS – Кадр со сводной информацией о состоянии самолетных систем (англ. – STATUS)
- SYN – Синоптические навигационные кадры (англ. – Synoptics)

XML	– Формат расширяемого языка разметки для создания, хранения и передачи структурированных данных (англ. – eXtensible Markup Language)
ВИУЭ	– Визуальный информационно-управляющий элемент
ВСС	– Вычислительная система самолетовождения
ВС	– Воздушное судно
ГИ	– Графическая информация
ГОСТ	– Государственный стандарт
ЖЦ	– Жизненный цикл
ИД	– Исходные данные
ИКАО	– Международная организация гражданской авиации
ИН	– Показатель «непротиворечивости»
ИУП	– Информационно-управляющее поле
КБО	– Комплекс бортового оборудования
КДК	– Контрольно-диагностические комплексы
КПП	– Контрольный проверочный перечень вопросов
ЛПР	– Лицо, принимающее решение
ЛТХ	– Летно-технические характеристики
МАИ	– Метод анализа иерархий
МОП	– Модельно-ориентированный подход
МППР	– Модуль поддержки принятия решения
МУС	– Метод уверенных суждений
МФИ	– Многофункциональный индикатор
ОН	– Показатель «Индекс относительной непротиворечивости»
ПК	– Персональный компьютер
ПО	– Программное обеспечение
ПП	– Пользовательское приложение (
СН	– Показатель «Индекс случайной непротиворечивости»

СОИ	– Система отображения информации
СППР	– Система поддержки принятия решения
СТС	– Сложная техническая система
ФО	– Файл определения
ЧСС	– Частота сердечных сокращений
ЭО	– Экспертные оценки

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Артемов А.Д., Лысаков Н.Д., Лысакова Е.Н. Человеческий фактор в эксплуатации авиационной техники. Монография. 2018.
2. Лысаков Н. Д. Психологические аспекты Человеческого фактора в авиации // Вестник университета. 2014. № 2. С. 250-253.
3. Лысаков Н. Д. Психология Человеческого фактора в авиации // Человеческий капитал. 2013. № 9 (57). С. 109-112.
4. Иванов, А. С. Развитие информационного-управляющего поля кабин самолетов транспортной категории в части решения проблем взаимодействия с экипажем // «Гагаринские чтения – 2021»: Сборник тезисов докладов. – Москва. – М.: МАИ – 2020. – с. 171-172.
5. Кузнецов, И.Б. Экспериментальные исследования зрительной деятельности пилота при пилотировании ВС с электронной системой отображения информации / И.Б. Кузнецов // Научный вестник МГТУ ГА. - №172. - 2011. - С. 122-128.
6. Силин Н.Д., Берсуцкая О.Д., Неретин Е.С. Применение принципов психологического восприятия визуальной информации при проектировании и валидации графической составляющей человеко-машинного интерфейса системы самолетовождения объектов гражданской авиационной техники // Навигация и управление летательными аппаратами, 2023, № 40, с 12 – 36.
7. Силин Н.Д. Разработка человеко-машинного интерфейса комплекса бортового оборудования перспективных объектов авиационной техники в соответствии с принципами Гештальт-теории // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLVII Гагаринские чтения, 12-15 апреля 2022 г. С. 413-415.
8. Силин Н.Д. Оценка эффективности эргономики человеко-машинного интерфейса объектов авиационной техники по критерию цветовой унификации //

Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLVII Гагаринские чтения 2021. – М.: Издательство «Перо», 2021. С. 737-738.

9. Силин Н.Д. Оптимизация цветового оформления систем электронной индикации человеко-машинного интерфейса для гражданских самолетов транспортной категории // 20-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 22-26 ноября 2021 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2021. С. 394–396.

10. Силин Н.Д., Берсуцкая О.Д., Неретин Е.С. Учет психологических аспектов зрительного восприятия при разработке системы самолетовождения гражданских воздушных судов // Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации». Том 1. 13-14 октября 2022 г. – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2022. С. 194–198.

11. Голубев С. И. Малышев В. В., Пиявский С. А., Сыпало К. И. Принятие решений в многокритериальных задачах на этапе обликowego проектирования авиационно-ракетной техники. Известия РАН. Теория и системы управления, 2020, № 2, с. 89–97.

12. Клюев, Г.И. и др. Авиационные приборы и системы: Учебное пособие / Г.И. Клюев, Н.Н. Макаров, В.М. Солдаткин; под ред. В.А. Мишина. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 343 с.

13. Торрес Р.Дж. Практическое руководство по проектированию и разработке пользовательского интерфейса: Пер. с англ. - М.: Вильямс, 2002.

14. Электронный ресурс. Головач В. Дизайн Пользовательского Интерфейса. - М., 2001. - 147 с. - издание в формате PDF. - С. 80-84.

15. Мандел Т. Разработка пользовательского интерфейса. - М.: ДМК Пресс, 2001. – 416 с. -ISBN 5-94074-069-3. -С. 5-18.

16. Эндрю ван Дам Пользовательские интерфейсы нового поколения // Открытие системы. - М.: Открытые системы, - 1996. - №6. - С.34-37

17. Silin N, Ivanov A. Development of the Perspective Aircraft Cockpit Indication System Simulator // Springer Nature: Lecture Notes in Mechanical Engineering. «Proceedings of 10th International Conference on Recent Advances in Civil Aviation», 20 October 2022. – pp 135-144.

18. ГОСТ Р ИСО 9241-20-2014 Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 20. Руководство по доступности оборудования и услуг в области информационно-коммуникационных технологий. – М.: Стандартинформ, 2015. – 44 с.

19. ГОСТ Р ИСО 14915-1-2016. Эргономика мультимедийных пользовательских интерфейсов. Часть 1. Принципы проектирования и структура. – М.: Стандартинформ, 2016. – 13 с.

20. ISO 14915-1: Software ergonomics for multimedia user interfaces – Part 1: Design principles and frame-work.

21. ISO 14915-2:2003 Software ergonomics for multimedia user interfaces – Part 2: Multimedia navigation and control.

22. ISO 14915-3:2002 Software ergonomics for multimedia user interfaces – Part 3: Media selection and combination.

23. ISO/TR 9241-100:2010 Ergonomics of human system interaction – Part 100: Introduction to standards related to software ergonomics.

24. ISO 9241-129:2010 Ergonomics of human system interaction – Part 129: Guidance on software individualization.

25. ISO 9241-143:2012 Ergonomics of human system interaction – Part 143: Forms/

26. ISO 9241-171:2008 Ergonomics of human-system interaction – Part 171: Guidance on software accessibility.

27. ISO/IEC 11581-10 Information technology user interface icons – Part 10: Framework and general guidance.

28. ГОСТ ИСО 9241-210–2012. НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. ЭРГОНОМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕК–

СИСТЕМА Часть 210. Человеко-ориентированное проектирование интерактивных систем. – М.: Стандартинформ, 2013. – 31 с.

29. ГОСТ Р ИСО 14915-1-2010. ЭРГНОМИКА МУЛЬТИМЕДИЙНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ. Часть 1. Принципы проектирования и структура. – М.: Стандартинформ, 2011. – 13 с.

30. ГОСТ Р ИСО 14915-2-2013. ЭРГНОМИКА МУЛЬТИМЕДИЙНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ. Часть 2. Навигация и управление мультимедийными средствами. – М.: Стандартинформ, 2016. – 31 с.

31. ИСО 14915-3. Эргономика мультимедийных пользовательских интерфейсов. Часть 3. Выбор и комбинация форм представления информации. – М.: Стандартинформ, 2014. – 44 с.

32. ГОСТ Р ИСО 9241-110-2009. ЭРГНОМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕК–СИСТЕМА. Часть 110. Принципы организации диалога. – М.: Стандартинформ, 2010. – 23 с.

33. ГОСТ Р ИСО 20282-1-2011. ЭРГНОМИКА ИЗДЕЛИЙ ПОВСЕДНЕВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ Часть 1. Требования к конструкции элементов управления с учетом условий использования и характеристик пользователя. – М.: Стандартинформ, 2012. – 23 с.

34. ГОСТ Р 54410-2011/ISO/IEC TR 19766:2007. НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. Рекомендации по дизайну графических значков и символов, доступных всем пользователям, включая граждан пожилого возраста и лиц с ограничениями жизнедеятельности. – М.: Стандартинформ, 2018. – 13 с.

35. ИСО/МЭК ТО 11580. Информационные технологии. Структура описания объектов, действий и атрибутов пользовательского интерфейса. – М.: Стандартинформ, 2013. – 13 с.

36. ИСО 9241-14. Эргономические требования, связанные с использованием видеотерминалов для учрежденческих работ. Часть 14. Диалоги типа выбора меню. – М.: Стандартиформ, 1997. – 114 с.

37. ICAO Doc 9806-2002 HUMAN FACTORS GUIDELINES FOR SAFETY AUDITS MANUAL РУКОВОДСТВО ПО ФАКТОРАМ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ РУКОВОДСТВА ПО АУДИТУ БЕЗОПАСНОСТИ

38. Руководство Р-25-11А по сертификации систем электронной индикации самолетов транспортной категории [Текст]. – М.: АР МАК, 2009. – 69 с.

39. Психология труда, инженерная психология и эргономика-2014: тр. Междунар. науч.-практич. конф. СПб: Межрегион. эргономич. ассоц., 2014.

40. Силин Н.Д., Берсуцкая О.Д. Возможные методы предотвращения и обнаружения ошибок проектирования систем индикации в части представления графической информации // Сборник аннотаций конкурсных работ XIV Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». 21-25 ноября 2022 г. С. 149.

41. Силин Н.Д., Берсуцкая О.Д. Необходимые пути развития методологий обнаружения ошибок проектирования при создании систем индикации // 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 21-25 ноября 2022 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2022 – С. 369-370.

42. Силин Н.Д. Иванов А.С. Оценка использования цветового решения при проектировании человеко-машинного интерфейса объектов гражданской авиационной техники // 13-й Всероссийский конкурс «Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2021». 23-26 ноября 2021 года. Сборник аннотаций конкурсных работ. – М.: Издательство Перо, 2021. – С. 156-157

43. Грешников И.И., Златомрежев В.И. Использование передовых технологий для оптимизации информационно-управляющего поля кабины

перспективного самолета / XVIII Всерос. науч. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение». М.: МГППУ, 2020.

44. Грешников И.И., Златомрежев В.И. Перспективное информационно-управляющее поле кабины, реализующее новые способы информационного обеспечения экипажа и управления информационным полем ВС // Сб. трудов V Междунар. науч.-практ. конф. «Перспективные направления развития бортового оборудования гражданских воздушных судов». М.: ФГУП «ГосНИИАС», 2019. С. 77-87.

45. Poisson R.J. Spatial Disorientation: Past, Present and Future. Ohio, USA, 2014. P. 72.

46. Lee B.G.; Myung R. Attitude Indicator Design and Reference Frame Effects on Unusual Attitude Recoveries, 2013. Pp. 63-90.

47. Силин Н.Д., Иванов А. С., Воронцов Т. П. Имитационный комплекс системы индикации перспективного гражданского самолета для ранней валидации эргономических решений, внешнего вида и логики индикации // 13-й Всероссийский конкурс «Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2021». 23-26 ноября 2021 года. Сборник аннотаций конкурсных работ. – М.: Издательство Перо, 2021. – С. 145.

48. Силин Н.Д., Иванов А. С. Разработка имитационного комплекса системы индикации перспективного гражданского самолета // Сборник трудов X Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации», Том 1, Иркутск, Иркутский филиал МГТУ ГА, 14-15 октября 2021 г. – 213 – 220 с.

49. Силин Н.Д., Иванов А. С. Неретин Е.С. Разработка методики управления информационным полем кабины гражданского самолета // XI Национальная научно-техническая конференция «Союз машиностроителей России». 2022 г. С. 31 – 35.

50. Семенов С.С., Щербинин В.В. Оценка технического уровня систем наведения управляемых авиационных бомб. М: Машиностроение, 2015. – 326 с.

51. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Экспертные оценки. М.: Наука, 1973. 160 с.

52. Райхман Э.П., Азгальдов Г.Г. Экспертные методы в оценке качества товара. М.: Экономика, 1974. 189 с.
53. Литвак Б.Г. Экспертная информация: методы получения и анализа. Монография. 2-е изд., стереотип. М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2009. 225 с.
54. Кендал М. Ранговые корреляции: пер. с англ./ Пер. Б.Г. Микрина. М.: Статистика, 1975. 216 с.
55. Руководство Р-4754А по разработке воздушных судов гражданской авиации и систем [Текст]. – М.: АР МАК, 2016. – 131 с.
56. Буздалов, Д. В. Инструментальные средства проектирования систем интегрированной модульной авионики [Текст] / Зеленов С. В., Корныхин Е. В., Петренко А. К. [и др.] // Труды Института системного программирования РАН. – М.: ИСП РАН, 2014. – Т. 26, №1. – С. 201-230.
57. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования [Текст]. – Введ. 2003-06-05; с изм. 2014-03-01. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 42 с.
58. ARINC Specification 429P1-17. MARK 33 Digital Information Transfer System (DITS). Part 1: Functional Description, Electrical Interface, Label Assignments and Word Formats [Text]. – The USA: Annapolis, ARINC, 2004. – 309 p.
59. ARINC Specification 664P1-1. Aircraft Data Network. Part 1: Systems Concepts and Overview [Text]. – The USA: Annapolis, ARINC, 2006. – 51 p.
60. ARINC Specification 825-2. General Standardization of CAN (Controller Area Network) Bus Protocol for Airborne Use [Text]. – The USA: Annapolis, ARINC, 2011. – 170 p.
61. КТ-178С. Квалификационные требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники [Текст]. – М.: АР МАК, 2016. – 106 с.

62. DO-178C Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification. – The USA: Washington. – 2011. – 144 p.

63. Яценко А.Н. Разработка эргономических предложений к электронной индикации пилотажно-навигационных параметров на перспективных и модернизируемых вертолетах // Труды МАИ, 2010. N 38. С. 4.

64. ANSYS SCADE Model-Based Development Solutions for Aerospace & Defense. ANSYS [Электронный ресурс]. URL: <https://s3-ap-southeast-2.amazonaws.com/public-leapaust/resources/SCADE-Solutions-for-Aerospace-Defense.pdf>, свободный (дата обращения: 18.05.2024).

65. ARINC specification 661-6. Cockpit Display System Interfaces to User Systems [Text]. – The USA: Annapolis, ARINC, 2002. – 651 p.

66. Model Based Design for Airbus A380 Fuel System Development [Электронный ресурс]. URL: [https://it.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/solutions/aerospace-defense/files/2010/Airbus\\_MBDC\\_2010.pdf](https://it.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/solutions/aerospace-defense/files/2010/Airbus_MBDC_2010.pdf), свободный (дата обращения: 18.05.2024).

67. Барабанщиков В.А., Жегалло А.В. Регистрация и анализ направленности взора человека. М.: Ин-т психологии РАН, 2013. 316 с.

68. Левин Д.Н. Методы оценки рабочего места экипажа в процессе проектирования кабины перспективного авиационного комплекса // Computational Nanotechnology, 2019. Т. 6. N 2. С. 95-100. DOI: 10.33693/2313-223X-2019-6-2-95-1.

69. Белов С.В., Симакова Е.Н. Ноксология: учебник и практикум для бакалавров; под общ. Ред. Белова С.В. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2014. – 451 с. – Серия: Бакалавр, Базовый курс.

70. ICAO Abbreviations and Codes. 8 th Edition [Text]. – Canada: Montreal, ICAO, 2010. – 83 p.

71. Руководство Р-330 по квалификации программных инструментов [Текст]. – М.: АР МАК, 2016. – 118 с.

72. Стародубцев А. А. Система поддержки принятия решений. Актуальные проблемы авиации и космонавтики – 2016. Том 2. С. 99 – 101.
73. Уэйншенк, С. 100 главных принципов дизайна. Как удержать внимание / С. Уэйншенк. – СПб.: Питер, 2011. – 272 с.
74. Уэйншенк, С. 100 новых главных принципов дизайна. Как удержать внимание / С. Уэйншенк. – СПб.: Питер, 2016. – 290 с.
75. Уэйншенк, С. Интуитивный веб-дизайн / С. Уэйншенк. – СПб.: Эскмо, 2011. – 160 с.
76. Головач, В.В. Дизайн пользовательского интерфейса / В.В. Головач. – СПб.: v 1.2. Uibook1, 2014. – 141 с.
77. Головач, В.В. Дизайн пользовательского интерфейса / В.В. Головач. – СПб.: Usethics, 2008. – 97 с.
78. Емельянова, Ю.Г. Методы комплексного оценивания когнитивных графических образов / Ю.Г. Емельянова, В.П. Фраленко, В.М. Хачумов // Программные системы: Теория и приложения. – 2018. – № 3. – С. 49-63.
79. Емельянова, Ю.Г. Алгоритмическое и программное обеспечение человеко-машинных интерфейсов с когнитивно-графическим отображением информации для систем космического назначения: дис. канд. тех. наук: 05.13.11/Емельянова Юлия Геннадиевна. – СПб., 2020. – 194 с.
80. Алефиренко, В.М. Инженерная психология / В.М. Алефиренко, Ю.В. Шамгин. – Минск: БГУИР, 2005. – 13 с.
81. Раскин, Д. Интерфейс Новые направления в проектировании компьютерных систем / Д. Раскин. – М.: Символ, 2007. – 257 с.
82. Shannon, C.E. A mathematical theory of communication / C.E. Shannon // Bell System Technical Journal, 1948. – PP. 379–423.
83. Харкевич, А.А. Проблемы кибернетики / А.А. Харкевич. – М.: Физматгиз, 1960. – 57 с.

84. Park, K.S. Human Reliability: Analysis, Prediction, and Prevention of Human Errors / K.S. Park. – Elsevier. New York, 1987. – 340 p.
85. Hartley, V.L. Transmission of information / V.L. Hartley // Bell System Technical Journal. – 1928. – PP. 535-563.
86. Горячкин Б.С. Оценка выходных экранных форм автоматизированной системы обработки информации и управления / Б.С. Горячкин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 10. – С. 24-27.
87. Диковицкий, В.В. Формализация задачи построения когнитивных пользовательских интерфейсов мульти предметных ИР / В.В. Диковицкий // Информационные технологии. – 2013. – № 5. – С. 90-97.
88. Stickel, C. The XAOS metric — understanding visual complexity as measure of usability / C. Stickel, M. Ebner, A. Holzinger. // 6th Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering on HCI in Work and Learning, Life and Leisure. – 2010. – PP. 278-290.
89. Fitts, P.M. The information capacity of the human motor system in controlling / P.M. Fitts // Journal of Experimental Psychology. – 1954. – Vol. 47(6). – PP. 381–391.
90. Оксанич, И.Н. Модель декомпозиции ментальных операторов в проблемно ориентированном интерфейсе пользователя и ее экспериментальное исследование / И.Н. Оксанич // Математические машины и системы. – 2010. – № 1. – С. 105-112.
91. Звенигородский, А.С. Оценка визуальной информации в технических системах / А.С. Звенигородский, О.А. Коломыйцев // Искусственный интеллект. – 2011. – № 4. – С. 19-23.
92. Вострых А. В. Методика комплексной оценки эффективности графических пользовательских интерфейсов информационных систем МЧС России: дис. канд. тех. наук: 05.25.05/Вострых Алексей Владимирович. – СПб., 2021. – 199 с.
93. Силин Н.Д. Подход к решению задачи многокритериального выбора графической составляющей человеко-машинных интерфейсов для перспективного

комплекса бортового оборудования // Навигация и управление летательными аппаратами – 2024, № 45, с 18 – 34.

94. Силин Н.Д. Подход к проведению эргономической оценки в части графических свойств визуальных информационно-управляющих элементов в составе системы отображения информации бортового оборудования // Навигация и управление летательными аппаратами – 2024, № 46, с 37 – 54.

95. Горюнова Л.Н. Операторская деятельность в человекотехнических системах. Учебное пособие. СПб.: СПбГУ, 2006. 68 с.

96. Анохин А.Н., Ивкин А.С. Визуальная поддержка когнитивной деятельности операторов АЭС на примере представления состояния барабанасепаратора на АЭС с РБМК // Безопасность АЭС и подготовка кадров 2013: Сборник трудов XIII Международной конференции. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2013. С. 18-24.

97. Гингер. С. - Гештальттерапия контакта, 1999.

98. Горячкин Б.С. Эргономическое обеспечение АСОИУ: Научные материалы МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М.

99. Hick, W.E. On the rate of gain of information / W.E. Hick // Quarterly Journal of Experimental Psychology. – 1952. – № 4. – PP. 11–26.

100. Comber T., Maltby J.R. Investigating Layout Complexity // Design, specification, and verification of interactive systems '96: proceedings of the Eurographics Workshop in Namur. Belgium, Springer, Wien; New York, 1996. 15 p. URL: [http://epubs.scu.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=comm\\_pubs](http://epubs.scu.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=comm_pubs) (дата обращения: 20.05.2024).

101. Шупейко И.Г. Теория и практика инженерно-психологического проектирования экспертизы. Учебно-методическое пособие. Минск: БГУИР, 2010.120 с. ISBN 978-985-488-511 -7.

102. Вичевская Ю.А., Мурынов А.И. Структурный анализ изображений на основе использования функции информативности // Альманах современной науки и образования. Тамбов: Грамота, 2010. № 4 (35). С. 53-55.
103. Кузнецов Л.А., Бугаков Д.А. Разработка меры оценки информационного расстояния между графическими объектами // Информационно-измерительные системы. 2013. № 1. С. 74-79.
104. Купер, А. Основы проектирования взаимодействия / А. Купер, Р. Рейман, Д. Кронин. – М.: Символ, 2010. – 688 с.
105. Литвинов В. А., Майстренко С. Я., Оксанич И. Н. Трудоемкость интерфейса пользователя в задаче поиска образца в справочнике и ее оценка на основе модели GOMS. Математические модели и системы, 2009, № 3, с. 120 – 125.
106. ГОСТ Р 25010-2015 Информационные технологии (ИТ). Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения. Модели качества систем и ПП. – М.: Стандартинформ, 2015. – 36 с.
107. Сергеев С.Ф. Введение в инженерную психологию и эргономику иммерсивных сред: Учебное пособие. – СПб: Изд-во СпбГУ ИТМО, 2011. С. 258
108. Gunderloy M. Developer to Designer: GUI Design for the Busy Developer. - USA, Alameda, CA: SYBEX Inc, 2005. - ISBN: 0-7821-4361-X - С.3
109. Бобронников В.Т. Системный анализ в инженерных исследованиях: Учеб. Пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2018. – 144 с.: ил.
110. Оптнер С.А. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. – М.: Сов. Радио, 1969. – 216 с.
111. Семенов С.С., Полтавский А.В, Маклаков В.В., Крянев А.В. Обзор методов принятия решений при разработке сложных технических систем. - Функциональная надежность. Теория и практика. – 72-84 с.
112. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах. – М.: Логос, 2000. – 296 с.

113. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Системный анализ стратегических решений в инноватике. Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций. – М. Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 304 с.
114. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. – М.: «Финансы и статистика», 2000. – 368 с.
115. Малышев В.В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления / В.В. Малышев – М: Изд. МАИ-ПРИНТ, 2010 г. – 440 с.
116. Малышев В.В., Пиявский Б.С., Пиявский С.А. Метод принятия решений в условиях многообразия способов учета неопределенности. // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010, № 1, с. 46–61.
117. James S. Dyer, José Rui Figueira, Salvatore Greco. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. 2005. с.265-292.
118. Паркинсон С. Н. Закон Паркинсона. М.: Прогресс, 1989.
119. Ларичев О. И., Павлова Л. И., Осипова Е. А. Многокритериальные задачи сконструируемыми вариантами решений при ограниченных ресурсах// Проблемы и методы принятия уникальных и повторяющихся решений / Под ред. С. В. Емельянова, О. И. Ларичева: Сб. тр. ВНИИСИ.М.,1990. № 10.
120. Климовский И. А. Рекомендации для лиц, которые принимают решения в рамках теории МАУТ / И. А. Климовский // Новая наука как результат инновационного развития общества: сборник материалов Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 47-79.
121. Попова Е. В., Замотайлова Д. А., Коляда В. В., Горкавой П. Г. Многокритериальный анализ альтернатив в решении задач по управлению человеческими ресурсами. Научный журнал КубГАУ, №153(09), 2019 г.
122. Булгак А.С. Дескриптивная модель работы диспетчера полиграфического предприятия // Системы и методы поддержки принятия решений / Под ред. С. В. Емельянова, О. И. Ларичева: Сб. тр. ВНИИСИ.М.,1986, № 12.

123. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982.
124. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений / О.И. Ларичев – М: Наука, 2006, 181 с.
125. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т.Л. Саати – М: Радио и связь, 1993 – 287 с.
126. Подиновский В.В., Подиновская О.В. Еще раз о некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2012. № 4. С. 75-78.
127. Кравченко Т.К., Середенко Н.Н. Выделение признаков классификации систем поддержки принятия решений // Открытое образование, 2010. № 4. С. 71-78.
128. Рудзейт О. Ю., Жигульский В. Е., Титанов В. М. Применение метода анализа иерархий для оценки типа серверного оборудования // Молодой ученый. - 2018. - №11. - С. 49-53.
129. Горлач, Б.А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация. - СПб.: Лань, 2016. - 292 с.
130. Китаев М.В, Новосельцев И.А, Староверова В.А. Решение задачи оптимизации характеристик судна методом последовательных уступок. Вестник инженерной школы ДВФУ. 2023. № 1(54), с. 50-57.
131. Соколов В.П. Постановка задач экономического обоснования судов. Ленинград: Судостроение, 1987. 162 с
132. Кузнецов М.А., Нгуен Т.У.Н. Использование методов ELECTRE в задачах принятия решения. Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии № 2 (10), 2010, с 40–46.
133. Кини Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х. РАйфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 287 с.
134. Figueira José, Vincent Mousseau, Bernard Roy. ELECTRE methods. In Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys, 2005, pp. 133-153.

135. Roy Bernard. Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle*. Vol. 2, i. 8, pp. 57-75.

136. Ларичев О. И. Качественные методы принятия решений / О. И. Ларичев, Е. М. Мошкович. – М.: Физматлит, 1996. – 167 с.

137. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев - М.: Наука, 1981 г. – 488 с.

138. Разумов Д. А. Разработка методики многокритериальной оценки проектов космических средств и систем. Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук. 2021 г, 128 с.

139. Фокин, А.А. Особенности применения метода Фишборна в задачах распределения летного ресурса / А.А. Фокин. — Текст: электронный // NovaInfo, 2020. — № 120 — С. 22-23 — URL: <https://novainfo.ru/article/18200> (дата обращения: 15.06.2024).

140. Шпак К. С. Оптимальная маршрутизация в мультисервисных компьютерных сетях с учетом требований качества обслуживания. Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020. Республиканская научно-практическая конференция, 28-29 октября 2020 г., Минск, Республика Беларусь.

141. Малышев В.В., Разумов Д.А. Решение задачи многокритериальной оценки проектных решений АСУ космодрома методом уверенных суждений. Информатика, вычислительная техника и управление, 2019, с. 78–82.

142. В. С. Брусов, П. О. Корчагин, В. В. Малышев, С. А. Пиявский. Расширенный метод «Уверенных суждений». Известия РАН. Теория и системы управления, 2020, №1, стр. 96–108.

143. Малышев В.В., Пиявский С.А. Метод «Уверенных суждений» при выборе многокритериальных решений. Известия РАН. Теория и системы управления, №5, 2015, с 90–101.

144. Пиявский С.А. Два новых понятия верхнего уровня в онтологии многокритериальной оптимизации. «Онтология проектирования» научный журнал, 1-2013. С 65-85.

145. Пиявский С.А. Простой и универсальный метод принятия решений в пространстве критериев “стоимость – эффективность” // Онтология проектирования. 2014. № 3 (10). С. 89–102.

146. Панов Д. В., Малышев В. В., Пиявский С. А., Ковков Д. В. Сравнительный многокритериальный анализ сложных технических и социальных систем в экономико-управленческом аспекте. Модернизация. Инновации. Развитие. 2016. Т.7. №2. С. 74-83.

147. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 2003. – 320 с.

148. Piyavsky SA, Brusov VS, Khvilon EA. Multipur-aircraft parameters optimization. Moscow: Mashi-nostroenie Publ.; 1974.

149. Шмигирилов С.Ю. Методология использования методов многокритериального анализа на примере выбора оптимальной архитектуры космического сегмента ГЛОНАСС // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования, 2021. Т. 22. № 3. С. 261-269.

150. Поляков В. Б. Архитектура перспективных комплексов управления бортовым оборудованием / В. Б. Поляков, Е. С. Неретин, А. С. Иванов, А. С. Будков, С. А. Дяченко, С. О. Дудкин // Электрон. журн. «Труды МАИ», №100, 2018.

151. ARINC Specification 661-5. Cockpit display system interfaces to user systems. – The USA: Annapolis. – 2013. – 563 p.

152. Y. Zheng, X. Y. Lei. Research and Implementation of Virtual Cockpit Panel Development Platform Based on ARINC 661 // Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. – Yantai, China. – 2014 – pp. 1-5.

153. Silin N, Ivanov A. Development of Guideliance on the use of Color Solution for Electronic Indication Systems when Designing Human-Machine Interface of Civil

Aircraft Objects // Springer Nature: Lecture Notes in Mechanical Engineering. «Proceedings of 10th International Conference on Recent Advances in Civil Aviation», 20 October 2022. – pp 145-155.

154. Силин Н.Д., Иванов А.С. Разработка рекомендаций по использованию цветового оформления для систем электронной индикации при проектировании человеко-машинного интерфейса объектов гражданской авиационной техники // Сборник трудов X Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации», Том 1, Иркутск, Иркутский филиал МГТУ ГА, 14-15 октября 2021 г. – 213 – 220 с.

155. ИКАО 8400 «Правила аэронавигационного обслуживания. Сокращения и коды ИКАО», 2010. С. 102.

156. Бабичева Т.А. Учебное пособие «Решение задач по комбинаторике» (практикум) – Махачкала: ДГУНХ, 2018. – 44 с.

157. Руководство Р-331. Разработка и верификация на основе модели. Дополнение к документам КТ-178С и КТ-278А – М.: АР МАК. – 2016. – 119 с.: ил.

158. DO-331C Model-based development and verification. Supplement to DO-178C and DO-278A. – The USA: Washington. – 2011. – 136 p.

159. Бурков, А. Ю. Модельно-ориентированная разработка программного обеспечения для критических по надежности встраиваемых систем с применением программного комплекса SCADE от компании Esterel technologies / М. Б. Насыров // Решетневские чтения. – 2015. – № 2. – с. 209-211.

160. Павлов, А. Н. Методы обработки экспертной информации: учебнометодическое пособие / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов. – СПб.: ГУАП, 2005. – 42

с