

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАР-  
СТВЕННЫЙ ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

*На правах рукописи*



**Грешников Иван Игоревич**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННО-  
УПРАВЛЯЮЩЕГО ПОЛЯ КАБИНЫ И ДЕЙСТВИЙ ЭКИПАЖА  
ВОЗДУШНОГО СУДНА НА УНИВЕРСАЛЬНОМ СТЕНДЕ ПРОТО-  
ТИПИРОВАНИЯ**

Специальность 1.2.2 - Математическое моделиро-  
вание, численные методы и комплексы программ  
(технические науки)

**Диссертация**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель  
Доктор технических наук, профессор  
Куравский Лев Семёнович**

Москва – 2022

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1: Анализ современных исследований.....	11
1.1 Анализ исследований в области оценки состояния и уровня подготовки пилотов.....	11
1.1.1 Определение психофизиологического состояния.....	12
1.1.2 Технические средства и методы оценки состояния пилота.....	16
1.1.3 Анализ исследований в области оценки уровня подготовки пилотов.....	25
1.2 Анализ исследований в области эргономической оценки.....	29
1.2.1 Современные методы объективной оценки.....	30
1.2.2 Современные методы экспертной оценки.....	33
1.2.3 Обзор существующих комплексов эргономической оценки.....	37
1.3 Выводы.....	39
Глава 2: Математические модели полёта ВС и ГДА пилотов, обеспечивающие оценку уровня их подготовки.....	40
2.1 Математические модели и методы, обеспечивающие анализ уровня подготовки пилотов.....	40
2.2 Метрики, обеспечивающие сравнение анализируемых лётных упражнений и данных видеоокулографии различных типов и качества исполнения.....	45
2.2.1 Евклидова метрика в пространстве вейвлет-коэффициентов.....	46
2.2.2 Метрика Кохонена в пространстве вейвлет-коэффициентов.....	51
2.2.3 Метрика правдоподобия для сравнения траекторий движения взора.....	53
2.3 Содержание подхода.....	53
2.4 Выводы.....	59
Глава 3: Методы анализа и оптимизации информационно-управляющего поля кабины экипажа ВС.....	62
3.1 Метод определения взаимного расположения элементов индикации.....	62
3.2 Метод экспертной (субъективной) оценки на основе вероятностного подхода метода парных сравнений.....	70
3.3 Выводы.....	79
Глава 4: Комплексы программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов.....	80

4.1 Программные комплексы для моделирования и оценки перспективных компонентов кабины пилотов.....	81
4.1.1 ИУП на базе сенсорных дисплеев.....	81
4.1.2 Перспективная пилотажно-навигационная индикация.....	89
4.1.3 Резервный контур управления индикацией и конфигурацией .....	92
4.2 Программный комплекс оценки уровня подготовки пилотов .....	102
4.3 Программный комплекс эргономической оценки ИУП кабины пилотов....	109
4.4 Выводы.....	117
Заключение .....	119
Основные результаты работы, выносимые на защиту.....	119
Список сокращений и условных обозначений.....	122
Список литературы .....	123

## Введение

Человеческий фактор по-прежнему является основной причиной авиапроисшествий, поэтому оптимизация информационно-управляющего поля (ИУП) кабины пилотов и анализ уровня их подготовки является актуальной задачей, которую можно решить, прибегая к специальным математическим методам с использованием соответствующей технической базы и программного обеспечения (ПО).

Оптимизация ИУП – сложный и многоступенчатый процесс, предполагающий большой объём исследовательской и практической работы по созданию удобного и интуитивного понятного человеко-машинного интерфейса.

Для внедрения перспективных технических и функциональных новшеств в части ИУП на новый тип воздушного судна (ВС) необходимо предварительно проанализировать существующие решения и нормативную базу через призму применения на конкретном ВС в контексте функциональной необходимости и сертификационных требований. Чем совершеннее ИУП, тем меньше психологическая нагрузка на экипаж и ниже вероятность негативного проявления человеческого фактора.

Важную роль при оптимизации ИУП играет процесс эргономической оценки. Все решения, принимаемые в рамках разработки концепции ИУП и апробации прототипов кабины, должны проходить оценку лётных экспертов, имеющих соответствующий уровень квалификации. Однако проблема заключается в том, что зачастую эксперты высказывают противоположные мнения по отношению друг к другу, а иногда их выводы содержат и внутренние противоречия.

Для решения существующей проблемы автором предложены специально разработанный математический метод и программные средства, объединённые в комплекс эргономических оценок ИУП. При помощи данных методов обеспечи-

ваются проведение последовательной и согласованной эргономической оценки и получение обоснованных результатов.

Под оптимизацией понимается разработка нового, более совершенного ИУП. Процесс оптимизации проходит следующие этапы:

- 1) анализ существующих решений в области перспективных функций ИУП;
- 2) формирование концепции перспективного ИУП в части некоторых функций, на базе которой разрабатывается ПО для стендовой базы (подробнее см. главу 4);
- 3) проведение апробации концепции с участием лётных экспертов и использованием специальных математических методов и ПО (подробнее см. главу 3);
- 4) оценка полученных результатов (предлагаемая концепция либо принимается, либо корректируется, либо отвергается).

Далее, используя комплекс эргономических оценок, автором проводится синтез перспективного ИУП для самолёта транспортной категории с одним пилотом. Разработка данной кабины является важным шагом в области авиации, поскольку позволяет приблизиться к перспективе создания полностью беспилотного самолёта. Очевидно, что требования к ИУП подобной кабины предъявляются самые высокие. Учитывая большой объём когнитивной и эмоциональной нагрузки, связанной с пилотированием и выполнением других лётных процедур, а также груз ответственности за большое количество пассажиров, можно однозначно говорить о том, что оптимизация ИУП должна выйти на совершенно новый уровень.

При создании программных комплексов для моделирования и оценки перспективных компонентов кабины пилотов ИУП упор делается на следующие функции:

1. ИУП на основе сенсорных дисплеев как основное средство оптимизации кабины. Использование сенсорных дисплеев значительно увеличивает скорость выполнения лётных процедур (в 2-3 раза) и сужает область перемещения взгляда пилота, осуществляя принцип «управляю там, где вижу».
2. Индикация на лобовом стекле (ИЛС) как основа подачи пилотажной информации. ИЛС, которая ранее использовалась как опциональное средство для

самолётов транспортной категории, теперь встречается всё чаще. Особенно удобно и полезно применять данный вид индикации на режимах взлёта и посадки, т.к. при должном исполнении нет необходимости переносить взгляд из области закабинной обстановки на ИУП кабины, что может быть жизненно важно на таких ответственных этапах полёта, особенно в условиях плохой видимости.

3. Синтезированное, улучшенное и комбинированное видение как средство расширения рабочих диапазонов взлёта и посадки. Данные системы предназначены для обеспечения ситуационной осведомлённости пилота на всех этапах полёта, особенно на этапах взлёта и посадки. Использование системы улучшенного видения в составе ИЛС позволяет снижать высоту принятия решения при заходе в сложных метеоусловиях, а также осуществлять навигацию по аэродрому при плохой видимости.

4. Резервные и перспективные контуры управления индикацией и реконфигурацией. Использование сенсорных дисплеев в кабине может быть затруднено при сильной турбулентности, поэтому актуальным считается вопрос о применении дополнительных контуров управления индикацией и реконфигурацией, таких как управление «шайбой», кноппелем, взглядом, голосом и жестами.

**Актуальность темы исследования** обусловлена необходимостью оптимизации ИУП кабины пилотов и совершенствования средств анализа уровня подготовки пилотов в целях снижения числа лётных происшествий, в том числе в контексте перехода к одночленной кабине самолёта транспортной категории.

**Цель работы:** повышение безопасности полётов ВС за счёт оптимизации ИУП кабины пилотов, обеспечиваемой применением новых методов объективной оценки ИУП, а также за счёт использования методов анализа уровня подготовки пилотов.

**Объект исследования:** ИУП кабины ВС и подготовка пилотов.

**Предмет исследования:** методы и алгоритмы эргономической оценки ИУП кабины ВС и анализа уровня подготовки пилотов.

**Задачи работы:**

1) разработка новых методов анализа уровня подготовки пилотов, основанных на использовании эмпирической базы данных паттернов лётных упражнений, состоящей из параметров бортовых систем и параметров глазодвигательной активности (ГДА);

2) разработка нового метода объективной оценки и оптимизации ИУП, основанного на определении оптимального взаимного расположения элементов индикации с применением средств видеоокулографии;

3) разработка комплексов программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов, основанных на разработанных методах и интеграции данных программ в универсальный стенд прототипирования (УСП) кабины пилотов.

**Методология и методы исследования,** применяемые в работе: методы многомерного шкалирования, кластерного и дискриминантного анализа; евклидова метрика и метрика Кохонена в пространстве вейвлет-коэффициентов, метрика правдоподобия; процедурное и объектно-ориентированное программирование с применением паттернов MVP, MVVM.

**Научная новизна** работы состоит:

1) в создании математической модели, представляющей полёт ВС в пространстве вейвлет-коэффициентов, вычисленных по репрезентативным параметрам, с использованием евклидовой метрики и метрики Кохонена для сравнения лётных упражнений;

2) в создании математической модели, представляющей ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения взора;

3) в разработке численного метода определения взаимного расположения элементов индикации, согласованного с эталонным стационарным распределением частот пребывания в зонах фиксации взора, путём оптимизации матрицы вероятностей переходов между ними с последующим двумерным шкалированием оценок вероятностей указанных переходов;

4) в предложении концепции комплексов программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1) математическая модель, представляющая полёт ВС в пространстве вейвлет-коэффициентов, вычисленных по репрезентативным параметрам, обеспечивающая оценку уровня подготовки экипажа на УСП;

2) математическая модель, представляющая ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения взора, обеспечивающая оценку уровня их подготовки на УСП;

3) численный метод определения взаимного расположения элементов индикации, согласованного с эталонным распределением частот пребывания в зонах фиксации взора, путём оптимизации матрицы вероятностей переходов между ними;

4) комплексы программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов, установленные на УСП ГосНИИАС.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в том, что её результаты позволяют:

1) использовать разработанные методы, математический аппарат и комплексы программ для анализа уровня подготовки пилотов любого ВС;

2) использовать разработанные методы, математический аппарат и комплексы программ для проведения эргономической оценки ИУП кабины ВС и любого другого ИУП;

3) применять разработанные комплексы программ в составе стендов прототипирования ИУП; часть программных компонентов может быть использована в составе БРЭО самолёта с минимальными доработками.

**Достоверность результатов** диссертационной работы подтверждается:

1) сопоставлением результатов вычислительных экспериментов и данных эмпирических исследований, включая проверку гипотез по статистическим критериям согласия;



2) проведёнными оценками разработанных методов и ПО с привлечением лётных экспертов ФГУП «ГосНИИГА» и ФГУП «ПИЦ».

#### **Апробация результатов работы.**

Основные положения работы были представлены на 17-й Международной конференции «Condition Monitoring and Asset Management» в 2021 г., на XI Международной научно-практической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» в 2020 г., 5-й Международной научно-практической конференции «Перспективные направления развития бортового оборудования гражданских ВС» в 2019 г., III и IV Всероссийских научно-технических конференциях «Моделирование авиационных систем» в 2018 и 2020 г., XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Нейрокомпьютеры и их применение» в 2020 г.

#### **Реализация и внедрение результатов работы.**

Диссертационное исследование проводилось на базе УСП кабины пилотов, созданного в ФАУ «ГосНИИАС» (рисунок 1), где автор работает в должности начальника сектора. Разработанные комплексы программ использовались при прототипировании кабин самолётов MC21 и SSJNEW в рамках соответствующих контрактов, а также в ряде научно-исследовательских разработок, проведённых в рамках государственных контрактов по линии Минпромторга России. Разработанный комплекс эргономических оценок внедрён на стенде прототипирования самолёта SSJNEW.



Рисунок 1. УСП кабины пилотов (ФАУ «ГосНИИАС»)

### **Публикации и патенты.**

Результаты проведенных исследований представлены в 19 публикациях (3 в журналах из перечня ВАК и 5 в международных изданиях WoS/Scopus).

Были оформлены 2 патента и 18 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Объем и структура диссертации.**

Работа содержит следующие разделы: введение, четыре основные главы, заключение, перечень сокращений, список литературы (112 позиций). Количество страниц диссертационного исследования составляет 134 страниц.

В главе 1 приведён анализ современных критериев и методов эргономической оценки, а также анализ исследований в области оценки состояния и уровня подготовки пилота.

В главе 2 описаны математические модели полёта ВС и ГДА пилотов, обеспечивающие оценку уровня их подготовки.

В главе 3 описаны методы анализа и оптимизации ИУП кабины экипажа ВС.

В главе 4 описаны комплексы программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов.

## **Глава 1: Анализ современных исследований**

В данной главе приведён анализ современных критериев и методов эргономической оценки, а также анализ исследований в области оценки состояния и уровня подготовки пилотов. Сделаны выводы:

- о важности задачи оптимизации ИУП кабины пилотов, обусловленной необходимостью снижения нагрузки на экипаж и, как следствие, повышения безопасности полёта;
- о необходимости создания надёжных средств, позволяющих определять анализ уровня подготовки пилотов и, если требуется, отстранять пилота от управления ВС, возложив данные функции на автоматику, что особенно важно в контексте перехода к одночленному экипажу.

Глава состоит из двух основных разделов:

- в разделе 1.1. представлен анализ исследований в области оценки состояния и уровня подготовки пилотов;
- в разделе 1.2. представлен анализ исследований в области эргономической оценки ИУП кабины пилотов.

### **1.1 Анализ исследований в области оценки состояния и уровня подготовки пилотов**

Стоит отметить, что применение даже самого совершенного ИУП не даёт гарантии полной безопасности в полёте. В условиях повышенной нагрузки пилоты часто не справляются со своевременным решением критически важных полётных задач, в связи с чем встаёт вопрос об анализе уровня подготовки лётного состава.

### 1.1.1 Определение психофизиологического состояния

Трудность определения понятия «состояние человека» заключается в том, что многие авторы опираются на разные уровни функционирования человека: одни рассматривают физический уровень, другие – психологический, а третьи – и тот, и другой вместе. Как следствие, ряд ученых (в основном физиологи) говорят о функциональных состояниях, а другие (в основном психологи) – о психических. Реальность же такова, что, если рассматривать состояния человека, а не отдельных его функциональных систем, в любом функциональном состоянии есть психическое, а в любом психическом – физиологическое [1].

Психофизиологическое (функциональное) состояние оператора представляет собой совокупный комплекс доступных черт тех свойств и функций его организма, которые напрямую либо косвенно обуславливают осуществление им профессиональной деятельности [2].

Функциональное состояние – системная реакция, формируемая под влиянием комплекса факторов трудовой среды. Эффективность труда (его производительность, темп, интенсивность, количество ошибок, объем произведённой продукции, её качество и т.д.) является такой же мерой состояния пилота, как и другие группы показателей [3].

При анализе профессиональной деятельности есть несколько концепций, через призму которых исследователи определяют состояние человека. Например, к таким состояниям можно отнести [4] [5] [6] [7] утомление, монотонию, напряжённость и различные формы психологического стресса, состояния, вызываемые воздействием экстремальных факторов физической природы.

Среди возможных функциональных состояний, характерных для пилотов ВС, наибольшее практическое значение имеют состояния:

- оперативного покоя;

- нервно-эмоционального напряжения;
- функционального комфорта;
- монотонии;
- утомления [8];
- эмоциональной напряжённости.

Рассмотрим подробнее представленные функциональные состояния.

1. Состояние оперативного покоя – это функциональное состояние готовности к деятельности, которое иногда называют предстартовым.

К внешним признакам относятся умеренное увеличение частоты сердечных сокращений, ударного и минутного объемов крови, повышение артериального давления и объема дыхания, повышение тонуса скелетной мускулатуры.

К внутренним признакам относятся растущая биоэлектрическая активность центральной нервной системы, ряда желёз внутренней секреции, увеличение числа межсистемных и внутрисистемных взаимосвязей различных органов и систем [9].

2. Нервно-эмоциональное (психоэмоциональное) напряжение – функциональное состояние, возникающее в процессе деятельности, при которой доминирует эмоциональный компонент, придающий повышенную оценку всем или каким-либо элементам деятельности. Оно присуще тем видам деятельности, где велика опасность либо очень высока ответственность. Характеризуется, прежде всего, временным понижением устойчивости психических и двигательных функций, выраженными вегетативными реакциями и снижением профессиональной работоспособности.

Внешние признаки: увеличивается частота и регулярность дыхания, укорачивается фаза вдоха относительно выдоха, увеличивается частота сердечных сокращений и почти исчезает аритмия, повышается артериальное давление.

Внутренние признаки: усиливается обмен веществ и энергии, увеличивается амплитуда по данным электромиографии и повышается сила сокращений скелетных мышц, концентрируется внимание.

3. Состояние функционального комфорта – это такое функциональное состояние человека, которое характеризуется положительным эмоциональным отношением к выполняемой деятельности, оптимальным состоянием и взаимодействием всех звеньев системного ответа организма на требования деятельности и обеспечивает постоянно высокий уровень работоспособности. При этом состоянии достигается соответствие средств и условий труда функциональным возможностям человека.

Состояние функционального комфорта способствует такой активации и мобилизации психофизиологических функций человека, которая не ведёт их к быстрому истощению, а, наоборот, обеспечивает их длительное сохранение и развитие.

4. Монотония является состоянием, в котором существенно снижается сознательный контроль деятельности на фоне однотипной работы, характеризуемой большим объёмом стереотипных действий.

Класс состояний, сопровождающийся переживаниями скуки, апатии, сонливостью и желанием сменить вид деятельности. Также характеризуется такими физиологическими и психологическими симптомами, как снижение тонуса, ослабление сознательного контроля, ухудшение внимания и памяти, стереотипизация действий.

К внешним признакам относятся изменение частоты сердечных сокращений, артериального давления, дыхательных функций, увеличение времени реагирования, неконтролируемые действия.

К внутренним признакам относятся резкое увеличение количества ошибок, «ложных тревог», иллюзорных восприятий.

5. Утомление (усталость) – физиологическое и психологическое состояние человека, которое является результатом интенсивных и продолжительных нагрузок, формирующих мотивацию к остановке работы.

К внешним признакам относятся изменение цвета кожи, повышенное выделение пота, нарушение ритма дыхания и координации движений, медленные движения.

К внутренним признакам относятся появление болевых ощущений в мышцах, головокружение.

Наиболее опасным с точки зрения безопасности полёта является стресс, который появляется у пилота ВС вследствие возникновения чрезвычайной или опасной ситуации в процессе полета. Напряжённость (стресс) характеризуется увеличением мобилизации ресурсов организма на фоне повышения уровня важности и сложности выполняемой задачи.

Под стрессом понимают состояние организма, возникающее при воздействии необычных раздражителей и приводящее к напряжению неспецифических адаптационных механизмов организма. В общем смысле под стрессом в психологии сейчас понимается психическое состояние общего возбуждения, психического напряжения при деятельности в трудных, необычных, экстремальных ситуациях [10].

Уровни проявления стресса и его особенности [11] отражены в таблице 1.

Таблица 1. Уровни проявления стресса и его особенности

<b>Уровень проявления стресса</b>	<b>Особенности проявления стресса</b>
Физиологический	Двигательная скованность или беспокойство. Изменение порога чувствительности в различных пределах.
	Зевота, беспричинные слёзы или смех, гиперемия или бледность лица, тремор пальцев, зуд тела и т.п.
Психологический	Расстройство всех видов памяти.
	Рассеянное внимание, легко отвлекается.
	Мышление затруднённое или ускоренное.
	Речевая заторможенность или повышенная активность.
	Ускоренное переживание времени.

Уровень проявления стресса	Особенности проявления стресса
Социально-психологический	Снижение качественной и количественной активности.
	Сдвиг поведенческого реагирования к крайним точкам шкалы «возбуждение – торможение». Неадекватность поведения.

В результате чрезмерного влияния стрессоров на организм человека развивается состояние дистресса и могут возникать различные негативные реакции – ухудшается кровоснабжение различных отделов головного мозга, снижается частота сердечных сокращений, падает артериальное давление, увеличивается время двигательных реакций и снижается моторная активность [9].

### 1.1.2 Технические средства и методы оценки состояния пилота

Выделяют различные методы оценки физиологического состояния пилота и сбора данных [12] [13]:

- физиологические: биохимические, оценка вегетативных сдвигов, электрофизиологические;
- психофизиологические: косвенная оценка физиологических проявлений;
- психологические: объективирующие психометрические тесты (когнитивные, исполнительские), субъективные методики (опросники, субъективные шкалы), проективные тесты;
- поведенческие: количественные методы (оценка производительности труда, хронометраж), качественные методы (видеонаблюдение, анализ речевого поведения).

Для диагностики физиологического состояния широко используется ряд физиологических, психофизиологических и биохимических показателей.



К числу наиболее информативных показателей динамики состояния обычно относят различные параметры сердечно-сосудистой, дыхательной систем, другие показатели (тремометрия, простая и сложная зрительно-моторные реакции, стабิโลграфическая проба), а также регистрацию кожно-гальванической реакции, используемой как один из наиболее четких критериев уровня активации.

К многообещающим направлениям исследований причисляют оценку суточных и нагрузочных колебаний гормональных сдвигов. В качестве стандартных коррелятов увеличенной напряжённости и стресса, как правило, указывают на увеличение содержания в крови и моче работающего человека «гормонов стресса» – адреналина и норадреналина. Повсеместно используются так называемые нагрузочные пробы, нацеленные на обнаружение резервных возможностей индивида.

При очевидных плюсах методы регистрации физиологических характеристик обладают и существенными недостатками. Например, такой широко применяемый показатель, как электроэнцефалограмма, характеризуется высокой вариабельностью у одного и того же лица в обычных условиях измерения, с одной стороны, и одинаковыми тенденциями изменения при развитии различных состояний – с другой.

Использование для оценки состояния пилота физиологических и психофизиологических методов в реальных условиях также сопряжено со значительными трудностями. Во-первых, наложение различного рода датчиков создаёт значительный дискомфорт и помехи в работе человека-оператора. Во-вторых, для реализации электрографических и психофизиологических записей требуются дополнительные каналы связи.

### Электроэнцефалография

Электроэнцефалография позволяет отследить изменения активности коры больших полушарий во время различных психоэмоциональных состояний. Существенными для оценки психологического состояния испытуемого индикаторами электроэнцефалографии являются частоты и амплитуды ритмов головного мозга.

Основными видами активности, которые записываются в ходе исследования и впоследствии подвергаются интерпретации и дальнейшему изучению, считаются волновые частота, амплитуда и фаза.

#### Электрокардиография и вариабельность сердечного ритма

Электрокардиография (ЭКГ) – это простой и важный информативный метод диагностики сердечно-сосудистой системы. Для полного анализа электрокардиограммы изучают основные её элементы – зубцы, сегменты и интервалы.

#### Пульс и частота или ритм дыхания

Наиболее простым и оперативным методом оценки состояния человека при стрессе является измерение его частоты сердечных сокращений (пульса). При исследовании пульса определяют его частоту, ритм, наполнение, напряжение и скорость. Различают три разновидности пульса: артериальный, венозный и капиллярный [14]. Ритм и частота пульса в широком смысле слова аналогичны ритму и частоте сердечных сокращений [6].

Показано, что пульс учащается от положительных эмоций и во время стрессовых ситуаций, при физических нагрузках и при заболеваниях. Пониженная частота пульса свидетельствует о потенциальной неготовности человека к работе [15].

#### Инфракрасная спектроскопия (температура тела)

Ближняя инфракрасная спектроскопия – это экспресс-метод мониторинга изменений состояния биологических тканей с использованием светового излучения с длиной волны от 600 до 900 нм, обусловленной оптическими свойствами основных хромофоров. Ближнее инфракрасное излучение может быть использовано для оценки параметров оксигенации и циркуляции крови в тканях мозга неинвазивно, через кости черепа.

Было доказано, что методы исследования мозговой активности на основе ближнего инфракрасного излучения могут служить альтернативой более старым методам, таким как функциональная магнитно-резонансная томография и позитронно-эмиссионная томография [16].

Тепловидение представляет собой способ измерения и визуализации теплового, инфракрасного излучения, испускаемого всеми нагретыми телами. Человеческое тело, являясь источником теплового излучения, имеет неоднородное поверхностное распределение температуры, которое видоизменяется как при наличии патологий, приёме медицинских препаратов, физической активности, так и при осуществлении естественной терморегуляции организма.

#### Кожно-гальваническая реакция

Изменения электрической активности кожи фиксируются с помощью полиграфа. Кожно-гальваническая реакция рассматривается как компонент ориентировочного рефлекса, оборонительных, эмоциональных и других реакций организма, связанных с симпатической иннервацией, мобилизацией адаптационнотрофических ресурсов и т.д., и представляет собой результат активности потовых желёз [17].

Сила переживаний человека находится в прямой зависимости от амплитуды колебаний разности потенциалов между участками кожи: чем сильнее переживания, тем выше амплитуда. При этом следует отметить, что высокая чувствительность указанного показателя к средовым факторам ограничивает возможности его применения вне контекста исследовательской деятельности со строгим контролем внешних раздражителей [18].

#### Анализ двигательных операций

При психофизиологических исследованиях состояния пилота с применением анализа моторных действий применяются кинорегистрация движений работающего человека, микроструктурный анализ исполнительной деятельности, анализ кинематических характеристик движений рук в ходе работы.

В настоящее время в психофизиологии труда стали применять метод оценки позотонических реакций работающего человека (например, путём записи стабиллограммы – количества, направлений и амплитуды отклонений тела работника в процессе деятельности, размещённого на стабиллоплатформе). Анализ управляющих движений операторов производят по записям средств объективного кон-

троля, применяемым в ряде высокотехнологичных отраслей промышленности и на транспорте [19].

### Параметры речи

Речь как источник информации о говорящем может быть показателем индивидуальных психофизиологических особенностей, а также сигнализировать о текущем состоянии человека – утомлении, эмоциональном напряжении. В ряде работ [20] [21] было показано, что информация о состоянии человека может быть заключена как в особенностях восприятия речевого сигнала, так и в лексико-грамматических особенностях построения высказывания, в акустико-фонетических, интонационных характеристиках его оформления, темпе речи. Также показано, что эмоциональное состояние человека изменяет характеристики его голоса и речи [22] [23] [24].

Анализ речевых характеристик для определения состояния пилота ВС имеет ряд важных преимуществ по сравнению с другими. Например, при записи речи не требуется наложение контактных датчиков, для передачи информации не требуются дополнительные каналы связи, а в случае необходимости запись речи можно производить скрытым микрофоном.

### Видеоокулография

Движения глаз являются неотъемлемым компонентом любого вида деятельности. Большое значение они приобретают в процессе пилотирования самолёта, выполнение которого требует постоянной окуломоторной активности. Так как основным элементом деятельности пилота является зрительно-двигательная координация, представляется целесообразным для объективной оценки его состояния анализировать глазодвигательные параметры [25].

Можно выделить две основные группы методов регистрации движений глаз:

1) контактные, т.е. связанные с установкой регистрирующих датчиков непосредственно на роговицу глаза или вокруг него (электроокулография, фотооптический и электромагнитный методы);

2) бесконтактные (фотоэлектрический, кино- и видеорегистрация) [26].

В отличие от других характеристик, доступных наблюдению и измерению, фиксация показателей ГДА имеет существенные преимущества: небольшое число степеней свободы, доступность прямому наблюдению и возможность непрерывной регистрации.

Эти движения включены в процессы познания, деятельности и общения и несут полезную информацию о процессах центральной нервной системы, способах регулирования движений, организации познавательных процессов, состояниях человека, его деятельности и общении [83]. Анализ ГДА открывает возможность объективного исследования разнообразных психических явлений [25] [27] [28].

На данный момент выявлен значительный список первичных показателей ГДА, которые обуславливают существенные отличия при исследовании целевых групп испытуемых (таблица 2).

Таблица 2. Первичные показатели ГДА, для которых экспериментально установлена связь с характеристиками операторов сложных технических систем

No	Показатель	Маркером/предиктором чего является по данным экспериментальной психологии
А	Амплитуда саккад	Увеличение когнитивной нагрузки
Б	Продолжительность саккад	Психические заболевания, алкогольное опьянение
В	Скорость саккад	Показатель уровня когнитивной активации и уровня активности, сложность решаемой задачи, наличие нейрофизиологических расстройств, приём медикаментов и алкоголя
Г	Суммарная продолжительность фиксаций + закрывание глаз	Наличие опыта в решении поставленной задачи, наличие затруднений в переработке получаемой информации, предиктор скорости протекания когнитивных процессов

№	Показатель	Маркером/предиктором чего является по данным экспериментальной психологии
Д	Число фиксаций	Наличие опыта в решении поставленной задачи, наличие психиатрических и нейрофизиологических заболеваний, наличие стратегий, обеспечивающих минимальную нагрузку на память
Е	Частота фиксаций	Сложность задачи
Ж	Частота саккад (по вертикали и горизонтали)	Уровень нагрузки на память, уровень возбуждения, наличие психиатрических и нейрофизиологических расстройств

### Сопоставление эффективности подходов

В таблице 3 приведено краткое сопоставление основных рассмотренных подходов оценки состояния пилота ВС по ряду параметров.

Таблица 3. Сопоставление эффективности различных подходов к оценке устойчивости пилота/экипажа к стрессам

№	Критерий	Методы диагностики										
		Сердечный ритм	Электропроводность кожи	Активность мозга	Давление	Пульс	Электромиография	Температура кожи	Частота дыхания	Параметры речи	Видеоокулография	Инфракрасная спектроскопия
1	Неинвазивность	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+
2	Возможность измерений и анализа с надёжными диагностическими выводами в автоматическом режиме и реальном времени	+	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+
3	Невозможность коррекции показателей с помощью медика-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-

№	Критерий	Методы диагностики										
		Сердечный ритм	Электропроводность кожи	Активность мозга	Давление	Пульс	Электромиография	Температура кожи	Частота дыхания	Параметры речи	Видеоокулография	Инфракрасная спектроскопия
	ментозных средств											
4	Чувствительность к изменению психофизиологического состояния пилотов	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5	Чувствительность к уровню когнитивной нагрузки	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-
6	Отсутствие влияния измерений на действия и состояние пилотов (вызывает ли дополнительную нагрузку)	-	-	-	-	+	-	-	-	+	+	+
7	Незаметность измерений для пилота	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-
8	Стабильность пороговых значений по отношению к индивидуальным характеристикам пилотов	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
9	Простота первичной обработки и анализа результатов измерений	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+
10	Возможность прогнозирования опасных состояний типа Brain Stall	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
11	Возможность корректных измерений в полёте/на тренажёре	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+
12	Новизна/современность технологии	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-

№	Критерий	Методы диагностики											
		Сердечный ритм	Электропроводность кожи	Активность мозга	Давление	Пульс	Электромиография	Температура кожи	Частота дыхания	Параметры речи	Видеоокулография	Инфракрасная спектроскопия	
13	Перспектива использования для прогнозирования опасных состояний a priori	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	
Количество		плюсов	5	4	5	4	6	1	3	3	6	12	6
		минусов	8	9	8	9	7	12	10	10	7	1	7

На рисунке 2 показано соотношение плюсов и минусов по анализируемым параметрам для рассмотренных подходов к оценке устойчивости пилота и/или экипажа ВС к стрессам.

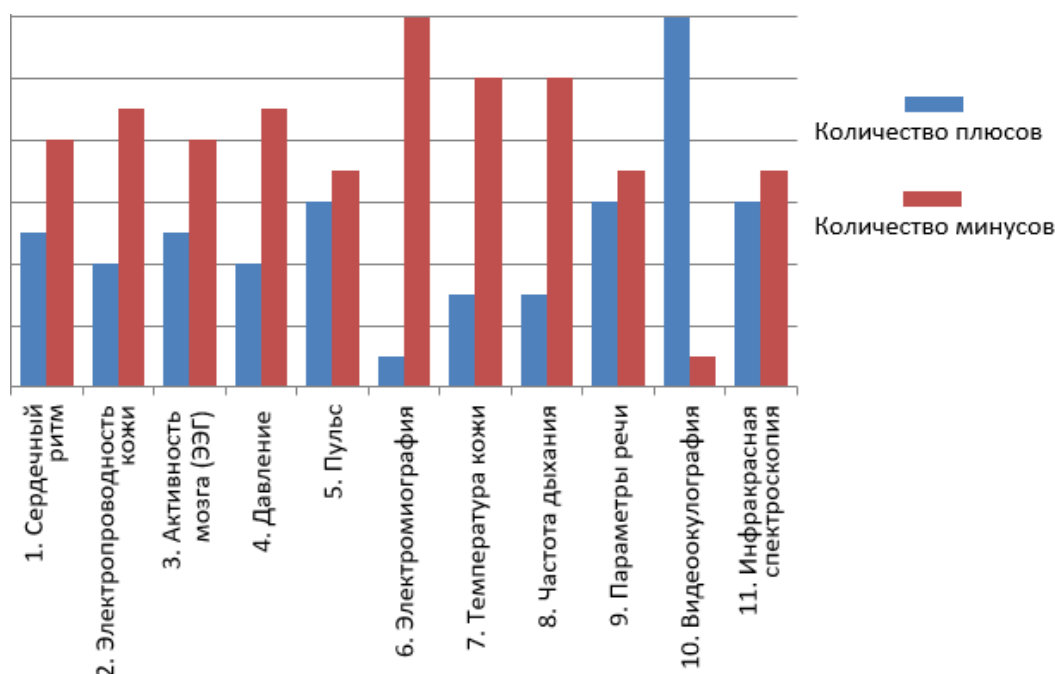


Рисунок 2. Сравнение подходов для оценки устойчивости пилота к стрессам



### **Выводы:**

- Методы диагностики 1, 2, 4–8 и 11 провоцируют пилотов на приём медицинских препаратов, устраняющих нежелательные отклонения измеряемых параметров, что практически полностью обесценивает диагностику.
- Методы 1–9 не имеют достаточного обоснования как средства прогнозирования опасных состояний пилотов, поскольку не исключено, что в подавляющем большинстве случаев выход измеряемых параметров из нормальных диапазонов значимо не связан с возникновением этих состояний. Накопленные наблюдения в основном связаны с уже имевшими место происшествиями, когда заключения диктуются возникшей ситуацией.
- Не следует надеяться, что такое сложное психологическое состояние, как стресс, может надёжно прогнозироваться по отдельным вегетативным реакциям, проявляющимся в показателях пульса, давления, температуры и т.д.
- Тотальный мониторинг физиологических показателей пилотов в условиях, когда такой контроль очевиден, будет оказывать негативное влияние на профессиональную деятельность пилота, выступая самостоятельным стрессовым фактором.
- Наиболее перспективными и валидными способами оценки функциональных состояний в настоящее время являются неинвазивные технологии, основанные на анализе характеристик распределения визуального внимания (видеоокулография и оценка параметров ГДА), и, в меньшей степени, инфракрасная термометрия и анализ речевых характеристик [29], [30].

### **1.1.3 Анализ исследований в области оценки уровня**

#### **ПОДГОТОВКИ ПИЛОТОВ**

Объективная оценка эффективности работы пилотов важна для анализа рисков, связанных с ИУП кабины экипажа ВС, оптимизации ИУП и обучения

лётного состава. Важнейшей проблемой при этом является создание критериев объективной оценки. Фиксируемые показатели, характеризующие деятельность лётного состава, могут применяться для оценки эффективности пилотирования и соответствующих навыков, полученных при лётной подготовке.

Таким образом, не вызывает сомнения важность задачи создания методов и соответствующего ПО для использования в качестве средств оценки уровня подготовки пилотов.

Основные цели разработки данных методов – это устранение субъективности при оценивании, увеличение содержательности и достоверности оценок, а также автоматизация процесса, позволяющая упорядочить оценку и сделать её более прозрачной.

Главным аспектом разработки новых методов является возможность комплексной диагностики результатов, полученных на базе специальных тренажёров, основным преимуществом которых является возможность быстрого моделирования очереди необходимых полётных ситуаций, в том числе аварийных и потенциально катастрофических.

В монографии [31] автор рассматривает процесс создания Интеллектуальных интерактивных учебно-тренировочных комплексов (комплексные и процедурные тренажёры, учебные классы и т.п.), подчеркивая целесообразность и эффективность их применения в условиях существенного увеличения затрат на «реальные» тренировочные полёты на ВС. Также автором упоминается необходимость контроля усвоения полученного материала курсантами, для чего, помимо оценки резервов внимания, предлагается метод, позволяющий оценивать показатели уровня подготовки пилотов на отдельных режимах полёта, основанный на вычислении отклонения отдельных параметров от эталонных значений. В то же время автор отмечает важность решения проблемы оценивания данных показателей на всех возможных режимах.

В статье [32] акцент делается на определении резервов внимания пилота при выполнении полётной задачи, из чего делается косвенный вывод о его уровне тренированности. Утверждается, что «количественная характеристика деятельно-

сти лётчика по переработке информации является показателем резервов его внимания и может быть использована для оценки уровня тренированности». В статье представлен аппаратно-программный комплекс для определения резервов внимания и методика работы с ним, при этом никак не освещается вопрос о контроле качества пилотирования и выполнения полётной задачи.

В работе [33] вопрос оценки резервов внимания представлен более подробно, рассмотрены математические методы и даны конкретные методические рекомендации по применению данного подхода.

Ключевым недостатком данных работ является отсутствие прямой объективной оценки уровня подготовки пилотов. Данный подход даёт лишь косвенную оценку подготовленности на основе анализа доступных резервов внимания пилота.

К настоящему времени уже получено определённое количество результатов, связанных с выявлением аномально выполненных лётных упражнений [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42]. Методы дискриминации временных рядов [43] и [44] имеют существенные ограничения для их применения на практике, особенно при анализе полётных данных. В подавляющем большинстве случаев рассматриваются только параметры траектории ВС и не учитываются другие характеристики упражнений. В случае анализа показателей ГДА используется малоэффективное сравнения тепловых карт [45] [26]. При сравнении динамики изменения параметров бортовых систем применяется непосредственное сравнение временных рядов, критически чувствительное к временным сдвигам [46] [42] [41]. Ограничения, которые делают невозможным реальное практическое применение этих результатов, детально рассмотрены в работах [47] [48] [49] [50] [51].

Приведём в пример некоторые из ограничений:

- требуется трудоёмкая ручная предварительная обработка данных;
- отсутствуют строгие математические критерии для отбора аномально выполненных упражнений;

- отсутствуют возможности для выявления причин некорректно выполненных упражнений, включая выявление параметров полёта, проясняющих возникшую ситуацию;
- используются недостаточно эффективные численные методы оптимизации;
- для исследуемых параметров полёта используются различные временные шкалы, что неприемлемо для корректного анализа данных;
- неудачно выбраны метрики для сравнения результатов выполнения упражнений;
- требуются весьма существенные вычислительные ресурсы для расчетов, что объясняется как формой представления временных рядов, обрабатываемых данных, так и выбором трудоёмких алгоритмов решения соответствующих задач оптимизации;
- EM-алгоритм, активно используемый при обработке данных, обычно не применим для данных высокой размерности;
- регрессионные модели, активно используемые при обработке данных, не могут быть эффективно применены для всех представляющих интерес параметров полёта;
- вычисляемые «усреднённые» структуры («центроиды»), которые используются при классификации полётов, в общем случае не могут рассматриваться как образцы, которые могут быть реализованы во время реального полёта;
- в результате обработки данных часто получают так называемое отрицательное шкалирование, которое приводит к нереалистичной интерпретации при анализе полётных данных;
- для качественного анализа необходимы недопустимо большие выборки сходных упражнений;
- объединение в кластеры траекторий полётов, а не самих полётов;

- отсутствуют реально успешные попытки сократить объём обрабатываемых полётных данных, что является результатом их представления в виде временных рядов.

Определённые перспективы применения возможны для подхода, первоначально разработанного для выявления аномальных режимов работы авиационных двигателей и построенного на использовании самоорганизующихся карт Кохонена [52] [43]. Однако его реальные возможности существенно ограничены недетерминированностью кластеризации с помощью этих карт и неэффективным способом выравнивания анализируемых рядов во временной области. Структурная устойчивость получаемых результатов при этом требует отдельного исследования. Убедительных примеров практического использования этого подхода на сегодняшний день нет.

В результате на данный момент имеется лишь несколько примеров полезного применения этих подходов (обычно изучаются траектории посадки). Следует отметить, что главным их недостатком является использование общераспространённых метрик в целях сопоставления лётных упражнений, так как данные метрики не обеспечили решение рассматриваемого класса задач.

## **1.2 Анализ исследований в области эргономической оценки**

ИУП современных летательных аппаратов оперирует большим количеством данных. Соответственно, актуальными являются исследования по оптимальной форме их подачи, эргономической оценке и выборе наилучшего варианта интерфейса, позволяющего минимизировать информационную загруженность и улучшать ситуационную осведомлённость пилота [53] [54]. Полноценная эргономическая оценка, на основе которой производится выбор варианта индикации, состоит из объективной и субъективной (экспертной) составляющих. В международной практике, как правило, учитываются обе оценки [55] [56].

В настоящее время для объективной эргономической оценки нередко используются инвазивные технические средства, оказывающие существенное влияние на результат оценки. Также применяются методики косвенной оценки эргономического качества на основе определения резервов внимания. Частота сердечного ритма, используемая в некоторых работах [57] [58], является крайне общим показателем и может изменяться по самым различным причинам, не связанным с качеством индикации. Использование прямого сравнения первичных показателей ГДА [59] [60] [61] также не лишено недостатков, поскольку данные показатели являются предикторами определённых психофизиологических состояний, которые могут быть связаны не только со сложностью восприятия информации, но и со степенью её важности и критичности, а также с наличием опыта решения подобных задач и утомлением пилота.

### **1.2.1 Современные методы объективной оценки**

Использование данных видеоокулографии, полученных с помощью айтрекера, является одним из наиболее перспективных подходов к решению задач в области оценки ИУП [45].

В отличие от других характеристик, доступных наблюдению и измерению, движения глаз имеют существенные преимущества:

- ограниченное число степеней свободы;
- доступность непосредственному наблюдению;
- возможность постоянной регистрации.

Итоги исследований указывают на присутствие факторов, значительно воздействующих на вариативность ГДА в рамках заданного стимульного материала и устанавливающих пространственно-временные нюансы траекторий движения взгляда в однородных группах подопытных [62] [63] [64]. Таким образом, можно

говорить о целесообразности исследований по совершенствованию ИУП кабины экипажа ВС и оптимизации ИУП на основе показателей ГДА.

Для проведения экспериментов целесообразнее использовать стационарные айтрекеры по ряду причин:

- стационарные айтрекеры имеют большую точность определения взгляда по сравнению с наголовными;
- наголовный айтрекер доставляет определённое неудобство пилоту, что может отразиться на результатах эксперимента;
- стационарный айтрекер обеспечивает более надёжную и простую калибровку айтрекера по отношению к оцениваемому изображению.

В статье [59] рассматривается проблема использования электронных индикаторов в системе отображения информации вертолёт, формулируются принципы формирования изображения на электронных индикаторах и проводится поиск оптимального варианта индикации пилотажно-навигационных параметров на базе специализированного комплекса эргономической оценки.

В качестве методов эргономической оценки предлагается определение резервов внимания и оценки структуры распределения внимания лётчика, причём акцент делается на сравнении длительности фиксации взгляда на элементах индикации.

Недостаток данного подхода заключается в том, что такой первичный показатель ГДА, как длительность фиксации, является предиктором уровня когнитивной нагрузки. Это может, в свою очередь, свидетельствовать не только о сложности считывания информации с элемента индикации (и его эргономического несовершенства), но и о важности и критичности информации, связанной с данным элементом индикации на текущем этапе полета, а также об имеющемся опыте решения подобных задач и утомлении пилота.

В статье [60] рассматриваются общие принципы и подходы создания стендовой базы для проведения эргономических исследований ИУП, делается акцент на использовании технологии виртуальной реальности для создания эффекта наибольшего погружения.

В качестве средств объективной эргономической оценки предлагается определение резервов внимания пилота и использование расширенного перечня первичных показателей ГДА (суммарное относительное время фиксации, среднее время фиксации, средний интервал между обращениями к элементам индикации, средняя частота переноса взгляда) в части применения методов видеоокулографии.

В статье [57] предлагается оценка пилотажной индикации на основе измерения частоты сердечного ритма на различных этапах полёта. Индикация, при работе с которой отмечалась наименьшая ЧСС, заявлена как наиболее эргономичная.

Недостатком данного подхода является тот факт, что ЧСС является крайне общим показателем и может изменяться по самым различным причинам, не связанным с качеством индикации.

В статье [65] детально рассматривается современный процесс разработки ИУП кабин вертолётов, выделяются отдельные стадии разработки и соответствующие временные, финансовые и технические ограничения. Автор отмечает огромную информационную нагрузку пилота и связанный с этим риск его отчуждения от процесса непосредственного восприятия окружающего пространства. Даются конкретные рекомендации для проектирования эргономичных ИУП, при этом не предлагается конкретных методов для объективной оценки и оптимизации ИУП.

В исследовании [61] разработаны теоретические основы объективных количественных методов оценки эргономического качества ИУП.

Для оценки эргономического качества ИУП предлагается три обобщённых показателя: вероятностно-траекторный, структурный и показатель относительной зрительной загрузки пилота. Несмотря на глубокую проработку вопроса эргономической оценки, в данной работе не представлено чётких и наглядных способов оптимизации ИУП, обладающего низким эргономическим качеством.



## 1.2.2 Современные методы экспертной оценки

Действия, направленные на анализ проблемы и выбор её решения, принято называть методами экспертных оценок. Данные методы используются, когда требуется решить сложную проблему с привлечением определённого количества специалистов (экспертов), поскольку имеется недостаток в информации, низкий уровень квалификации и т.д.

Решения, предложенные данными специалистами на основе своего опыта и квалификации, называют методами экспертной оценки. Подобный анализ позволяет выявить возможные варианты решения проблемы при различных обстоятельствах. При использовании экспертной оценки возможно быстро и без лишних затрат решить проблему оптимальным образом.

Экспертную оценку как метод исследования можно разделить на два вида – метод коллективной работы экспертов и метод, направленный на получение индивидуального подхода каждого из них [66] (таблица 4).

Таблица 4. Виды экспертной оценки

Виды	Пояснение	Примеры методик
Коллективная работа экспертов	В этом случае итоговое решение принимается после совместного обсуждения конкретной проблемы. В некоторых случаях такой метод называют прямым получением общего мнения. Главный его плюс заключается в том, что в ходе обсуждения можно посмотреть на	«Мозговой штурм» позволяет творчески подойти к поиску решения, открывая новые идеи на основе интуитивного мышления экспертов. Они могут свободно озвучивать собственные идеи и участвовать в дискуссиях.
		Сценарии – это письменный документ, в котором содержится анализ проблемы и подходы к её решению. Эксперты сначала предлагают свои

	<p>проблему под разными углами. Есть и минусы: проявление авторитета среди экспертов, сложности при сборе информации, невозможность прийти к единому мнению. В перечень методик, составляющих метод экспертных (субъективных) оценок такого вида, входят «мозговой штурм», сценарии, деловые игры, дерево целей и т.д.</p>	<p>идеи, а затем выбирают наиболее оптимальную среди них.</p> <p>Деловые игры подразумевают создание модели управления, при которой достигаются поставленные цели. В этом случае у каждого эксперта есть собственная роль и обязанности, заранее установленные правилами.</p> <p>Дерево целей – структура, созданная по иерархическому принципу. Здесь общая цель разделена на несколько подцелей, которые также необходимо разделить как функции.</p>
<p>Получение индивидуального мнения всех экспертов</p>	<p>За основу берётся предварительный сбор информации, которым занимаются эксперты. На этом этапе они не взаимодействуют между собой, но потом совместно анализируют полученные данные. Преимущество такого метода заключается в его оперативности, а также в возможности воспользоваться индивидуальными навыками каждого из экспертов. Однако</p>	<p>Наиболее распространённый вариант экспертной оценки заключается в проведении анкетирования. Испытуемые оценивают предложенные варианты с применением различных шкал в соответствии с заданными критериями оценки.</p> <p>Интервью – это беседа с экспертами, во время которой озвучиваются заранее подготовленные вопросы по теме. Руководитель и сам эксперт тесно взаимодействуют между собой.</p> <p>По-другому метод Дельфи также называют методом дельфийского</p>

	<p>недостаток здесь чаще всего проявляется в не-объективности полученных оценок. Популярными методиками такого вида можно считать анкетный опрос, интервью и методы Дельфи.</p>	<p>оракула. Это итеративная процедура анкетного опроса. Он состоит из нескольких этапов, на каждом из которых эксперты выполняют определенные действия: сначала отвечают на вопросы, а затем несколько раз пересматривают свои взгляды. После нескольких этапов они получают общий ответ.</p>
--	---	---

Для закрепления полученного в результате исследования проблемы вывода необходимо обработать сведения, которые предоставили эксперты.

Рассмотрим основные этапы обработки экспертной оценки:

- 1) определяется уровень компетенции экспертов и их обобщённая оценка;
- 2) формируется ранжирование, если специалисты предоставили несколько альтернативных мнений, а также определяется зависимость между ними;
- 3) оценивается согласованность экспертов. Если они не смогли прийти к единому мнению, важно признать этот факт и выявить причины, которые привели к такому результату;
- 4) происходит оценка допущенных в исследовании ошибок, если они есть;
- 5) создаётся модель свойств объекта на основании экспертной оценки;
- 6) формируется финальный отчёт (цель исследования, перечень экспертов-участников, конечная оценка и анализ полученных результатов).

Главная цель обработки экспертных оценок – получение как новой, так и обобщенной информации. На основе этих сведений и будет принято итоговое решение для озвученной проблемы.

При обработке важно решить следующие задачи:

- Определить согласованность мнений экспертов. Этот фактор должен доказать, что привлечённые специалисты действительно являются экспертами. Он

также позволяет выявить среди них отдельные группы. Оценить согласованность необходимо, рассчитав количественные показатели близости экспертных мнений.

- Сформировать на основании полученных данных общую оценку. Для этого чаще всего применяется методика ранжирования или парного оценивания.

- Выявить зависимость между мнениями специалистов. Данный показатель демонстрирует связь между мнениями, а также позволяет сгруппировать их в зависимости от того, насколько они взаимосвязаны.

- Оценить надежность полученного результата.

Метод экспертной (субъективной) оценки относится к методам количественной оценки. Измерить факторы можно при помощи трёх основных способов:

- Ранжирование направлено на расположение объектов в порядке возрастания (или убывания) в зависимости от какого-либо параметра. Такая методика позволяет выбрать наиболее оптимальный вариант.

- Парное сравнение предполагает определение предпочтения экспертов посредством сравнения всевозможных вариантов между собой. В отличие от предыдущей методики здесь не нужно упорядочивать объекты, стараясь выявить самый популярный из них.

- Непосредственная оценка (балльный метод). Здесь объекты не только ранжируются, но и упорядочиваются по степени важности на основании присвоенных баллов (например, по десятибалльной шкале).

При формировании итоговой эргономической оценки для рассматриваемых вариантов элементов ИУП может применяться различный математический аппарат [67] [68] [69], начиная со среднего арифметического и заканчивая методом анализа иерархий (МАИ) и нечёткой логикой.

Поскольку предлагаемый метод основан на применении балльной системы, а также предполагает выставление приоритетов (весовых коэффициентов) для критериев в контексте данной задачи, возникает следующая проблема: при наличии большого количества разнородных характеристик нежелательно использовать весовые коэффициенты, так как существует риск некорректного их назначения, что может приводить к результатам, далёким от объективных.

Метод МАИ позволяет оценить внутреннюю согласованность матрицы сравнения, что может помочь в решении проблемы неправильного присвоения весов, но несогласованность оценок может возникать по нескольким причинам. Это может быть разница в компетентности экспертов, а также неоднозначность самого объекта или критериев, по которым оценивается объект. Необходимо отличать одно от другого, чтобы иметь возможность выбрать более адекватный способ преодоления неопределенности – в одном случае необходимо сменить экспертов, в другом – более тщательно продумать критерии оценки.

Метод МАИ не даёт достаточной уверенности для определения источника несоответствия. Также использование метода МАИ может значительно увеличить количество процедур попарного сравнения с числа  $\frac{(n*(n-1))}{2}$ , а в насущных ситуациях предпочтительнее оптимизировать затраты времени экспертов.

В главе 2 будет рассматриваться модифицированный вариант вероятностного моделирования парных сравнений. Данный выбор обусловлен тем, что человек очень хорошо может уловить различие между двумя объектами, но достаточно субъективно располагает объекты на шкале признака оценки относительно друг друга.

### **1.2.3 Обзор существующих комплексов эргономической оценки**

Человеческий фактор по-прежнему является основной причиной авиапроисшествий, поэтому поиск оптимальных решений в области ИУП кабины пилотов является актуальной задачей, которую можно решить, прибегая к современным методам эргономической оценки с использованием соответствующей технической базы [53].

В [57] проводилась экспериментальная оценка оптимального варианта индикации пилотажно-навигационных параметров на базе диалогово-моделирующего комплекса кабины пилотов, целью которой являлась разработка

эргономических предложений к электронной индикации, представляемой на МФИ современных и перспективных вертолётов.

Основу рассматриваемого комплекса составляет методика «Резервы внимания», реализуемая с помощью аппаратуры «Физиолог-М», помимо этого производилась регистрация направления взгляда лётчика с помощью прибора «Нас».

В качестве критериев оценки эффективности взаимодействия лётчика с информационными кадрами использовались:

- показатели точности пилотирования: средние значения и величины среднеквадратичных отклонений от заданных параметров;
- характеристики получения и анализа данных в соответствии с показателями ГДА пилота: время контроля параметра и длительность фиксации взгляда ИУП;
- показатель загруженности внимания лётчика процессом пилотирования: коэффициент загруженности;
- субъективная оценка лётчиком способов представления индицируемых параметров на МФИ (по материалам беседы).

Для нахождения статистически значимых различий между рассматриваемыми показателями, описывающими ГДА пилота при выполнении лётных задач, применялся параметрический критерий t-Стьюдента.

В [60] рассматривается стенд поисковых исследований на базе полунатурного стенда моделирования ИУП кабины пилотов. Для целей эргономической оценки в состав стенда включены системы:

- оценки резерва внимания;
- слежения за взглядом лётчика;
- видеонаблюдения за действиями лётчика.

В части объективной оценки рассмотрены критерии оценки показателей ГДА, что предполагает наличие соответствующего математического аппарата для сбора и анализа показателей.

Однако в данной работе не рассмотрены методы экспертной оценки ни с

точки зрения методологии, ни с точки зрения применяемого математического аппарата. Также не раскрыт вопрос о применении стимульного материала при съёме показателей ГДА.

### 1.3 Выводы

Современные критерии и методы эргономической оценки должны применяться при отработке как всего перспективного ИУП, так и его отдельных составляющих. В настоящее время наиболее перспективными и валидными способами оценки функциональных состояний являются неинвазивные технологии, основанные на анализе характеристик распределения визуального внимания (видеоокулография), которые выбраны основным средством объективной оценки в данной работе. Результаты анализа, полученные в данной главе, будут использоваться в дальнейших главах диссертации в качестве основы для разработки новых, более совершенных критериев и методов эргономической оценки.

Необходимы также надёжные средства, позволяющие определять опасные когнитивные и эмоциональные состояния пилота и, при необходимости, отстранять пилота от управления ВС, возложив данные функции на автоматику (также мировым сообществом предлагаются варианты управления обученным бортпроводником и вариант управления пилотом по радиоканалу с земли, но данные подходы не рассматриваются в рамках представленной работы). Подобные средства также могут быть использованы на этапе подготовки лётного состава для оценки уровня подготовки и предпринятия соответствующих мер.

## **Глава 2: Математические модели полёта ВС и ГДА пилотов, обеспечивающие оценку уровня их подготовки**

В данной главе рассматриваются предлагаемые автором математические модели полёта ВС и ГДА пилотов, обеспечивающие оценку уровня их подготовки. Результаты изложены в [70] [71] [72].

Глава состоит из трёх основных разделов:

- в разделе 2.1. представлены математические модели и методы, обеспечивающие анализ уровня подготовки пилотов;
- в главе 2.2. представлены метрики, обеспечивающие сравнение анализируемых лётных упражнений и данных видеоокулографии различных типов и качества исполнения;
- в разделе 2.3. представлено содержание разработанного подхода;

### **2.1 Математические модели и методы, обеспечивающие анализ уровня подготовки пилотов**

Уровень подготовки пилота определяется с использованием комплексных сравнений исследуемых лётных упражнений с сопоставимыми лётными упражнениями из специализированной базы данных (далее паттерны), которые содержат в себе заранее проанализированные и оценённые данные полётов лётчиков с различным уровнем квалификации.

Паттерны представляют характерные лётные упражнения с помощью наборов временных рядов, которые содержат значения параметров, определяющих движение и состояние систем ВС. На исследуемое лётное упражнение переносятся характеристики паттерна, ближайшего в заданной метрике. Поиск ближайшего



паттерна сопровождается распознаванием аномального пилотирования и определением параметров полёта, связанных с ошибками пилота. Аномальность лётных упражнений определяется за счёт принадлежности к заданным кластерам паттернов. При этом находятся параметры, определяющие принадлежность к определённым кластерам и отвечающие за различия между паттернами.

Информация, содержащаяся в специальной базе данных, включает в себя временные ряды параметров выполнения лётных манёвров и экспертные оценки этих манёвров. Оценки содержат данные об ошибках лётного состава в терминах параметров деятельности.

Многомерное пространство шкалирования, которое смоделировано при помощи конкретной процедуры в подобранных метриках, позволяет отделить друг от друга действия лётчиков, имеющих разный уровень квалификации, и разнотипные лётные упражнения.

Требуемый результат достигается с использованием сложной комбинации процедур анализа случайных процессов и многомерного статистического анализа.

Эмпирические данные, состоящие из паттернов лётных упражнений, являются своеобразным «интеллектом» системы, который может видоизменяться по мере накопления этих данных. Эмпирические данные содержат информацию о параметрах бортовых систем ВС, связанных с пилотированием, ГДА пилотов, а также экспертные оценки результатов выполнения пилотажных манёвров.

Чтобы классифицировать манёвры в пространстве шкалирования и выявить некорректные действия экипажа используются специально созданные кластеры лётных упражнений, полученные в результате использования методов (многомерное шкалирование, кластерный анализ, метод главных компонент).

При этом решаются различные задачи:

- при применении метода главных компонент обеспечивается нахождение представителей групп параметров, обладающих высокой внутренней корреляцией, а также происходит снижение размерности задачи;
- в результате выполнения многомерного шкалирования возможно разделить нормальные (аномальные) результаты выполненной деятельности, а также

типы лётных упражнений и ГДА пилотов в пространстве шкалирования паттернов;

- с помощью кластерного анализа можно разделить типы и уровни качества выполнения лётных упражнений;

- применение дискриминантного анализа позволяет решать различные задачи, связанные с классификацией лётных упражнений.

Предлагается два метода анализа уровня подготовки экипажа: метод моделирования полёта ВС в пространстве вейвлет-коэффициентов, вычисленных по репрезентативным параметрам, и метод моделирования ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения взора.

Данные методы имеют общую основу и отличаются применением различных метрик в зависимости от вида анализируемых параметров. Структура методов представлена на рисунке 3. Зелёным цветом выделен метод моделирования полёта ВС в пространстве вейвлет-коэффициентов, синим – метод моделирования ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения взора.



Рисунок 3. Оценка уровня подготовки пилотов на основе анализа параметров полёта и данных ГДА, полученных в результате выполнения лётных упражнений

Результаты сравнения лётных упражнений с соответствующими паттернами из специальной базы данных вычисляются на основе анализа параметров бортовых систем ВС и первичных показателей ГДА лётного состава.

Финальные выводы о принадлежности к целевым кластерам, связанным с типами лётных упражнений и качеством пилотирования, формируются на основе вычисления вероятностного профиля, что обеспечивается с помощью дискриминантного анализа.

Для обнаружения параметров, которые могут охарактеризовать совершаемые пилотами ошибки, может применяться детализация вкладов параметров бортовых систем в элементы матриц взаимных расстояний между лётными упражнениями в определённой метрике. При помощи детализации возможно выявить факторы, влияющие на некорректное выполнение данных упражнений.

Детализация вкладов параметров бортовых систем ВС в элементы матриц взаимных расстояний между лётными упражнениями в заданной метрике позволяет проанализировать причины неправильного выполнения лётных упражнений. Кроме того, с помощью детализации возможно определение параметров, характеризующих ошибки пилота. При достаточно высокой скорости машинных вычислений оценки уровня подготовки пилотов могут быть получены в автоматическом режиме.

Существует несколько способов определения количественной оценки, которая показывает уровень подготовки экипажа:

1) вероятностные оценки. Их можно найти при помощи дискриминантного анализа, применяя выборочные функции распределения расстояний упражнений до центров кластеров в пространстве шкалирования;

2) вероятностный профиль пребывания в диапазонах параметров деятельности. Здесь применяется байесовская оценка решения;

3) прямое сравнение. При помощи одной из применяемых метрик сравниваются лётные упражнения и паттерны деятельности из базы данных. При этом ближайший паттерн переносит свои характеристики на исследуемое упражнение.

Эксперт, осуществляющий анализ результатов выполнения полётных задач, отвечает за:

- выбор кластеров аномальных паттернов с помощью двумерного шкалирования;
- анализ вкладов записанных параметров при сравнении результатов полётных задач и последующего изучения данных параметров;
- поиск и объяснение некорректных действий пилота.

Представленный подход можно использовать даже при малых выборках лётных маневров, поскольку и в этом случае возможен выбор паттерна и расчёт вклада параметров во взаимные расстояния.

Результаты практического применения данного подхода показали, что созданные методы способствовали распознаванию некорректно выполненных лёт-

ных маневров и определению параметров, характеризующих лётные ошибки, с последующей возможностью выявления их причин.

Применяемый подход содержит следующие элементы новизны:

- вместо непосредственного представления исследуемых процессов временными рядами используется их представление вейвлет-коэффициентами, полученными в результате дискретного вейвлет-преобразования, что сняло проблему синхронизации сопоставляемых процессов, существенно тормозившую работы в данном направлении;
- основной формой представления анализируемых данных являются матрицы взаимных расстояний исследуемых процессов в различных метриках;
- в зависимости от типа задачи применяются три вновь разработанные метрики для сравнения исследуемых лётных упражнений;
- представление лётных упражнений в пространстве шкалирования и их распределение по типам путём применения многомерного шкалирования к матрицам взаимных расстояний и последующего кластерного анализа;
- оценка относительных вкладов параметров в элементы матриц взаимных расстояний между лётными упражнениями и байесовские оценки правдоподобия с целью выявления аномально выполненных манёвров и определения параметров, динамика которых свидетельствует об ошибках пилотов.

Предлагаемый подход показал способность к распознаванию некорректно выполненных лётных упражнений и определению параметров, характеризующих ошибки лётного состава, обеспечивая последующее выявление их причин.

Использование предлагаемого подхода на практике обеспечивается программным комплексом The Intelligent System for Flight Analysis (ISFA), предназначенным для анализа поведения сложных систем.

## **2.2 Метрики, обеспечивающие сравнение анализируемых лётных упражнений и данных видеоокулографии различных типов и качества исполнения**

### 2.2.1 Евклидова метрика в пространстве вейвлет-коэффициентов

Размерность матриц взаимных расстояний между лётными упражнениями соответствует объёму выборки рассматриваемых упражнений. Следуя рассматриваемому подходу, исходные временные ряды, представляющие исследуемые процессы, заменяются рядами вейвлет-коэффициентов, полученными в результате *кратномасштабного анализа* [43]. При этом происходит замена исходных процессов (как функций времени) на интегральные характеристики интервалов времени, относящихся к области определения данных функций. Благодаря этому коэффициентов, которые требуются для корректного представления рассматриваемых процессов, становится значительно меньше.

В результате применения вейвлет-преобразования временных рядов решаются проблемы, заключающиеся в необходимости точной синхронизации процессов, связанных с разными манёврами одного типа, вследствие того факта, что наиболее содержательные коэффициенты, *относящиеся к более продолжительным временным интервалам, практически не чувствительны к небольшим временным сдвигам*. Длина вейвлет-представлений, применяемых при последующем анализе, значительно меньше длины соответствующего исходного временного ряда, при этом точность оценок существенно не ухудшается. Матрицы взаимных расстояний, найденные для всех рассматриваемых параметров, суммируются, в результате чего получается общая матрица взаимных расстояний между исследуемыми упражнениями.

Рассмотрим более строгое описание преобразований исследуемых временных рядов.

*Кратномасштабный анализ (КМА)* – это средство для разделения сигналов на составляющие и анализа их порядка. Сигнал выступает в качестве суммы различных компонентов, к которым можно отнести:

- функцию тренда;

- циклические компоненты, которые имеют определённый период повторения;
- локальные особенности разного порядка;
- флуктуации более высокого порядка (вокруг описанных ранее составляющих).

Понятие КМА является базовым в теории вейвлетов благодаря каскадному алгоритму вычислений, подобному быстрому преобразованию Фурье.

При проведении КМА пространство сигналов  $L^2(R)$  представляется в виде системы вложенных подпространств  $V^m$ . Пространство сигналов  $L^2(R)$  может быть представлено в виде последовательности вложенных друг в друга замкнутых подпространств  $\dots \subset V^{-1} \subset V^0 \subset V^1 \subset V^2 \subset \dots \subset V^m \subset \dots$ , «размеры» которых непрерывно расширяются по мере роста значения  $m$  и объединение которых в пределе даёт пространство  $L^2(R)$ , т.е.:  $UV^m = L^2(R)$ ,  $\cap V^m = \{\emptyset\}$ . Для любой функции  $s(t) \in V^m$  её масштабное преобразование по аргументу в два раза перемещает функцию в соседнее подпространство:

$$s(t) \in V^m \Leftrightarrow s(2t) \in V^{m+1}, \quad s(t) \in V^m \Leftrightarrow s(t/2) \in V^{m-1}.$$

Для пространства  $V^0$ , существует *phi*-функция  $\phi(t) \in V^0$ , целочисленные сдвиги которой по аргументу образуют ортонормированный базис пространства  $V^0$ :  $\phi_{0,k} = \phi(t - k)$ ,  $k \in Z$  ( $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ).

Взвешенная сумма множества разномасштабных и ортогональных друг другу функций  $s_m(t) \in V^m$  даёт сигнал  $s(t)$ , аппроксимируя его с определённой точностью в зависимости от количества значений масштабирующего коэффициента  $m$ . Функции  $s_m(t)$  являются ортогональными проекциями сигнала  $s(t)$  на подпространства  $V^m$ .

Достаточно знать только одно из подпространств  $V^m$ , остальные определяются через него. Пусть это подпространство  $V^0$  с его масштабирующей функцией  $\phi(t)$ . Поскольку  $V^0 \subset V^1$ , то функцию  $\phi(t)$  можно представить линейной комбинацией сдвинутых и сжатых модификаций этой же функции с определёнными весовыми коэффициентами  $h_k$ . При  $2M$  коэффициентов и размере вейвлета  $2M - 1$

(в единицах  $k$ ) масштабирующее уравнение запишется в виде  $\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2M-1} h_k \varphi(2t - k)$ . Его решение дает скейлинг-функцию, называемую также «отцовским» вейвлетом.

Значения  $h_k$  определяются из условия для ортонормированных базисов

$$h_k = \sqrt{2} \int \varphi(t) \varphi(2t - k) dt.$$

Масштабирующий («отцовский») вейвлет дискретен при дискретных значениях параметров сдвига. Условие нормировки масштабирующих коэффициентов:  $\int \varphi(t) dt = 1$ , откуда следует  $\sum h_k = \sqrt{2}$ .

Если масштабирующая функция установлена, то базисный «материнский» вейвлет определяется по формуле  $\psi(t) = \sqrt{2} \sum g_k \varphi(2t - k)$ , где  $g_k = (-1)^k h_{2M-1-k}$ . При масштабном множителе 2 фурье-образ «материнского» вейвлета при  $m = M$  сосредоточен в основном во второй высокочастотной половине частотного диапазона, «отцовского» – в первой низкочастотной его половине.

Выполним преобразование Фурье выражения для  $\varphi(t)$ :

$$\varphi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum h_k e^{-jk\omega/2} \varphi(\omega/2).$$

Используя фурье-образ  $H(\omega) = (\frac{1}{\sqrt{2}}) \sum h_k e^{-jk\omega/2}$ , получаем масштабирующее уравнение в частотной области  $\varphi(\omega) = H(\omega/2) \varphi(\omega/2)$ .

Разложение функции на уровне разрешения  $m'$  имеет вид

$$s(t) = \sum c_{m',k} \varphi_{m',k} + \sum_{(m>m',k)} d_{m,k} \psi_{m,k}.$$

Значения коэффициентов  $c_{m,k} = \int s(t) \varphi_{m,k}(t) dt$  и  $d_{m,k} = \int s(t) \psi_{m,k}(t) dt$  на практике определяются с помощью быстрого вейвлет-преобразования. Первая сумма содержит усреднённые с весом  $\varphi_{m,k}$  значения  $s(t)$  по диадным интервалам  $[k2^{-m}, (k+1)2^{-m}]$ , вторая – значения флуктуаций на данных интервалах.

На самом детальном уровне  $M = m_{\max}$  ряд представлен только скейлинг-функцией  $s(t) = \sum c_{M,k} \varphi_{M,k}$ . Функции  $\varphi_{m,k}(t)$  образуют ортонормированный базис пространства  $V_m$ .



При переходе из пространства  $V_{m+1}$  в пространство  $V_m$  от  $V_{m+1}$  отделяется подпространство  $W_m$  функции  $\psi_{m,k}(t)$  – подпространство вейвлетов:  $V_{m+1} = V_m \oplus W_m$ . В пределе:  $V_{m+1} = \sum_{k=-\infty}^m W_k$ . В пространстве  $W_m$  отделяются высоко-частотные составляющие пространства  $V_{m+1}$ , а в пространстве  $V_m$  остаются его низкочастотные составляющие: функции  $\varphi_{m,k}(t)$  и  $\psi_{m,k}(t)$  играют роль высоко-частотного и низкочастотного фильтров.

Величины  $h_k$  и  $g_k$  находятся исходя из общих свойств масштабирующих функций и вейвлетов. Уравнения функций:  $\varphi(t) = \sqrt{2} \sum h_k \varphi(2t - k)$ ,  $\psi(t) = \sqrt{2} \sum g_k \varphi(2t - k)$ . Из свойства ортогональности скейлинг-функций:  $\int \varphi(t)\varphi(t - l)dt = \delta_{0,1}$ ,  $\sum h_k h_{k+2l} = \delta_{0,1}$ . Из условий нормировки скейлинг-функции:  $\int \varphi(t)dt = 1$ ,  $\sum h_k = \sqrt{2}$ . Из ортогональности вейвлетных и масштабных функций  $\int \psi(t)\varphi(t - n)dt = 0$  следует уравнение для  $g_k$ :  $\sum h_k g_{k+2l} = 0$ ,  $g_k = (-1)^k h_{2M-1-k}$ .

В целях выполнения условий знакопеременности и гладкости до степени  $M - 1$  вейвлеты должны быть ортогональны полиномам соответствующих степеней:  $\int t^m \psi(t)dt = 0$ ,  $m = 0, 1, \dots, M - 1$ , откуда  $\sum k^m g_k = 0$ ,  $\sum (-1)^k k^m h_k = 0$ .

Пример расчёта при  $M = 2$ .

Система уравнений для определения  $h_k$ :

$$\begin{cases} \sum h_k h_{k+2l} = \delta_{0,1}; \\ \sum h_k = \sqrt{2}; \\ \sum (-1)^k k^m h_k = 0, m = 0, 1; \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} h_0 h_2 + h_1 h_3 = 0; \\ h_0 + h_1 + h_2 + h_3 = \sqrt{2}; \\ h_0 - h_1 + h_2 - h_3 = 0; \\ h_2 - 2h_1 + 3h_0 = 0. \end{cases}$$

Решение:  $h_0 = 2^{-3/2} - h_3$ ,  $h_1 = 2^{-1/2} - h_3$ ,  $h_2 = 2^{-3/2} + h_3$ ,  $h_3 = 2^{-5/2}(1 \pm \sqrt{3})$ . Если принять для  $h_3$  минус в скобках:  $h_0 = 0.483$ ;  $h_1 = 0.837$ ;  $h_2 = 0.224$ ;  $h_3 = -0.129$ ;  $g_k = (-1)^k h_{2M-1-k} \rightarrow g_0 = -0.129$ ;  $g_1 = -0.224$ ;  $g_2 = 0.837$ ;  $g_3 = -0.483$ .

Вычисленные  $h_k$  и  $g_k$  определяют вейвлеты Добеши (Daubechies) четвёртого порядка, которые обеспечивают большое число малозначимых коэффициентов разложения, что удобно при сжатии данных.

На практике, как правило, применяется быстрое вейвлет-преобразование, которое определяется следующим образом.

Каждую функцию  $s(t)$  можно рассматривать на произвольном  $m'$ -уровне разрешения, разделяя её усреднённые значения и флюктуации вокруг них:

$$s(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} c_{m',k} \varphi_{m',k}(t) + \sum_{m'}^{+\infty} \sum_{-\infty}^{+\infty} d_{m,k} \psi_{m,k}(t).$$

В общем случае  $c_{m,k}$  и  $d_{m,k}$  можно вычислять как проекции на функциональный базис:

$$c_{m,k} = \int s(t) \varphi_{m,k}(t) dt \quad \text{и} \quad d_{m,k} = \int s(t) \psi_{m,k}(t) dt.$$

На практике работаем с конечным набором отсчётов. Наилучший уровень разрешения определён интервалом в один отсчёт. Для этого уровня разрешения обычно принимается  $m = 0$  (суммирование в конечных пределах).

Скейлинг-функции имеют вид  $\varphi_{m,k} = 2^{m/2} \varphi(2^m t - k)$ . Усреднение отсчётов, определяющее расширение размеров вейвлетов, происходит при  $m = 0, -1, -2, \dots$ . Для исключения использования отрицательных индексов используем представление  $\varphi_{m,k} = 2^{-m/2} \varphi(2^{-m} t - k)$  при  $m > 0$ .

Итерационные вычисления вейвлет-коэффициентов при кратномасштабном анализе определяются пирамидальным алгоритмом Малла (Mallat):

$$c_{m+1,k} = \sum h_n c_{m,2k+n}, \quad d_{m+1,k} = \sum g_n c_{m,2k+n},$$

$$c_{0,k} = \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} s(t) \cdot \varphi(t - k) dt.$$

На первом этапе преобразования первый цифровой фильтр  $h_n$  из сигнала  $s_k = c_{0,k}$  выделяет низкие частоты  $|\omega| \leq \frac{\pi}{2}$ , а фильтр  $g_n$  – верхние частоты  $\frac{\pi}{2} \leq |\omega| \leq \pi$ . Т.к. на выходе фильтра  $h_n$  отсутствует верхняя половина частот, частота дискретизации выходного сигнала может быть уменьшена в два раза. В результате прореживания выходного сигнала происходит перенос верхних частот на освобождённое место.

В итоге выходная и входная информация представлена одинаковым количеством отсчётов, поскольку каждый из выходных сигналов содержит информацию о своей половине частот.

### **2.2.2 Метрика Кохонена в пространстве вейвлет-коэффициентов**

Чтобы рассчитать значения метрики Кохонена в пространстве вейвлет-коэффициентов, можно воспользоваться одной из ассоциативных нейронных сетей – *самоорганизующейся картой Кохонена*.

Для каждого параметра действий экипажа строится индивидуальная карта Кохонена. На входные слои этих структур подаются вейвлет-коэффициенты, представляющие параметры деятельности пилота. Выходные слои образуют прямоугольные матрицы, состоящие из элементов на радиальных базисных функциях (рисунок 4). Для каждого элемента обучающей выборки определяется ближайший к нему в евклидовой метрике («выигравший») нейрон.

Корректировка параметров «выигравшего» нейрона (а также нейронов из его окрестности) происходит после получения взвешенной суммы предыдущего центра данного нейрона и соответствующего элемента обучающей выборки. Параметры должны в большей степени походить на входной элемент. При этом «сдвиг» центров нейронов должен быть достаточно малым.

Последовательность данных корректировок приводит к перемещению определённых областей топологической карты к элементам обучающей выборки. При этом элементам карт, которые ближе всего расположены к входным данным, обеспечивается «выигрыш».

Таким образом самоорганизующиеся карты Кохонена учатся «понимать» структуру входных данных. В основе концепции данных карт лежит аналогия с ассоциативными свойствами человеческого мозга.

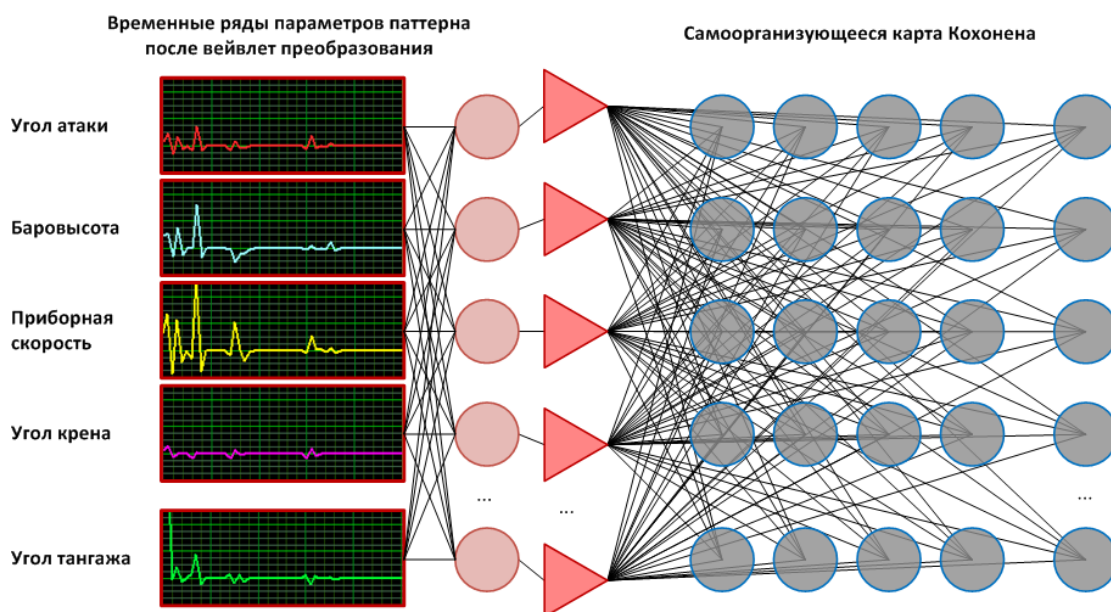


Рисунок 4. Входной и выходной слои самоорганизующейся карты Кохонена

Лётные манёвры различных типов могут быть представлены через пары исследуемых процессов. Определение взаимных расстояний между вейвлет-преобразованиями этих пар происходит при помощи средних значений модулей представленных далее разностей между расстояниями карты Кохонена:

- начиная представлением первого процесса и заканчивая «выигравшим» нейроном и начиная представлением второго процесса и заканчивая вычисленным «выигравшим» нейроном первого процесса, и наоборот;
- начиная представлением второго процесса и заканчивая «выигравшим» нейроном второго процесса и начиная представлением первого процесса и заканчивая вычисленным «выигравшим» нейроном второго процесса.

Общее взаимное расстояние есть сумма соответствующих расстояний для всех параметров полётов. Поэтому, как и в случае евклидовой метрики в пространстве вейвлет-коэффициентов, могут быть найдены оценки вкладов параметров действий в элементы матриц взаимных расстояний.

Пример, демонстрирующий эффективность применения представленных метрик, детально рассматривается в работе [47].

### 2.2.3 Метрика правдоподобия для сравнения траекторий движения взора

Сравнение динамики перемещений взгляда лётчика по зонам индикации базируется на оценках правдоподобия, определяющих согласованность движений взгляда, измеренную в результате выполнения различных типов лётных упражнений.

Моделирование динамики перемещений взора по зонам индикации осуществляется с помощью цепей Маркова. Зонам индикации соответствуют определённые состояния, образующие полную систему (т.е. данные состояния охватывают все допустимые области, куда может быть направлен взор). Пребывание в состоянии определяется нахождением взора в соответствующей ему зоне индикации. Такт дискретного времени – в зависимости от количества накопленных эмпирических данных – либо задаётся конкретным временным интервалом, либо совпадает с интервалом времени, определяющим переход от одной фиксации взора к другой. Параметрами модели являются вероятности переходов между состояниями. Каждому исследуемому лётному упражнению  $l \in \{0, \dots, z\}$  соответствует своя модель с уникальным набором вероятностей переходов между состояниями.

Перемещение взора определяется последовательностями пройденных зон индикации, которые в данном случае являются последовательностями состояний.

## 2.3 Содержание подхода

Особенности метода моделирования полёта ВС в пространстве вейвлет-коэффициентов, вычисленных по репрезентативным параметрам, состоят в следующем.

Заданы:

- исследуемое лётное упражнение, представляющее временные ряды значений параметров полёта, взятых с фиксированным временным шагом, полученным в реальном времени из текущей полётной информации с помощью динамического «временного окна»;
- специализированная база данных, содержащая классифицированные паттерны нормальных и аномальных лётных упражнений, соответствующих различным фазам полёта и типам лётных манёвров, и включающая содержательные интерпретации этих паттернов с точки зрения оценки уровня подготовки экипажа.

Следует определить:

- содержательную интерпретацию и атрибуты лётного упражнения из специализированной базы данных, ближайшего к исследуемому лётному упражнению в заданной метрике, приписав эту интерпретацию и атрибуты исследуемому упражнению.

Содержание подхода:

1. Сформировать для исследуемого лётного упражнения полёта прямоугольную матрицу  $A = [A_1, A_2, \dots, A_N]$ , составленную из столбцов  $A_i$  ( $i=1, \dots, N$ ), представляющих нормированные временные ряды значений всех наблюдаемых параметров полёта с фиксированным временным шагом  $\Delta t$ , получив её в реальном времени с помощью динамического «временного окна».

2. Преобразовать матрицу  $A$  в матрицу  $B = [B_1, B_2, \dots, B_M]$ ,  $M \ll N$ , составленную из временных рядов репрезентативных параметров, определённых *по главным компонентам*, вычисленным в результате решения *алгебраической проблемы собственных значений*

$$Cx = \lambda x,$$

где  $C = \|c_{ij}\|$  – матрица выборочных оценок ковариаций репрезентативных параметров полёта,  $x$  – собственный вектор,  $\lambda$  – собственное значение. Выбор параметров, представляющих главные компоненты, осуществляется по наибольшим компонентным нагрузкам.

3. Перевести временные ряды  $B_i$  ( $i=1, \dots, M$ ) в наборы соответствующих им

вейвлет-коэффициентов  $W(B_i)$  с помощью *кратномасштабного анализа*, сформировав прямоугольную матрицу результатов вейвлет-преобразований  $W(B) = [W(B_1), W(B_2), \dots, W(B_M)]$ .

Используя накопленные в специализированной базе данных паттерны из множества классифицированных нормальных и аномальных лётных упражнений  $K$ , соответствующих различным фазам полёта и типам лётных маневров, определить паттерн  $W(B_k)$  ( $k \in K$ ), ближайший к исследуемому упражнению  $W(B)$  в *евклидовой метрике вейвлет-коэффициентов* или *метрике Кохонена*:

$$\arg \min_{k \in K} \rho(W(B), W(B_k)),$$

где  $\rho(\dots)$  – количественная оценка расстояния в заданной метрике, представляющая собой критерий выбора паттерна, ближайшего к исследуемому лётному упражнению.

4. Исследуемому лётному упражнению приписывается *интерпретация* (нормальность/аномальность и т.д.), соответствующая выявленному ближайшему классифицированному паттерну из специализированной базы данных.

5. С целью оценки надёжности сделанного выбора вычислить оценки вероятностей принадлежности к различным классам паттернов средствами *дискриминантного анализа*.

Вероятностные оценки принадлежности обучающихся определяются с помощью *выборочных функций распределений*  $F_i(Y)$  евклидовых расстояний  $Y$  до центров кластеров, соответствующих распознаваемому классу  $i \in \{0, \dots, z\}$  в результирующем *пространстве шкалирования*. Полученные величины  $p_i = 1 - F_i(r_i)$ , где  $r_i$  – евклидово расстояние до центра  $i$ -го кластера, рассматриваются как оценки вероятности принадлежности рассматриваемого обучающегося к заданным классам. Обеспечивается вычисление *вероятностного профиля* принадлежности к заданным кластерам, на основе которого строится итоговое заключение. Распределение по классам  $\{p_i\}_{i=0}^z$  характеризует *надёжность* полученной оценки.

Для содержательной интерпретации ошибок пилотирования вычисляется распределение относительных вкладов  $\{\rho(W(B_i), W(B_i \mathcal{E})) / \rho(W(B), W(B \mathcal{E}))\}_{i=1}^M$ ,

наиболее значимых с точки зрения анализа лётных параметров, которыми обусловлены отличия оцениваемого лётного упражнения от заданного эталонного (с индексом Э) выполнения манёвра данного типа, в соответствующую общую оценку расстояния в заданной метрике.

На рисунках 5 и 6 представлено схематическое описание рассматриваемого метода и графические интерфейсы ПО, разработанного на его основе.

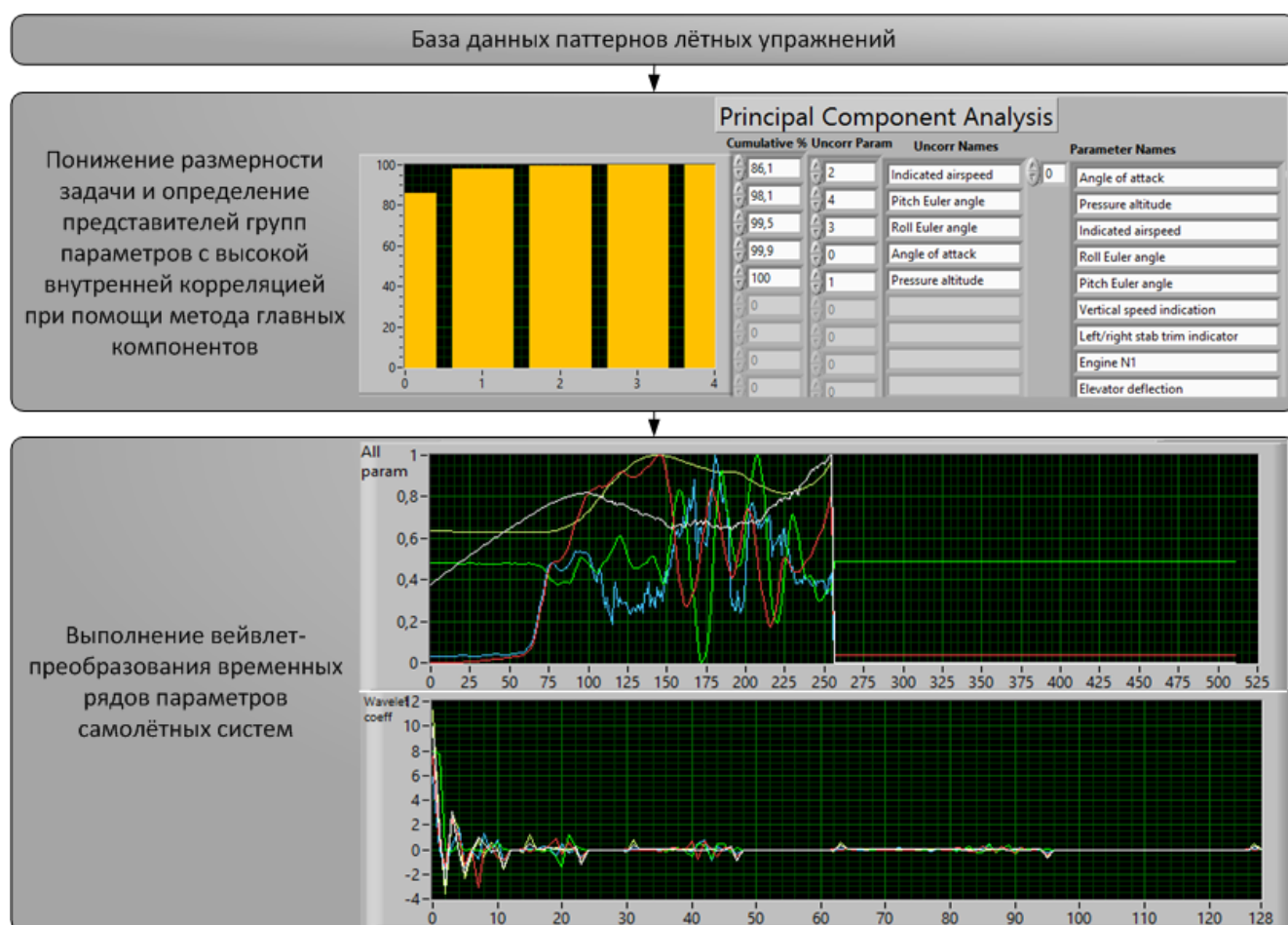


Рисунок 5. Процедура определения принадлежности текущего лётного упражнения к группе наиболее близких паттернов. Часть 1



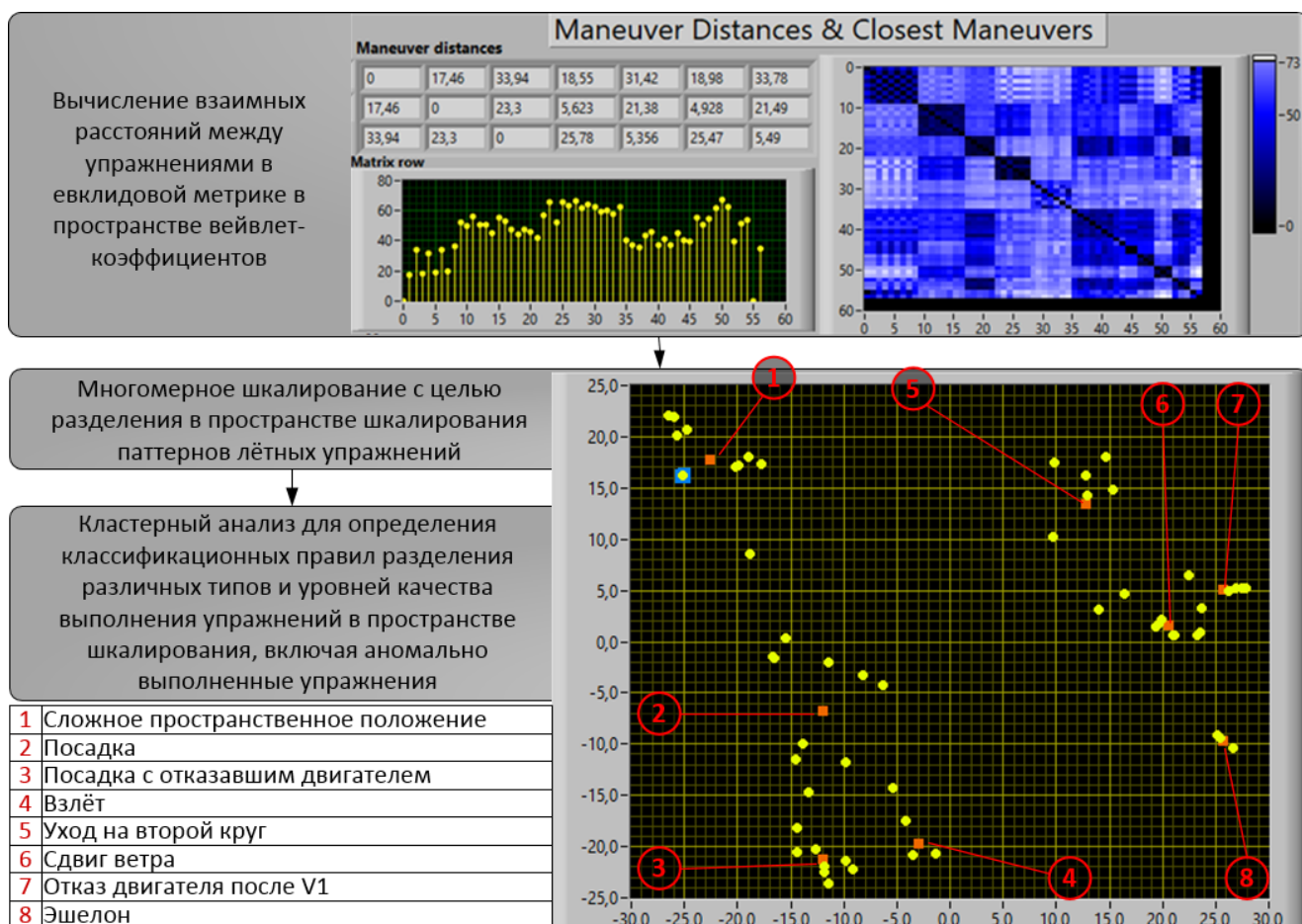


Рисунок 6. Процедура определения принадлежности текущего лётного упражнения к группе наиболее близких паттернов. Часть 2

Особенности метода моделирования ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения взора состоят в следующем.

Динамика вероятностей нахождения в состояниях модели как функций дискретного времени определяется следующим матричным уравнением:

$$p(t + 1) = M_l p(t),$$

где  $t$  – дискретное время;  $0 \leq t \leq T$ ;  $t, T \in N$ ;  $T$  – конечный момент времени;  $N$  – множество натуральных чисел; вектор  $p(t) = (p_0(t), \dots, p_n(t))^T$  – представляет вероятности пребывания в состояниях модели в момент времени  $t$ ;  $n$  – число состояний марковского процесса;  $M_l = \|m_{ij,l}\|$  – стохастическая матрица вероятностей перехода между состояниями цепи Маркова порядка  $n$ , в которой  $m_{ij,l}$  – вероятность перехода из состояния  $j$  в состояние  $i$  для исследуемого лётного

упражнения  $l$ .

Идентификация марковских моделей для рассматриваемых лётных упражнений  $l \in \{0, \dots, z\}$  осуществляется на основе экспериментальных данных о частотах переходов между зонами индикации. Каждое рассматриваемое лётное упражнение  $l$  имеет свою идентифицированную матрицу  $M_l$  (рисунок 7).

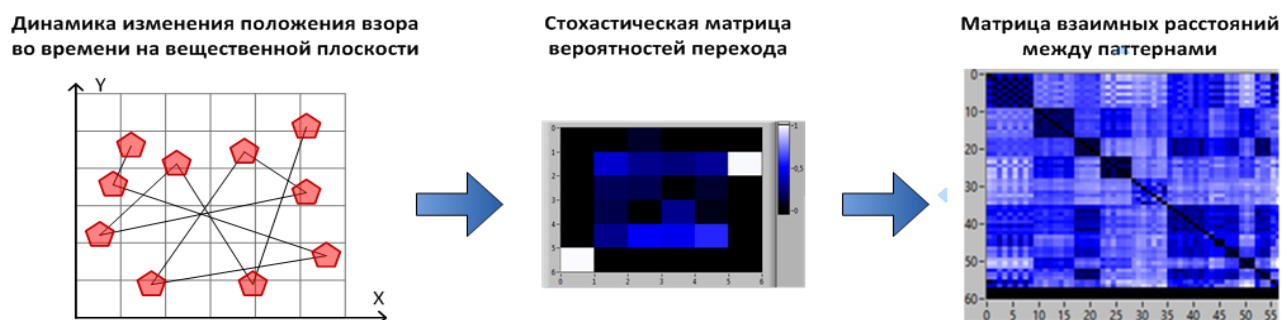


Рисунок 7. Представление динамики изменения положения взора через стохастическую матрицу вероятностей перехода между зонами индикации

Чтобы вычислить вероятности  $P(v_r|C_l)$  прохождения последовательности из  $r$  состояний марковского процесса, могут использоваться элементы матриц  $M_l$ . При этом значение  $l$  должно принадлежать к исследуемому лётному упражнению; тогда  $v_r$  – событие, которое представляет собой прохождение последовательности из  $r$  состояний, а  $C_l$  – факт принадлежности к исследуемому упражнению)

$$P(v_r|C_l) = \prod_{k=1}^{r-1} m_{s_{k+1}s_k,l}.$$

Величины  $\ln P(v_r|C_l)$  используются как оценки правдоподобия прохождения последовательности из  $r$  состояний при условии принадлежности к рассматриваемому лётному упражнению  $l$ . Применение оценок правдоподобия вместо соответствующих вероятностей при анализе динамики прохождения состояний модели связано с низкими порядками указанных вероятностей, неудобными для машинных вычислений.

Для фиксации ГДА применяются бесконтактные технические средства – айтрекеры, не доставляющие чувства дискомфорта пилоту при использовании данного подхода (рисунок 8).



Рисунок 8. Айттрекер, использованный для сбора данных ГДА (Gazerpoint GP3)

## 2.4 Выводы

Создан новый подход к оценке уровня подготовки пилотов, базирующийся на сопоставлении рассматриваемых лётных упражнений с паттернами, содержащимися в заранее созданной специальной базе данных и представляющими эмпирический интеллект системы.

При рассмотрении исследуемого подхода становится очевидно, что три метрики являются главной его составляющей:

- 1) евклидова метрика (евклидово расстояние) в пространстве вейвлет-коэффициентов;
- 2) метрика Кохонена в пространстве вейвлет-коэффициентов (при этом возможно использование ассоциативных нейронных сетей);
- 3) метрика правдоподобия (обычно используется при сравнении траектории движения взора).

Данные метрики призваны обеспечить существенную дискриминацию исследуемых лётных упражнений.

Оценить уровень подготовки пилотов возможно благодаря различным математическим методам, к числу которых можно отнести:

- 1) определение представителей групп параметров, обладающих высокой внутренней корреляцией, и снижение размерности задачи. Данный метод построен на основе метода главных компонент;
- 2) многомерное шкалирования. Метод позволяет разделить в пространстве паттерны, принадлежащие к разным типам лётных упражнений;

3) кластерный анализ. Данный метод может использоваться, если необходимо разграничить типы и уровни качества выполнения лётных упражнений;

4) дискриминантный анализ. Метод призван решать задачи, связанные с классификацией различных лётных упражнений.

Представленный подход показал способность к распознаванию некорректно выполненных лётных упражнений и определению параметров, характеризующих ошибки лётного состава, обеспечивая последующее выявление их причин.

Полученные результаты вносят значимый вклад в развитие подходов и методов предсказания рисков и нахождения причин, возникновения опасных полётных ситуаций и могут использоваться:

- для получения оценки качества пилотирования лётного состава;
- для помощи инструктору при выставлении оценок;
- для обеспечения интеллектуального обучения лётного состава;
- для оценки влияния кадров дисплейной индикации и параметров полёта на вероятность возникновения авиационных происшествий.

Преимущество предлагаемых автором методов состоит:

- в снятии проблемы точной синхронизации начала сравниваемых лётных упражнений, не позволявшей выполнять оценки в автоматическом режиме (за счёт перехода в пространство вейвлет-коэффициентов допускаются сдвиги до 20–25% от продолжительности фрагмента, ранее допускалось не более 5%, что требовало подготовки данных в ручном режиме и идентификации полиномов высоких степеней во временной области);
- в возможности выявления причин аномально выполненных упражнений, используя содержательную интерпретацию относительных вкладов лётных параметров, которыми обусловлены отличия оцениваемого лётного упражнения от эталонного, в соответствующую общую оценку различий в заданной метрике;
- в допустимости использования для построения оценок малых выборок лётных маневров (пилотный анализ требует всего 60 упражнений, а применявшиеся ранее подходы требовали порядка 500);

- в наличии вероятностных критериев для отбора anomalно выполненных лётных упражнений, построенных на основе дискриминантного анализа (ранее применялись только ненормированные количественные оценки в так называемой «косинус-метрике»);
- в возможности решать задачи в реальном времени (применявшиеся ранее подходы требовали в аналогичных случаях недельной ручной работы, причём для ограниченного набора лётных манёвров – в основном, для посадки).

### Глава 3: Методы анализа и оптимизации информационно-управляющего поля кабины экипажа ВС

В данной главе рассматриваются предлагаемые автором методы анализа и оптимизации ИУП кабины экипажа ВС. Следует отметить, что рассматриваемые методы в целом применимы для оптимизации любых ИУП.

Глава состоит из трёх основных разделов:

- в разделе 3.1. представлен метод определения взаимного расположения элементов индикации на основе видеоокулографии (результаты изложены в [73]);
- в разделе 3.2. представлен метод экспертной (субъективной) оценки ИУП на основе вероятностного подхода метода парных сравнений (результаты изложены в [74] [75]).

#### 3.1 Метод определения взаимного расположения элементов индикации

Расположение зон индикации обусловлено следующими *опытными фактами*:

- высокая частота взаимных переходов между элементами индикации свидетельствует о необходимости одновременного получения информации с соответствующих зон, а переход между геометрически близкими зонами индикации выполняется быстрее;
- близость зон индикации позволяет при считывании информации с одного индикатора контролировать за счёт периферического зрения другой, обеспечивая одновременный контроль информации, необходимой для выполнения манёвра, и уменьшая время её считывания;
- распределение времени пребывания в зонах индикации является устойчивой наблюдаемой характеристикой, определяемой, в первую очередь, типом лётного манёвра, уровнем подготовки пилотов и взаимным расположением зон

индикации, но слабо зависящей от вариативности индивидуальных особенностей перемещения взора;

- соотношения частот взаимных переходов между парами элементов индикации, напротив, являются индивидуальными характеристиками и обнаруживают существенную зависимость от особенностей перемещения взора конкретного пилота и его привычек, сформировавшихся на основе практического опыта.

Вычисление оптимального взаимного расположения зон индикации, представляющих различные элементы индикации, опирается на обусловленные этим расположением количественные оценки, определяемые:

- степенью согласованности распределения относительных времён пребывания в зонах индикации;
- частотами взаимных переходов между ними с аналогичными эталонными характеристиками перемещений взоров квалифицированных пилотов, измеренными при выполнении ими различных лётных упражнений или используя их экспертные рекомендации.

Перемещения взора характеризуются последовательностями просмотренных элементов индикации. Динамика вероятностей нахождения в состояниях модели определяется матричным уравнением, рассмотренным ранее:

$$p(t + 1) = M_t p(t).$$

Эта матрица рассматривается как интегральная характеристика, представляющая частоты взаимных переходов между зонами индикации. Идентификация матриц  $M$  для рассматриваемого репрезентативного набора лётных упражнений выполняется, используя экспериментальные данные о частотах переходов из одной зоны индикации в другую.

Заданы:

- множество  $n$  элементов индикации, которые рассматриваются как зоны фиксации взора (зоны индикации), например: высота, угол атаки, приборная скорость, пространственное положение и вертикальная скорость;

• эталонное распределение наблюдаемых количеств попаданий  $\{F_k\}$  ( $k=1, \dots, n$ ) в указанные  $n$  зон индикации для пилотов высшей квалификации, полученное путём измерений с помощью айтрекера.

Следует определить:

1) стохастическую матрицу вероятностей переходов  $M_l^*$ , обеспечивающую наилучшее согласование с эталонным распределением попаданий  $\{F_k\}_{k=1, \dots, n}$  в  $n$  зон индикации для пилотов высшей квалификации по критерию минимума хи-квадрат (одна из форм критерия максимального правдоподобия):

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^n \frac{(p_k^* N - F_k)^2}{p_k^* N},$$

где  $N = \sum_{k=1}^n F_k$ ,  $p^* = (p_1^*, \dots, p_n^*)^T$  – стационарное распределение вероятностей пребывания в зонах индикации;  $\{F_k\}_{k=1, \dots, n}$  – эталонное распределение наблюдаемых количеств попаданий  $F_k$  в указанные зоны взоров пилотов высшей квалификации, полученное путём измерений с помощью айтрекера.

Согласно теореме Крамера, при выполнении ряда общих условий значения статистики  $\chi^2$  описываются распределением  $\chi^2$  с  $n - 1$  степенями свободы [76], что позволяет, вычисляя уровень значимости  $p$ , использовать эту статистику для проверки гипотезы о том, что искомое распределение значимо не отличается от эталонного;

2) распределение индикаторов на приборной доске путём вычисления их взаимного расположения в пространстве шкалирования размерности 2, используя в качестве *матрицы сходств* симметризованную матрицу вероятностей переходов.

Задача (1) решается численным методом, разработанным в рамках диссертации. Задача (2) решается методом многомерного шкалирования с точностью до ортогонального преобразования.

Стационарное распределение вероятностей пребывания в зонах индикации определяется решением следующего уравнения

$$P^* = M P^*,$$



где  $p^*$  является собственным вектором *стохастической* матрицы  $M$ , соответствующим собственному значению 1.

Как известно, стохастические матрицы всегда имеют собственное число, равное 1, причём это число является спектральным радиусом этих матриц [77]. В общем случае матрицы  $M$  являются несимметричными, а их собственные значения – комплексными числами. Поскольку элементы векторов  $p^*$  интерпретируются как вероятности, их значения требуют нормировки:

$$\sum_{k=1}^n p_k^* = 1, p_k^* \geq 0 (k = 1, \dots, n).$$

При последующем решении задачи *двумерного шкалирования* [78] [79] симметризованная матрица вероятностей переходов  $M_s = M + M^T$  рассматривается как *матрица сходств*, в которой  $m_{ij}$  количественно характеризует степень близости между  $j$ -й и  $i$ -й зонами индикации.

Таким образом, в результате шкалирования зоны индикации с большей вероятностью взаимного перехода будут расположены ближе друг к другу на приборной панели.

Такое взаимное расположение зон индикации обусловлено существенно большей эффективностью считывания полётной информации, поскольку высокая частота взаимных переходов свидетельствует о необходимости одновременного получения информации с соответствующих индикаторов, а переход между геометрически близкими зонами выполняется быстрее. Кроме того, близость зон индикации позволяет, считывая информацию с одного индикатора, контролировать за счёт периферического зрения другой, обеспечивая таким образом одновременный контроль за информацией, необходимой для выполнения манёвра.

Процедура вычисления оптимального взаимного расположения элементов индикации включает в себя:

1) оценку эталонного распределения частот пребывания в зонах индикации на основе данных экспериментов (айтрекинга) с участием пилотов высокой квалификации;

2) применение численного метода определения матрицы вероятностей переходов, обеспечивающей минимальное значение критерия хи-квадрат, с помощью итерационной процедуры (рисунок 9);

3) определение оптимального взаимного расположения заданных элементов индикации с помощью процедуры многомерного шкалирования, рассматривая симметризованную матрицу вероятностей переходов, вычисленную на предыдущем шаге, как матрицу сходств, количественно характеризующую относительные показатели близости между парами элементов индикации;

4) выполнение ортогональных преобразований (вращений и зеркальных отражений относительно заданных осей) для вычисленного оптимального взаимного расположения заданных элементов индикации с целью обеспечения удобства восприятия и ограничений, накладываемых требованиями дизайна.

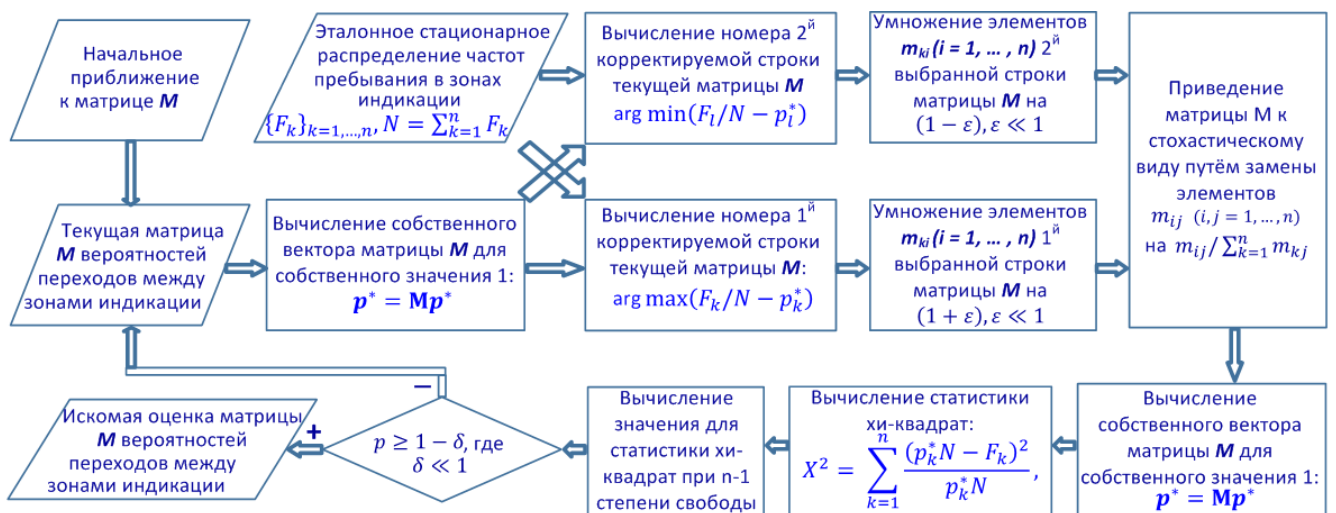


Рисунок 9. Численный метод определения взаимного расположения элементов индикации

Для оптимизации формата экранной индикации на основе анализа перемещений взора пилота по зонам индикации на стимульном материале были выделены пять зон, содержащих показатели *высоты, угла атаки, приборной скорости, пространственного положения самолёта и вертикальной скорости*, которые обозначены далее, соответственно, как *attitude, aAngle, indSpeed, posIndication* и *vrtSpeed*. Всё, что не охватывалось этими зонами, рассматривалось как условная,

шестая, зона, обозначенная как *Out*. Первоначальное расположение указанных элементов индикации показано на рисунке 10 (0 – «*attitude*», 1 – «*Out*», 2 – «*aAngle*», 3 – «*indSpeed*», 4 – «*posIndication*», 5 – «*vrtSpeed*»).

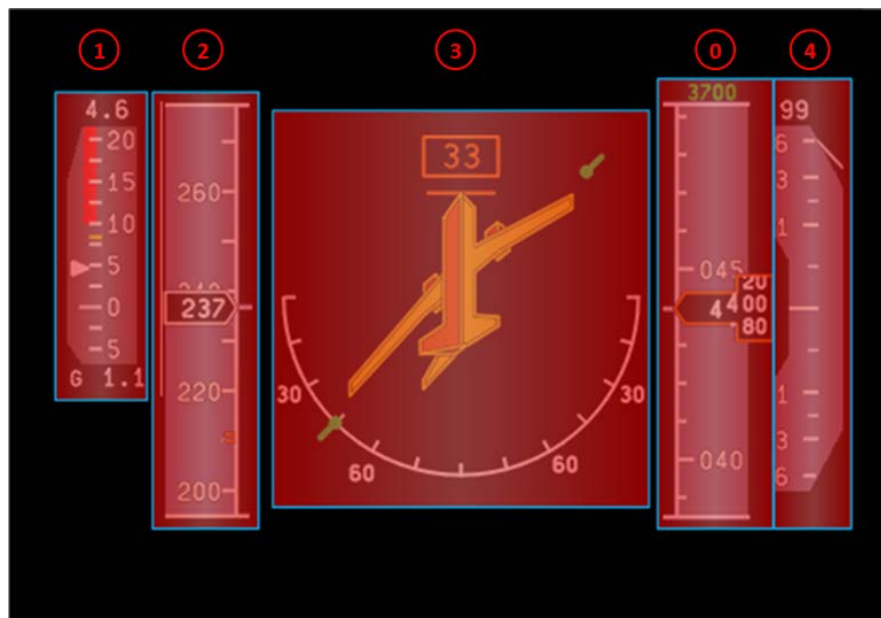


Рисунок 10. Зоны индикации на пилотажном кадре

Используя экспертные заключения опытных пилотов и результаты экспериментов с их участием, получена эталонная оценка стационарного распределения частот пребывания в зонах индикации. Опираясь на эту оценку и начальное приближение к матрице вероятностей переходов, полученное в результате экспериментов с первым вариантом расположения индикаторов, предложенным конструкторами, численно определена матрица вероятностей переходов, обеспечивающая минимальное значение приведённой выше статистики Пирсона.

В виде иллюстрации на рисунке 11 представлены эталонные и вычисленные стационарные распределения частот пребывания в зонах индикации до и после выполнения процедуры оптимизации (*Статистика Пирсона  $\chi^2$  может быть использована* в качестве меры соответствия для оценки соответствия распределения (a)  $\chi^2_5 = 275,97, p < 0,0001$ ; (b)  $\chi^2_5 = 0,374, p = 0,996$ ). На рисунке 12 – соответствующие им матрицы вероятностей переходов между зонами индикации в цветовой шкале, а на рисунке 13 – собственные значения этих матриц.

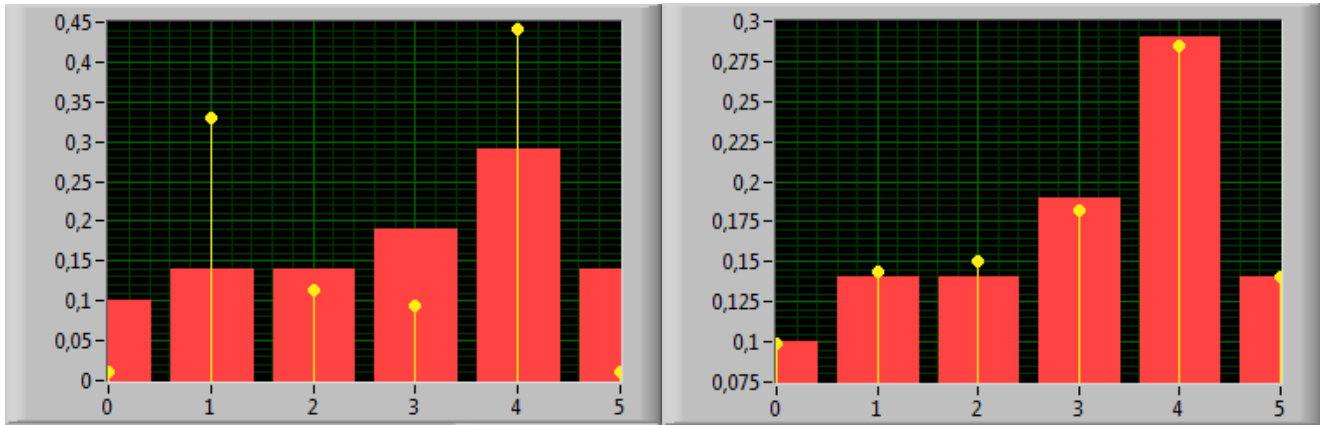


Рисунок 11. Эталонные и вычисленные стационарные распределения частот пребывания в зонах индикации до и после выполнения процедуры оптимизации

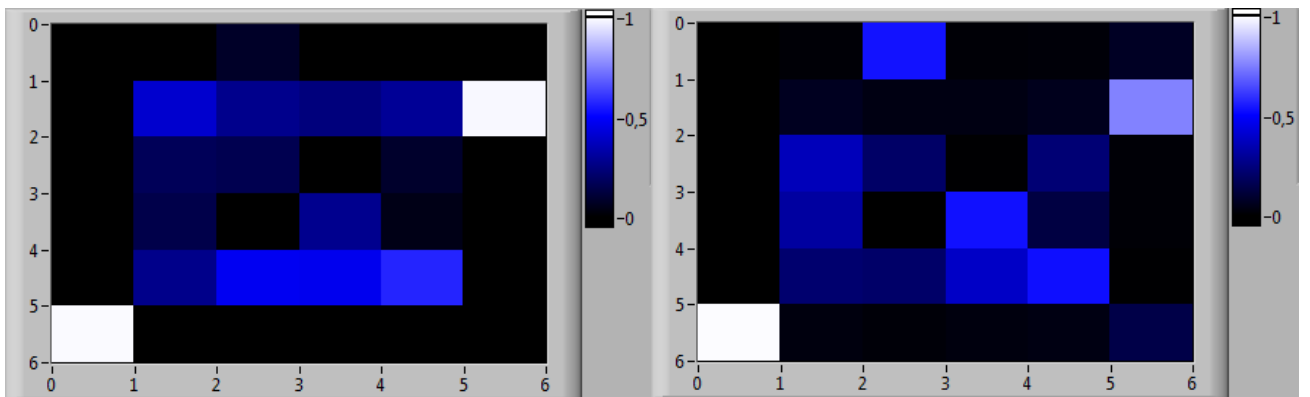


Рисунок 12. Матрицы вероятностей переходов между зонами индикации в цветовой шкале

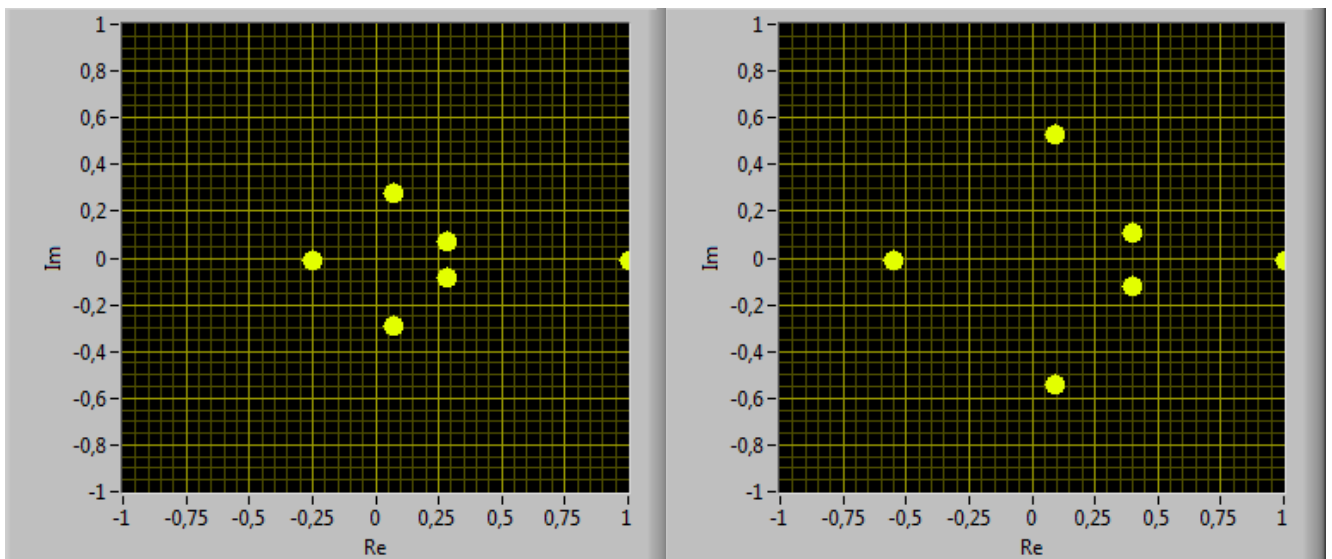


Рисунок 13. Собственные значения матриц вероятностей переходов между зонами индикации

На рисунке 14 показаны оптимальные взаимные расположения заданных элементов индикации до и после выполнения вращений и зеркальных отражений относительно заданных осей.

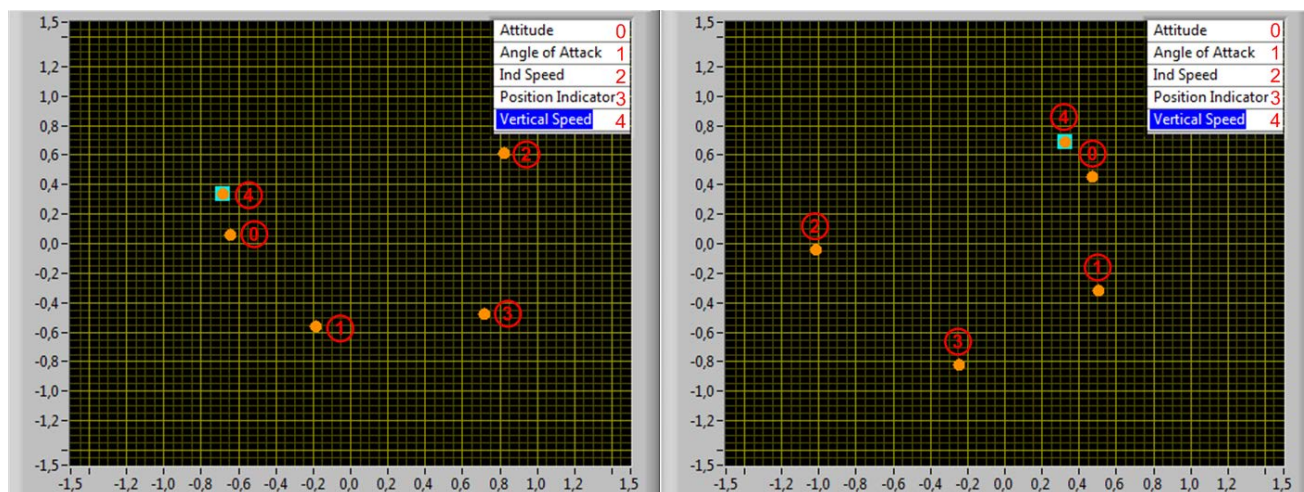


Рисунок 14. Оптимальные взаимные расположения заданных элементов индикации

На основе оптимизированного расположения был произведён синтез варианта компоновки пилотажного кадра для сложного пространственного положения с учётом требований эстетики и нормативных документов (рисунок 15). Для этого была произведена расстановка блоков индикации (связанных с рассмотренными выше, зонами индикации) в соответствии с выходными параметрами оптимизации. Зона индикации, связанная с отображением угла атаки, ранее имевшая ленточный тип, была заменена на круговую шкалу, что позволило придать итоговой компоновке завершённый и эстетически приемлемый вид.

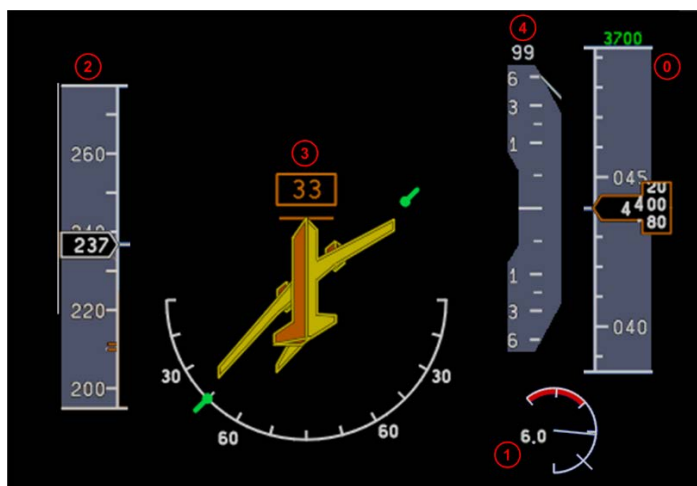


Рисунок 15. Оптимизированный вариант компоновки пилотажного кадра с учётом требований эстетики и нормативных документов

### 3.2 Метод экспертной (субъективной) оценки на основе вероятностного подхода метода парных сравнений

Для формирования экспертной оценки вариантов индикации ИУП кабины и выбора оптимального варианта индикации предлагается проводить анкетирование. Испытуемые (пилоты) производят оценку вариантов индикации с применением определённой шкалы в соответствии с заданными критериями оценки.

Наиболее перспективным представляется вероятностное моделирование парных сравнений с использованием метода наименьших квадратов. Данный выбор обусловлен тем, что человек гораздо лучше улавливает различие между двумя объектами, чем располагает объектами на шкале признака оценки относительно друг друга [80] [81].

Подход, при котором варианты индикации оцениваются бинарными оценками, позволяет по полученным значениям с помощью модели Терстоуна разместить варианты индикации на шкале интервалов, что позволяет определить, насколько один объект оценки лучше другого. Стоит учитывать, что эксперты проводят оценку не в ситуации реального полёта, а на имитационном тренажёре.

Также сами варианты индикации являются сложным комплексом индикаторных изображений, и оцениваются они несколько раз по разным критериям. Ввиду неестественности среды оценки, а также комплексности самого объекта оценки видится оптимальным представлять эксперту по два объекта за раз, чтобы снизить комплексность оценки, а следовательно, и вероятность возникновения неточностей при оценке.

Используемая модель Терстоуна (под редакцией Торгерсона) была модифицирована таким образом, чтобы можно было оценить согласованность оценок экспертов и неопределённость ответов каждого эксперта персонифицированно.

Предложенный метод позволяет по результатам проведения эксперимента ранжировать варианты индикаций таким образом, чтобы шкальные значения оси критерия, на которых находятся варианты индикаций, были подобраны максимально правдоподобно.

Несколько вариантов отображения сравниваются друг с другом попарно. Всего существует  $N$  способов представления параметров в парах:

$$N = \frac{n*(n-1)}{2},$$

где  $n$  – это общее количество вариантов.

Пилот выбирает из двух представленных вариантов тот, который ему кажется предпочтительным относительно критерия выбора.

Одна пара сравнений обозначена как  $a_{ij}$ . Два сравниваемых варианта индикации обозначаются как  $i$  и  $j$ . Тогда если  $i$ -ый вариант индикации более предпочтителен, то  $a_{ij} = 1$ , в противном случае  $a_{ij} = 0$ . В том случае, если пилот не может отдать предпочтение одному из двух вариантов,  $a_{ij} = 0.5$ .

Когда все  $n$  пар проходят оценку пилота, строится таблица размером  $n * n$ , где  $i$  – строка, а  $j$  – столбец. Далее эта таблица заполняется значениями  $a_{ij}$ .

В результате опроса подобные таблицы получаются для каждого пилота. Впоследствии все полученные таблицы суммируются следующим образом:

$$f_{ij} = \sum y(a_{ij}),$$

где  $y$  – это номер пилота, а  $f$  – ячейка результирующей таблицы сумм. В итоге получается таблица, где количество пилотов равно  $h$ . В полученной таблице выполняется правило:

$$h = f_{ij} + f_{ji}.$$

Чтобы получить вероятность  $p_{ij}$  того, что вариант индикации  $i$  в паре  $ij$  оценивается как более предпочтительный, нужно разделить значение таблицы  $f_{ij}$  на общее количество респондентов, участвующих в исследовании:

$$p_{ij} = f_{ij}/h.$$

Чтобы найти необходимые  $s_i$  на оси критерия ( $s_i$  – шкальное значение для  $i$ -го варианта индикации относительно рассматриваемого критерия), необходимо перевести таблицу вероятностей  $p$  в матрицу  $z$ -оценок (таблица 5).

Таблица 5. Перевод вероятностей в  $z$ -значения.  $Z$ -значение является результатом применения к вероятности функции опорных точек.

p	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Z	-2,33	-2,05	-1,88	-1,75	-1,64	-1,55	-1,48	-1,41	-1,34	-1,28
p	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20
Z	-1,23	-1,18	-1,13	-1,08	-1,04	-0,99	-0,95	-0,92	-0,88	-0,84
p	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
Z	-0,81	-0,77	-0,74	-0,71	-0,67	-0,64	-0,61	-0,58	-0,55	-0,52
p	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40
Z	-0,50	-0,47	-0,44	-0,41	-0,39	-0,36	-0,33	-0,31	-0,28	-0,25
p	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50
Z	-0,23	-0,20	-0,18	-0,15	-0,13	-0,10	-0,08	-0,05	-0,03	-0,00
p	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60
Z	+0,03	+0,05	+0,08	+0,10	+0,13	+0,15	+0,18	+0,20	+0,23	+0,25
p	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,70
Z	+0,28	+0,31	+0,33	+0,36	+0,39	+0,41	+0,44	+0,47	+0,50	+0,52
p	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80
Z	+0,55	+0,58	+0,61	+0,64	+0,67	+0,71	+0,74	+0,77	+0,81	+0,84
p	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90
Z	+0,88	+0,92	+0,95	+0,99	+1,04	+1,08	+1,13	+1,18	+1,23	+1,28
p	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,995
Z	+1,34	+1,41	+1,48	+1,55	+1,64	+1,75	+1,88	+2,05	+2,33	+2,58



Далее, зная  $z$ -значение для каждого  $z_{ij}$ , имеется возможность рассчитать  $s_i$  для всех  $i$  вариантов индикаций по формуле [80]

$$s_i = \frac{\sum_{j=1}^n z_{ij}}{n}$$

После того, как проведено опытное исследование для всех рассматриваемых критериев оценки вариантов индикации, включая общий критерий, строится матрица, где строки – это варианты индикации, а столбцы – критерии. На пересечении  $i$ -ой строки и  $j$ -го столбца помещается рассчитанное ранее шкальное значение  $i$ -го варианта индикации по  $j$ -му критерию. Оценка общего критерия получается таким же образом, как и оценки остальных критериев по описанному ранее алгоритму.

Для расчёта веса критериев, т.е. степени согласованности оценок по каждому специальному пронумерованному критерию с оценками по общему критерию, необходимо оценить дистанцию между векторами данных оценок  $d_j$ :

$$d_j = \frac{\sum_{i=1}^m cr_i - cm_i}{m} (u)^{-1} \quad (6)$$

где  $m$  – количество вариантов индикации;  $cr_i$  – оценка по рассматриваемому критерию;  $cm_i$  – оценка по общему критерию;  $u$  – константа, равная 5,14 (максимально возможная разница между  $cr_i$  и  $cm_i$ ). Тогда вес  $j$ -го критерия

$$w_j = 1 - d_j. \quad (7)$$

Имея вес каждого критерия, можно рассчитать итоговую оценку для каждого варианта индикации:

$$s_i = \frac{(\sum_{j=1}^n s_{ij} * w_j)}{n} \quad (8)$$

где  $s_{ij}$  – это оценка  $i$ -го варианта индикации по  $j$ -му критерию;  $n$  – количество критериев.

При проведении пилотами экспертной оценки вариантов индикаций существует риск того, что пилоты могут давать ответы случайным образом, не включаясь в процесс оценки, в связи с чем возникает необходимость провести анализ ответов с целью определения точности и последовательности ответов каждого пилота.

Идея состоит в том, чтобы рассмотреть возможность логичного расположения полученных оценок вариантов индикаций на оси предпочтений без ситуации, когда первый объект оценивается выше второго, второй выше третьего, а третий выше первого ( $3 > 2 > 1 > 3$ ).

Если имеет место подобная ситуация, то либо критерии оценки были определены неправильно, либо пилот был не включён в процесс сознательной оценки и проходит тестирование «на автомате». В случае, если подобная ситуация возникает систематически, следует пересмотреть критерии оценки. Если же возникновение подобной ситуации характерно для конкретного пилота, то его оценки не стоит учитывать в общем определении шкальных значений вариантов индикаций.

Значение степени последовательности оценок пилота в диапазоне от 0 до 1 рассчитывается следующим образом:

$$1 - \frac{\sum_i^n \text{error}(i)}{n} \quad (9)$$

где  $i$  – номер критерия.

Функция `error` возвращает одно из двух значений  $\{0, 1\}$ , принимая в качестве аргумента номер критерия, по которому производились оценки. По данному критерию берётся таблица сравнений пилота, а затем в данной таблице суммируются значения строк  $i$ . Если среди сумм строк есть повторения, то результат функции равен 1, иначе 0.

При составлении анкет следует учитывать специфику испытательной среды. К примеру, если оценка проводится на стенде, не оснащённом системой подвижности, то следует ограничить или исключить вопросы, касающиеся полётных ощущений. Исходя из специфики применяемого метода, в анкету заносятся только общие вопросы, т.е. подразумевающие ответы «да/нет». Необходимо контролировать равномерность, чтобы не было перекоса по количеству вопросов на определённую тему, особенно большого количества на второстепенную характеристику.

Предлагаемая методика интегрировалась и отрабатывалась на базе УСП кабины пилотов, предназначенного для отработки ИУП кабины ВС [82]. Под уни-

версальностью стенда подразумевается возможность отработки на нём кабин различных ВС, для чего запускается ПО моделей самолётных систем и ИУП кабины конкретного самолёта.

При проведении эргономических оценок на УСП следует учитывать некоторые особенности:

- стенд не позволяет получать тактильные ощущения при работе с органами управления;
- не воспроизводятся вестибулярные стимулы ввиду отсутствия системы подвижности;
- цветовые характеристики изображения на дисплеях отличаются от аналогичных изображений в ВС;
- пространственное восприятие закабинной обстановки весьма ограничено ввиду использования плоских дисплеев для системы визуализации.

Все вышеперечисленные особенности необходимо учитывать при составлении плана эксперимента, т.е. при выборе объекта исследования и критериев оценки.

В качестве конкретного примера рассмотрим задачу поиска оптимального варианта индикации на ИЛС, которая была решена в рамках данного диссертационного исследования.

На основе анализа зарубежного и отечественного опыта, а также на основе консультации с лётными экспертами авторами были разработаны три варианта индикации для ИЛС.

Варианты различаются между собой местонахождением и типом шкал и цифровых значений, принципом поведения динамических мнемосимволов, объёмом фильтрации мнемосимволов по фазам полёта, количеством используемых фаз и т.д. (рисунок 16). Необходимо выбрать наиболее оптимальный формат.

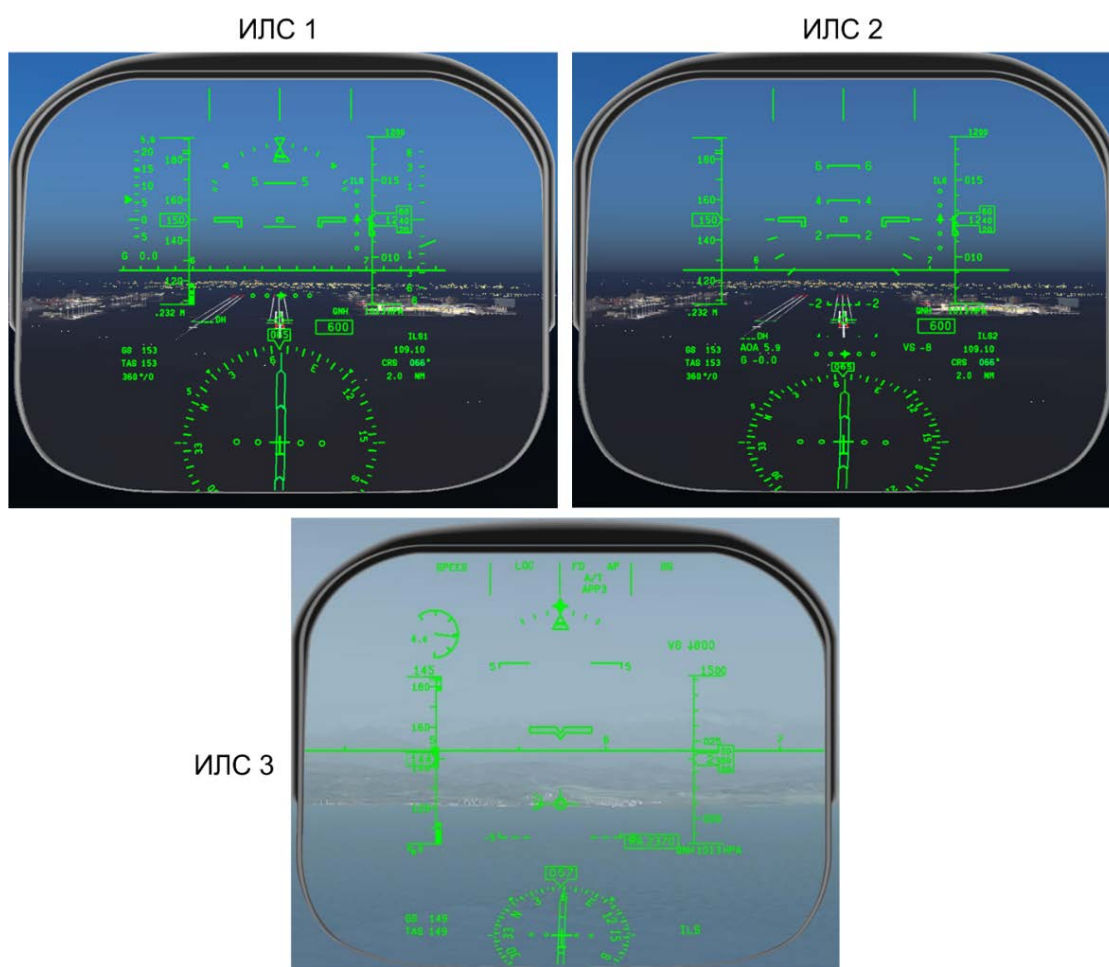


Рисунок 16. Варианты индикации для ИЛС

Оценка проводилась с использованием ряда специально подобранных критериев. Ниже приведены некоторые из них:

- 1) видимость/различимость и интерпретируемость, чёткость и неискажённость элементов индикации (шкал, индексов, цифробуквенных символов);
- 2) уровень ситуационной осведомлённости (определение своего местоположения при низкой видимости, информация об объектах наземной инфраструктуры и интродерах);
- 3) удобство восприятия индицируемой информации, отсутствие искажений при наложении символов;
- 4) уровень рабочей нагрузки и требуемого уровня концентрации;
- 5) общий критерий – уровень проработанности индикации.

В результате эксперимента были получены результаты, свидетельствующие о существенном превосходстве варианта 3 над другими вариантами (рисунок 17).

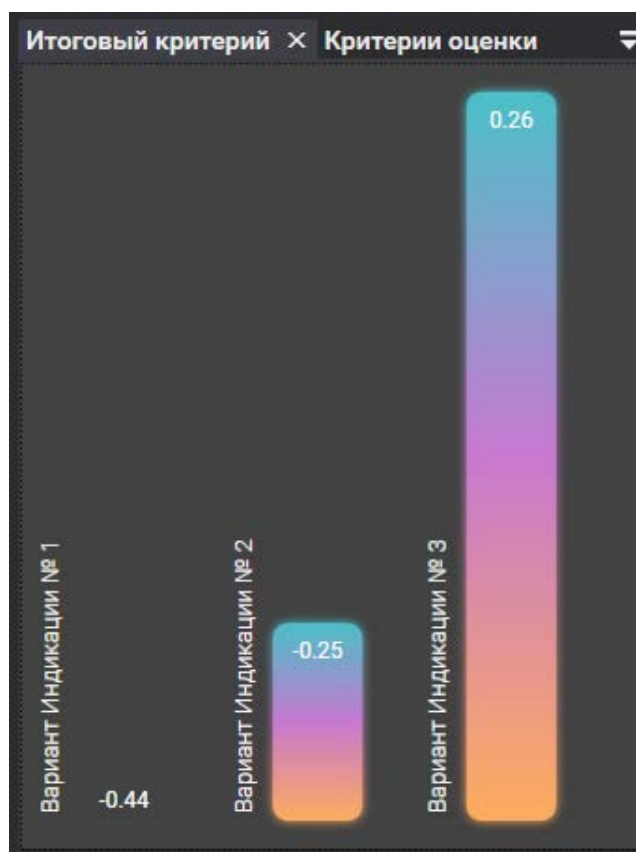


Рисунок 17. Результаты оценки вариантов ИЛС

$S1 = -0.44$  (ИЛС 1);  $S2 = -0.25$  (ИЛС 2);  $S3 = 0.26$  (ИЛС 3).

В качестве промежуточного результата было установлено, что наиболее значимыми критериями являются 1, 2 и 5 (рисунок 18).

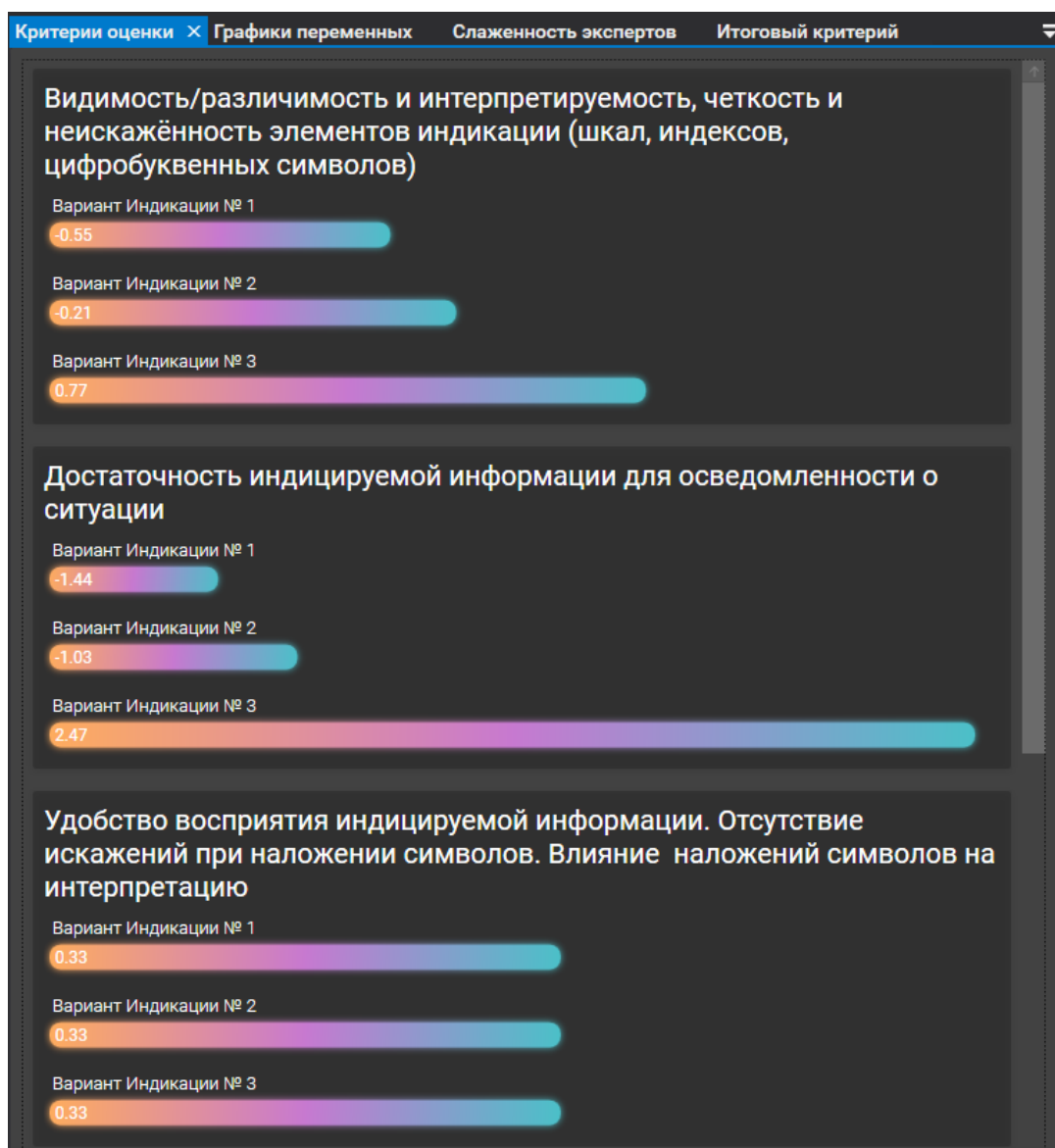


Рисунок 18. Результаты оценки вариантов ИЛС по отдельным критериям (показана часть критериев)

### 3.3 Выводы

На основе проведённого анализа существующих подходов к эргономической оценке разработан метод экспертных (субъективных) оценок ИУП кабины и обработки их результатов с применением математического аппарата на основе вероятностного подхода метода парных сравнений вместо традиционного анкетирования и подсчёта среднего арифметического значения.

В части объективной оценки разработан метод, основанный на применении марковских процессов для описания распределения внимания по зонам индикации с последующей оптимизацией на основе сравнения стационарных распределений матриц вероятностей перехода между зонами индикации с помощью специально разработанной итерационной численной процедуры для поиска минимального значения расхождения между распределениями, используя статистику хи-квадрат.

Главным преимуществом предлагаемого автором метода объективной оценки является возможность не просто получить численную оценку эргономического качества ИУП, но и произвести оптимизацию ИУП в реальном времени, что раньше достигалось только с использованием экспертных оценок, а применение неинвазивных технических средств объективной оценки позволяет исключить влияние на результат «эмоционального» фактора.

Данные подходы были апробированы на базе УСП кабины пилотов и высоко оценены лётными экспертами и специалистами в области эргономики, в частности, были решены задачи по поиску оптимальных вариантов индикации для ИЛС и пилотажного кадра.

## **Глава 4: Комплексы программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов**

В данной главе представлены комплексы программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов, установленные на УСП ФАУ «ГосНИИАС».

Разработано ПО:

- для анализа уровня подготовки пилотов [83];
- для анализа результатов комплексной эргономической оценки на базе УСП [84] [85] [86] [87];
- для проведения экспертной оценки на основе метода парных сравнений [88] [89];
- для моделирования и оценки ИУП на базе сенсорных дисплеев [90] [91] [92];
- для моделирования и оценки перспективной индикации системы самолётовождения, кадров управления самолётными системами, штатных и аварийных чек-листов с применением авиационного стандарта ARINC 661, адаптированных к сенсорному управлению [93] [94] [95] [96];
- для моделирования и оценки перспективной пилотажно-навигационной индикации [97] [98] [99];
- для моделирования и оценки функции управления взглядом и голосом в кабине пилотов [100] [101] [102];
- для моделирования и оценки резервного контура управления индикацией, конфигурацией и бортовыми системами [103].



## **4.1 Программные комплексы для моделирования и оценки перспективных компонентов кабины пилотов**

Тенденции к отображению лётному экипажу самолёта гражданской авиации оптимального объёма информации, необходимой для эффективного управления транспортным средством, успешно развиваются и принимают различные формы. Используется голографическое отображение на лобовом стекле, появляются гибкие прозрачные экраны – плёнки, увеличиваются и улучшаются характеристики жидкокристаллических экранов, применяются сенсорные экраны и т.д. [54], [53]. Естественно, что остаётся актуальным вопрос о надёжности и сертифицируемости новых компонентов ИУП кабины экипажа.

Актуальность оптимизации ИУП обуславливается важностью задачи синтеза оптимального ИУП кабины для авиации как ключевого фактора обеспечения безопасности полётов.

### **4.1.1 ИУП на базе сенсорных дисплеев**

В [61] показано преимущество ИУП, разработанного на основе многофункциональных дисплеев, над старым поколением электромеханических ИУП. Переход к сенсорной кабине следует рассматривать как следующий шаг глобальной модернизации ИУП кабины пилотов, который можно сравнить с переходом от электромеханической индикации к индикации на многофункциональных дисплеях. С помощью сенсорных дисплеев реализуется интерфейс, прочно вошедший в жизнь при работе с электронными планшетами: «листание» страниц экранов движением пальца, перетаскивание объектов по экрану, зуммирование изображения двумя пальцами и т.д.

Все ведущие зарубежные разработчики систем электронной индикации (Honeywell, Rockwell Collins, Thales Avionics) активно ведут опытно-

конструкторские работы в этом направлении, планируя в первую очередь применить дисплеи и пульта с сенсорными экранами на самолётах деловой авиации. АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения» также работает над этими задачами.

До настоящего времени дисплеи и пульта с сенсорными экранами не находили применения на борту ВС гражданской авиации из-за отсутствия соответствующей нормативной базы. Базирующаяся в Фениксе компания аэрокосмической промышленности Honeywell в рамках текущего контракта с Федеральным Управлением Гражданской Авиации США (FAA), изучает применение различных форм сенсорных технологий в кабине экипажа. Исследования проводятся с сенсорными экранами и пультами. Цель исследований – определить, какие факторы заставляют пилотов делать больше ошибок при вводе данных или тратить большее время на исполнение задач по сравнению с традиционными контролируемые вручную интерфейсами кабины.

Использование технологии сенсорных дисплеев несёт в себе много преимуществ, но без необходимой исследовательской базы, учитывающей присущие данной области особенности, внедрение сенсорного управления не видится возможным повсеместно, в особенности в авиации транспортной категории, где сертификационные требования особенно жёсткие.

Внедрение сенсорного управления в кабине может значительно повлиять на ряд следующих характеристик ВС:

- улучшить эргономичность процесса управления комплексом оборудования;
- улучшить надёжность комплекса за счёт замены электромеханических органов управления дисплеями;
- снизить стоимость разработки ИУП и внесения доработок;
- снизить вес за счёт сокращения количества проводов и оборудования;
- снизить сложность монтажа.

В целях моделирования и оценки перспективной кабины на основе сенсорных дисплеев был разработан программный комплекс, обеспечивающий проведе-

ние исследований и испытаний с участием лётного состава на базе УСП. На рисунке 19 показан общий вид и компоновка ИУП кабины перспективного самолёта, моделируемые с помощью данного программного комплекса.

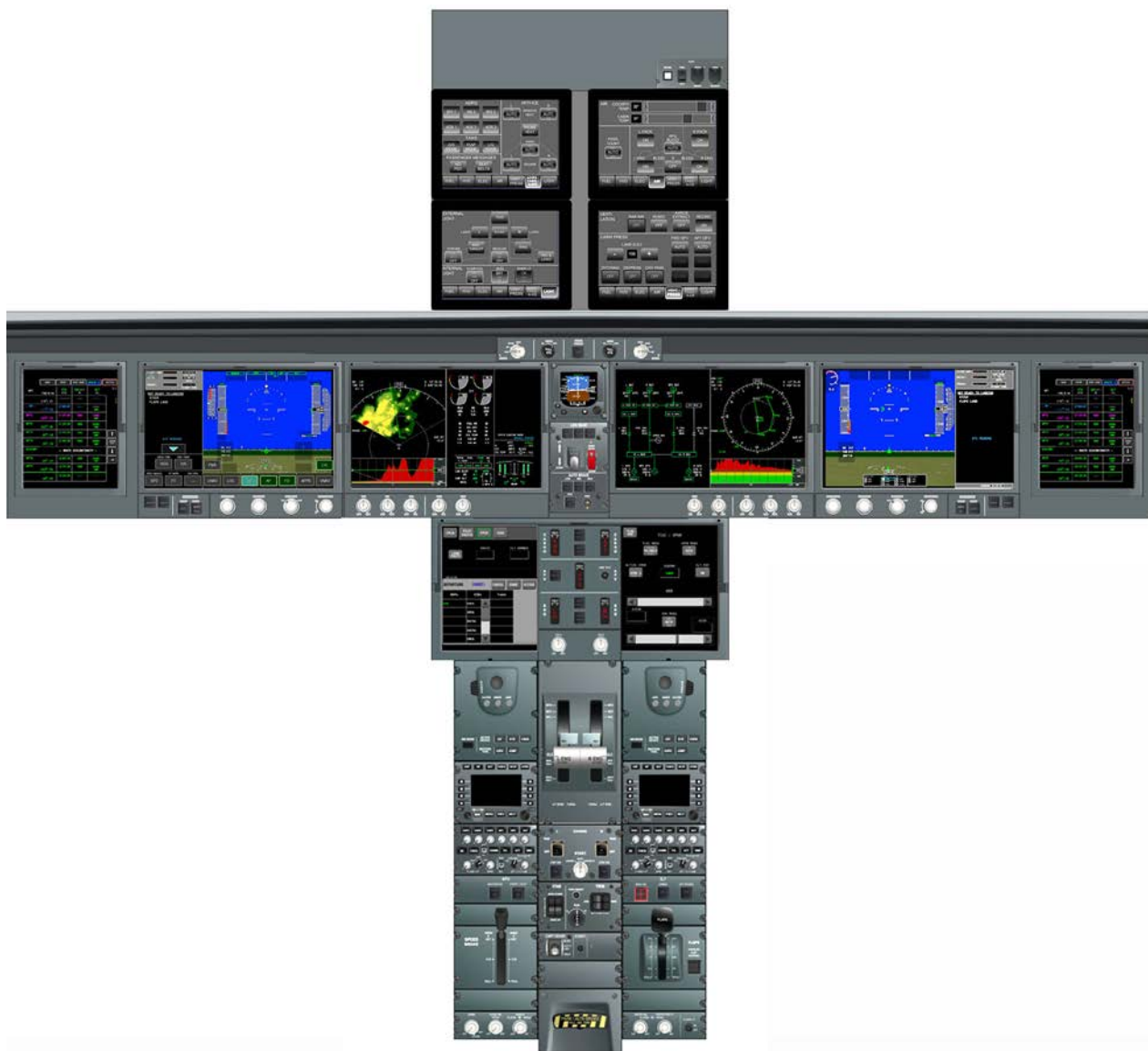


Рисунок 19. ИУП кабины перспективного самолёта на основе сенсорных дисплеев

Основу ИУП кабины составляют 12 сенсорных дисплеев. Дисплеи размером 7" служат заменой традиционному потолочному пульту и позволяют управлять самолётными системами через свой графический интерфейс. Благодаря четырёхкратному резервированию можно обеспечить высокую степень надёжности взаимодействия с самолётными системами.

На приборной доске располагаются четыре сенсорных широкоформатных дисплея размером 15", на которые выводятся пилотажные, навигационные и синоптические кадры, дополненные интерактивными элементами с возможностью сенсорного управления.

На наклонной части передней панели и боковых консолях располагаются дисплеи размером 8", предназначенные для более удобного взаимодействия через сенсорный ввод с кадрами системы самолётовождения (FMS), электронными чек-листами и др.

Штатный и аварийные чек-листы (рисунок 20) составляют основу безопасности полёта в рамках данной концепции, позволяя выполнять штатные процедуры и парировать отказные ситуации непосредственно в зоне чек-листа (в 90% случаев) без необходимости перенаправления взгляда на потолочный или средний пульты. Навигационный кадр (рисунок 20) обладает функциями прямого управления маршрутом посредством взаимодействия с точками маршрута при помощи сенсорного ввода, что позволяет быстро и наглядно вводить изменения в заданный маршрут. Также для навигационного кадра доступны функции зуммирования и перемещения по карте при помощи пальцев руки.



Рисунок 20. Штатный, аварийный чек-листы и навигационный кадр

В рамках данной исследования были разработаны кадры FMS, адаптированные для работы с сенсорным вводом (рисунок 21). Учитывая большой объём вза-

имодействия экипажа с FMS, данный подход может на порядок увеличить эффективность работы с данной системой, тем самым значительно снизив нагрузку на экипаж.



Рисунок 21. Кадры FMS

Учитывая естественные ограничения, накладываемые стандартом ARINC 661, автор столкнулся с рядом проблем, затрудняющих реализацию удобного и красивого графического интерфейса. Данные проблемы были успешно преодолены путём разработки оригинальной методологии работы со стандартом, основанной на применении наборов виджетов (widget set). Данная методология позволяет работать исключительно с виджетами, описанными в стандарте, без необходимости разработки новых, что являлось бы крайне нежелательным и противоречащим духу стандарта.

Учитывая новизну технологии сенсорных дисплеев для авиации, а также очевидные проблемы, возникающие в условиях турбулентности, в рамках данной концепции был разработан резервный контур управления индикацией на основе электромеханического пульта с кноппелем (рисунок 22). Данный контур обеспечивает функцию управления интерактивными элементами дисплеев посредством отклонения кноппеля в сторону требуемого элемента и последующей активации данного элемента нажатием на встроенную в кноппель кнопку (режим Jumping). Также возможен курсорный режим управления, в котором кноппель управляет

положением курсора, свободно перемещающегося по странице; данный режим может быть удобен при взаимодействии с навигационным кадром.



Рисунок 22. Графический интерфейс модели пульта резервного контура управления

На рисунке 23 представлена архитектура программного комплекса (интегрированного в состав УСП кабины пилотов [82]), разработанного в рамках данного исследования и позволяющего проводить моделирование ИУП кабины пилотов на основе сенсорных дисплеев, ПО которых разработано с применением стандарта ARINC 661 (для наглядности на схеме отображены только 6 из 12 дисплеев ИУП).

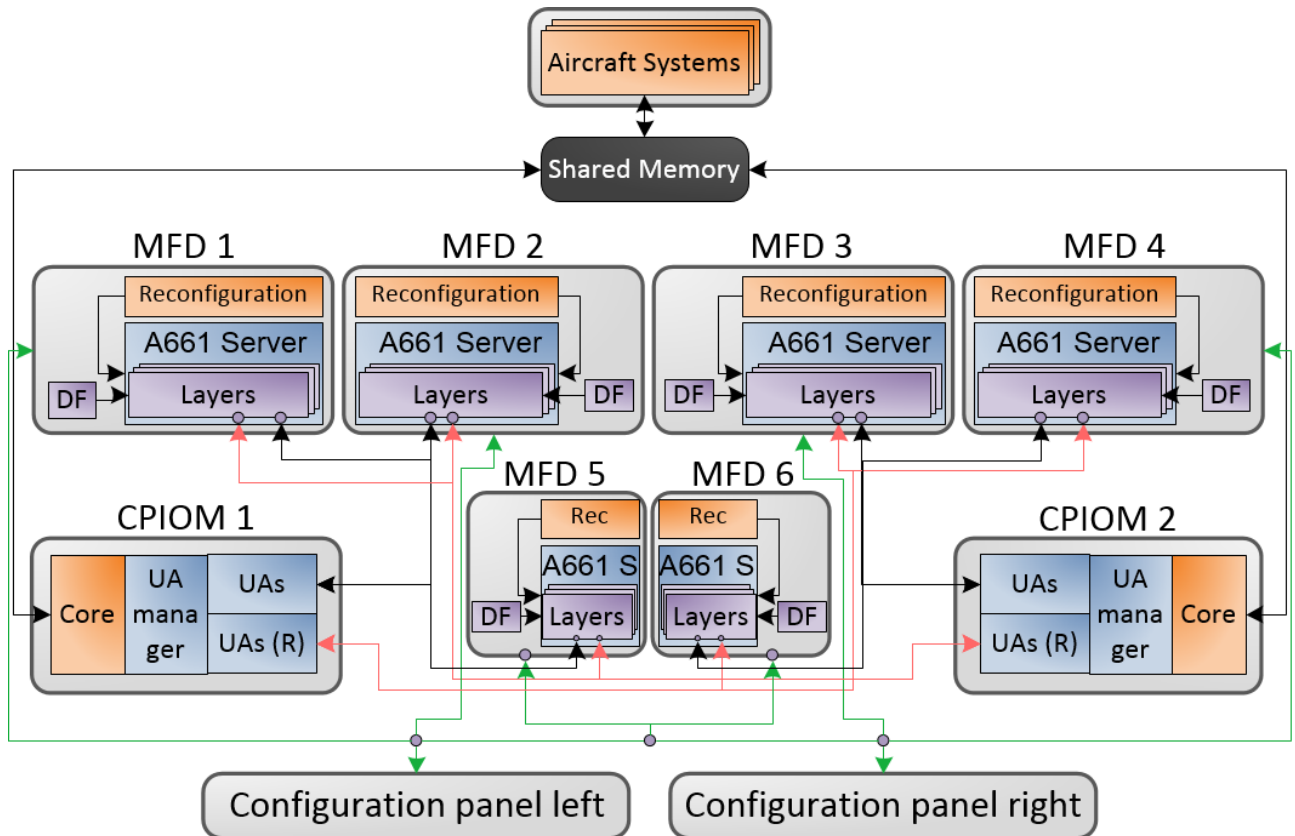


Рисунок 23. Архитектура программного комплекса для отработки ИУП кабины пилотов

Стандарт ARINC 661 призван упорядочить разработку систем экранной индикации кабины экипажа (CDS) и упростить взаимодействие с пользовательскими приложениями (UA), которые управляют функциями самолётных систем и авионики, графический интерфейс ИУП при этом полностью определяется так называемыми Definition Files (DF) [104].

Стандарт ARINC 661 определяет дизайн форматов бортовой индикации, а также способ их взаимодействия с пользовательскими приложениями, предписывая использование predetermined и стандартизованных графических элементов (виджетов), одновременно стандартизируя протокол связи между пользовательскими приложениями и бортовыми дисплеями.

Разработчики бортовых систем индикации применяют виджеты для создания графического интерфейса пользователя. Использование этих виджетов означает, что нет необходимости разрабатывать графику с нуля для новых или модернизируемых пользовательских приложений, так как всё новое, созданное с помо-

щью виджетов, уже соответствует стандарту. Виджет может представлять простое графическое изображение или же выводить на дисплей подробные данные из какого-либо источника в авионике, например генерируя карту.

Компоновка и графические характеристики форматов индикации хранятся в так называемых Definition Files (DF), откуда их считывает и исполняет сервер ARINC 661, представляющий собой графический движок со встроенной имплементацией поведения виджетов в терминологии стандарта. Размер и тип отображаемых форматов индикации определяется модулем реконфигурации (Reconfiguration), экземпляр которого запускается в каждом дисплее. Также в модуле реконфигурации реализованы такие функции, как пролистывание и перемещение форматов, масштабирование карты и другие функции, связанные с сенсорным вводом.

Пользовательские приложения (User Applications, UAs) запускаются в вычислителях СРІОМ. Для обеспечения надёжности в каждом блоке СРІОМ, помимо основных UAs, также в горячем резерве работают резервные UAs (R), которые в случае отказа одного из блоков начинают взаимодействовать с графическими слоями (Layers), связанными с отказавшим СРІОМ.

Запуск и управление UAs осуществляется из специального приложения UA Manager, которое, в свою очередь, связано с программным ядром (Core), реализующим предметную логику приложения.

Резервные панели индикации и конфигурации (Configuration Panels) подключаются непосредственно к дисплеям и взаимодействуют с сервером ARINC 661 и модулем реконфигурации, обеспечивая функционирование резервного контура взаимодействия с форматами индикации в случае неполадок.

Основная часть программного комплекса реализована при помощи инструментов SCADЕ компании ANSYS, имеющих функцию компиляции ПО под различные аппаратные платформы, используя встроенный кодогенератор, что позволяет применять реализованное ПО не только в составе УСП, но также и в составе бортового комплекса.



Остальные программные решения реализованы на языке высокого уровня (с#) и позволяют быстро и удобно настраивать конфигурацию программного комплекса и обеспечивать высокую эффективность моделирования и оценки ИУП.

Использование языка высокого уровня и продуктов ANSYS со встроенным низкоуровневым сертифицированным кодогенератором позволяет создать оптимальный баланс между мобильностью и удобством работы с программным комплексом, с одной стороны, и возможностью использовать созданный технический задел для бортового применения, с другой.

#### **4.1.2 Перспективная пилотажно-навигационная индикация**

Ограниченная видимость при пилотировании ВС на малых высотах и рулении по взлётно-посадочной полосе остаётся одним из самых весомых факторов, влияющих как на безопасность, так и на эффективность воздушных перевозок. Она является основной причиной задержки и переноса авиарейсов, поскольку препятствует визуальному контакту экипажа со взлётно-посадочной полосой при визуальном заходе на посадку и, в отсутствие систем инструментального захода, вынуждает экипажи уходить на другой аэродром. Кроме того, если погодные условия перестают удовлетворять правилам визуального пилотирования, диспетчеры вынуждены прибегнуть к увеличению дистанций для разделения воздушного трафика.

Целый ряд бортовых и аэродромных систем (системы инструментального захода на посадку, индикаторы пространственного положения ВС, система раннего предупреждения близости земли и др.) призваны помочь экипажу ВС при пилотировании в условиях ограниченного обзора из кабины. Однако статистика авиационных происшествий показывает, что в одной только бизнес-авиации более 30% авиационных происшествий относятся к категории «Столкновение с землёй в контролируемом полёте», когда штатно функционирующие ВС сталкиваются с

землёй или препятствиями из-за пространственной дезориентации экипажа, вызванной плохой видимостью.

В целях моделирования и оценки перспективной пилотажно-навигационной индикации был разработан программный комплекс, обеспечивающий проведение исследований и испытаний с участием лётного состава на базе УСП. На рисунке 24 показана перспективная пилотажно-навигационная индикация, моделируемая с помощью данного программного комплекса.

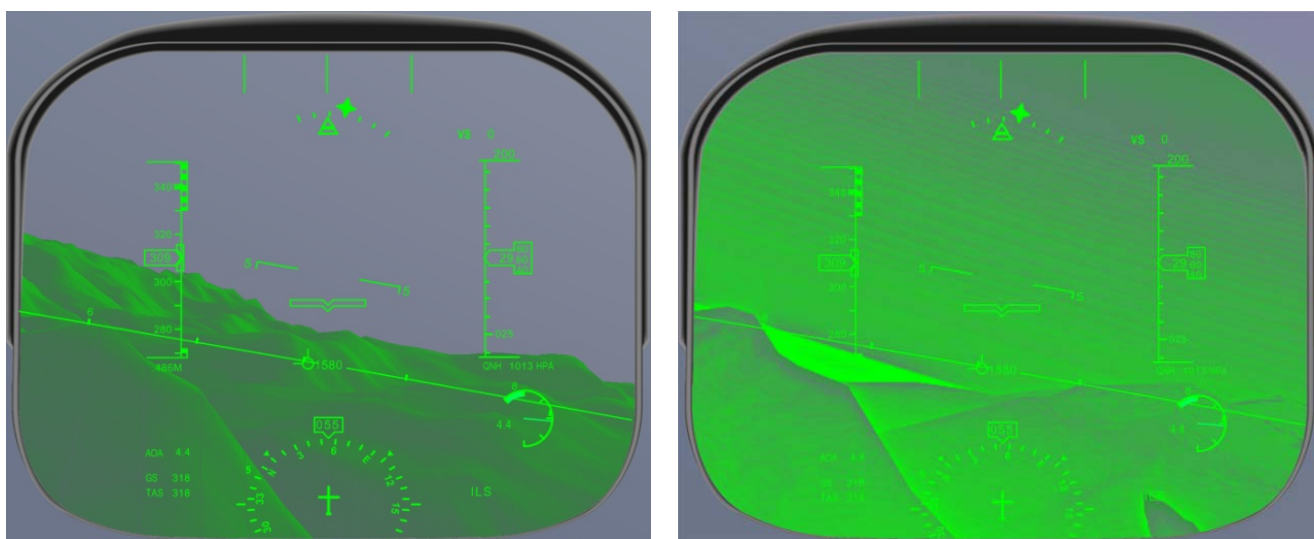


Рисунок 24. Перспективная пилотажно-навигационная индикация

На рисунке 25 представлена архитектура программного комплекса (интегрированного в состав УСП кабины пилотов), позволяющего проводить моделирование пилотажно-навигационной индикации на лобовом стекле.

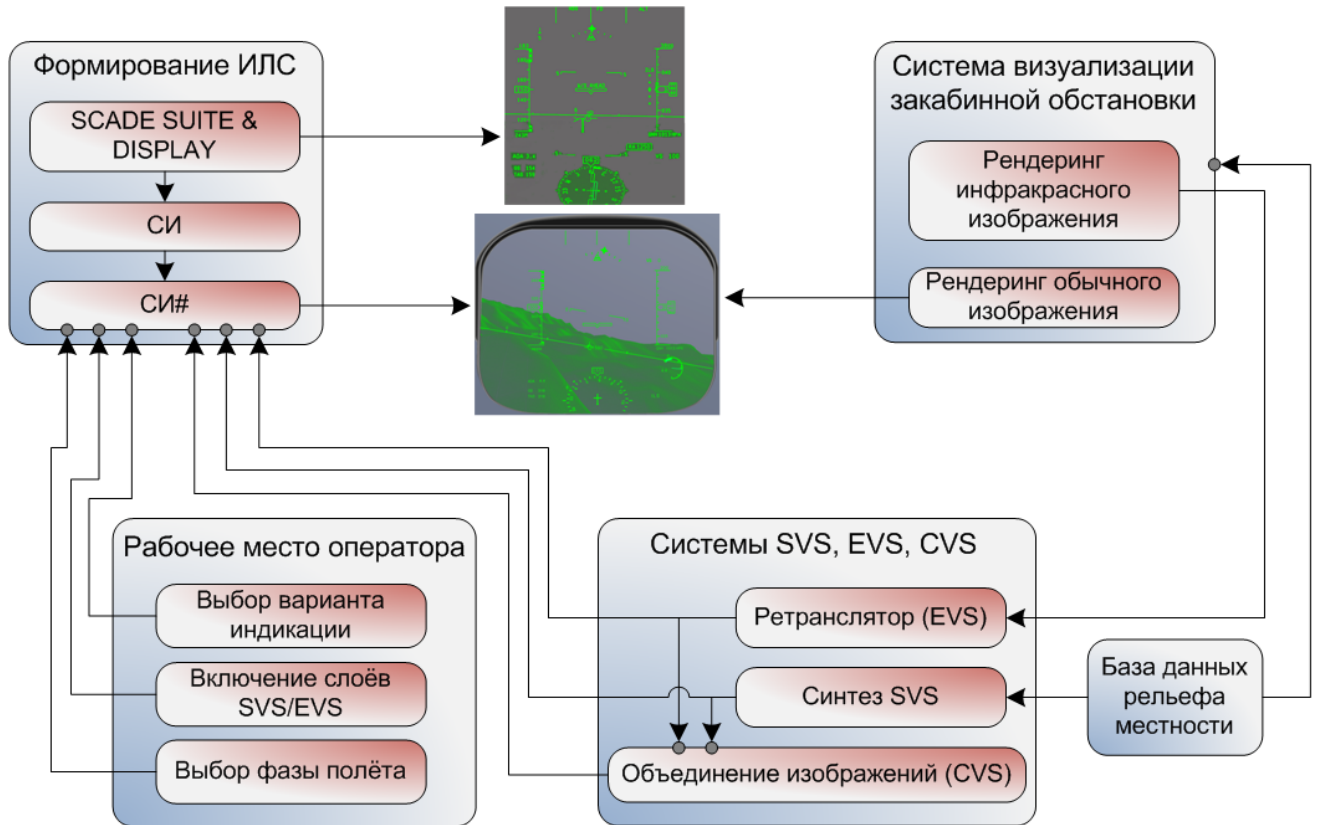


Рисунок 25. Архитектура программного комплекса, позволяющего проводить моделирование пилотажно-навигационной индикации на лобовом стекле

Программный комплекс позволяет проецировать графические изображения мнемосимволов ИЛС, формируемых программным ядром на систему экранной визуализации закабинной обстановки, а также добавлять графические слои от систем синтезированного / улучшенного / комбинированного видения (SVS/EVS/CVS).

Программное ядро реализовано при помощи инструментов SCADЕ компании ANSYS, имеющих функцию компиляции ПО под различные аппаратные платформы, используя встроенный кодогенератор, что позволяет применять реализованное ПО не только на УСП, но также и в составе бортового комплекса.

Рабочее место оператора позволяет производить быстрое переключение вариантов ИЛС и их отдельных элементов, включать и настраивать режимы слоёв SVS/EVS/CVS, изменять компоновку ИЛС в соответствии с фазой полёта.

### 4.1.3 Резервный контур управления индикацией и конфигурацией

Современные устройства ввода и управления, такие как клавиатура, трекбол и тачпад, прочно вошли в ИУП кабины пилотов самолётов гражданской авиации. С другой стороны, начинают применяться более совершенные способы управления, такие как кнопочное управление и управление на основе «шайбы». Взаимодействие с ИУП, базирующееся на сенсорных дисплеях, также постепенно внедряется в деловой авиации (где сертификационные требования менее суровые, нежели в авиации транспортной категории). В то же время стоит отметить, что помимо тактильного способа взаимодействия с ИУП существуют и более современные и перспективные технологии, такие как голосовое управление и управление взглядом.

Управление взглядом уже давно используется для управления персональным компьютером. В операционной системе Windows применяется технология Eye Control, которая требует наличие специальной камеры-контроллера, считывающей движение глаз пользователя. Например, переведя взгляд на специальную панель управления, можно открыть почту, удерживая взгляд на соответствующем элементе панели. Для управления элементами Windows малого размера предусмотрено всплывающее окно для точной фокусировки.

Что касается внедрения функции управления взглядом и голосом на ВС, то необходимо отметить, что на данный момент подобных примеров нет, но работы над применением данной технологии ведутся многими разработчиками авионики, такими как Honeywell, Thales, Elbit Systems и др. [105] [106] [107] [108] [109] [110].

В целях моделирования перспективного резервного контура управления индикацией, а также функций управления кнопочным, взглядом и голосом был разработан специальный программный комплекс, обеспечивающий проведение исследований и испытаний с участием лётного состава на базе УСП. На рисунке 26 представлена архитектура программно комплекса, обеспечивающего взаимодей-

стве с интерактивными элементами дисплейной индикации при помощи кноппеля, взгляда и голоса.

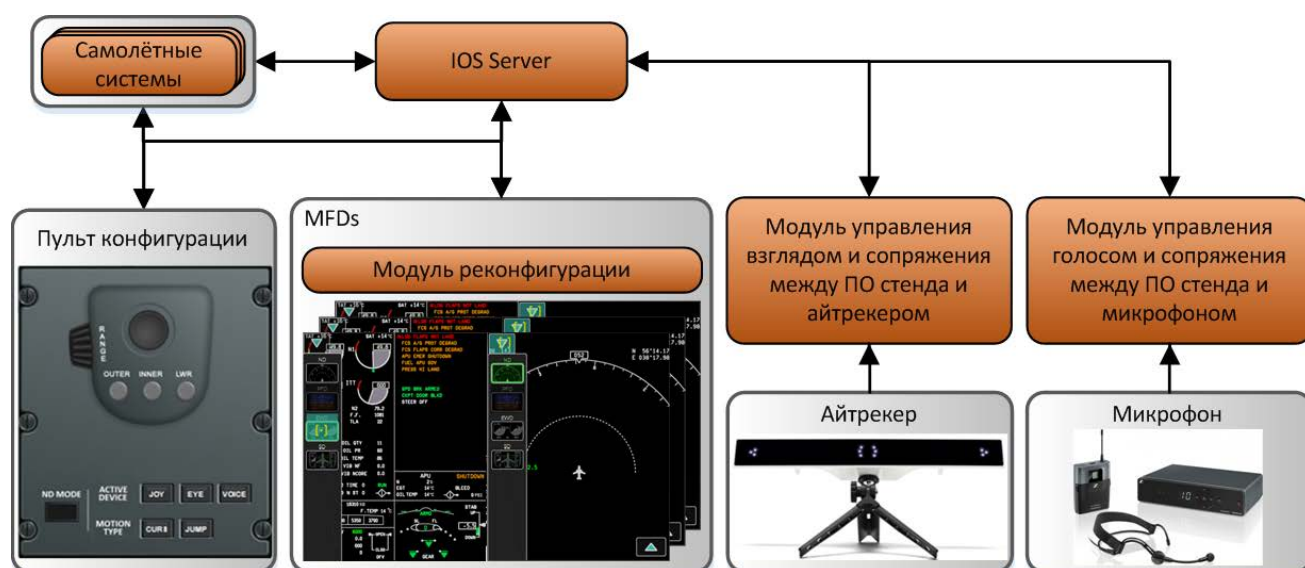


Рисунок 26. Архитектура программного комплекса для моделирования взаимодействия с интерактивными элементами дисплейной индикации при помощи кноппеля, взгляда и голоса

Пульт конфигурации позволяет осуществлять взаимодействие с интерактивными элементами дисплейной индикации и производить реконфигурацию форматов индикации исходя из задач, соответствующих текущей фазе полёта.

Пульт позволяет активировать следующие режимы взаимодействия с ИУП: Joy (взаимодействие с использованием кноппеля), Eye (управление взглядом) и Voice (голосовое управление). Одновременная активация режимов Joy и Eye блокируется в целях избежания путаницы при взаимодействии с ИУП. В то же время режим Voice может включаться независимо от режимов Joy и Eye, т.к. функция голосового управления не пересекается с данными типами управления в части пользовательского интерфейса.

Для режимов Joy и Eye доступны также подрежимы Curs и Jump. В подрежиме Curs обеспечивается плавное передвижение курсора в границах кадра дисплейной индикации. Курсор перемещается вслед за взглядом или в направлении отклонения кноппеля. В подрежиме Jump осуществляется скачкообразное пере-

мещение между элементами кадра. Подрежим Jump позволяет увеличить скорость выполнения операций при управлении кноппелем и не создаёт «мельтешения при управлении взглядом. Подрежим Curs менее быстрый, но может быть полезен, к примеру, для редактирования интерактивного плана полёта на навигационном кадре.

Кноппельное управление позволяет осуществлять быструю навигацию по интерактивным элементам кадров в качестве альтернативы сенсорному управлению, что может являться удобным решением при возникновении турбулентности.

Для отслеживания положения взгляда используется айтрекер Gazepoint GP3. Данный айтрекер находится в средней ценовой категории и имеет достаточную точность для целей демонстрации концепции управления взглядом. Для применения в реальных условиях на борту ВС точности данного айтрекера будет недостаточно, поэтому рекомендуется использовать более дорогостоящее оборудование с улучшенными характеристиками.

Программа EyeTrackCoordConvertor осуществляет взаимодействия с API (программный интерфейс приложения) айтрекера, считывая положение зрачков в координатах от 0 до 1 по высоте и ширине и передавая эти данные на обработчик координат, который конвертирует координаты в требуемый формат для взаимодействия с курсором на экране бортового дисплея.

Программа Configuration Panel моделирует работу пульта управления индикацией и реконfigurацией. Данный пульт позволяет устанавливать различные режимы управления индикацией и реконfigurацией, в том числе режим управления при помощи взгляда.

Для включения режима управления взглядом необходимо нажать на кнопку EYE, при этом светосигнализатор кнопки должен загореться зелёным цветом.

Управление взглядом может осуществляться в двух режимах:

- курсорный режим (при перемещении взгляда по дисплею курсор всегда двигается за точкой взгляда) вызывается нажатием на кнопку CURS;

- режим прыжков (при перемещении взгляда по дисплею курсор скачком перемещается на ближайший к точке взгляда элемент) вызывается нажатием на кнопку JUMP.

Для активации выбранного при помощи взгляда элемента индикации используется кнопка, встроенная в кнопочель пульта.

Программа MFD моделирует работу бортового дисплея. Данный дисплей отображает информационные кадры самолётных систем, а также меню управления индикацией и реконfigurацией, рассчитанное на сенсорное управление. Модуль реконfigurации дисплея обрабатывает входящие данные от программы EyeTrackCoordConvertor и осуществляет навигацию по интерактивным элементам информационных кадров и элементам меню.

На программном уровне определение текущего элемента осуществляется следующим образом:

- строится карта всех видимых и незаблокированных интерактивных элементов информационного кадра и меню (при изменении видимости и статуса блокировки карта перестраивается);
- определяется ближайший интерактивный элемент к текущему положению взгляда (чтобы избежать перескакивания фокуса в случае, когда взгляд находится на стыке областей интерактивных элементов, используется гистерезис);
- определённый элемент подсвечивается как элемент, получивший фокус.

Программа IOSServer обеспечивает коммуникацию между MFD, EyeTrackCoordConvertor и Configuration Panel. Для отладки и контроля, а также для наглядной демонстрации принципа управления взглядом в IOSServer предусмотрена специальная панель, на которой отображаются все дисплеи ИУП перспективной кабины (рисунок 27). На одном из дисплеев всегда отображается красный квадрат, который соответствует положению взгляда. В случае необходимости отладки без айтрекера данная панель может применяться для установки имитируемого положения взгляда путём непосредственного перетаскивания красного квадрата мышкой или пальцем.

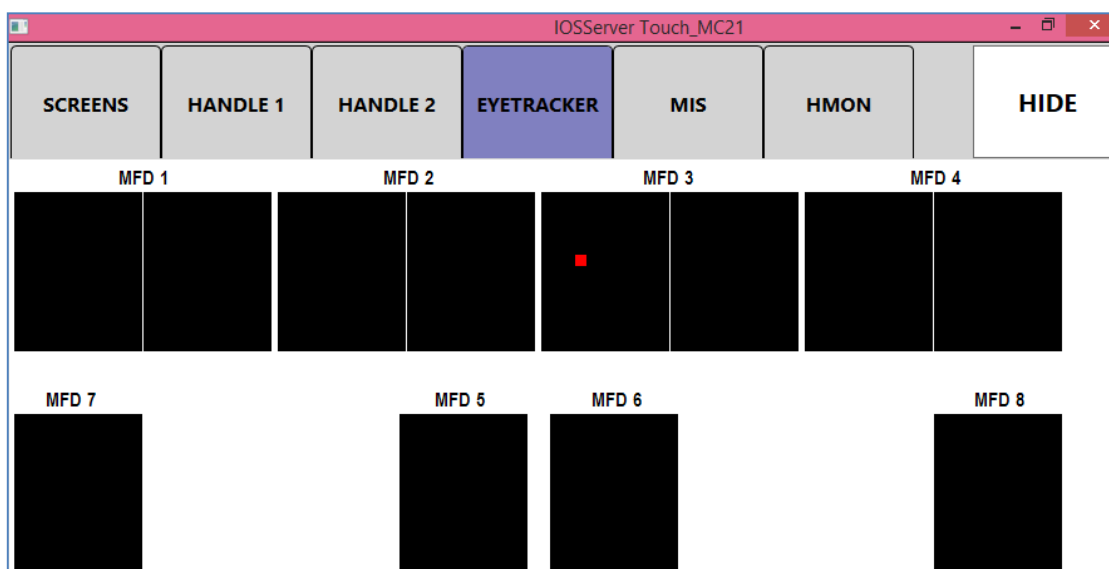


Рисунок 27. Панель отладки и контроля положения взгляда

Для демонстрации функции управления взглядом рассмотрим выполнение задачи по переключению формата индикации. Произведём переключение навигационного кадра на кадр текстовых сообщений и информации о двигателях (EWD), для этого выполним следующие шаги (см. рисунки 28 и 29).

1. После включения режима управления взглядом переносим взгляд на кнопку вызова главного меню кадра, в результате чего курсор окажется на данной кнопке, а кнопка изменит свою заливку.
2. На панели отладки и контроля красный квадрат появится в соответствующей зоне.
3. Не отрывая взгляда от выбранной кнопки вызова, нажмём на кнопку пульта управления индикацией и конфигурацией, в результате чего откроется главное меню.



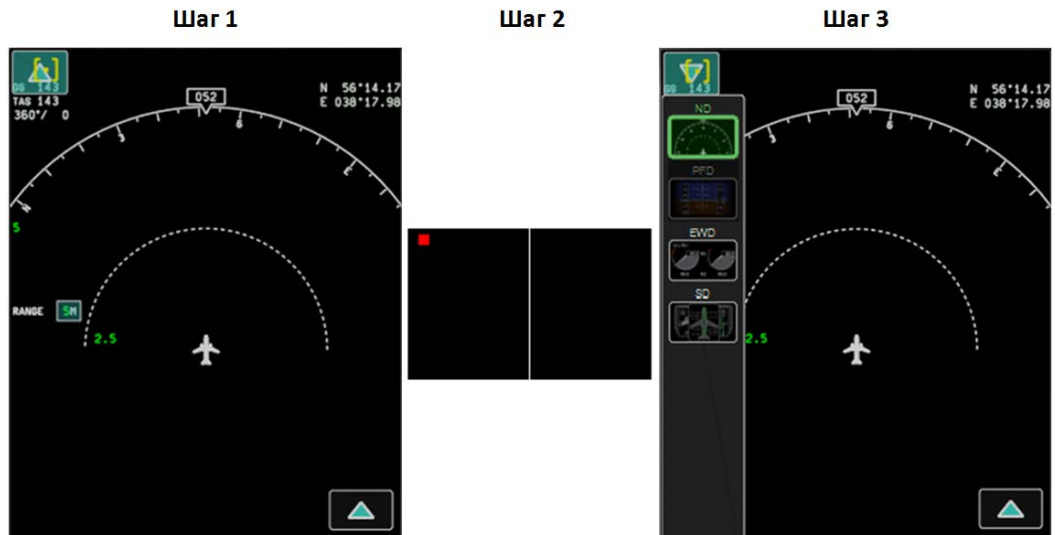


Рисунок 28. Демонстрация функции управления взглядом. Часть 1

4. Перенесём взгляд на кнопку вызова кадра EWD, в результате чего курсор окажется на данной кнопке, а кнопка изменит свою заливку.
5. На панели отладки и контроля красный квадрат появится в соответствующей зоне.
6. Нажмём на кнопочель пульта управления индикацией и конфигурацией, в результате чего появится кадр EWD.



Рисунок 29. Демонстрация функции управления взглядом. Часть 2

Для приёма голосовых команд используется беспроводная радиосистема

Sennheiser XSW в комбинации с внешней звуковой картой Behringer UM2 U-Phoria. Данное оборудование обладает достаточными характеристиками для демонстрации концепции управления голосом. В реальных условиях с учётом шума, возникающего в кабине во время полёта, качества данного оборудования может быть недостаточно, поэтому рекомендуется использовать более дорогостоящее оборудование с улучшенными характеристиками.

Программа SpeechRecognition осуществляет перевод голосовых сигналов в текстовые команды. Данное ПО связывается с используемым микрофоном и при его активации начинает запись речи. Распознавание и перевод голосовых команд в текстовый вид производится с помощью общедоступного инструмента PocketSphinx. Распознавание происходит благодаря предварительно обученной на базе английских текстов языковой марковской модели. При использовании данного инструмента необходимо задать синтаксическую структуру предполагаемого текста. Для улучшения точности распознавания имеется возможность провести соответствующую настройку под голос конкретного человека.

Для управления ИУП кабины использовался следующий синтаксис голосовых команд: <Keyword> <Command>. Данный синтаксис позволяет разделить наборы команд по ключевым словам. Программа прослушивает речь до тех пор, пока не идентифицирует одно из ключевых слов, далее ожидается приём команды заранее заданного типа.

Например, для управления реконфигурацией синоптических страниц необходимо произнести фразу следующего формата:

*Display number (опционально): {one, two, ..., five}, side: {left; right}, type: {pdf, ewd, ..., fuel}.*

«Display» является ключевым словом (Keyword), а остальная часть фразы – командой (Command).

Создание объектов конфигурации модели, декодера, микрофона, а также декодирование записанного высказывания осуществляется с помощью встроенных инструментов PocketSphinx. Результаты создания данных объектов, а также результаты распознавания команд отображаются в специальном разработанном

окне (рисунок 30). При распознавании ключевого слова (display) программа настраивается на распознавание голосовой команды соответствующей структуры, также в правом верхнем углу выводится текстовая информация о том, что программа готова к прослушиванию команды.

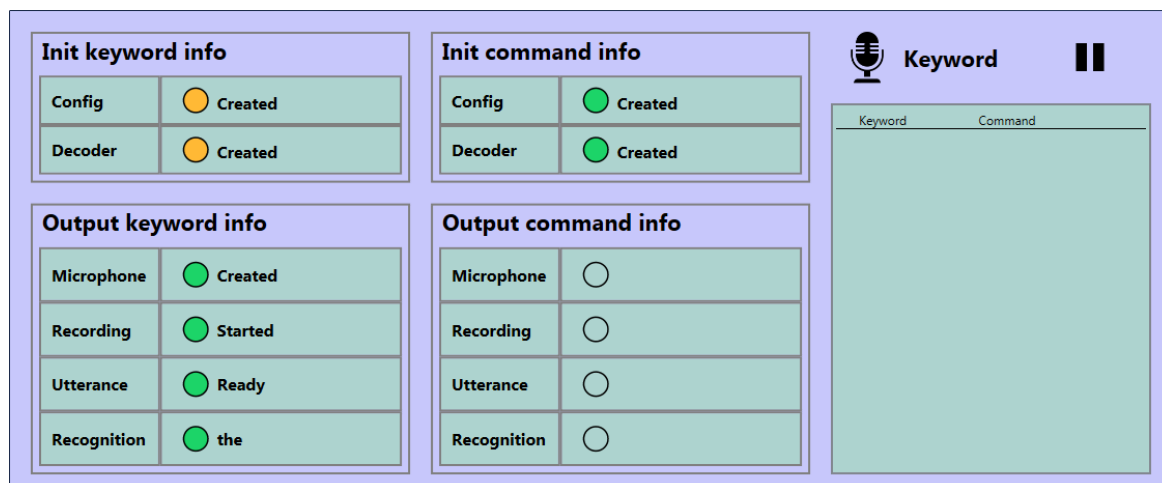


Рисунок 30. Интерфейс программы SpeechRecognition

Пульт конфигурации позволяет устанавливать различные режимы управления индикацией и реконфигурацией, в том числе режим управления при помощи голоса. Для включения режима управления голосом необходимо нажать на кнопку VOICE, при этом светосигнализатор кнопки должен загореться зелёным цветом.

Программа MFD моделирует работу бортового дисплея. Данный дисплей отображает информационные кадры самолётных систем, а также меню управления индикацией и реконфигурацией, рассчитанное на сенсорное управление. Модуль реконфигурации дисплея обрабатывает входящие данные от программы SpeechRecognition и осуществляет навигацию по интерактивным элементам информационных кадров и элементам меню.

На программном уровне определение текущего элемента осуществляется следующим образом: входящая команда разбивается по ключевым словам, а затем по данным ключам определяется, какой именно кадр необходимо отобразить. Логика алгоритма реконфигурации реализована в соответствии с авиационными

стандартами в части индикации (например, требуется индикация хотя бы одного пилотажного кадра для каждого пилота и хотя бы одного кадра EWD на всю кабину).

Программа IOSServer обеспечивает коммуникацию между MFD, SpeechRecognition и пультом конфигурации. Для отладки и контроля функции управления голосом в IOSServer предусмотрена специальная панель с окном, в котором отображается текст распознанных команд. В случае необходимости можно включить режим отладки и задавать текстовые команды без микрофона с клавиатуры. Также на данной панели отображается индикатор связи с программой SpeechRecognition (рисунок 31).

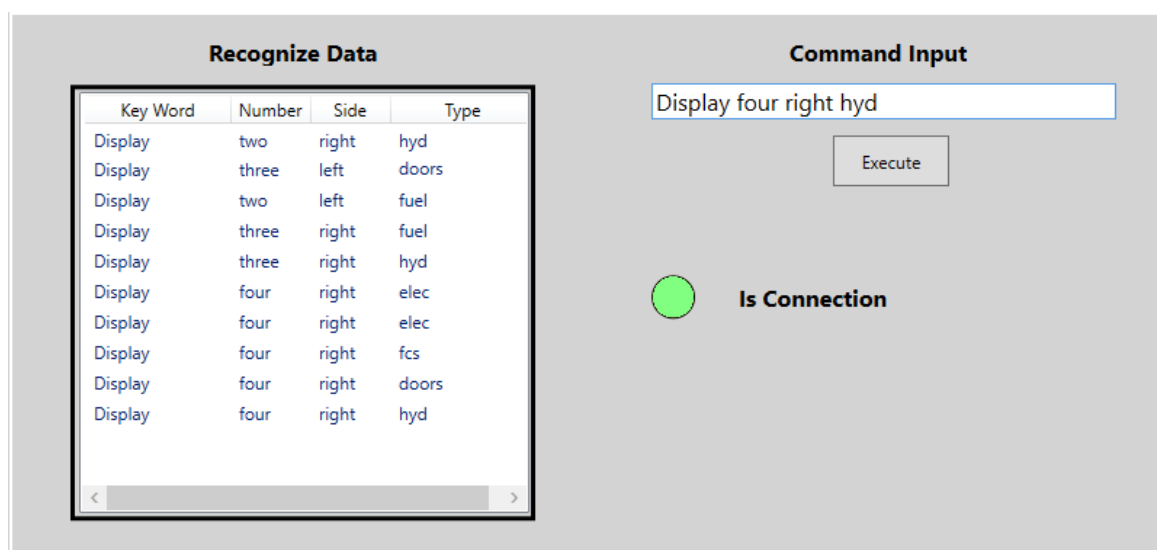


Рисунок 31. Панель отладки и контроля голосовых команд

Для демонстрации функции управления голосом рассмотрим выполнение задачи по переключению формата индикации. Произведём переключение кадра системы электроснабжения (ELEC) на третьем дисплее на кадр топливной системы (FUEL), для этого выполняется следующая последовательность действий:

- 1) включается режим голосового управления нажатием кнопки voice на панели конфигурации (см. рисунок 22), при этом на панели отладки и контроля индикатор связи с модулем speech recognition (isconnection) загорится зеленым;
- 2) в микрофон произносится ключевое слово «display», в результате чего в

окне программы speechrecognition появляется индикатор распознавания ключевого слова и его текст;

3) произносится команда «three left fuel», результат распознавания фиксируется в окне программы speechrecognition и в случае успешного декодирования отображается на панели отладки и контроля;

4) на левой стороне третьего дисплея отобразится кадр fuel (рисунок 32).

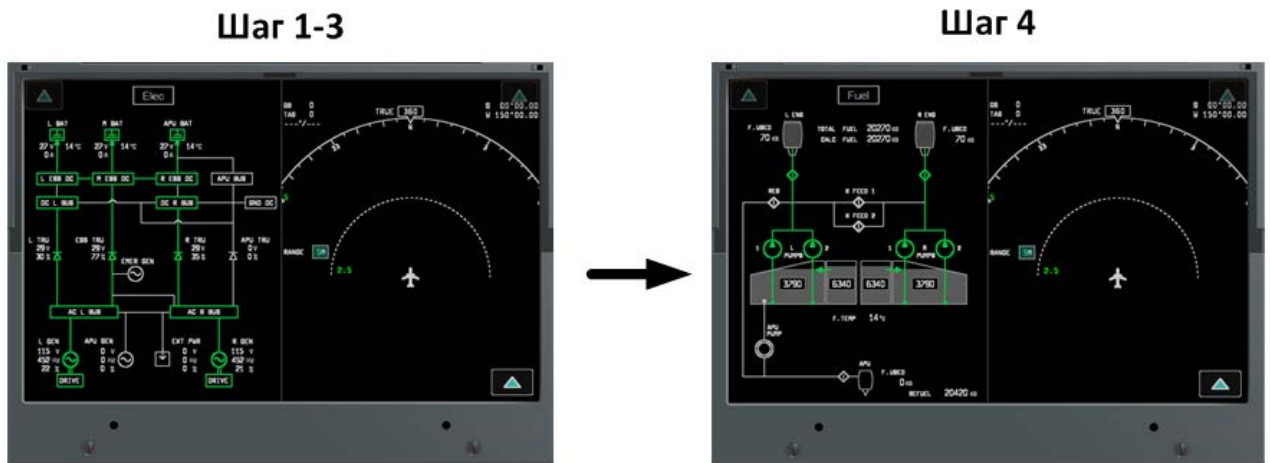


Рисунок 32. Пример использования голоса для реконфигурации синоптических страниц

Представленный выше программный комплекс был апробирован с участием лётных экспертов. В результате оценки были сделаны следующие выводы:

- функции управления кноппелем, взглядом и голосом позволяют существенно увеличить скорость ряда типовых операций по сравнению с классическими способами взаимодействия с ИУП кабины пилотов (такие как трекбол и тачпад);
- в случае использования сенсорных дисплеев как основного способа взаимодействия с ИУП кабины пилотов функции управления кноппелем, взглядом и голосом могут использоваться в качестве резервного контура взаимодействия с ИУП в случае турбулентности;

- при управлении взглядом достигается большее удобство за счёт того, что пилот прибывает в более комфортном положении, чем при использовании сенсорных дисплеев;
- голосовое управление также позволяет находиться в комфортном положении, при этом не отрывая взгляда от критически важной индикации.

Представленные типы взаимодействия с ИУП существенно увеличивают скорость и удобство выполнения полётных задач, опережая по данным показателям традиционные способы, тем самым снижая нагрузку на экипаж и увеличивая безопасность полётов. Данный программный комплекс интегрирован в состав УСП кабины пилотов и прошёл предварительную апробацию с участием лётного и инженерного состава.

#### **4.2 Программный комплекс оценки уровня подготовки пилотов**

Программный комплекс оценки уровня подготовки пилотов ISFA, разработанный автором, был интегрирован в УСП кабины пилотов с целью автоматизации процесса оценки и отработки технологии на платформе, близкой по функциональности и назначению к целевой. На рисунке 33 представлена архитектура взаимодействия модулей ISFA и УСП кабины пилотов, разработанного ФАУ «ГосНИИАС».

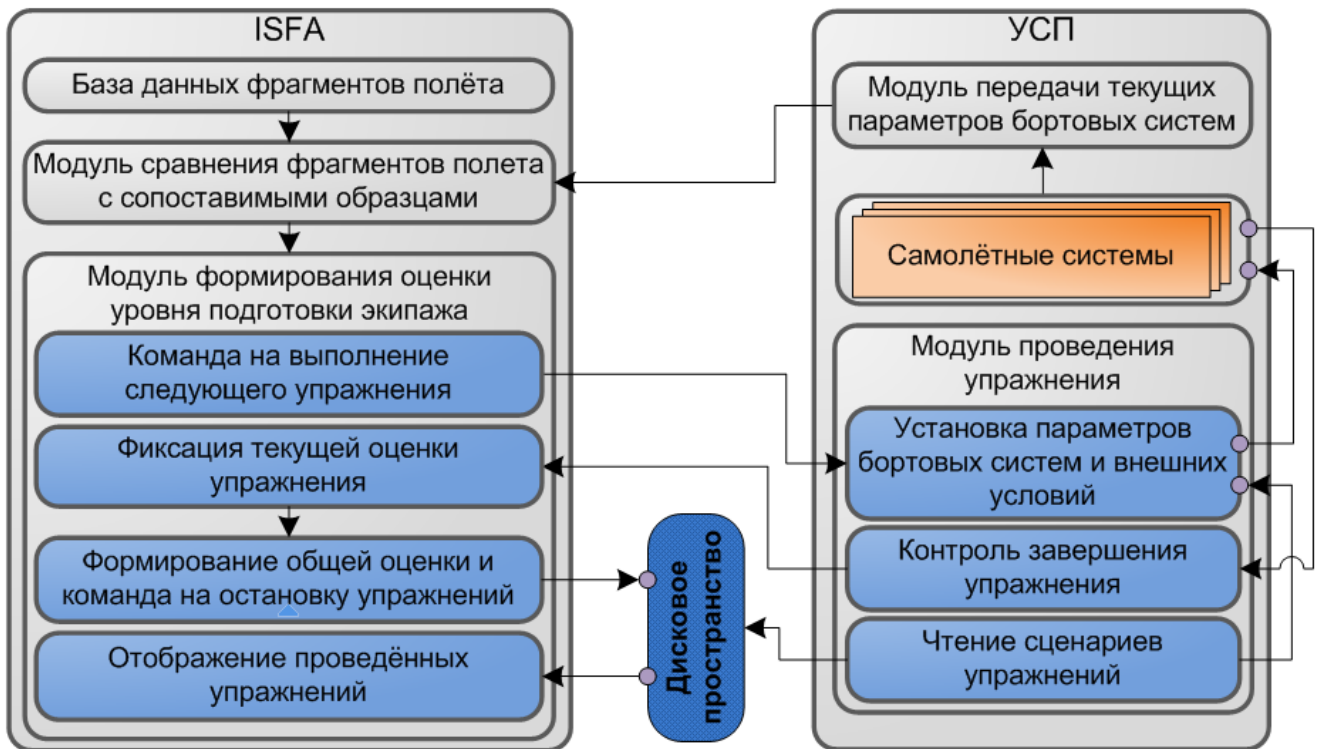


Рисунок 33. Архитектура взаимодействия модулей ISFA и УСП

Экзаменуемому пилоту предлагается выполнение определённого упражнения на УСП. После начала упражнения, начинается процесс записи параметров на жёсткий диск, а также поиск ближайшего паттерна лётного упражнения в реальном времени. В зависимости от качества выполнения упражнения выставляется определённая оценка. В дальнейшем возможно проведение более подробного анализа полученных результатов, в том числе с отображением ошибок пилотирования, повлиявших на оценку (в виде сравнения графиков эталонных и полученных лётных параметров).

На рисунках 34 – 40 представлена последовательность графических интерфейсов, иллюстрирующая этапы работы ISFA при выполнении выхода из сложного пространственного положения на УСП кабины экипажа.

На рисунке 34 отображается информация о выбранном паттерне, такая как номер, тип и качество проведения лётного упражнения.

Maneuver Information	
No	1
Maneuver	Upset Recovery
Date	30 . 5 . 2021
Qualification	Average
1st Pilot ID	0
2nd Pilot ID	0
Information 1	0
Information 2	0
Admission	No

Parameter Names	
Angle of attack	
Pressure altitude	
Indicated airspeed	
Roll Euler angle	
Pitch Euler angle	
Vertical speed indication	
Left/right stab trim indicator	
Engine NI	
Elevator deflection	

Рисунок 34. Информация о выбранном лётном упражнении

На рисунке 35 отображается панель выбора представителей групп параметров с высокой внутренней корреляцией с помощью метода главных компонент. В рамках описанной задачи, были определены следующие наиболее представительные параметры: indicated airspeed (приборная скорость), pitch angle (угол тангажа), angle of attack (угол атаки), roll angle (угол крена), pressure altitude (баровысота).

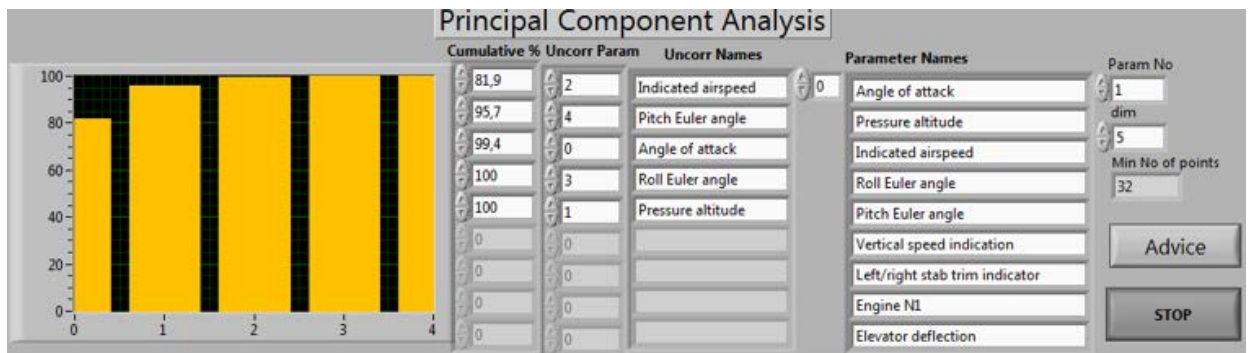


Рисунок 35. Выбор представителей групп параметров с высокой внутренней корреляцией с помощью метода главных компонент

На рисунке 36 отображается панель представления временных рядов значений параметров соответствующими вейвлет-коэффициентами.



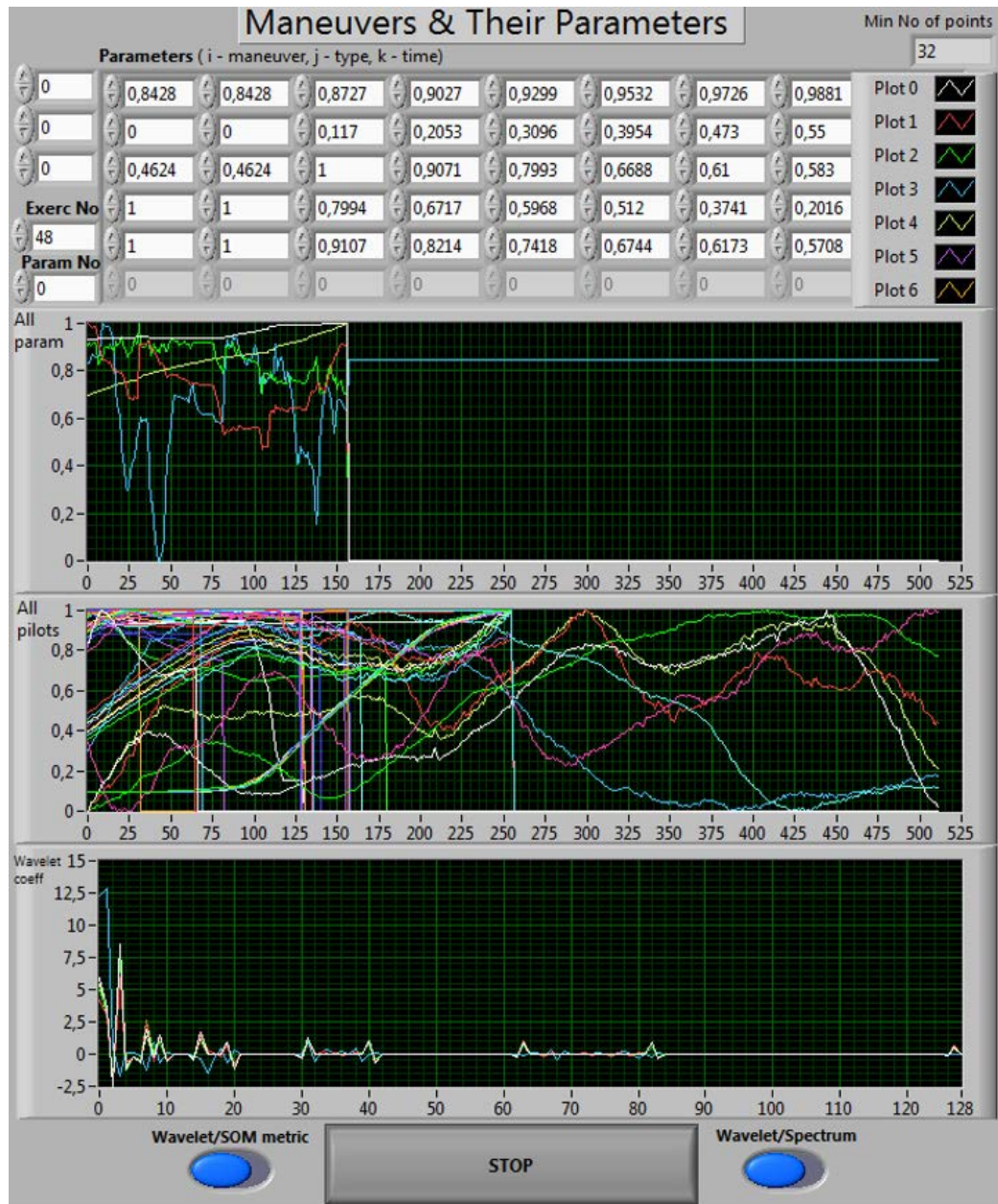


Рисунок 36. Представление временных рядов значений параметров соответствующими вейвлет-коэффициентами

На рисунке 37 отображается панель расстояния между рассматриваемым лётным упражнением и паттернами из специальной базы данных в выбранной метрике, а также матрица взаимных расстояний между паттернами в цветовой шкале, информация о паттернах, ближайших к исследуемому, относительные вклады параметров бортовых систем ВС во взаимные расстояния между исследуемым и эталонным лётным упражнением выбранного типа.

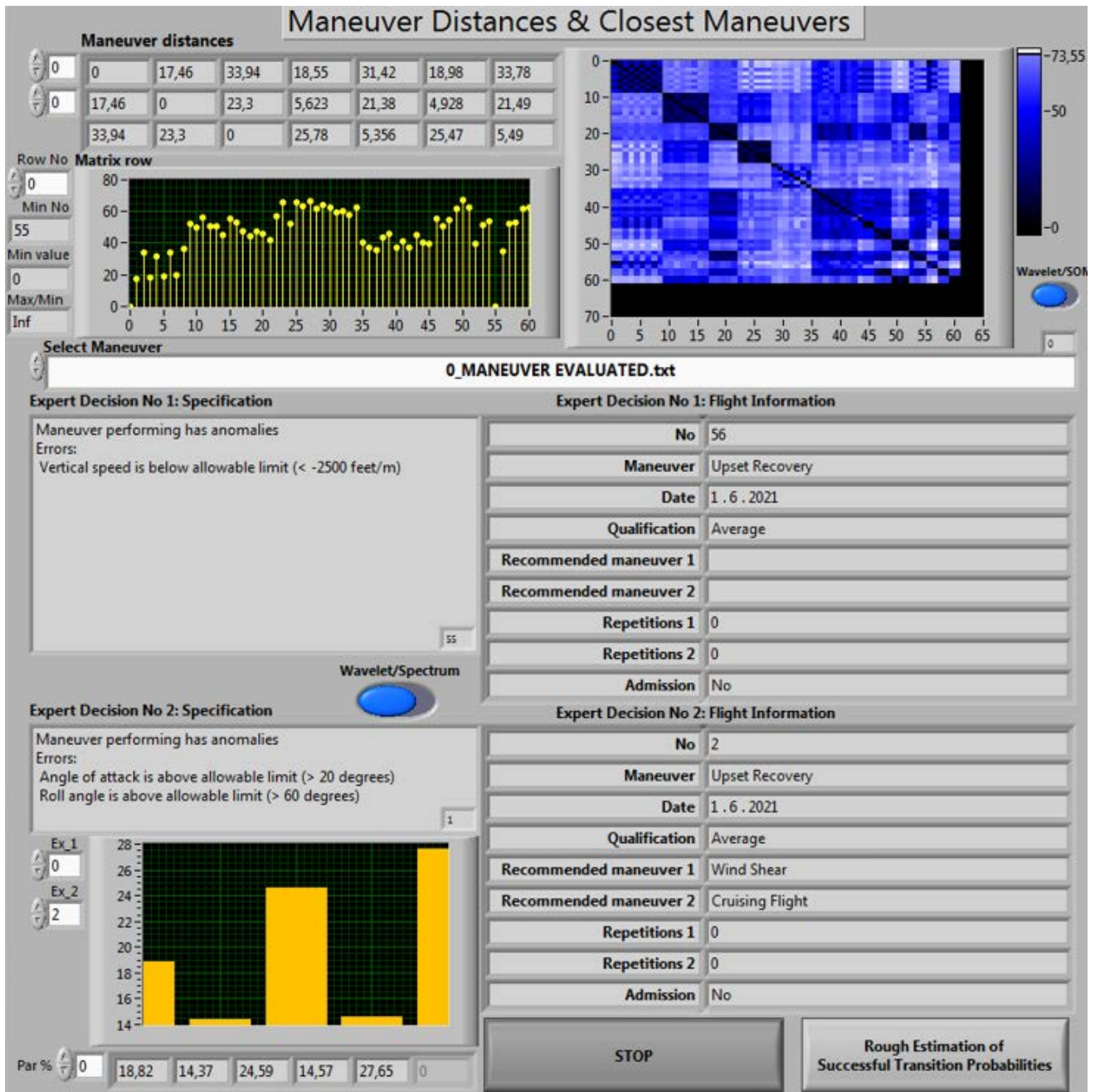


Рисунок 37. Расстояния от исследуемого лётного упражнения до каждого паттерна из базы данных в заданной метрике

На рисунке 38 отображается панель паттернов различных типов лётных упражнений в пространстве шкалирования и результаты их кластеризации, в том числе центры кластеров, вероятности принадлежности рассматриваемого упражнения к выбранным кластерам упражнений различных типов, найденные в результате дискриминантного анализа.

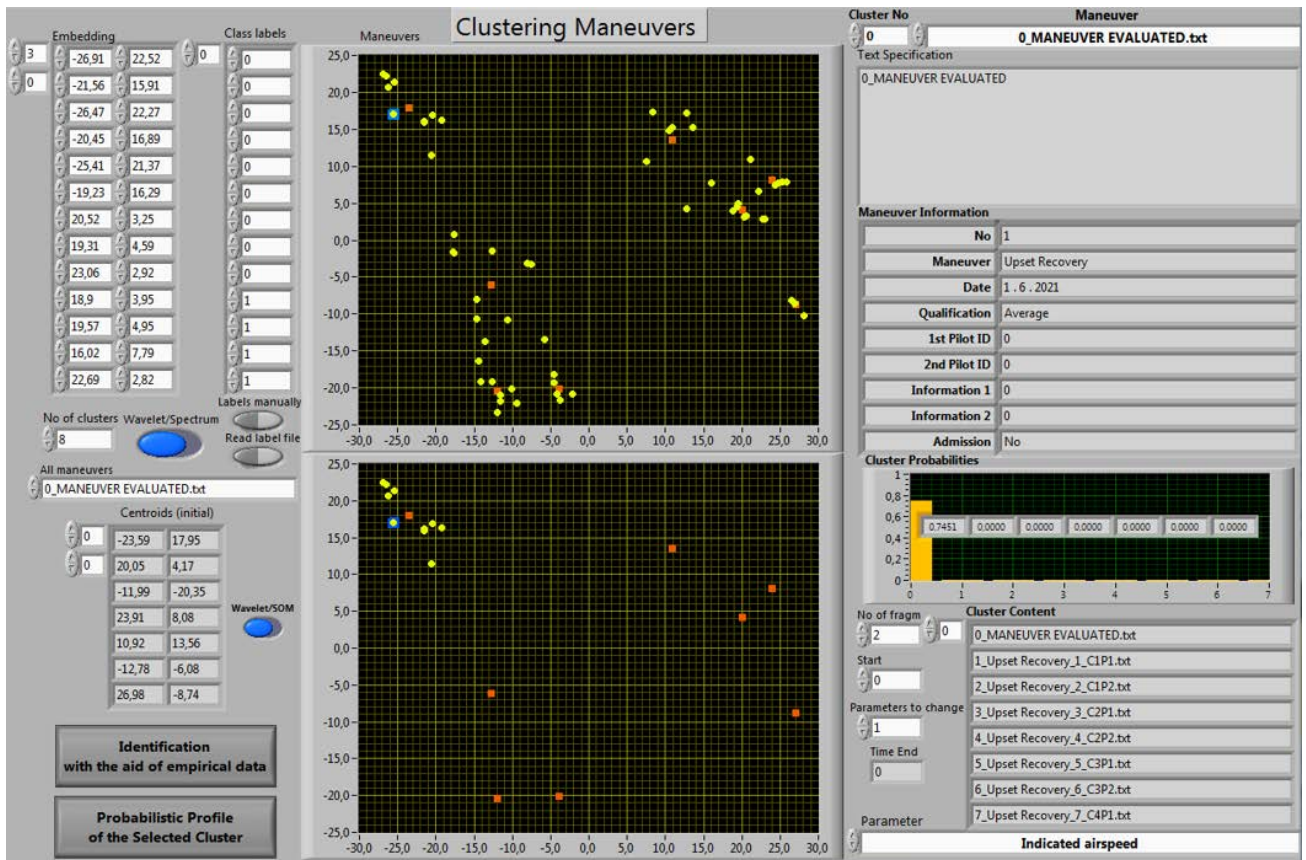


Рисунок 38. Паттерны различных типов лётных упражнений в пространстве шкалирования

На рисунке 39 отображается панель кластеризации лётных упражнений в пространстве шкалирования. Каждый кластер соответствует одному из заданных типов упражнений. Были выделены следующие кластеры данных: (1) сложное пространственное положение, (2) посадка, (3) посадка с отказавшим двигателем, (4) взлёт, (5) уход на второй круг, (6) сдвиг ветра, (7) отказ двигателя после V1, (8) эшелон.

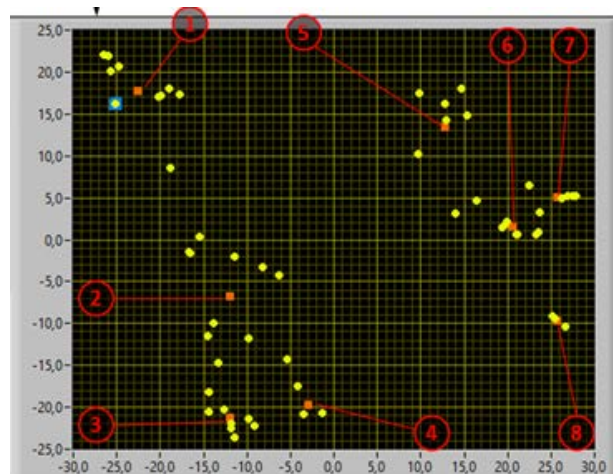


Рисунок 39. Кластеризация лётных упражнений в пространстве шкалирования

На рисунке 40 отображается панель оценки результатов пилотирования на панели монитора состояния полёта, на которой отображаются информация о нормальности или аномальности текущего лётного манёвра, тип манёвра, заранее записанная экспертная оценка выявленной аномальности и процентный вклад наиболее значимых с точки зрения анализа лётных параметров, которыми обусловлены отличия текущего лётного упражнения от эталонного выполнения манёвра данного типа.

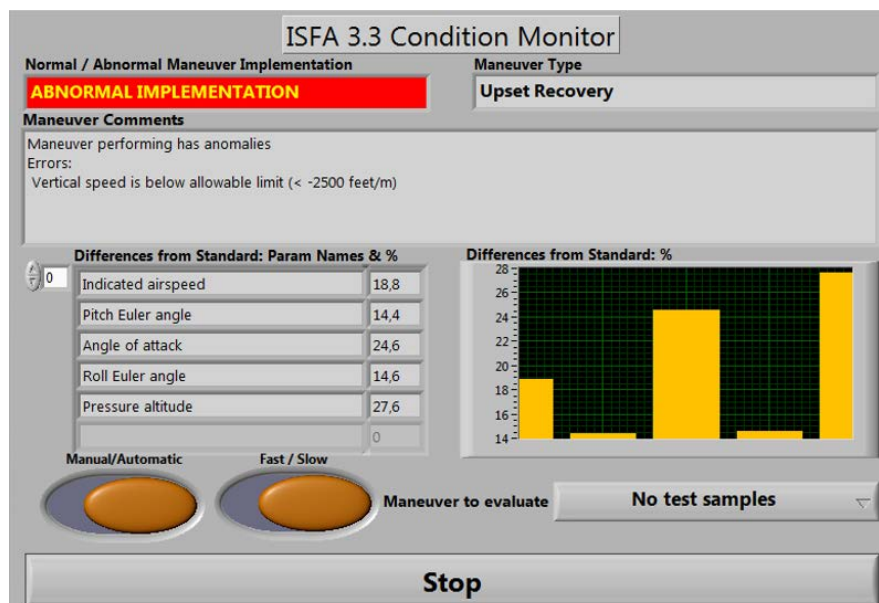


Рисунок 40. Оценка результатов пилотирования на панели монитора состояния полёта

### 4.3 Программный комплекс эргономической оценки ИУП кабины пилотов

Программный комплекс эргономических оценок строится на базе УСП, предназначенного для обработки ИУП кабины ВС [82] (см. рисунок 1). На рисунке 41 представлена общая архитектура ПО комплекса эргономических оценок.



Рисунок 41. Архитектура ПО комплекса эргономических оценок

Эксперимент начинается с настройки определённых параметров:

- названия группы экспериментов, подгрупп экспериментов и отдельных экспериментов;
- сценария экспериментов;
- критериев экспертной оценки (критерии выбираются отдельно для каждой группы экспериментов);
- зоны интереса (осуществляется путём задания определённой зоны ИУП, на которой будут отображаться варианты индикации для эргономической оценки и сравнения). При проведении эксперимента осуществляется видеозахват и захват параметров ГДА для данной области.

Для облегчения выбора критериев экспертной оценки может использоваться «мастер» выбора критериев, который на основе формализованных правил (разра-

ботанных на основе опыта ведущих специалистов по экспертной оценке) позволит выбрать наиболее оптимальные критерии для каждой группы оценок. Также критерии могут быть выбраны непосредственно из общего списка критериев.

В качестве критериев субъективной (экспертной) оценки могут использоваться:

- оценка удобства работы;
- оценка обзора внекабинного пространства;
- оценка расположения приборов и светосигнальных устройств, органов управления на рабочем месте члена экипажа;
- оценка досягаемости, удобства использования и исключения перепутывания и случайного включения/выключения органов управления;
- оценка зонального размещения приборов, световых сигнализаторов и органов управления, кадров экранных индикаторов, используемых в сложной и аварийной ситуации;
- оценка восприятия информации при реконфигурации кадров и т.д.

В качестве критериев объективной оценки используются (выбор данных критериев для каждой конкретной группы экспериментов не требуется, т.к. критерии являются универсальными):

- общая продолжительность фиксаций взора, оценивающая длительность считывания информации с индикатора и сопутствующим считыванию действий пилота, включая время принятия решений;
- частоты саккад (быстрые, строго согласованные движения глаз, происходящие одновременно и в одном направлении), интегрально характеризующие пространственно-временную динамику переключения внимания между зонами индикации;
- энтропия распределения пребывания взора в области индикации, характеризующая среднее время распознавания ситуации по зрительному стимулу и представляющая собой более содержательную и детализированную форму критерия «общая продолжительность фиксаций».

После проведения группы экспериментов испытуемый (пилот) производит оценку вариантов индикации, соответствующих каждой подгруппе. Для автоматизации оценки было разработано специальное ПО, фиксирующее мнения пилотов о рассматриваемых вариантах индикации (анкетирование) и получения итоговой оценки на основе данных мнений (рисунок 42). Данное ПО является универсальным и может применяться для экспертной оценки любых других видов индикации.

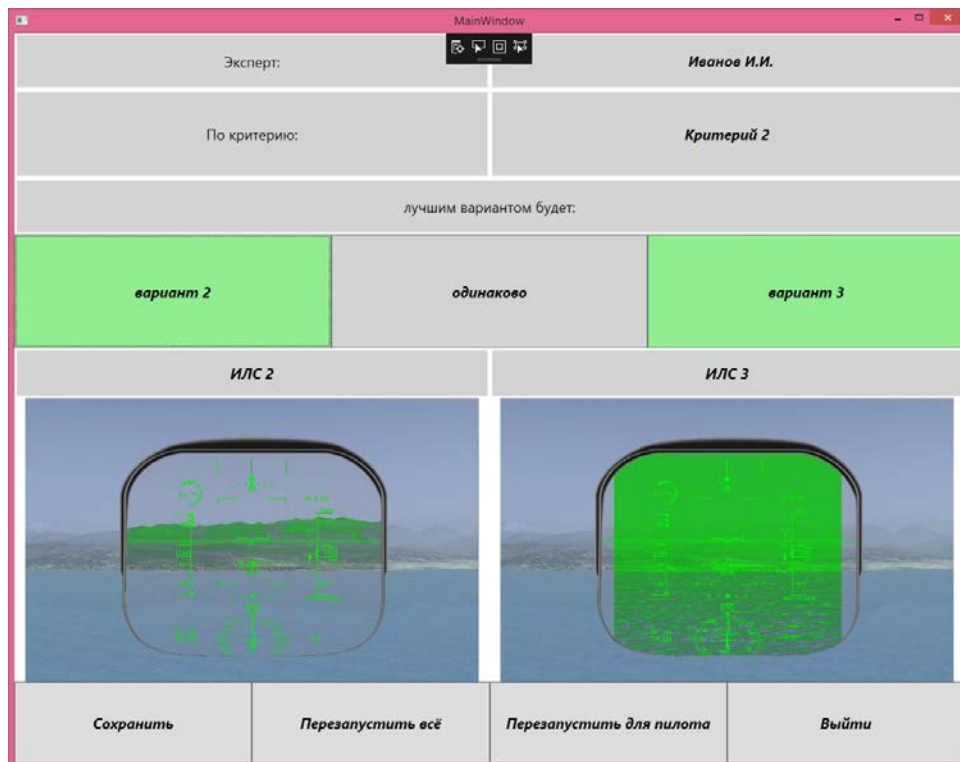


Рисунок 42. Графический интерфейс ПО для экспертной оценки

Все данные, полученные на этапе проведения эксперимента, структурируются и сохраняются на жёстком диске в соответствии со схемой, отображённой на рисунке 43.

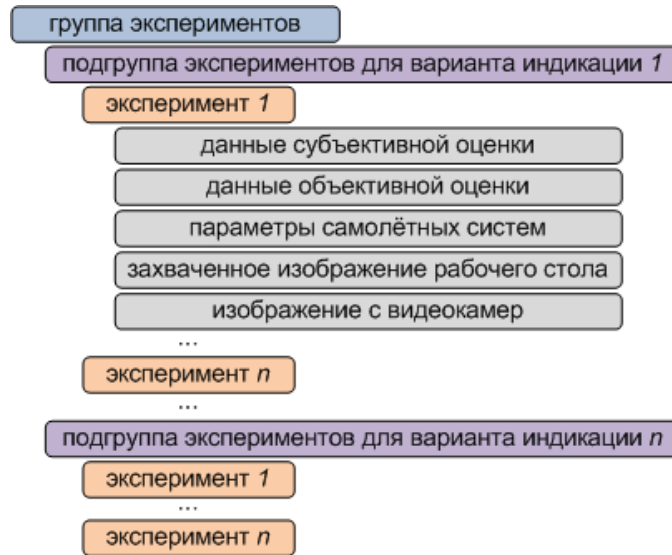


Рисунок 43. Структура записываемых данных эксперимента на жёстком диске

На рисунке 44 отображён пример структуры данных для исследования вариантов ИЛС с делением по пилотам и условиям полёта.

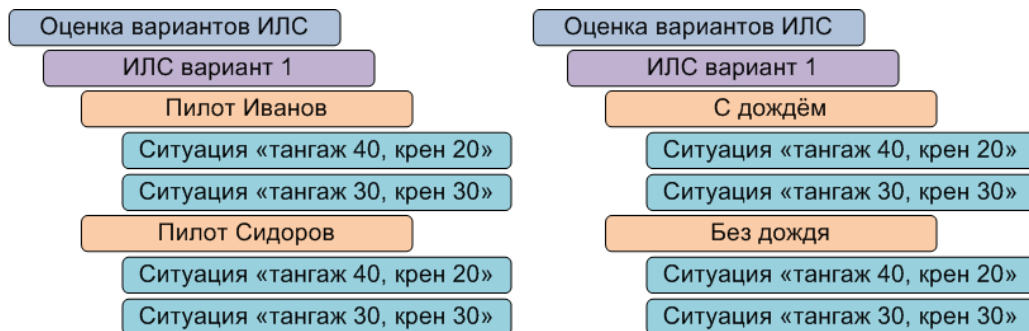


Рисунок 44. Пример структуры данных для исследования ИЛС

Группа экспериментов – это набор экспериментов, которые проводятся с целью сравнения эргономического качества различных вариантов индикации.

Подгруппа экспериментов – это набор экспериментов, проводимых с целью получения эргономической оценки одного из вариантов индикации.

Эксперимент – это набор экспериментальных ситуаций, сгруппированных по какому-либо признаку (пилот, условия полёта, добавление дополнительных слоёв или элементов в исследуемом варианте индикации относящемуся к подгруппе).



Экспериментальная ситуация (ЭС) – наименьшая структурная единица, начинается и заканчивается по команде оператора или на основе условий, прописанных в скрипте. С ЭС связан скрипт, описывающий ряд параметров, таких как условие начала и конца ЭС, события, возникающие во время проведения ЭС и т.д.

После проведения группы экспериментов технические специалисты, ответственные за разработку ИУП кабины пилотов, имеют возможность, используя ПО, обеспечивающее просмотр результатов эксперимента, получить количественную и качественную оценку вариантов индикации, оцениваемых в рамках проведения группы экспериментов.

Полная информация о результатах эксперимента может выводиться на дисплей средствами ПО, обеспечивающего просмотр результатов эксперимента (рисунок 45).

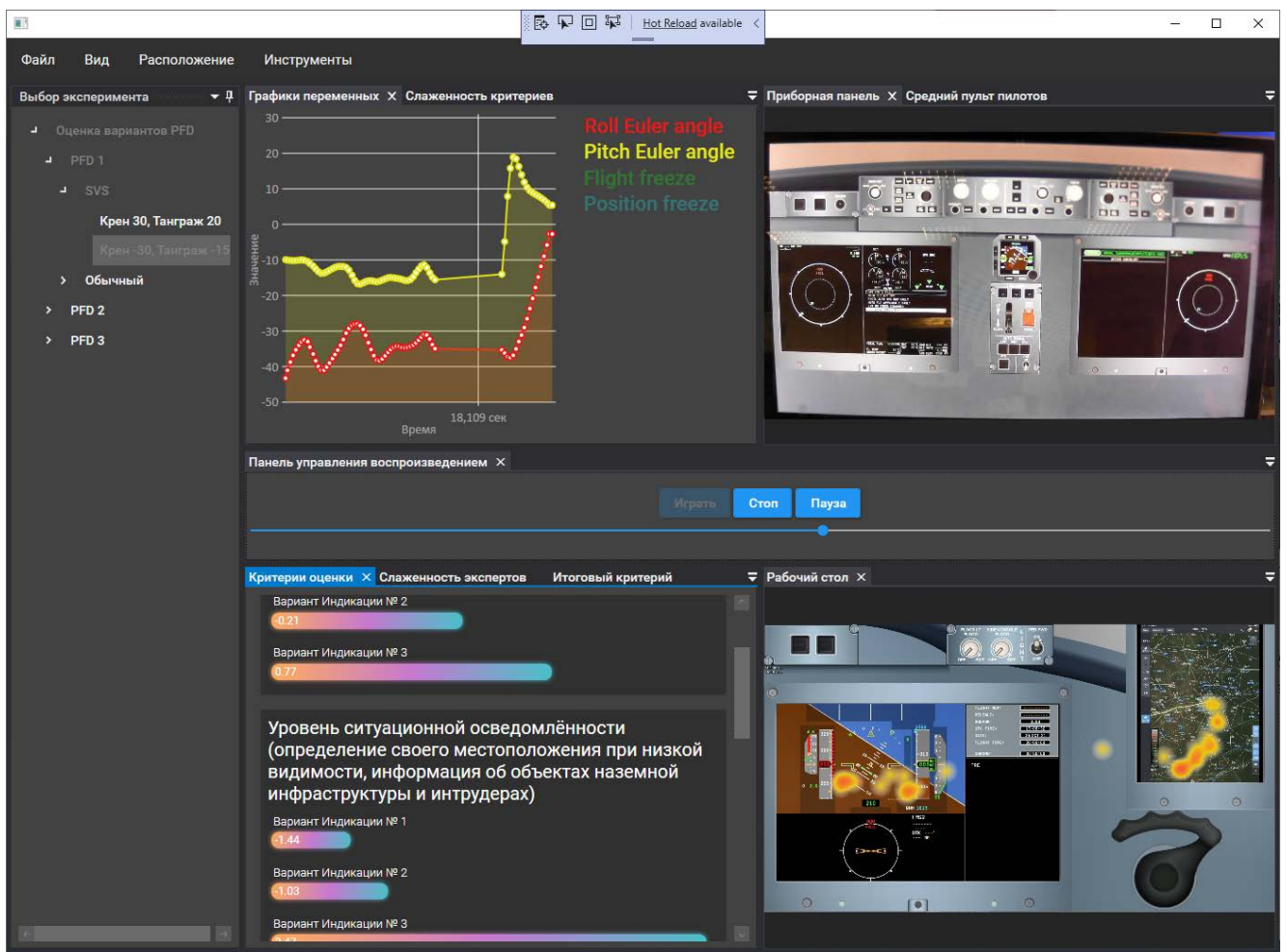


Рисунок 45. Графический интерфейс ПО, обеспечивающего просмотр результатов эксперимента

Интерфейс программы позволяет просматривать как результат одного эксперимента по отдельности, так и сравнивать результаты выбранных экспериментов (соответствующих различным вариантам индикации).

Может выводиться следующая информация:

- видеоизображение с камер;
- видеоизображение, захваченное с рабочих столов УСП (область рабочих столов, необходимая для записи, может выбираться в зависимости от областей интереса);
  - метаданные от системы регистрации взора, которые могут отображаться в различных вариантах («тепловые» карты, вероятностные карты и т.п.);
  - сценарий эксперимента (последовательность выполняемых пилотом действий, условия эксперимента, возникновения отказов в определённый момент времени и т.д.);
  - параметры стенда (динамика изменений заранее оговоренных переменных УСП с привязкой ко времени);
  - субъективная (экспертная) оценка эксперимента;
  - объективная оценка эксперимента.

Динамические компоненты перечисленной информации выводятся с синхронизацией по времени.

На рисунке 46 представлена разработанная обобщённая архитектура комплекса эргономических оценок в составе УСП.

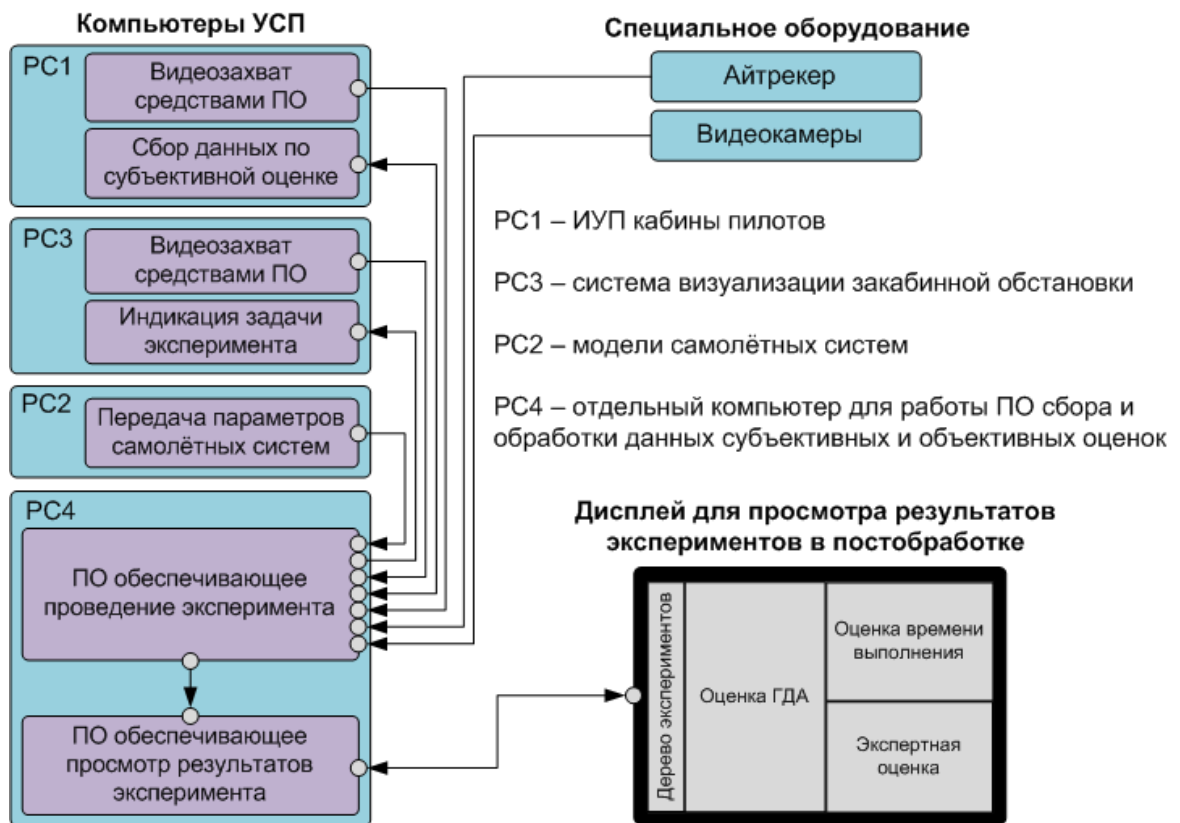


Рисунок 46. Архитектура комплекса эргономических оценок в составе УСП

К основным компьютерам стенда (PC1, PC2, PC3), обеспечивающим функционирование моделей самолётных систем, ИУП кабины пилотов и системы визуализации закабинной обстановки, добавляется компьютер для обеспечения функционирования ПО сбора и обработки данных субъективных (экспертных) и объективных оценок, который объединяется с ними по общей сети Ethernet.

К данному компьютеру (PC4) также подсоединяются средства фиксации ГДА (айтрекер) и видеокамеры, количество которых определяется исходя из размера заданной области фиксации.

На рисунке 47 отображён вариант размещения айтрекеров для покрытия заданной зоны фиксации ГДА. Места для размещения определяются исходя из следующих соображений:

- необходимость покрытия всех возможных областей интереса в рамках исследования ИУП кабины;
- камеры не должны мешать нормальной работе пилота при проведении испытаний на УСП.

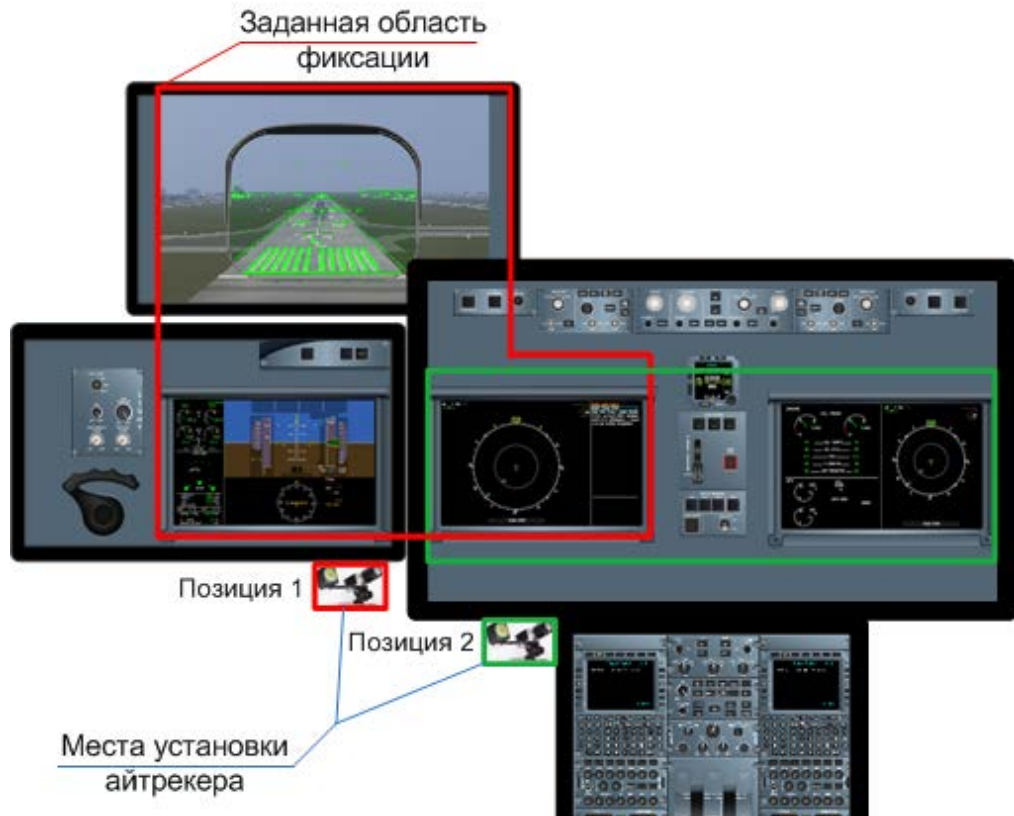


Рисунок 47. Вариант размещения айтрекеров для покрытия заданной зоны фиксации ГДА

Предъявляемые требования к устанавливаемым видеокамерам менее жёсткие ввиду того, что информация видеофиксации эксперимента носит вспомогательную роль по отношению к информации ГДА. В рамках рассматриваемой задачи используемые видеокамеры следует выбирать таким образом, чтобы полученное видеоизображение моделируемого пространства ИУП кабины было достаточно чётким для распознавания действий испытуемого (пилота), например, таких как манипуляции с виртуальными/реальными органами управления.

После начала эксперимента все необходимые данные пишутся на дисковое пространство РС4. После проведения эксперимента или серии экспериментов имеется возможность вывести записанные данные, а также результаты анализа на большой дисплей, подсоединённый к РС4.

#### 4.4 Выводы

Важность задачи оптимизации ИУП кабины пилотов обусловлена необходимостью снижения нагрузки на экипаж и, как следствие, повышения безопасности полёта. В контексте перехода к одночленному экипажу данная задача стоит особенно остро, т.к. и без того немалая нагрузка ложится на плечи одного пилота. Используя всю совокупность перспективных функций ИУП, можно надеяться на создание кабины одночленного экипажа с приемлемым уровнем функциональной нагрузки, лежащейся на пилота.

Представленные комплексы программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов были интегрированы в УСП кабины пилотов и апробированы с участием пилотов-экспертов и специалистов по сертификации, которые вынесли положительную оценку по проделанной работе. С использованием данных программных комплексов была произведена эргономическая оценка перспективных концепций ИУП самолёта транспортной категории и получены существенные результаты (таблица 6).

Таблица 6. Результаты оценки перспективных концепций ИУП.

Вид оценки	Результат
Оценка времени выполнения типовых операций при работе с ИУП на базе сенсорных дисплеев	Увеличение скорости выполнения типовых операций на 279%
Экспертная оценка перспективной пилотажно-навигационной индикации	Экспертная оценка 4,7 баллов из 5
Оценка времени выполнения типовых операций при работе с резервным контуром управления индикацией и конфигурацией	Увеличение скорости выполнения типовых операций на 227%

Интегральная экспертная оценка всех разработанных перспективных компонентов	Экспертная оценка 4,6 из 5
---	----------------------------

Научно-технический задел, полученный в результате данного исследования, был использован при прототипировании ИУП кабин самолётов MC-21 и SSJ-NEW в рамках, соответствующих госконтрактов. Поскольку при создании контура индикации широко применялся стандарт ARINC 661 и инструменты SCADe, данный научно-технический задел можно использовать в комплексе бортовой авионики с минимальными доработками.

Использование перспективных функций ИУП в кабине ВС реализует потенциальные преимущества для производителей ВС, авиакомпаний и пилотов, связанные с оптимизацией ИУП кабины, поэтому целесообразно продолжать развитие и внедрение данных функций и соответствующих средств моделирования. Применение результатов данной работы на ВС позволит улучшить эргономическое качество кабины пилотов и, следовательно, увеличить безопасность полётов.

Прототип комплекса эргономических оценок был высоко оценён лётными экспертами и специалистами в области эргономической оценки.

Главное отличие данного комплекса от существующих заключается в интегральном подходе с точки зрения сбора первичных данных и формирования конечного результата за счёт развитого ПО, а также в более детальной проработке её отдельных составляющих, в том числе в части математического аппарата.

Применение данного комплекса позволит проводить эффективную эргономическую оценку ИУП кабины пилотов без жёсткой необходимости привлечения специалистов в области эргономической оценки, получая результаты с высокой степенью достоверности, что определяет высокую практическую значимость.

Прототип комплекса оценки уровня подготовки пилотов был апробирован лётными экспертами и признан в качестве средства эффективного контроля подготовки лётного состава. Основные преимущества данного комплекса заключены в математических методах, на которых базируется его работа. Преимущества данных методов были описаны в главе 2.

## Заключение

### Основные результаты работы, выносимые на защиту

1. Математическая модель, представляющая полёт ВС в пространстве вейвлет-коэффициентов, вычисленных по репрезентативным параметрам, и математическая модель, представляющая ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения взора, которые обеспечивают оценку уровня подготовки экипажа на УСП и имеют следующие особенности:

- вместо непосредственного представления исследуемых процессов временными рядами используется их представление вейвлет-коэффициентами, полученными в результате дискретного вейвлет-преобразования, что сняло проблему синхронизации сопоставляемых процессов, существенно тормозившую работы в данном направлении;
- основной формой представления анализируемых данных являются матрицы взаимных расстояний исследуемых процессов в различных метриках;
- в зависимости от типа задачи применяются три вновь разработанные метрики для сравнения исследуемых лётных упражнений;
- представление лётных упражнений в пространстве шкалирования и их распределение по типам путём применения многомерного шкалирования к матрицам взаимных расстояний и последующего кластерного анализа;
- оценка относительных вкладов параметров в элементы матриц взаимных расстояний между лётными упражнениями с целью выявления аномально выполненных упражнений и определения параметров, динамика которых свидетельствует об ошибках пилотов.

2. Численный метод определения взаимного расположения элементов индикации, согласованного с эталонным распределением частот пребывания в зонах фиксации взора, путём оптимизации матрицы вероятностей переходов между ними, особенностями которого являются:

- применение марковских процессов для описания распределения внимания по зонам индикации;
- оптимизация на основе сравнения стационарных распределений матриц вероятностей перехода между зонами индикации;
- применение итерационной численной процедуры для поиска минимального значения расхождения между распределениями, используя статистику хи-квадрат;
- применение многомерного шкалирования для графического представления расстояний между зонами индикации, вычисляемых с помощью соответствующих матриц вероятностей переходов.

3. Комплексы программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов, установленные на УСП ГосНИИАС, позволяющие обеспечить:

- возможность объективной оценки уровня подготовки лётного состава;
- высокую степень автоматизации эргономической оценки, с возможностью произвести оценку «от и до», в том числе инженерам, не имеющим опыта в проведении эргономических оценок;
- возможность моделирования перспективных функций ИУП кабины пилотов;
- высокую производительность и масштабируемость ПО за счёт использования современных подходов к программированию.

Автору принадлежат основные теоретические и практические результаты, представленные в диссертационной работе: математическая модель, представляющая полёт ВС в пространстве вейвлет-коэффициентов; математическая модель, представляющая ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения



взора; численный метод определения взаимного расположения элементов индикации; комплексы программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов.

Поставленные задачи были успешно выполнены. Методы, математический аппарат, архитектуры и алгоритмы разработанные в рамках диссертации использовались в следующих ОКР, НИР и НИОКР:

- ОКР «Разработка, изготовление и поставка стенда информационно-управляющего поля кабины экипажа». Шифр ИУПКЭ-SSJ-NEW. Договор №17705596339190000900/07-33290-799 от 05.11.2019 между ФГУП «ГосНИИАС» и АО «ГСС».

- НИОКР «Разработка предложений по адаптации ИУП КЭ». Шифр ЭЧ-МИКЭ-SSJ-NEW. Договор №17705596339190000900/07-36700-27342 от 17.10.2019 между «ГосНИИАС» и АО «ГСС».

- ОКР «Разработка стендов прототипирования для МАИ». Контракт №P08-1-1374-19 между «ГосНИИАС» и ФГБОУ ВО «МАИ».

- НИР «Исследования по новой функциональности бортового оборудования и общесамолетных систем для повышения безопасности и снижения стоимости эксплуатации воздушного судна». Шифр «Борт-Функции». Государственный контракт №17411.1770290019.18.012 от 14.04.17г.

- НИР «Обоснование, исследование и разработка перспективной функциональности бортового оборудования и внешних сервисов проектов воздушных судов поколения 2025 г.». Шифр «Борт-функции-2025». Государственный контракт № 19411.1770290019.18.007.

- НИР «Обоснование, исследование и разработка перспективной функциональности бортового оборудования и внешних сервисов проектов воздушных судов поколения 2030 г.». Шифр «Борт-функции-2030». Государственный контракт № 20411.1770290019.18.002.

### Список сокращений и условных обозначений

ARINC	Корпорация «Авиационное радио»
CDS	Cockpit Display System (система индикации кабины экипажа)
CPIOM	Central Processor and Inputs/Outputs Module (центральный процессор и модуль ввода/вывода)
CVS	Combined Vision System (система комбинированного видения)
DF	Definition Files (файлы определяющие графический интерфейс)
EVS	Enhanced Vision System (система улучшенного видения)
EWD	Engine and Warning Display (кадр текстовых сообщений и информации о двигателях)
FAA	Федеральное агентство воздушного транспорта США
FMS	Flight Management System (система самолётовождения)
ISFA	The Intelligent System for Flight Analysis (инструментальным средство оценки уровня подготовки)
MVP	Model-View-Presenter (модель-представление-презентер)
MVVM	Model-View-ViewModel (модель-представление-представление модель)
SVS	Synthetic Vision System (система синтезированного видения)
UA	User Application (пользовательское приложение)
ВС	Воздушное Судно
ГДА	Глазодвигательная Активность
ИЛС	Индикатор на Лобовом Стекле
ИУП	Информационно-управляющее Поле
КМА	Кратномасштабный Анализ
МАИ	Метод Анализа Иерархий
ПО	Программное Обеспечение
УСП	Универсальный Стенд Прототипирования

### Список литературы

1. Ильин Е.П. Психофизиология человека. СПб.: Питер, 2005. 540 с.
2. Прудников Л.А., Климов Р.С. Потенциальные возможности управления профессиональной подготовкой операторов на основе оценки психофизиологического состояния // Современное образование. 2016. N 2. С. 52-64. DOI: 10.7256/2409-8736.2016.2.17889.
3. Данилова Н.Н. Психофизиологическая диагностика функциональных состояний: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1992. 192 с.
4. Мещеряков Б., Зинченко В. Большой психологический словарь. СПб.: Прайм-ЕВРОЗНАК, 2003. 632 с.
5. Хватова М.В. Функциональное состояние человека как интегральная характеристика // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки, N. 3. 2008. С. 22-27.
6. Войнов В.Б., Воронова Н.В., Золотухин В.В. Методы оценки состояния систем кислородобеспечения организма человека: учеб. пособие / Под ред. Г.А.Кураева. Ростов-на-Дону, 2002. 99 с.
7. Бодров В.А. Психология профессиональной пригодности. М.: ПЕР СЭ, 2001. 511 с.
8. Ушаков И.Б., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. Паттерны функциональных состояний оператора. М.: Наука, 2010. 390 с.
9. Солодков А.С., Сологуб Е.Б. Физиология человека. Общая. Спортивная. Возрастная: Учебник: 2-е изд., испр. и доп. М.: Олимпия Пресс, 2005. 528 с., ил.
10. Психология стресса: учеб.-метод. пособие [Электронный ресурс] / сост. К.С. Карташова. Электрон. дан. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 35 с.
11. Милорадова Н.Г. Психология и педагогика: учебник и практикум для академического бакалавриата / 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2018. 341 с.

12. Севостьянов Д.А. Психофизиология профессиональной деятельности: учеб. пособие / Новосиб. гос. аграр. ун-т, фак. ГМУ; авт.-сост. Д.А. Севостьянов. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2017. 207 с.
13. Психология состояний: учеб. пособие / А.О. Прохоров, М.Е. Валиуллина, Г.Ш. Габдреева, В.Д. Менделевич / Под ред. А.О. Прохорова. М.: Когито-Центр, 2011. 624 с.
14. Большев А.С. Частота сердечных сокращений. Физиолого-педагогические аспекты [Текст]: учеб. пособие / А.С. Большев, Д.Г. Сидоров, С.А. Овчинников. Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т: Н. Новгород: ННГАСУ, 2017. 76 с.
15. Щербатых Ю.В. Психология стресса и методы коррекции. СПб.: Питер, 2006. 256 с.
16. Психологические аспекты проблемы человеческого фактора в авиационной аварийности. Анализ и стратегия профилактики / А.В. Ключев, А.Н. Качалкин, Э.Б. Диденко, В.Е. Овчаров, Н.Г. Горбач. М.: Текст, 1996. 85 с.
17. Петров Д. Электрокожное сопротивление как показатель состояния человека [Электронный ресурс]. URL: <http://www.medlinks.ru/article.php?sid=8356> (дата обращения: 15.03.2020).
18. Медицинская психология: новейший справочник практического психолога / сост. С.Л. Соловьева. М.: АСТ; Спб: Сова, 2006. 576 с.
19. Предмет, задачи, основные понятия психофизиологии профессиональной деятельности [Электронный ресурс]. URL: <http://psyphy2007.narod.ru/pervkontr.htm> (дата обращения: 27.02.20).
20. Казимилова Е.А. Речевой сигнал как отражение изменений функционального состояния при депрессивном и тревожно-депрессивном расстройствах: дис. ... канд. биол. наук: 03.03.01 / Казимилова Евдокия Алексеевна. М., 2016. 90 с.
21. Лукьяница А.А., Шишкин А.Г. Автоматическое определение изменений эмоционального состояния по речевому сигналу // Речевые технологии, 2009. N 3. С. 60-76.
22. Витт Н.В. Личностно-ситуационная опосредованность выражения и

- распознавания эмоций в речи // Вопросы психологии, 1991. N 1. С. 95-107.
23. Онтогенетические особенности психофизиологических механизмов восприятия эмоционального компонента речи у музыкально одаренных детей / Е.С. Дмитриева, В.Я. Гельман, К.А. Зайцева, А.М. Орлов // ЖВНД, 2004. Т. 54. N 5. С. 581-591.
  24. Лопатина О.И. Исследование особенностей речи в стрессовых ситуациях // Современные наукоемкие технологии, 2013. N 7(1). С. 91-91.
  25. Ellis K.K.E. Eye Tracking Metrics for Workload Estimation in Flight Deck Operations. University of Iowa, 2009. P. 116.
  26. Барабанщиков В.А., Жегалло А.В. Методы регистрации движений глаз: теория и практика // Психологическая наука и образование, 2010. N 5. С. 240-254.
  27. Tiwari T., Singh A.L., Singh I.L. Information Technology-Induced Stress and Human Performance: A Critical Review // Journal of the Indian Academy of Applied Psychology, July 2008. Vol. 34. N 2. Pp. 241-249.
  28. Staal M.A. Stress, Cognition, and Human Performance: A Literature Review and Conceptual Framework // Ames Research Center, Moffett Field, California. August 2004. P. 176.
  29. Отчёт о прикладных научных исследованиях по теме «Разработка моделей рисков человеческого фактора и рекомендаций по созданию человеко-машинного интерфейса кабины экипажа воздушного судна» (промежуточный). Этап 1. Государственная программа Российской Федерации.
  30. Отчёт о прикладных научных исследованиях по теме «Разработка моделей рисков человеческого фактора и рекомендаций по созданию человеко-машинного интерфейса кабины экипажа воздушного судна» (итоговый). Этап 2. Государственная программа Российской Федерации.
  31. Интеллектуальные интерактивные учебно-тренировочные комплексы / А.В. Пономаренко, В.М. Василец, В.В. Михайлов, А.И. Наумов, Ю.Г. Оболенский. М.: Воениздат, 2006. С. 143-152.
  32. Резервы внимания лётчика как оценка процесса подготовки на авиационном

- тренажёре / Ю.А. Кукушкин, А.В. Пономаренко, Ю.П. Цигин, С.Б. Страмнов // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики, 2007. N 1-1(38). С. 59-64.
33. Еремин А.Л. Проблема физиолого-гигиенической оценки информационных нагрузок для оптимизации труда: автореф. дис. ... д-ра мед. наук: 14.02.04 / М., 2014. 48 с.
  34. Aircraft Trajectory Clustering Techniques Using Circular Statistics. Yellowstone Conference Center, Big Sky, Montana, 2016. IEEE.
  35. Bastani V., Marcenaro L., Regazzoni C. Unsupervised Trajectory Pattern Classification Using Hierarchical Dirichlet Process Mixture Hidden Markov Model // IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP) / IEEE 2014. Pp. 1-6.
  36. Enriquez M. Identifying Temporally Persistent Flows in the Terminal Airspace Via Spectral Clustering // Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2013) / Federal Aviation Administration (FAA) and EUROCONTROL. Chicago, IL, USA. 2013.
  37. Enriquez M., Kurcz C. A Simple and Robust Flow Detection Algorithm Based on Spectral Clustering // International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT) / Federal Aviation Administration (FAA) and EUROCONTROL. Berkeley, CA, USA. 2012. May 22-25.
  38. Gaffney S., Smyth P. Joint Probabilistic Curve Clustering and Alignment // In Advances in Neural Information Processing Systems. Vol. 17. Cambridge, MA: MIT Press, 2005. Pp. 473-480.
  39. Gaffney S., Smyth P. Trajectory Clustering with Mixtures of Regression Models // Proceedings of the Fifth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 1999. Pp. 63-72.
  40. Laxhammar R., Falkman G. Online Learning and Sequential Anomaly Detection in Trajectories // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2014. Vol. 36. N 6. Pp. 1158-1173.
  41. Rintoul M., Wilson A. Trajectory Analysis Via a Geometric Feature Space Approach // Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal, 2015.

42. Wilson A., Rintoul M., Valicka C. Exploratory Trajectory Clustering with Distance Geometry // International Conference on Augmented Cognition / Springer, 2016. Pp. 263-274.
43. Faure C., Bardet J.M., Olteanu M., Lacaille J. Using Self-Organizing Maps for Clustering and Labelling Aircraft Engine Data Phases. In: WSOM (2017). Pp. 96-103.
44. Eerland W.J., Box S. Trajectory Clustering, Modelling and Selection with the Focus on Airspace Protection // AIAA Infotech@ Aerospace. \_ AIAA, 2016. Pp. 1-14.
45. Барабанщиков В.А., Жегалло А.В. Регистрация и анализ направленности взора человека. М.: Ин-т психологии РАН, 2013. 316 с.
46. Wei J., et al. Design and Evaluation of a Dynamic Sectorization Algorithm for Terminal Airspace // Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014. Vol. 37. N 5. Pp. 1539-1555.
47. Kuravsky L.S., Yuryev G.A. A Novel Approach for Recognizing Abnormal Activities of Operators of Complex Technical Systems: Three Non-Standard Metrics for Comparing Performance Patterns // Intern. Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET), 2020. N 11(4). Pp. 119-136.
48. Kuravsky L.S., Yuryev G.A. The Intelligent System to Support Condition Monitoring for Activities of Operators of Complex Technical Systems. In: Proc. 16th International Conference on Condition Monitoring and Asset Management, Glasgow, UK. June 2019. DOI: 10.1784/cm.2019.108-17.
49. Kuravsky L.S., Yuryev G.A. Detecting Abnormal Activities of Operators of Complex Technical Systems and their Causes Basing on Wavelet Representations // Intern. Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 2019. N 10(2). Pp. 724-742 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.as>.
50. Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I. New Approaches for Assessing the Activities of Operators of Complex Technical Systems. Eksperimental'naya psikhologiya = Experimental psychology (Russia), 2019. Vol. 12. N 4. Pp. 27-49. DOI:10.17759/exppsy.2019120403.
51. Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I., Yuryeva N.E. Assessing the

- Aircraft Crew Actions with the Aid of a Human Factor Risk Model. Eksperimental'naya psikhologiya = Experimental Psychology (Russia). 2020, Vol. 13. N 2. Pp. 153-181. DOI: <https://doi.org/10.17759/exppsy.2020130211>.
52. Cottrell M., Faure C., Lacaille J., Olteanu M. Anomaly Detection for Bivariate Signals. IWANN (1), 2019. Pp. 162-173.
  53. Грешников И.И., Златомрежев В.И. Использование передовых технологий для оптимизации информационно-управляющего поля кабины перспективного самолёта / XVIII Всерос. науч. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение». М.: МГППУ, 2020.
  54. 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.
  55. Poisson R.J. Spatial Disorientation: Past, Present and Future. Ohio, USA, 2014. P. 72.
  56. Lee B.G.; Myung R. Attitude Indicator Design and Reference Frame Effects on Unusual Attitude Recoveries, 2013. Pp. 63-90.
  57. Яценко А.Н. Разработка эргономических предложений к электронной индикации пилотажно-навигационных параметров на перспективных и модернизируемых вертолётах // Труды МАИ, 2010. N 38. С. 4.
  58. Баевский Р.М. Вариабельность сердечного ритма в космической медицине // Материалы VI Всерос. симпозиума, Ижевск, 11-12 октября 2016 года / Ижевск: Издательский дом «Удмуртский университет», 2016. С. 15-19.
  59. Яценко А.Н. Методические подходы к эргономическому обоснованию и оценке пилотажно-навигационной информации на индикаторах в кабинах перспективных и модернизируемых вертолётов // Человеческий фактор в сложных технических системах и средах: труды II Междунар. конф. 6-9 июля 2016 года. Межрегиональная эргономическая ассоциация. С. 389-395.
  60. 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.

61. Столяров Н.Н. Методы оценки эффективности систем отображения полётных параметров воздушного судна. М.: МГТУ гражданской авиации, 2005.
62. Куравский Л.С., Мармалюк П.А., Юрьев Г.А. Диагностика профессиональных навыков на основе вероятностных распределений глазодвигательной активности // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований, 2016. N 3(91). С. 72-82. DOI: 10.22204/2410-4639-2016-091-03-72-82.
63. Куравский Л.С., Юрьев Г.А., Беляева О.Б., Прокопьева О.Ю. Оценка навыков пилотирования и психофизиологического состояния лётного состава по данным видеоокулографии // Автоматизация в промышленности, 2018. N 6. С. 14-23.
64. Методы исследования распределения визуального внимания и состояния пилотов средствами окулографии / Л.С. Куравский, Г.А. Юрьев, В.И. Златомрежев, И.В. Златомрежев // V Междунар. конф. «Перспективные направления развития бортового оборудования гражданских воздушных судов». ФГУП «ГосНИИАС», 2019.
65. Чунтул А.В. Эргономическое обеспечение разработки современных и перспективных систем «экипаж-вертолет-среда» // Эргодизайн, 2019. С. 147-155. DOI: 10.30987/2619-1512-2019-2019-4-147-155.
66. Метод экспертных оценок: виды, критерии и примеры: Сайт КомДир [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kom-dir.ru/article/3450-metod-ekspertnyh-otsenok> (дата обращения: 14.10.2020).
67. Перминов Г.И. Метод выделения общности в альтернативах и критериях в задачах принятия решений // Социология науки и технологий, 2011. N 2. С. 90-104.
68. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. Физматлит, 2007. 64 с.
69. Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечётких моделей. Рига: Зинатне, 1990. 184 с.

70. Грешников И.И., Куравский Л.С., Юрьев Г.А. Принципы построения программно-аппаратного комплекса для интеллектуальной поддержки экипажа и оценки уровня его подготовки // Моделирование и анализ данных, 2021. С. 5-30. DOI: 10.17759/mda.2021110201.
71. Оценка действий экипажа самолёта по данным видеоокулографии // Л.С. Куравский, Г.А. Юрьев, В.И. Златомрежев, И.И. Грешников, Б.Ю. Поляков / Экспериментальная психология, 2021. N 1. С. 204-222. DOI: 10.17759/exrpsy.2021140110.
72. An Approach to Diagnostics Based on Video Oculography Data Analysis // L.S. Kuravsky, G.A. Yuryev, V.I. Zlatomrezhev, I.I. Greshnikov, B.Y. Polyakov / 17th International Conference on Condition Monitoring and Asset Management, CM 2021: 17, London, Virtual, 15-17 июня 2021 года [Scopus].
73. Kuravsky L.S., Greshnikov I.I. Optimizing the Mutual Arrangement of Pilot Indicators on an Aircraft Dashboard and Analysis of This Procedure From the Viewpoint of Quantum Representations // Journal of Applied Engineering Science, 2021. Pp. 1-10. DOI: 10.5937/jaes0-31855.
74. Методика субъективных оценок информационно-управляющего поля кабины пилотов / И.И. Грешников, Г.А. Лаврова, Т.Д. Сальников, В.И. Златомрежев, Г.В. Сергеева // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2020. N 3. С. 18-25. DOI: 10.18127/j19998554-202003-02.
75. Greshnikov I.I., Salnikov T.D., Ivanov A.S. Expert Assessment of the Cockpit Crew Information and Control Field // XI International Scientific & Technical Conference on Robotic and Intelligent Aircraft Systems Improving Challenges (RIASIC 2020). M., Russia: Journal of Physics: Conference Series, 10-11 December 2020. Pp. 204-222. DOI: 10.1088/1742-6596/1958/1/012018.
76. Cramer H. Mathematical Methods of Statistics. Princeton: Princeton University Press, 1999. P. 575.
77. Lancaster P. Theory of matrices. NY: Academic Press, 1969. P. 272.
78. Borg I., Groenen P.J.F. Modern Multidimensional Scaling: Theory and Applications // Springer, 2005. P. 140.
79. Cox T.F., Cox M.A.A. Multidimensional Scaling, Second Edition, Chapman & Hall/CRC, 2001. P. 299.

80. Гусев А.Н., Измайлов Ч.А., Михалевская М.Б. Измерение в психологии: общий психологический практикум // М.: Смысл, N 2. С. 111.
81. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных: учеб. пособие, 4-е изд., перераб. и доп. М.: Форум-Инфра, 2006.
82. Пат. 101331 Комплекс оборудования (стенд) прототипирования интерфейса кабины воздушного судна / Желтов С.Ю., Федосов Е.А., Чуянов Г.А., Златомрежев В.И., Грешников И.И.; Правообладатель ФГУП «ГосНИИАС» (Россия). Заявка N 2016500077; Заявл. 15.01.2016; Зарегистр. 15.12.2016. РОСПАТЕНТ.
83. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ N 2021668683 «The Intelligent System for Flight Analysis v. 3.3» (ISFA v. 3.3) / Куравский Л.С., Юрьева Н.Е., Юрьев Г.А., Порохин В.А., Грешников И.И., Златомрежев В.И.; Правообладатель ФГУП «ГосНИИАС» (Россия). Заявка N 2021668197; Заявл. 17.11.2021; Зарегистр. 18.11.2021. РОСПАТЕНТ.
84. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ N 2020663266 «ПО постобработки результатов экспериментов глазодвигательной активности» / Денщиков А.А., Ефремов Е.Ю., Грешников И.И.; Правообладатель ФГУП «ГосНИИАС» (Россия). Заявка N 2020662389; Заявл. 15.10.2020; Зарег. 26.10.2020. РОСПАТЕНТ.
85. Грешников И.И. Разработка архитектуры системы объективных и субъективных оценок информационно-управляющего поля для универсального стенда прототипирования кабины пилотов // Тр. ГосНИИАС. Сер. Вопросы авионики, 2020. N 5. С. 30-42.
86. Разработка комплекса эргономических оценок кабины пилотов // И.И. Грешников, А.А. Денщиков, Т.Д. Сальников, Е.Ю. Ефремов, В.И. Златомрежев / IV Всерос. науч.-техн. конф. «Моделирование авиационных систем». М.: ФГУП «ГосНИИАС», 26 ноября 2020.
87. Пат. 203394 Российская Федерация. Установка регистрации глазодвигательной активности стенда прототипирования / Голиков С.Н., Златомрежев В.И., Грешников И.И., Михайлов А.Ю.; Оpubл. 2021.
88. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ N 2020663271 «ExpertEvaluationAnalyzer» / Сальников Т.Д., Грешников И.И., Златомрежев В.И.; Правообладатель ФГУП «ГосНИИАС» (Россия). Заявка N 2020662425;

Заявл. 15.10.2020; Зарег. 26.10.2020. РОСПАТЕНТ.

89. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ N 2020663272 «ExpertEvaluationCollector» / Златомрежев В.И., Грешников И.И.; Правообладатель ФГУП «ГосНИИАС» (Россия). Заявка N 2020662422; Заявл. 15.10.2020; Зарег. 26.10.2020. РОСПАТЕНТ.
90. Грешников И.И., Златомрежев В.И. Внедрение сенсорных дисплеев в информационно-управляющее поле кабины пилотов с применением стандарта ARINC 661 // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2021. N 3. С. 5-13.
91. Greshnikov I., Zlatomregey V., Davydov D. Optimization of Cockpit Displays and Controls Using Touch Displays / 17th International Conference on Condition Monitoring and Asset Management, CM 2021: 17, London, Virtual, 15-17 июня 2021 года [Scopus].
92. Грешников И.И., Златомрежев В.И. Применение сенсорных дисплеев в перспективной кабине пилотов / III Всерос. науч.-техн. конф. «Моделирование авиационных систем». М.: ФГУП «ГосНИИАС». 21-22 ноября 2018.
93. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ N 2020611051 «Аварийные чеклисты с применением ARINC 661, адаптированные к сенсорному управлению» / Златомрежев В.И., Грешников И.И., Грешникова Е.А.; Правообладатель ФГУП «ГосНИИАС» (Россия). Заявка N 2019667617; Заявл. 30.12.2019; Зарег. 23.01.2020. РОСПАТЕНТ.
94. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ N 2020610986 «Кадр TCAS/WXR с применением ARINC 661, адаптированный к сенсорному управлению» / Златомрежев В.И., Грешников И.И.; Правообладатель ФГУП «ГосНИИАС» (Россия). Заявка N 2019667682; Заявл. 30.12.2019; Зарег. 23.01.2020. РОСПАТЕНТ.
95. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ N 2020610899 «Кадры управления самолетными системами с применением ARINC 661» / Златомрежев В.И., Грешников И.И., Давыдов Д.А.; Правообладатель ФГУП «ГосНИИАС» (Россия). Заявка N 2019667569; Заявл. 30.12.2019; Зарег. 21.01.2020. РОСПАТЕНТ.

96. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ N 2020611050 «Штатные чеклисты с применением ARINC 661, адаптированные к сенсорному управлению» / Златомрежев В.И., Грешников И.И., Грешникова Е.А.; Правообладатель ФГУП «ГосНИИАС» (Россия). Заявка N 2019667618; Заявл. 30.12.2019; Зарег. 23.01.2020. РОСПАТЕНТ.
97. Златомрежев В.И., Грешников И.И. Разработка перспективной индикации на лобовом стекле // Тр. ГосНИИАС. Сер. Вопросы авионики, 2021. С. 16-26.
98. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ N 2021615029 «Синоптический кадр индикатора на лобовом стекле абстрактного самолёта» / Давыдов Д.А., Грешников И.И., Златомрежев В.И.; Правообладатель ФГУП «ГосНИИАС» (Россия). Заявка N 2021613843; Заявл. 23.03.2021; Зарег. 02.04.2021. РОСПАТЕНТ.
99. Разработка демонстратора ИУП кабины с использованием элементов виртуальной реальности на основе функции синтезированного и улучшенного видения // В.В. Князь, О.В. Выголов, А.В. Никаноров, И.И. Грешников, В.И. Златомрежев / III Всерос. научно-техн. конф. «Моделирование авиационных систем». М.: ФГУП «ГосНИИАС». 21-22 ноября 2018.
100. Грешников И.И. Внедрение функции управления взглядом в информационно-управляющее поле кабины пилотов // Информационные технологии, 2021. Т. 27. N 8. С. 445-448. DOI: 10.17587/it.27.445-448.
101. Управление информационно-управляющим полем кабины пилотов при помощи взгляда // И.И. Грешников, А.Д. Касимовский, В.И. Златомрежев, А.В. Гнедов / IV Всерос. науч.-техн. конф. «Моделирование авиационных систем». М.: ФГУП «ГосНИИАС». 26 ноября 2020.
102. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ N 2020663265 «Модуль управления взглядом в кабине пилотов» / Грешников И.И., Касимовский А.Д., Златомрежев В.И.; Опубл. 2020.
103. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ N 2020610987 «Резервный контур управления индикацией» / Златомрежев В.И., Грешников И.И., Денщиков А.А.; Правообладатель ФГУП «ГосНИИАС» (Россия). Заявка N 2019667681; Заявл. 30.12.2019; Зарег. 23.01.2020. РОСПАТЕНТ.

104. ITC S. ARINC Specification 661-6. Cockpit Display System Interfaces to User Systems. 01.09.2016.
105. Honeywell. Hey Siri, take off! Get ready for more-advanced planes [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cnet.com/news/honeywell-tests-gear-for-even-more-high-tech-planes>.
106. Elbit Systems. InSight™ Display System with SkyLens™ Wearable HUD [Электронный ресурс] [10-03-2018]. URL: [https://www.elbitsystems.com/landing/wp-content/uploads/2019/06/UASC\\_InSight-SkyLens\\_Brochure.pdf](https://www.elbitsystems.com/landing/wp-content/uploads/2019/06/UASC_InSight-SkyLens_Brochure.pdf).
107. J. Shree DV, LRD. Murthy, K. Saluja, P. Biswas. Operating Different Displays in Military Fast Jets Using Eye Gaze Tracker, 2018.
108. Garmin. Talking to Your Airplane With Telligence Voice Control [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garmin.com/en-US/blog/aviation/talking-to-your-airplane/>.
109. Trzos M., Dostl M., Machkov P., Eitlerov J. Voice Control in a Real Flight Deck // Text, Speech, and Dialogue. TSD 2018. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 11107. Springer, Cham., 2018.
110. Gauci J., Theuma K., Muscat A., Zammit-Mangion D. Evaluation of a Multimodal Interface for Pilot Interaction with Avionic Systems // 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). London, UK.