

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ульяновский институт гражданской авиации
имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева»

на правах рукописи

Фролова Лидия Ивановна

**МОДЕЛИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕХНИКИ ПИЛОТИРОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ПИЛОТА**

2.9.6. Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

научный руководитель

кандидат технических наук, доцент

Косачевский Сергей Григорьевич

Ульяновск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. Анализ теоретических подходов и практического опыта построения моделей оценки качества техники пилотирования пилота гражданской авиации, постановка задачи исследования.....	25
1.1. Взаимосвязь качества профессиональной подготовки летного состава и уровня безопасности полетов в гражданской авиации	25
1.2. Применение компетентностного подхода в ходе профессиональной подготовки летного состава гражданской авиации.....	31
1.3. Опыт применения технологии ай-трекинга для оценки освоения профессиональных компетенций с учетом психофизиологического состояния пилота.....	34
1.4. Анализ существующих моделей оценки качества техники пилотирования пилотов гражданской авиации.....	45
Выводы по главе 1.....	51
Глава 2. Совершенствование моделей оценки качества техники пилотирования на основе анализа глазодвигательной активности пилота.....	53
2.1. Выбор критериев для оценки точности выдерживания заданных параметров полета.....	53
2.2. Применение метода анализа иерархий для реализации системного подхода при экспертном оценивании качества техники пилотирования.....	57
2.3. Комплексный показатель глазодвигательной активности, характеризующий распределение и переключение зрительного внимания пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации	63

2.4. Применение энтропийного моделирования для оценки распределения и переключения зрительного внимания пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации.....	66
2.5. Методика разработки модели оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики.....	71
Выводы по главе 2.....	76
Глава 3. Апробация моделей оценки качества техники пилотирования на основе анализа глазодвигательной активности пилота.....	78
3.1. Исследование особенностей глазодвигательной активности пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации	78
3.2. Апробация и исследование комплексного показателя глазодвигательной активности, характеризующего распределение и переключение зрительного внимания пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации	91
3.3. Апробация и исследование энтропийной модели оценки распределения и переключения зрительного внимания пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации.....	96
3.4. Апробация и исследование модели оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики.....	105
3.5. Экспериментальная проверка повышения надежности оценки качества техники пилотирования с применением разработанной модели, обработка результатов эксперимента	112
Выводы по главе 3.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	118
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Анализ материалов расследования авиационных происшествий с ВС ГА и научной литературы по проблемам безопасности полетов свидетельствует о том, что одной из основных причин авиационных происшествий является негативное влияние ЧФ, которое часто обусловлено недостатками в профессиональной подготовке членов летных экипажей.

Результаты проведенного анализа подтверждают актуальность разработки новых методов оценки качества профессиональной подготовки пилотов, которые в соответствии со стандартами и рекомендуемой практикой ИКАО должны основываться на компетентностном подходе к обучению и оцениванию СВТА. При этом, «оценка компетентности персонала должна осуществляться на основе четко сформулированных целей, соответствующих профессиональной деятельности, и количественно отражать величины, выражающие степень освоения компетенций» [3, 54, 55]. Изучение действующей Программы учебной и производственной практики подготовки коммерческих пилотов в образовательных учреждениях гражданской авиации России [63], позволило определить возможности повышения объективности оценивания качества техники пилотирования курсантов. С учетом того, что до 90% информации в полете пилот получает через органы зрения, целесообразно использование для решения этой задачи комплексных показателей, характеризующих процесс его ГДА в процессе летной эксплуатации воздушных судов. При этом с учетом возрастания количества обрабатываемой информации, неопределенности и неполноты исходных данных оправданным является применение систем интеллектуального анализа данных на основе нечеткой логики и энтропийного анализа.

Все это позволяет утверждать, что научная задача совершенствования методов оценивания качества первоначальной профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации является актуальной.

Диссертация посвящена решению данной научной задачи и базируется на работах автора, выполненных в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева».

Поставленная в данной работе научная задача соответствует пункту 15 «Совершенствование технических средств обучения, систем подготовки, переподготовки, повышения квалификации и аттестации авиационного персонала» паспорта научной специальности 2.9.6. Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники, позволяя усовершенствовать систему подготовки авиационного персонала.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в изучение проблемы оценивания качества профессиональной подготовки членов летного экипажа, внесли такие отечественные ученые как Г. В. Коваленко, В. Г. Ципенко, В. А. Пономаренко, А. В. Малишевский, С. Г. Косачевский, Д. В. Айдаркин, а также ряд зарубежных ученых: V. Peysakhovich, F. Dehais, M. Causse.

Значительный вклад в решение данной проблемы привнесли также результаты практических семинаров и конференций, организованных Межгосударственным авиационным комитетом в рамках Проекта ICAO-MAC (COSCAP-CIS) «Повышение безопасности полетов и поддержание летной годности в государствах-участниках Соглашения» под руководством В. М. Рухлинского и С. Ш. Фараджева.

Важную роль в области анализа ГДА пилотов внесли работы Н. А. Столярова, Л. С. Куравского, Г. А. Юрьева, И. Б. Кузнецова, О. В. Ариничевой, С. М. Muehlethaler, W. Li, S. Peissl, G. Ziv.

Основные принципы проектирования моделей на основе нечеткой логики и энтропийного анализа изложены в М. Sugeno, В. Kosko, С. Д. Штовба, А. Н. Тырсин.

Объект исследования

Процесс первоначальной профессиональной подготовки пилотов в образовательных учреждениях гражданской авиации Российской Федерации.

Предмет исследования

Модели оценки качества техники пилотирования.

Цель и задачи исследования

Цель работы состоит в повышении надежности оценки качества техники пилотирования пилотов при первоначальной летной подготовке в рамках совершенствования системы подготовки авиационного персонала.

Для достижения цели в работе поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ теоретических подходов и практического опыта построения моделей оценки качества техники пилотирования с учетом применения технологии ай-трекинга и методов диагностики психофизиологического состояния пилота.

2. Разработать комплексный показатель ГДА, характеризующий распределение и переключение зрительного внимания (РПЗВ) пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации (Electronic Flight Instrument System, EFIS).

3. Разработать и апробировать энтропийную модель оценки РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS.

4. Разработать и апробировать модель оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики.

Научная новизна работы

Научной новизной диссертации является учет ГДА пилота при оценке качества техники пилотирования:

1. Разработан комплексный показатель ГДА, отличающийся возможностью учитывать приоритет области индикации EFIS на основе метода анализа иерархий (МАИ).

2. Предложена энтропийная модель оценки РПЗВ пилота, отличающаяся выделением показателей ГДА и связей между ними в качестве отдельных

переменных, позволяющих осуществлять управление процессом формирования рационального РПЗВ.

3. Предложен новый подход к оценке качества техники пилотирования пилота, отличающийся применением моделей на основе нечеткой логики, учитывающий показатели, характеризующие точность выдерживания заданных параметров полета, комплексный показатель ГДА, показатель психофизиологической напряженности испытуемого и позволяющий повысить надежность оценки качества техники пилотирования пилота при первоначальной летной подготовке на 15%.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексный показатель ГДА, основанный на использовании МАИ и характеризующий РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS.

2. Энтропийная модель оценки РПЗВ пилота, основанная на использовании дифференциальной энтропии и позволяющая осуществлять управление процессом формирования рационального РПЗВ.

3. Модель оценки качества техники пилотирования пилота, основанная на нечеткой логике, учитывающая показатели, характеризующие точность выдерживания заданных параметров полета, комплексный показатель ГДА, показатель психофизиологической напряженности испытуемого и позволяющая повысить надежность оценки качества техники пилотирования на 15%.

Методы исследования. В процессе выполнения исследования использовались метод эксперимента, статистические методы обработки результатов эксперимента, теория моделирования, теория нечетких множеств, энтропийное моделирование. Обработка полученных данных осуществлялась с использованием компьютерной программы MATLAB 17 и STATISTICA 10.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что в ней:

- получены новые данные для дальнейшего развития исследований, связанных с анализом ГДА пилота;
- разработан комплексный показатель ГДА, характеризующий РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS;

- разработана модель оценки качества техники пилотирования пилота на основе нечеткой логики;

- обоснована возможность применения энтропийного моделирования для оценки РПЗВ пилота.

Практическая значимость состоит в том, что полученные результаты позволяют:

- повысить надежность оценки качества техники пилотирования пилота при первоначальной летной подготовке на 15 %;

- автоматизировать процесс анализа качества техники пилотирования и обработки данных глазодвигательной активности пилотов и тем самым повысить их доступность для летно-инструкторского состава;

- повысить эффективность процесса формирования рационального распределения и переключения зрительного внимания пилота на основе формализации его оценки.

Достоверность полученных результатов обеспечена достаточным объемом экспериментальных и статистических данных, корректным использованием апробированных научных методов исследований и современного математического аппарата обработки результатов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10 научных конференциях, в т.ч.: XI, XII, XIII, XIV Международной молодежной научной конференции «Гражданская авиация: XXI век» (Ульяновск, 2019, 2020, 2021, 2022 гг.); Международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы» (Санкт-Петербург, 2021 г.); XXIII Международной научно-технической конференции и школе молодых ученых, аспирантов и студентов «Авиакосмические технологии-2022» (Воронеж, 2022 г.); Международном семинаре-практикуме по обучению, основанному на компетентности – СВТА/ЕВТ в рамках Проекта ИКАО-МАК (COSCAP-CIS) «Повышение безопасности полетов и поддержание летной годности в государствах-участниках Соглашения» (Баку, 2022 г.); II Всероссийской научной

конференции «Достижения науки и технологий-ДНиТ-II-2023» (Красноярск, 2023 г.); Международной научно-практической молодежной конференции «Состояние и основные тенденции развития гражданской авиации» (Санкт-Петербург, 2023 г.); Всероссийской научно-практической студенческой конференции «Неделя науки 2023» (Москва, 2023 г.).

Публикации. По результатам исследований подготовлено 19 печатных работ, из них 1 публикация в издании, входящем в международную базу данных Scopus, 6 публикаций в рецензируемых научных журналах, которые включены в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 4 публикации в других научных журналах, 8 тезисов докладов в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи исследования, разработке теоретических и экспериментальных методов их решения, в обработке полученных результатов и формулировке выводов. В опубликованных в соавторстве работах автору принадлежат постановка задачи, анализ проблем, результаты теоретических и практических исследований, рекомендации по практическому использованию моделей.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении научно-исследовательских работ в ФГБОУ ВО УИ ГА. Имеются соответствующие акты о внедрении результатов диссертационной работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, списка сокращений и обозначений, а также приложения. Работа изложена на 143 страницах машинописного текста, содержит 22 таблицы и 32 рисунка. Список литературы включает 138 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Изложены объект, предмет, цель и задачи исследования, научная новизна,

методы исследования, теоретическая и практическая значимость. Приводятся положения, выносимые на защиту. Дано краткое содержание работы. Показана достоверность полученных результатов исследования.

В первой главе рассмотрены вопросы взаимосвязи качества ПП ЛС ГА и уровня безопасности полетов в ГА, проведен анализ существующих теоретических подходов и практического опыта построения моделей оценки качества техники пилотирования ЛС ГА с учетом применения технологии ай-трекинга и методов оценки психофизиологического состояния испытуемых.

Анализ статистических данных о состоянии безопасности полетов позволил сделать вывод о том, что при общей тенденции повышения уровня безопасности полетов в ГА, относительное количество авиационных происшествий, обусловленных негативным влиянием ЧФ, остается практически постоянным.

Проведенный анализ стандартов и рекомендуемой практики ИКАО позволил сделать вывод о том, что перспективным направлением исследований является разработка моделей оценки качества техники пилотирования пилотов на основе СВТА/ЕВТ. Качественная подготовка в рамках СВТА/ЕВТ возможна в первую очередь за счет внедрения методов оценки состояния пилотов, которые позволяют получать объективную и всестороннюю информацию о процессе подготовки ЛС ГА. В результате проведенного анализа отечественных и зарубежных источников был сделан вывод, что применение технологии ай-трекинга и метода ВКМ позволяют решить поставленную задачу исследования. Применение МАИ и технологии ай-трекинга позволяет определить комплексный показатель ГДА, характеризующий РПЗВ пилота при работе с EFIS. Использование метода ВКМ позволяет оценить степень психофизиологической напряженности пилота. В результате анализа моделей оценки качества техники пилотирования ЛС ГА, которые применяются в настоящее время, был сделан вывод о том, что существующие модели основаны только на анализе итоговых результатов деятельности и не учитывают данные средств объективного контроля состояния обучающихся.

Во второй главе предложены комплексный показатель ГДА, характеризующий РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS, энтропийная модель оценки РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS и методика разработки модели оценки качества техники пилотирования пилота на основе нечеткой логики.

Основываясь на опыте применения технологии ай-трекинга, в работе предлагается комплексный показатель ГДА, характеризующий РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^k E_{ROI} w_k}{\sum_{i=1}^n E_{ROI} w_n}, \quad (1)$$

где E_{ROI} – индекс, характеризующий параметр ГДА в области индикации;

w – численное значение важности для области индикации, полученное с помощью экспертного опроса и метода анализа иерархий;

k – количество областей индикации, контролируемых на заданном режиме полета;

n – общее количество областей индикации.

При этом проведенное исследование автора позволило выявить 3 наиболее информативных параметра ГДА: общее количество фиксаций (Fixation Count, FC); общая длительность фиксаций (Fixation Duration, FD); общее количество возвратных саккад (Reverse Saccades, RS).

Для моделирования РПЗВ предлагается подход, основанный на дифференциальной энтропии случайного вектора. Данный вектор описывается в виде многомерной случайной величины $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)^T$. Отдельные компоненты вектора $Y_i, (i=1, 2, \dots, m)$ в свою очередь представляются одномерными случайными величинами, которые предлагается представить как, комплексный показатель ГДА, характеризующий РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS и рассчитанный для определенного параметра ГДА. Данные компоненты при этом могут быть взаимозависимыми.

Формула дифференциальной энтропии случайного нормально распределенного вектора $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)^T$ представляется следующим образом:

$$H(Y) = \sum_{i=1}^m H(Y_i) + \frac{1}{2} \ln |R|, \quad (2)$$

где $|R|$ – определитель корреляционной матрицы R случайного вектора Y ,
 $H(Y_i)$ – энтропия каждой из нормальных случайных величин, равная:

$$H(Y) = \frac{1}{2} \ln \left[(2\pi e) \delta_{Y_i}^2 \right], i, j = 1, 2, \dots, m$$

где $\delta_{Y_i}^2$ – дисперсия случайной величины Y_i .

Исходя из анализа составляющих модели (2) можно сделать вывод, что изменение энтропии происходит за счет изменения дисперсии, ее компонент и/или изменения корреляционных взаимосвязей между ними.

Компоненту $H(Y)_V = \sum_{i=1}^m H(Y_i)$ можно описать как составляющую, соответствующую фактору независимости элементов системы РПЗВ. Компоненту $H(Y)_R = 0,5 \ln |R|$ можно описать как составляющую, соответствующую фактору самоорганизации системы РПЗВ.

Применение формулы (2) как суммы компонент в некоторых случаях может не точно характеризовать различные состояния РПЗВ. Для повышения диагностических свойств модели предлагается рассматривать ее не в скалярной, а векторной форме $h(Y) = (h_V; h_R) = (H(Y)_V; H(Y)_R)$. Направление и величину энтропийного вектора в рамках конкретных задач следует задавать исходя из особенностей исследуемой системы РПЗВ. Предлагается ввести показатель «энтропийное расстояние» РПЗВ:

$$\rho_H = (Y^{(1)}, Y^{(2)}) = \sqrt{[H(Y^{(1)})_V - H(Y^{(2)})_V]^2 + [H(Y^{(1)})_R - H(Y^{(2)})_R]^2}. \quad (3)$$

Данный показатель позволит оценить степень отклонения диагностируемого РПЗВ от эталонного, за основу которого могут браться РПЗВ пилота-инструктора.

В случае выявления отклонения для снижения энтропии одним из механизмов является мероприятие по изменению корреляционных связей между компонентами. Выбор конкретной компоненты воздействия может осуществляться с использованием градиентного метода. Для выявления направления уменьшения функции определителя корреляционной матрицы следует вычислить антиградиент, который позволит определить те компоненты РПЗВ пилота, увеличение или уменьшение значения корреляционных связей которых в наибольшей степени повлияет на изменение энтропии.

Энтропийная модель представляет собой общую диагностическую модель оценки РПЗВ пилота. В работе рассматривается также развитие данной модели для задач динамической оценки РПЗВ. Под динамической оценкой понимается последовательный процесс сбора, обработки и анализа информации о параметрах ГДА пилота с последующим использованием данной информации для обучения рациональным методам РПЗВ, состоящий из следующих этапов:

1. Оценка изменений энтропии за анализируемый период.
2. Выявление периодов, в которых наблюдалось максимальное изменение энтропии.
3. Анализ компонент самоорганизации и хаотичности в периодах максимальных изменений энтропии, на предмет того, какая из компонент в наибольшей степени повлияла на ее изменение.
4. Анализ составляющих компоненты энтропии (комплексных показателей ГДА), за счет которых произошло изменение энтропии.

Полученные в результате динамической оценки значения изменения энтропии отражают динамику формирования РПЗВ пилота за исследуемый период времени.

Применяя комплексный показатель ГДА, характеризующий РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS, предлагается проектировать модель оценки качества техники пилотирования пилота на основе нечеткой логики.

В качестве входных данных (x) модели предлагается использовать показатели, характеризующие точность выдерживания заданных параметров

полета, комплексный показатель ГДА, а также показатель психофизиологической напряженности испытуемого, основанный на оценке индекса напряжения регуляторных систем.

Первая группа показателей d_{fg} , характеризующих точность выдерживания заданных параметров полета, основана на использовании манхэттенского расстояния и рассчитывается по формуле:

$$d_{fg} = \int_{t_0}^{t_1} |f(t) - g(t)| dt \Big/ \int_{t_0}^{t_1} g(t) dt,$$

где $f(t)$ – функция, описывающая наблюдаемые значения некоторого параметра полета в ходе тренажерной подготовки на интервале времени $[t_0; t_1]$, в течение которого проводилось наблюдение;

$g(t)$ – функция, соответствующая эталонным значениям параметра полета на выбранном промежутке времени $[t_0; t_1]$.

Вторая группа показателей включает значения комплексного показателя ГДА, рассчитанного для трех наиболее информативных параметров ГДА: 1) общее количество фиксаций FC (Fixation Count); 2) общая длительность фиксаций FD (Fixation Duration); 3) общее количество возвратных саккад RS (Reverse Saccades);

Показатель, характеризующий психофизиологическое напряжение испытуемого, основан на оценке индекса напряжения регуляторных систем (Stress Index, SI) и рассчитывается следующим образом:

$$SI = \frac{A_{Mo}}{2Mo(\Delta MCI)}$$

где A_{Mo} – амплитуда моды распределения межсистолических интервалов;

Mo – мода распределения;

ΔMCI – размах межсистолических интервалов.

В качестве выходной переменной (IN) используется оценка пилота-инструктора по шкале от 1 до 10.

В третьей главе проведены апробация и исследование комплексного показателя ГДА, характеризующего РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS, энтропийной модели оценки РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS и модели оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики.

С целью апробации и исследования поставленных в работе задач на базе тренажерного центра УИ ГА было проведено экспериментальное исследование. В экспериментальном исследовании принимали участие 30 пилотов-курсантов специализации «Организация летной работы» и 4 пилота-инструктора летного отряда УИ ГА. Каждый из испытуемых выполнил на тренажере самолета DA 40 NG полет в соответствии с заданным сценарием:

1. Первый участок – горизонтальный полет в течение 3 минут, при котором нужно было выдерживать приборную скорость 105 узлов, высоту 1000 футов.

2. Второй участок – восходящая спираль, при которой нужно было выдерживать приборную скорость 92 узла, крен 30 градусов, вертикальную скорость +600 футов/мин до высоты 3000 футов.

3. Третий участок – горизонтальный полет в течение 3 минут, при котором нужно было выдерживать приборную скорость 105 узлов, высоту 3000 футов.

4. Четвертый участок – нисходящая спираль, при которой нужно было выдерживать скорость 92 узла, крен 45 градусов и вертикальную скорость -500 футов/мин до высоты 1000 футов.

5. Пятый участок – горизонтальный полет в течение 3 минут, при котором нужно было выдерживать приборную скорость 105 узлов, высоту 1000 футов.

6. Шестой участок – горизонтальный полет в условиях сильной турбулентности в течение 3 минут, при котором нужно было выдерживать приборную скорость 105 узлов, высоту 1000 футов.

С целью фиксации параметров полета использовалась видеокамера GoPro. Параметры ГДА фиксировались с помощью ай-трекера Gazepoint 3HD. Для мониторинга ЭКГ использовался прибор NTrend-EEG20.

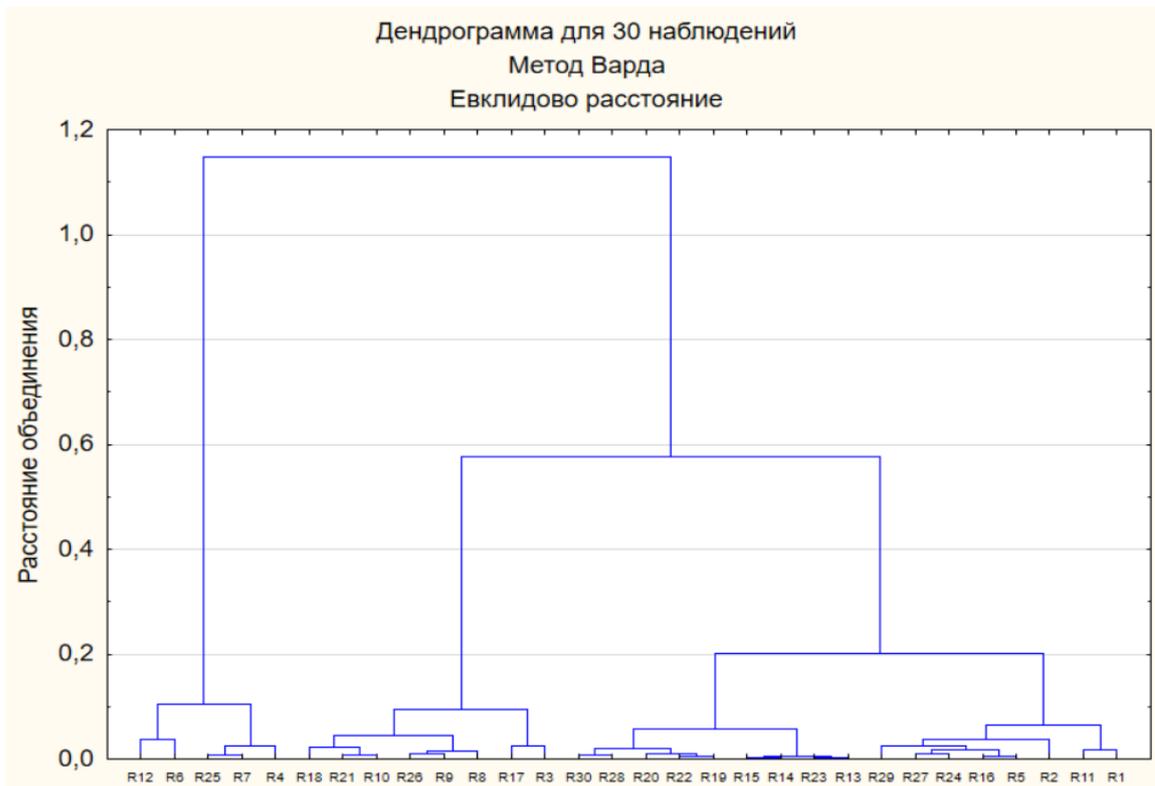
Апробация и исследование комплексного показателя ГДА, характеризующего РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS

Анализ экспериментальных данных проводился с использованием методов факторного, корреляционного и кластерного анализов в программе STATISTICA 10.

Применение факторного анализа решало задачу сокращения числа параметров ГДА. В результате было выявлено три параметра ГДА, которые взаимосвязаны с показателями тренажерной результативности пилотов:

- 1) общее количество фиксаций (FC),
- 2) общая длительность фиксаций (FD),
- 3) общее количество возвратных саккад (RS).

Для трех выявленных наиболее информативных параметров ГДА был рассчитан комплексный показатель ГДА, характеризующий РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS. На рисунке 1 представлена полученная дендрограмма наблюдений для 30 испытуемых.



В соответствии с дендрограммой наблюдений, приведенной на рисунке 1, предлагается рассматривать четыре кластера респондентов.

Для углубленного анализа найденных кластеров был построен «график средних значений кластеров», который наглядно демонстрирует четыре основные группы пилотов-курсантов (рис. 2).

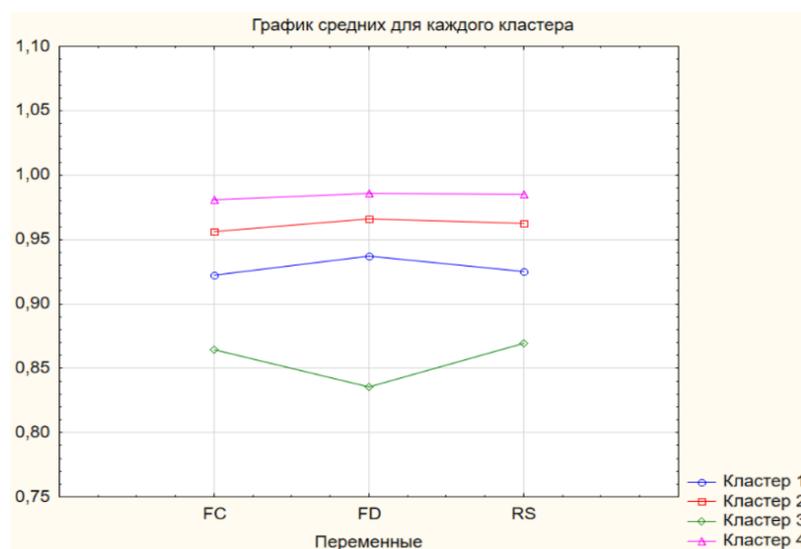


Рисунок 2 – График средних значений кластеров

Апробация предложенного комплексного показателя ГДА, характеризующего РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS, показала, что с его применением получается устойчивая кластеризация испытуемых в пространстве сформированных наборов признаков.

Апробация и исследование энтропийной модели оценки РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS

В результате проведенного эксперимента были получены значения трех наиболее информативных параметров ГДА (FC, FD, RS), на основе которых затем рассчитаны комплексные показатели ГДА в векторе $Y^k = (Y_1^k, Y_2^k, Y_3^k)$, где

Y_1^k – комплексный показатель, характеризующий общее количество фиксаций (FC);

Y_2^k – комплексный показатель, характеризующий общую длительность фиксаций (FD);

Y_3^k – комплексный показатель, характеризующий общее количество возвратных саккад (RS).

В таблице 1 приведены данные случайного вектора Y для третьего этапа полета трех групп испытуемых.

Таблица 1 – Данные случайного вектора Y для третьего этапа полета трех групп испытуемых

Испытуе- мые	Группа 1			Испытуе- мые	Группа 2		
	Этап 3				Этап 3		
	Y_1	Y_2	Y_3		Y_1	Y_2	Y_3
R1	0,9202	0,8600	0,9194	R16	0,9756	0,9839	0,9764
R2	0,9705	0,9727	0,9708	R17	0,9672	0,9437	0,9693
R3	0,9657	0,9745	0,9686	R18	0,9757	0,9853	0,9754
R4	0,9175	0,9393	0,9166	R19	0,9616	0,9684	0,9672
R5	0,9515	0,9464	0,9516	R20	0,9884	0,9929	0,9894
R6	0,9931	0,9947	0,9927	R21	0,9695	0,9738	0,9644
R7	0,9985	0,9998	0,9985	R22	0,9892	0,9977	0,9890
R8	0,9871	0,9893	0,9887	R23	0,9876	0,9948	0,9879
R9	0,8761	0,8640	0,8766	R24	0,9457	0,9216	0,9464
R10	0,9442	0,9716	0,9420	R25	0,8971	0,8833	0,8952
R11	0,9754	0,9911	0,9751	R26	0,9765	0,9858	0,9796
R12	0,9898	0,9944	0,9901	R27	0,9701	0,9796	0,9700
R13	0,9771	0,9793	0,9687	R28	0,9865	0,9958	0,9896
R14	0,9525	0,9564	0,9536	R29	0,9646	0,9664	0,9682
R15	0,9342	0,9616	0,9320	R30	0,9557	0,9516	0,9664

Испытуемые	Группа 3		
	Этап 3		
	Y_1	Y_2	Y_3
R31	0,9987	0,9998	0,9993
R32	0,9997	0,9999	0,9997
R33	0,9909	0,9901	0,9906
R34	0,9991	0,9997	0,9990

В результате расчета по модели (3) получены значения $\rho_{H^{(1)}} = 7,9$, $\rho_{H^{(2)}} = 6,65$ для групп 1 и 2 соответственно. Энтропийное расстояние в группе курсантов, приступивших к летной практике, на 1,25 меньше, чем в группе курсантов, не приступивших к летной практике. С одной стороны, это подтверждает очевидный факт, но вместе с тем показывает, что предложенный критерий обладает диагностическим потенциалом и может быть использован в процессе тренажерной подготовки для оценки сформированности РПЗВ пилотов. Аналогичные результаты были получены и для других этапов полета.

В таблице 2 представлены соответствующие корреляционные матрицы для трех групп испытуемых.

Таблица 2 – Корреляционные матрицы для группы 1 (а), группы 2 (б) и группы 3 (в)

Группа 1	Y_1	Y_2	Y_3
Y_1	1	0,9014	0,9994
Y_2	0,9014	1	0,8993
Y_3	0,9994	0,8993	1

а)

Группа 2	Y_1	Y_2	Y_3
Y_1	1	0,9129	0,9973
Y_2	0,9129	1	0,9017
Y_3	0,9973	0,9017	1

б)

Группа 3	Y_1	Y_2	Y_3
Y_1	1	0,9958	0,9977
Y_2	0,9958	1	0,9990
Y_3	0,9977	0,9990	1

в)

Одним из способов снижения энтропии является проведение мероприятий по изменению корреляционных связей между элементами системы. Для этого необходимо выявить точки роста для осуществления

управляющих воздействий. Для решения задачи выбора направления воздействия на систему можно использовать градиентный метод.

Выбор направления воздействия на систему с помощью градиентного метода:

$$|R| = f(r_{12}, r_{13}, r_{23}),$$

$$f = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & 1 & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & 1 \end{vmatrix} = 1 - r_{23}^2 - r_{12}^2 - r_{13}^2 + 2r_{12}r_{23}r_{31},$$

$$\begin{aligned} -grad(f) &= -(2(r_{23}r_{31} - r_{12}), 2(r_{12}r_{23} - r_{13}), 2(r_{12}r_{13} - r_{23})) = \\ -grad(f) &= -(2(r_{23}r_{31} - r_{12}), 2(r_{12}r_{23} - r_{13}), 2(r_{12}r_{13} - r_{23})) = \\ &= -(2(0,8993 \times 0,9994 - 0,9014), 2(0,9014 \times 0,8993 - 0,9994), 2(0,9014 \times 0,9994 - 0,8993)) = \\ &= -(-0,0053, -0,3775, 0,0031) \end{aligned}$$

Вычислив антиградиент функции определителя корреляционной матрицы, необходимо определить те компоненты РПЗВ, увеличение или уменьшение значения корреляционных связей которых в наибольшей степени повлияет на изменение энтропии. В рассматриваемом случае необходимо предпринимать меры по уменьшению корреляционной связи между параметрами Y_1 и Y_3 , и увеличению корреляции между параметрами Y_2 и Y_3 . Следовательно, при увеличении количества возвратных саккад, необходимо также увеличить и длительность фиксации на данной области, уменьшая в свою очередь количество фиксации.

Апробация и исследование модели оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики

Проектирование модели осуществлялось в программе MATLAB 17. В качестве обучающих данных были использованы показатели 18 курсантов, а в качестве тестовых – показатели 8 курсантов. Схемы разработанных моделей Сугено и Мамдани представлены на рисунке 3.

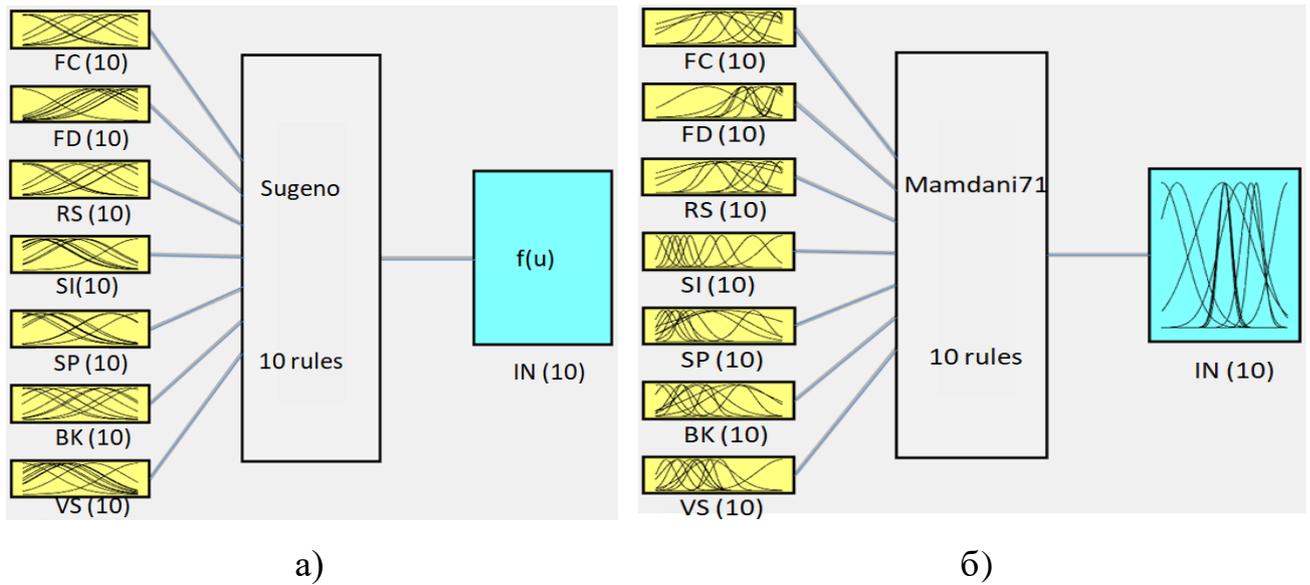


Рисунок 3 – Схемы разработанных моделей Сугено (а) и Мамдани (б)

В результате кластерного анализа были найдены 10 кластеров, которые характеризуют 10 правил вывода модели Сугено.

Результаты проверки модели Сугено с тестовой и обучающей выборками представлены на рисунке 4.

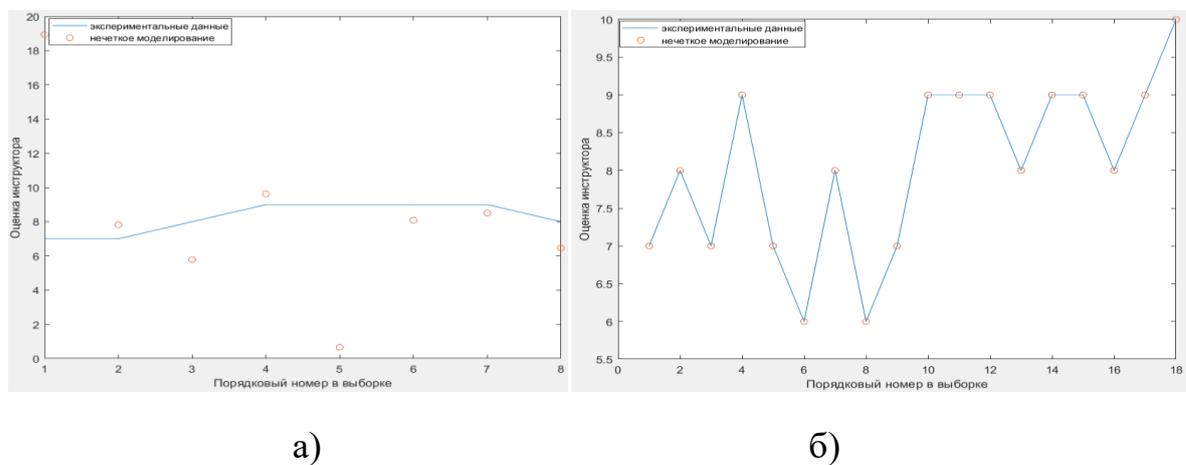
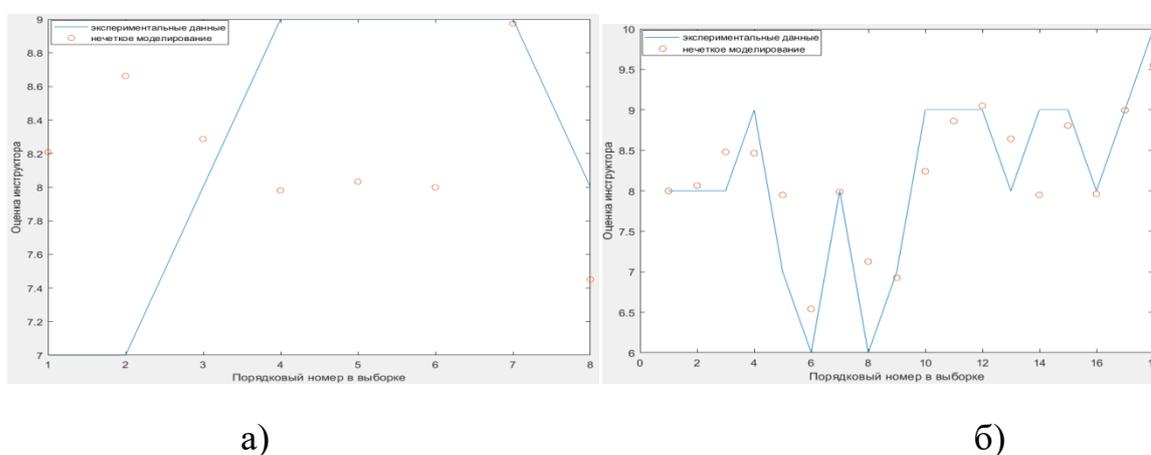


Рисунок 4 – Результаты проверки модели Сугено:
с тестовой выборкой – а; с обучающей выборкой – б

Из рисунка 4 видно, что результаты проверки модели Сугено демонстрируют незначительные расхождения между экспериментальными данными и результатами нечеткого моделирования на тестовой и обучающей выборках.

На втором этапе осуществлялось проектирование модели Мамдани. Основным параметром алгоритма разработки модели Мамдани является количество кластеров или нечетких правил. Исходя из результатов проектирования модели Сугено значение данного параметра было выбрано равным 10. В результате кластеризации получена матрица координат центров нечетких кластеров (каждая строка матрицы описывает центр одного кластера) и матрица степеней принадлежности объектов кластерам.

Результаты проверки модели Мамдани с обучающей и тестовой выборками представлены на рисунке 5.



а) б)
Рисунок 5 – Результаты проверки модели Мамдани:
с тестовой выборкой – а; с обучающей выборкой – б

Из рисунка 5 видно, что результаты проверки модели Мамдани демонстрируют значительные расхождения между экспериментальными данными и результатами нечеткого моделирования на тестовой выборке (рис. 5а) и расхождения в некоторых случаях – на обучающей выборке (рис. 5б).

Третьим этапом проводился сравнительный анализ разработанных моделей (табл. 3). Оценка осуществлялась на основе численного значения критерия среднеквадратической ошибки (Root Mean Square Error, RMSE).

Таблица 3 – Результаты сравнения полученных моделей

Тип модели	RMSE на тестовой выборке	RMSE на обучающей выборке
Модель Сугено	0,9734	0,0047
Модель Мамдани	5,265	0,5445

Результаты сравнения полученных моделей показали, что модель Сугено точнее, чем модель Мамдани описывает зависимость между предложенными показателями.

Проведенное экспериментальное исследование позволило утверждать, что применение полученной модели повышает надежность оценки качества техники пилотирования пилота при первоначальной летной подготовке на 15%.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ И ПРАКТИЧЕСКОГО ОПЫТА ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕХНИКИ ПИЛОТИРОВАНИЯ ПИЛОТА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Взаимосвязь качества профессиональной подготовки летного состава и уровня безопасности полетов в гражданской авиации

Безопасность полетов является одним из основных критериев эффективной деятельности ГА. Уровень безопасности полетов во многом определяется качеством профессиональной подготовки авиационного персонала. В документах ИКАО отмечается, что профессиональная подготовка лиц, деятельность которых связана с авиацией, представляет собой один из наиболее важных факторов, определяющих уровень безопасности полетов [54, 55, 58, 59, 66].

Влияние качества профессиональной подготовки авиационного персонала на безопасность полетов подтверждается статистическими данными, согласно которым около 70 % от общего количества авиационных происшествий в ГА связаны с недостатками в деятельности авиационного персонала. Интересно отметить, что за период с 1930 года относительная доля авиационных происшествий, связанных с отказами авиационной техники и опасным воздействием окружающей среды, сократились с 70 до 25 %, а относительная доля авиационных происшествий, связанных с деятельностью персонала, наоборот, возросла с 15 до 70 % (табл. 1.1) [64].

Таблица 1.1 – Изменение относительного количества
авиационных происшествий с 1930 года

№ п/п	Группы причин авиационных происшествий	Изменение относительного количества авиационных происшествий с 1930 года
1	Воздействие окружающей среды	с 20 до 10%
2	Отказы авиационной техники	с 50 до 15%
3	Прочие причины	с 15 до 5%
4	Деятельность персонала	с 15 до 70%

В мировой гражданской авиации с 2008 по 2017 годы наблюдалась устойчивая тенденция к снижению количества катастроф при выполнении регулярных коммерческих рейсов. А 2017 год по этим показателям признан ИКАО наиболее благополучным [3, 130].

К сожалению, в 2018 – 2019 годах эта тенденция была нарушена целой серией авиационных происшествий, из которых наиболее резонансными были две катастрофы в Российской Федерации (11.02.2018 с самолетом Ан-148 и 05.05.2019 с самолетом RRJ-95).

На сегодняшний день завершено расследование только катастрофы самолета Ан-148 АО «Саратовские авиалинии». По заключению комиссии катастрофа, унесшая жизни 71 человека, «произошла *из-за ошибочных действий экипажа* на этапе набора высоты в инструментальных метеоусловиях при недостоверных показаниях приборной скорости...» [50].

Расследование катастрофы с самолетом RRJ-95 продолжается, но у авиационных специалистов нет сомнений, что одной из причин и этих печальных событий, унесших еще 41 человеческих жизней, также являются недостатки в профессиональной подготовке пилотов.

К сожалению, последующие годы (2020 – 2022 годы) также не способствовали устранению недостатков в профессиональной подготовке

пилотов в связи с ограничениями, связанными с распространением новой коронавирусной инфекции COVID-19, внешним санкционным воздействием.

В 2022 году с ВС коммерческой ГА РФ произошло 15 авиационных происшествий (в 2021 году – 12 авиационных происшествий, в 2020 году – 11 авиационных происшествий), в том числе 4 катастрофы, в которых погибло 7 человек (в 2021 году – 6 катастроф с гибелью 48 человек, в 2020 году 5 катастроф с гибелью 11 человек) [8-10].

Таким образом, авиационные происшествия, происшедшие в 2020-2022 годах, в очередной раз напомнили о том, насколько сложной является проблема обеспечения безопасности полетов. Сравнение числа авиационных происшествий на 1 млн. регулярных рейсов в РФ и в мировой гражданской авиации за период с 2011 по 2022 годы позволяет сделать вывод о нестабильности этого показателя в РФ. Если для стран-членов ИКАО наблюдается его монотонное уменьшение с 4,10 до 1,93, то в РФ наблюдаются нерегулярные колебания этого показателя в диапазоне от 0 до 5,26, что свидетельствует о наличии недостатков в системе обеспечения безопасности полетов (рис. 1.1) [7-10, 71-75].

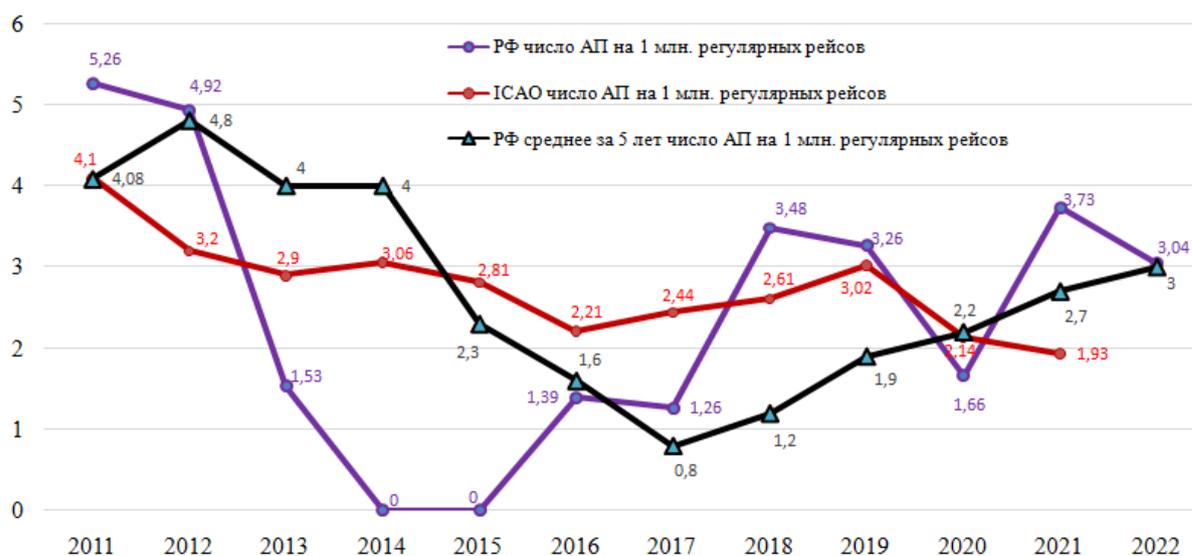


Рисунок 1.1 – Относительное число авиационных происшествий на 1 млн. регулярных рейсов с самолетами коммерческой авиации в РФ и странах-членах ИКАО

При этом основными типами событий, приводящих к авиационным происшествиям с самолетами коммерческой авиации, являются следующие:

- столкновение с землей в управляемом полете (CFIT);
- выкатывание (RE);
- потеря управления в полете (LOC-I);
- нештатное касание ВПП (ARC).

Причинами называются ошибки в технике пилотирования, снижение профессиональной подготовленности членов летных экипажей воздушных судов, а также недостаточное развитие таких компетенций пилота, как навыки ручного пилотирования, навыки совместной работы членов летного экипажа, управление рабочей нагрузкой и ситуационная осведомленность [7-10, 71-75].

Динамика изменения абсолютных показателей авиационных происшествий, обусловленных недостатками в ПП ЛС ГА, представлена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Динамика изменения абсолютного показателя авиационных происшествий, обусловленных недостатками в ПП ЛС ГА

(период 2013-2022 годы)

На основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что за последние 10 лет положительная динамика не наблюдается.

Таким образом, задача совершенствования методов оценивания качества профессиональной подготовки пилотов является важной и актуальной. Решение этой задачи возможно на основе разработки новых моделей оценки качества техники пилотирования, за счет познания самого человека, его психофизиологических возможностей [25, 33, 46, 48, 49].

Следует заметить, что в настоящее время в авиакомпаниях в подавляющем большинстве эксплуатируются автоматизированные воздушные суда, основными особенностями которых являются [2, 76, 127]:

- высокая степень автоматизации управления воздушным судном, позволяющая выполнять в автоматическом режиме большинство элементов полета;

- высокая степень интегрирования информации, когда системы электронной индикации предъявляет пилоту не только индикацию параметров пространственного положения ВС, но и директорную информацию, предписывающую действия с такой степенью детальности, что пилот остается фактически исполнителем на уровне сервопривода;

- применение электронной системы отображения информации, позволяющей выводить на экраны мониторов необходимую информацию о параметрах полета и работе функциональных систем ВС;

- уменьшенное до 2 человек количество членов летного экипажа за счет возложения рутинных задач на соответствующие автоматические устройства.

В этих условиях сенсомоторная деятельность пилота, под которой понимается процесс непрерывного пилотирования для устранения расхождений фактических и заданных значений параметров полета, значительно сокращается, уступая свое место процедурной деятельности. Необходимость ручного пилотирования в настоящее время сохраняется только для очень кратковременных участков полета, связанных, в основном, с выполнением

взлета и посадки самолета, а также при отказах систем автоматического управления.

Однако автоматизация управления, основной целью которой является снижение нагрузки на членов летного экипажа для уменьшения негативного влияния человеческого фактора, создала целый ряд новых проблем, основными из которых являются:

- утрата ситуативной осведомленности, когда пилот не способен оценить или ошибочно оценивает полетную ситуацию;

- непонимание работы автоматизированных систем, незнание их возможностей и ограничений и ошибочного представления о том, как они могут работать в различных эксплуатационных условиях;

- изменение во взаимодействии членов летного экипажа в результате того, что многие функции, ранее выполнявшиеся членами экипажа, теперь передаются автоматизированным системам;

- излишнее доверие к автоматизированным системам, возникающее вследствие быстрого привыкания к их широким возможностям, и связанная с этим монотония;

- беспокойство, связанное со значительным усложнением автоматизированных систем, и неспособность выбрать нужный режим их работы для рационального использования их многочисленных возможностей;

- неспособность вывести самолет в нормальный режим полета после его попадания за пределы эксплуатационных ограничений вследствие нарушения экипажем требований документов, регламентирующих летную эксплуатацию.

Очевидно, что в этих условиях, когда характер профессиональной деятельности пилотов качественно изменился, возникла необходимость разработки новых подходов к системе профессиональной подготовки летного состава и оценки ее качества. Для решения этих проблем ИКАО было предложено использовать компетентностный подход к обучению, пути реализации которого в настоящее время активно обсуждаются мировым авиационным сообществом на различных уровнях от рабочих групп ИКАО и

IATA до летно-методических подразделений авиакомпаний. Практически ежегодно проводятся семинары с участием представителей ведущих производителей авиационной техники и авиакомпаний: «CBT/EBT Workshoring Moscow», 27 апреля 2018 года; «Flight Operations Safety Awareness Seminar Moscow», 6-8 ноября 2019 года; «Competency-based Training and Assessment (CBTA) / Evidence-based Training (EBT)» 12-26 ноября 2020 года; «ICAO-IAC-IATA BAKU CBTA/EBT WORKSHOP» 19-20 октября 2022 года. При этом основное внимание на таких мероприятиях уделяется совершенствованию профессиональной подготовки летного состава в авиакомпаниях и авиационных учебных центрах, тогда как первоначальной подготовке пилотов в учебных заведениях гражданской авиации уделяется гораздо меньше внимания [51].

1.2. Применение компетентностного подхода в ходе профессиональной подготовки летного состава гражданской авиации

В документах ICAO реализация компетентностного подхода для первоначальной подготовки пилотов была продемонстрирована на примере разработки принципиально новой программы подготовки пилотов в составе многочленного экипажа – Multi-Crew Pilot License (MPL).

Толчком к разработке этой программы послужили результаты проведенных в 2000 году исследований, на основе которых был сделан вывод, что стандарты ICAO не соответствуют новым технологиям в области подготовки персонала и авиационной техники. Поэтому в октябре 2002 года было принято решение разработать совершенно новый метод подготовки пилотов. В результате была разработана комплексная программа первоначального обучения, которая позволяет из кандидата в пилоты с нулевым налетом подготовить второго пилота, способного после обучения немедленно приступить к работе в составе многочленного экипажа на самолетах с электронной индикацией. Разработка программы MPL является

первым, начиная с 1944 года, фундаментальным пересмотром методологии подготовки пилотов гражданской авиации, согласно которой уровень их квалификации и профессионализма оценивался главным образом только опытом летной работы, количественной оценкой которого является общее количество часов налета.

На совещании в декабре 2003 года группа экспертов по выдаче свидетельств членам летных экипажей установила очевидную потребность в разработке руководящего документа, который содержал бы инструктивный материал по подготовке и выдаче свидетельств членам летных экипажей. В результате проведенной работы были подготовлены и в 2006 году приняты к исполнению правила аэронавигационного обслуживания «Подготовка персонала», содержащие положения по выдаче свидетельств членам летных экипажей, а также по осуществлению их профессиональной подготовки и оценки ее результатов с использованием основных положений компетентностного подхода к обучению [59]. Публикация этого документа дала начало процессу внедрения компетентностного подхода к подготовке авиационного персонала СВТ – Competency Based Training.

Следующий шаг в этом направлении был сделан Международной ассоциацией воздушного транспорта IATA совместно с ICAO в 2010 году, когда они приступили к разработке концепции компетентностного обучения в рамках программы ITQI (IATA Training and Qualification Initiative). С учетом важности оценки качества освоения пилотами следующих 8 ключевых компетенций:

1. применение процедур;
2. коммуникация;
3. управление траекторией полета ВС (автоматическое управление);
4. управление траекторией полета ВС (ручное управление);
5. лидерство и работа в команде;
6. устранение проблем и принятие решений;
7. ситуационная осведомленность;

8. управление рабочей нагрузкой;

понятие СВТ трансформировалось в СВТ&А (Competency Based Training and Assessment), выделив систему оценивания компетенций в отдельный раздел.

В 2013 году был выпущен документ ИКАО 9995 «Руководство по подготовке персонала на основе анализа фактических данных» (Evidence-based Training Guide, ЕВТ), дополняющий документ 9868 обновленной методологией компетентностного обучения, в соответствии с которой «качественная подготовка и оценка достигаются на основе анализа фактических данных, а также за счет качественного профессионального сопровождения процесса подготовки, в том числе с использованием различных аппаратурных методов» [58, 66].

В 2016 году была издана вторая версия документа ИКАО «Подготовка персонала», в котором был обобщен 10-летний опыт разработки и внедрения компетентностного подхода к подготовке авиационного персонала, включающего Поправку 5 с датой начала применения 5 ноября 2020 года [54]. Таким образом, подготовка пилотов на сегодняшний день должна реализовываться в соответствии с рекомендациями этого документа.

В связи с тем, что Российская Федерация является членом ИКАО, стандарты и рекомендуемая практика ИКАО должны лежать в основе российских нормативных документов, устанавливающих требования к профессиональной подготовке пилотов. Это подтверждается требованиями Федерального Закона № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» [65] и соответствующих ФГОС, согласно которым программы подготовки членов экипажей воздушных судов разрабатываются в соответствии с международными требованиями [82, 83, 90].

В настоящее время подготовка пилотов по программам высшего образования осуществляется в образовательных учреждениях России в соответствии с требованиями следующих ФГОС:

- Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – бакалавриат по направлению подготовки 25.03.03 Аэронавигация [82];

- Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – специалитет по специальности 25.05.05 Эксплуатация воздушных судов и организация воздушного движения [83].

Данные стандарты относятся к поколению ФГОС 3++, в которых предусмотрено, что профессиональные компетенции для каждого профиля подготовки бакалавров или специализации образовательная организация определяет самостоятельно на основе профессиональных стандартов, а, в случае их отсутствия, на основе изучения требований к выпускникам на рынке труда и обобщения отечественного и зарубежного опыта. Кроме того, ФГОС предусмотрено, что образовательная организация самостоятельно устанавливает индикаторы достижения профессиональных компетенций. Очевидно, что эффективная реализация компетентностного подхода требует проведения исследований с целью научного обоснования выбора и использования индикаторов освоения компетенций с учетом особенностей первоначальной подготовки пилотов и возможностей применяемых технических средств подготовки и обучения и использования дополнительных технических средств [2, 15, 24, 35].

1.3. Опыт применения технологии ай-трекинга для оценки освоения профессиональных компетенций с учетом психофизиологического состояния пилота

Применение автоматизированных систем управления ВС меняет характер деятельности членов летных экипажей. Сенсомоторная деятельность пилота, под которой понимается процесс непрерывного пилотирования для устранения расхождений фактических и заданных значений параметров полета, уступает свое место процедурной деятельности. Это требует развития новых подходов к

системе профессиональной подготовки летного состава, введения не только качественных, но и количественных оценок освоения профессиональных компетенций. Об этом свидетельствуют рекомендуемые ИКАО методики обучения, среди которых в настоящее время наибольшее внимание уделяется программам ЕВТ.

Программы ЕВТ ориентированы на оценку и развитие не только технических, но и нетехнических компетенций. Данный факт свидетельствует о том, что дальнейшее совершенствование системы профессиональной подготовки пилотов связано с применением технических средств и методов оценки состояния пилота [20, 21, 57, 70], среди которых основными являются следующие:

- методы контактного измерения электрических параметров кожи (кожно-гальваническая реакция, электрокожное сопротивление);
- метод анализа клавиатурного почерка;
- метод вариационной кардиоинтервалометрии (ВКМ);
- метод электроокулографии;
- метод окулометрических измерений.

Исходя из того, что характер профессиональной деятельности пилотов качественно изменился и представляет собой во многом процесс взаимодействия с системой отображения полетной информации, так как большую часть информации для формирования «образа полета» (до 90 %) пилот получает через зрительный канал, перспективным в использовании является метод окулометрических измерений (или технология ай-трекинга).

Технология ай-трекинга – это метод регистрации и оценки движений глаз и реакций зрачка для исследования РПЗВ человека в процессе его профессиональной деятельности. Данный метод позволяет выполнить количественную оценку ее наиболее значимых составляющих – фиксаций, саккадических движений глаз и морганий. Оценка может быть произведена относительно всего зрительного поля или его отдельных зон – так называемых областей интереса или зон интереса. Область интереса или зона интереса

(Region of Interest, ROI) представляет собой участок зрительного стимула, на котором сосредоточено зрительное внимание человека [4, 114, 125, 128]. В настоящей работе будем придерживаться термина «область индикации», так как зрительное внимание пилота в первую очередь направлено и сосредоточено на приборы индикации и контроля [21].

Фиксации – это медленный и плавный дрейф глаза в небольшой зоне, во время которого происходит прием зрительной информации. Саккада – резкий и точный скачок глаза с высокой скоростью, при котором резко изменяется позиция глаза и положение фиксации. В научной литературе встречается также термин «возвратная саккада». Возвратная саккада представляет собой перемещение позиции глаза в обратном направлении. Например, в случае если данные системы динамически изменяются и содержание трудноуловимо для восприятия и понимания, то часто наблюдаются возвратные саккады. Моргание – это естественный защитный рефлекс, благодаря которому обеспечивается увлажнение роговицы глаза в ответ на какой-либо раздражитель. Большое количество фиксаций и саккад свидетельствует о высокой переключаемости внимания, способности в нужное время отследить поступающую сенсорную информацию. Большое количество морганий может свидетельствовать об утомлении человека-оператора, а также о возможных пропусках поступающей информации [4, 78, 108].

С помощью технологии ай-трекинга можно количественно представить данные о РПЗВ пилота между разными источниками информации (показаниями приборов, визуальной информацией) в реальном времени. В частности, можно выявить, какую информацию использует пилот при выполнении различных операций и каковы алгоритмы и временные рамки процессов анализа ситуации и принятия решения. Технология ай-трекинга дает возможность анализировать деятельность пилота на всех этапах полета и в различных условиях [109, 125].

Число исследователей, использующих ай-трекеры, значительно возросло за последние 20 лет. На самом деле ай-трекеры – это современные физиометрические системы [13]. Ай-трекер или окулограф отслеживает

движения глаз и распознает направление взгляда, используя для этого систему камер и излучателей, определяющих координаты положения зрачка и точку, на которую в данный момент времени нацелен взгляд. Современный ай-трекер может быть внешним, то есть установленным, например, на приборной панели, или интегрированным, в частности, в оправу, напоминающую обычные очки [4, 104].

Исследования особенностей движения глаз при решении профессиональных задач в процессе подготовки активно развиваются в различных областях деятельности. Исходя из задач диссертационного исследования интерес представляют работы зарубежных и отечественных ученых, касающиеся применения технологии ай-трекинга в ходе профессиональной подготовки летного состава гражданской авиации.

В качестве примера можно привести экспериментальные исследования РПЗВ пилотов на тренажере самолета Boeing-747-400, не имеющем системы подвижности. В эксперименте участвовали 20 пилотов, имеющих налет от 100 до 9000 часов на этом типе самолета, при этом общий налет на самолетах со стеклянной кабиной у каждого был не менее 1000 часов. Для изучения РПЗВ пилотов использовались окулометрические методы [126].

В процессе полета вводились отказы автоматических систем управления в соответствии с 4 сценариями. Результаты эксперимента показали, что действия пилотов оказались значительно хуже, чем предполагалось изначально (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Результаты эксперимента по исследованию РПЗВ пилотов на тренажере самолета Boeing-747-400

Событие	Всего выполнено полетов	Количество действий пилотов		
		Количество зафиксированных отказов	Количество сообщений об отказах	Количество устраненных отказов
1. Некорректный режим управления по тангажу 1.	18	12	0	0
2. Изменение высоты крейсерского полета.	16	9	2	4
3. Некорректный режим управления по тангажу 2.	19	10	1	0
4. Некорректный режим работы автомата тяги.	19	10	0	0

Как видно из таблицы 1.2, только примерно в половине случаев в поле зрения пилотов попадали индикаторы, сигнализирующие об изменении режима работы автоматики. При этом только в единичных случаях пилотами выполнялись все необходимые действия.

По результатам эксперимента были сделаны выводы, что причиной неправильных действий пилотов являются как недостаточное понимание принципов работы автоматики, так и недостатки в представлении информации и системе обратной связи.

Во Франции по инициативе Бюро по проведению исследований в области обеспечения безопасности полетов в гражданской авиации BEA (Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile) в 2013 году с использованием окулометрической системы проводились эксперименты по изучению проблемы потери контроля за основными параметрами полета в процессе ухода на второй круг ASAGA (Study on Aeroplane State Awareness during Go-Around) [131].

Эксперименты проводились на тренажерах FFS самолетов Boeing 777 и Airbus 330. При проведении экспериментов учитывалось такое ограничение тренажера как невозможность имитации соматогравитационной иллюзии.

Наряду со стандартными средствами записи параметров полета, такими как проведение анкетирования и видеозаписи, также использовались окулометрические методы, которые позволяли строить по результатам эксперимента:

- «тепловые карты», представляющие качественные характеристики РПЗВ пилотов между различными областями индикации на различных режимах полета;
- количество обращений к каждой области индикации;
- среднюю и минимальную продолжительность фиксации взгляда на каждой области индикации.

Наряду с «очками», на голове у каждого члена экипажа была установлена видеокамера, которая фиксировала направление взгляда. Система обеспечивала определение направления взгляда на основе обработки результатов «очков» и видеокамер.

Письменная мини-анкета проводилась сразу же после эксперимента, чтобы исключить влияние на мнение пилотов результатов обсуждения с другими участниками эксперимента.

Одним из результатов эксперимента явился вывод о том, что в процессе профессиональной подготовки пилотов необходимо осуществлять оценку и мониторинг РПЗВ, особенно для таких напряженных и сравнительно редких режимов полета как уход на второй круг. При ее отсутствии пилоты не могут рационально организовать взаимодействие с системами отображения информации [131].

Необходимо отметить также следующие работы зарубежных ученых, исследовавших особенности движения глаз пилотов.

В работе [114] исследователи отмечают, что отслеживание взгляда может быть полезным инструментом для обучения пилотов стратегиям мониторинга,

например, при видео демонстрации визуального образца эксперта начинающим пилотам. В [103] авторы обращают внимание на то, что окулографические данные предоставляют собой интересные поведенческие (фиксации) и физиологические (пупиллометрия) измерения, которые отражают изменения уровня стресса и внимания. В [121] авторы предлагают даже новую программу обучения пилотов, включающую в обязательном порядке теоретическую информацию о методиках распределения зрительного внимания и ситуационной осведомленности как об одном из наиболее важных и сложных аспектов работы пилота.

Особенно интересны обзоры, опубликованные в [124, 138]. Авторы затронули многие важные темы, и пришли к выводу, что определенные схемы РПЗВ, по-видимому, помогают улучшить навыки пилотирования, и предположили, что будущие исследования с использованием окулометрических измерений должны прояснить взаимосвязь между ГДА пилота и его компетентностью [113, 118, 119, 120].

В нашей стране первые окулометрические исследования проводились с использованием отечественного биотехнического комплекса БТК-6, позволяющего производить регистрацию движения глаз командира воздушного судна и второго пилота одновременно или по отдельности в Государственном Научно-исследовательском институте ГА на КТС Ил-86 [77].

При проведении исследований каждый экипаж выполнял три полета в штурвальном режиме, с директорным или автоматическим заходом на посадку. В каждом полете по команде пилоты фиксировали значения основных пилотажно-навигационных приборов в следующих точках:

- на взлете ($H = 250\text{--}350$ м);
- между вторым и третьим разворотами;
- между четвертым разворотом и захватом глиссады;
- между захватом глиссады и дальней приводной радиостанцией с маркером;
- между дальней и ближней приводными радиостанциями с маркером.

Для каждого полета проводилось построение характеристик РПЗВ, сравнение которых позволило сделать предположение о существовании устойчивого среднего динамического стереотипа зрительного восприятия в процессе пилотирования, имеющего следующие особенности [77]:

1) Повышенное внимание к ПКП, на долю которого приходится в среднем 40 % всех фиксаций и 54 % времени фиксаций, затрачиваемого на обзор приборной доски и внешнего пространства.

2) Минимизация частных зрительных маршрутов относительно ПКП, среди которых преобладают двух- и трехприборные маршруты (92 % всех маршрутов).

3) Незначительное колебание среднего времени фиксации приборов, расположенных в «кресте» (кроме ПКП). На диапазон среднего времени фиксации приборов, равного 0,4-0,65 с, приходится от 65 до 90 % всех фиксаций. Данное обстоятельство дает возможность предполагать, что это время является достаточным на получение пилотом информации с такой точностью, которая позволяет осуществлять пилотирование в нормальных условиях полета.

4) Значение среднего времени перерыва между двумя последовательными фиксациями одного и того же прибора свидетельствует о том, что наибольшее внимание пилот уделяет параметрам, индицируемым на ПКП.

Дальнейшим развитием этого направления научных исследований уже для самолета с EFIS, являются эксперименты, проведенные на КТС самолета Ту-204 [37-39]. Исследовалось качество пилотирования и РПЗВ у 6 пилотов, выполнявших заходы на посадку при различных режимах работы системы автоматического управления. Для фиксации РПЗВ использовался прибор NAC Eye Mark Recorder.

На первом этапе проведения исследований было проведено анкетирование 45 пилотов, имеющих опыт полетов на самолетах со «стеклянной кабиной» типа Airbus 320, Boeing 737, Boeing 767, Ан-148 и Ту-204. По результатам

анкетирования было выявлено, что пилоты, основываясь на субъективной оценке своей ГДА, констатируют факт наличия определенной схемы РПЗВ [37].

В дальнейшем одним из результатов проведенных экспериментальных исследований является вывод о том, что основным параметром, определяющим качество техники пилотирования, является количество параметров полета, включаемых пилотом в отдельный цикл РПЗВ. Связь получается обратной, т.е. увеличение количества параметров полета в цикле снижает качество пилотирования. При этом не выявлено существенного влияния на качество пилотирования продолжительности фиксации взгляда на параметр полета, а существенный разброс значений этой величины у различных пилотов обусловлен их психофизиологическими особенностями и в работе не исследовался (табл. 1.3) [37].

Таблица 1.3 – Время фиксации взгляда пилотов на параметре полета

Порядковый номер пилота	1	2	3	4	5	6
Среднее время фиксации взгляда на параметре полета, с.	0,84	1,00	1,10	0,66	0,83	0,98

В работах [98, 99] авторами предложены показатели, характеризующие РПЗВ пилота, в основе которых лежит вычисление отклонения длительности фиксаций от соответствующей оптимальной величины. Однако, необходимо отметить, что данные показатели не получили экспериментальной апробации на летном тренажере.

В работах [40-42] исследователи предлагают новую концепцию диагностики летного состава на основе окулометрических данных, опираясь на сравнения исследуемых фрагментов полета с сопоставимыми фрагментами из специализированной базы данных. Интересным результатом проведенных исследований является вывод, что дисперсия изменчивости фиксируемых параметров на 46% обусловлена влиянием навыков пилотирования и на 54%

совместным влиянием психофизиологического состояния пилотов и ошибок измерений, что позволяет говорить о сопоставимом влиянии исследуемых факторов на анализируемые характеристики [40-42].

Исследования РПЗВ пилотов в ходе тренажерной подготовки отражены в работе [27, 34]. Авторы провели экспериментальное исследование по переключению зрительного внимания пилотов с использованием системы мобильного ай-трекера в ходе первоначального обучения на тренажерах в условиях электронных систем отображения информации. Установлено, что формирование рациональных методов РПЗВ положительно влияет на качество пилотирования, в связи с чем, разработаны рекомендации по совершенствованию методики начальной профессиональной подготовки курсантов, связанные с формированием рационального метода РПЗВ в полете по приборам.

Полученные экспериментальные и расчетные результаты позволяют говорить об эффективности рассмотренного подхода и возможности построения на его основе автоматизированных диагностических средств для оценки качества техники пилотирования по результатам работы на авиационных тренажерах.

Однако для комплексного подхода к вопросу оценки качества техники пилотирования целесообразным является также применение метода ВКМ. Так как любая профессиональная деятельность сопряжена с определенной степенью нервного и эмоционального напряжения, то использование данного метода позволит оценить степень ПФН во время выполнения полетного задания [47, 87, 93].

В работе [36] степень ПФН определяется в качестве «психофизиологической цены выполнения профессиональной задачи», представляющая собой «показатели психологических и физиологических характеристик субъекта во время выполнения профессиональной деятельности» [16, 22]. В качестве показателя ПФН возможно использовать отношение

текущих абсолютных значений показателя к фоновым значениям, замеренным в процессе нормального функционирования [14].

В [60-62] предлагается интегральный показатель надежности деятельности. Это важная для человека-оператора, которым является пилот, способность к сохранению требуемых рабочих качеств в условиях возможного усложнения обстановки. Значение показателя варьируется от 0 до 100 единиц. Чем выше его значение, тем дольше пилот сможет на должном уровне и безошибочно выполнять необходимые действия.

В качестве показателя ПФН широко распространенным в России выступает индекс напряжения регуляторных систем (стресс-индекс). Этот показатель отражает общий уровень симпатoadреналовой активности, степень активации центральных звеньев регуляторного механизма. Это очень лабильный показатель, который сильно зависит от психофизиологического состояния обследуемых лиц [11, 12, 29].

Выделяется 5 уровней стресс-индекса (SI):

- 1) $SI < 70$ — преобладание парасимпатического тонуса в организме;
- 2) $70 \leq SI < 150$ — нормальное напряжение регуляторных систем;
- 3) $150 \leq SI < 300$ — умеренное напряжение регуляторных систем;
- 4) $300 \leq SI < 600$ — выраженное напряжение регуляторных систем;
- 5) $SI \geq 600$ — перенапряжение (дезадаптация) регуляторных систем.

Западноевропейские и американские исследователи для оценки степени ПФН используют так называемый треугольный индекс, определяемый как интеграл плотности распределения (общее количество кардиоинтервалов), отнесенный к максимуму плотности распределения (AMo). Этот показатель обозначается как TINN (triangular interpolation of NN intervals) [102, 106]. Если не вдаваться в математические алгоритмы вычисления этих индексов, то, по большому счету, оба показателя будут давать близкую корреляцию, так как оба учитывают вариационный размах и наиболее часто встречающиеся кардиоинтервалы.

Таким образом, в результате проведенного анализа отечественных и зарубежных источников можно сделать вывод о том, что применение технологии ай-трекинга и метода ВКМ позволяет решать задачи в области оценки качества техники пилотирования пилота при первоначальной летной подготовке.

1.4. Анализ существующих моделей оценки качества техники пилотирования пилотов гражданской авиации

Согласно приведенному в разделе 1.3 анализу в качестве методов диагностики состояния пилотов гражданской авиации показана возможность использования метода окулометрических измерений и метода ВКМ. Кроме того, показано, что одной из основных причин ошибок пилотов гражданской авиации являются недостаточное качество техники пилотирования, когнитивные особенности восприятия (внимательность, бдительность и т.д.).

Рассмотрим особенности существующих моделей оценки качества техники пилотирования пилотов гражданской авиации.

В работах [26, 31, 32] авторы определяют критерии деятельности оператора ВС в качестве меры оценки профессиональной подготовленности. Одним из важнейших критериев деятельности выступает надежность, под которой понимается «свойство человека безотказно выполнять заданные функции, сохраняя свои психофизиологические характеристики и социальные показатели в допустимых пределах, в определенных условиях в течение заданного промежутка времени» [32].

Простейшим показателем надежности является вероятность безошибочного выполнения заданной структуры деятельности p_σ , которая вычисляется по следующей формуле [32]:

$$p_\sigma = 1 - C_n^k \beta^k (1 - \beta)^{n-k}, \quad (1.1)$$

где n – количество повторений данной операции;

k – число допущенных при этом ошибок;

C_n^k – число сочетаний из n элементов по k ;

β – вероятность появления ошибок при единичном испытании.

Другим параметром для определения надежности оператора может рассматриваться вероятность своевременного выполнения операции [32]:

$$p_c = \int_0^{\tau} f_{\alpha, \beta, T_0(t)} dt, \quad (1.2)$$

где $f_{\alpha, \beta, T_0(t)}$ – смещенное на величину T_0 (полное время оператора) гамма-распределение с параметрами α и β ;

p_c – вероятность своевременного выполнения операции.

В работе [45] авторами представлена вероятностная математическая модель надежности курсанта-пилота:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -\lambda P_0 + \mu P_1 \\ \frac{dP_1}{dt} = +\lambda P_0 - \mu P_1 - \lambda P_1, \\ \frac{dP_A}{dt} = +\lambda P_1 \end{cases} \quad (1.3)$$

где λ – интенсивность потока событий, являющихся ошибками курсанта-пилота;

μ – интенсивность потока событий, являющихся исправлениями ошибок курсанта-пилота инструктором;

P_0 – вероятность потока событий, которые характеризуются отсутствием ошибок курсанта-пилота;

P_1 – вероятность потока событий, которые характеризуются тем, что ошибка курсанта-пилота исправлена инструктором;

P_A – вероятность потока событий, которые характеризуются тем, что ошибка курсанта-пилота не исправлена инструктором (авиационное происшествие).

В рамках модели (1.3) на основе анализа статистических данных по ошибкам, допущенным при выполнении учебных полетов, причин ошибок и их интенсивности можно судить о подготовленности курсанта-пилота, а по правильным и своевременным действиям пилота-инструктора (исправление ошибок, допускаемых курсантом) можно также судить о подготовленности пилота-инструктора [45].

В работе [5] предложена следующая одномерная двухпараметрическая логистическая модель:

$$P_i(\beta) = \frac{e^{d_i(\theta_i - \beta)}}{1 + e^{d_i(\theta_i - \beta)}}, \quad (1.4)$$

где β – уровень трудности задания;

d_i – параметр, характеризующий меру структурированности профессиональных знаний i -го испытуемого;

θ_i – уровень подготовленности i -го испытуемого.

В рамках модели (1.4) профессиональная подготовленность пилота рассматривается как функция от таких параметров, как разности уровня подготовки и уровня трудности задания, а также меры структурированности профессиональных знаний пилота.

В работе [1] авторами предлагается метод объективной оценки качества техники пилотирования на современных тренажерах самолетов на основе регистрируемых параметров полета. Некоторые результаты применения систем регистрации движения глаз при оценке качества техники пилотирования приведены в [6], но они не в полной мере затрагивают вопрос учета психофизиологической напряженности. В некоторых работах авторы отмечают связь данных ГДА и качества техники пилотирования экипажа, опираясь на сравнения исследуемых фрагментов полета с сопоставимыми фрагментами из специализированной базы данных [39, 40-44, 111, 112].

Математические модели надежности пилота как оператора сложной динамической системы описаны в зарубежных научных работах [105, 107, 116, 117, 132]. Среди выдающихся ученых в этой области можно назвать

профессора Д. Т. Макруэра, чей «Закон взаимного согласования характеристик» [117] стал отправной точкой для многих последующих научных исследований. Теория Макруэра показала, что после некоторых упрощений деятельность пилота можно описать с помощью теории динамических систем и теории автоматического управления. Основываясь на этой теории, исследователи апробировали многие типы моделей [107, 117].

Обобщая модель взаимного согласования характеристик и связанные с ней модели, надежность пилота можно упрощенно описать с помощью передаточной функции Лапласа, как показано в следующей формуле (1.5) [109]:

$$F(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K(T_1s + 1)}{(T_2s + 1)(T_3s^2 + T_4s + 1)} \exp(-\tau s) \quad (1.5)$$

где $F(s)$ – передаточная функция человека-оператора;

s – оператор Лапласа;

K – коэффициент усиления человека-оператора;

τ – время чистого запаздывания;

T_1 – постоянная времени дифференцирующего звена человека-оператора;

T_2 – постоянная времени интегрирующего звена человека-оператора;

T_3 и T_4 – постоянные времени колебательного звена человека-оператора.

Формула (1.5) описывает динамическую модель надежности человека-оператора как отношение выходного сигнала (управляющего воздействия) – $Y(s)$ к входному сигналу (восприятию сигнала человеком-оператором) – $U(s)$.

В соответствии с действующей Программой учебной и производственной практики подготовки коммерческих пилотов в образовательных учреждениях гражданской авиации России система оценки качества техники пилотирования пилотов при первоначальной летной подготовке основывается на бинарной системе оценок: «зачтено» или «незачет». В тренировочных полетах оцениваются только те элементы упражнения, выполнение которых инструктор может наблюдать, не занимая при этом рабочего места на борту самолета или тренажере самолета. Одним из основных недостатков данной системы является

малая информативность оценки и ограниченность в проверке состояния обучающегося.

Анализ существующих моделей оценки качества техники пилотирования пилота гражданской авиации позволяет сделать вывод о том, что в данных моделях применяются итоговые результаты деятельности и в комплексе не учитываются показатели ГДА и ПФН. В связи с этим оценка является недостаточно объективной [18, 28]. Наряду с этим с учетом возрастания количества обрабатываемой информации, неопределенности и неполноты исходных данных целесообразным является применение систем интеллектуального анализа данных на основе методов теории нечетких множеств [52, 95].

Построение моделей приближенных рассуждений человека и использование их в компьютерных системах будущих поколений представляет сегодня одну из важнейших задач науки. Значительный шаг в этом направлении в 1965 г. был сделан профессором Калифорнийского университета Лотфи А. Заде (Lotfi A. Zadeh). Его работа «Нечеткие множества» (Fuzzy Sets), появившаяся в 1965 г. в журнале *Information and Control*, № 8, заложила основы моделирования интеллектуальной деятельности человека и явилась первым импульсом в развитии теории нечеткого моделирования [94, 97].

Новый подход позволил расширить сферу приложения автоматизации за пределы применимости классического математического моделирования. В этом плане любопытна точка зрения самого Лотфи Заде: «Я считаю, что излишнее стремление к точности стало оказывать действие, сводящее на нет теорию управления и теорию систем, так оно приводит к тому, что исследования в этой области сосредоточиваются на тех и только тех проблемах, которые поддаются точному решению. В результате многие классы важных проблем, в которых данные, цели и ограничения являются слишком сложными или плохо определенными для того, чтобы допустить точный математический анализ, оставались и остаются в стороне по той причине, что они не поддаются математической трактовке. Для того чтобы сказать что-либо существенное для

проблем подобного рода, мы должны отказаться от наших требований точности и допустить результаты, которые являются несколько размытыми или неопределенными» [123, 134-137].

Нечеткая логика описывает сложные системы с помощью лингвистических правил «ЕСЛИ-ТО» [96]. Одними из важных и актуальных для настоящей работы приложений нечеткой логики являются системы управления и системы поддержки принятия решений. Нечеткое моделирование включает в себя следующие этапы: (1) фаззификация – преобразование четких входов в нечеткие значения; (2) построение базы знаний, которая содержит нечеткие правила вместе со словарем, определяющим функции принадлежности; (3) реализация механизма вывода, который применяет нечеткое рассуждение для получения нечеткого выходного сигнала и (4) дефаззификация – преобразование нечеткого выхода в четкое значение.

Нечеткие модели различаются по способу определения следствий правил, а также процессу импликации. В данной работе рассматриваются два основных типа нечетких моделей: Мамдани и Сугено [91, 92].

Успешное проектирование нечеткой системы на основе правил зависит от нескольких факторов, таких как выбор базы правил, функций принадлежности, механизма вывода и стратегии дефаззификации. Из этих факторов выбор подходящей базы правил является наиболее важным и сложным. Часто для нечетких моделей базу правил строят на основе знаний и опыта экспертов в конкретной области. Такой подход известен как моделирование на основе знаний. Этот подход к моделированию становится сложным, когда имеющиеся знания неполны или когда эксперту трудно установить взаимосвязь между входными и выходными переменными и описать ее в виде правил «ЕСЛИ-ТО». Несмотря на то, что эта методология проектирования привела к большому количеству успешных приложений, она требует много времени и в большинстве своем не имеет установленных принципов и систематических методик. Для устранения данного недостатка необходимы подходы к разработке нечетких моделей без привлечения экспертов. Таким образом,

извлечение соответствующего набора правил из наблюдаемых данных является важным и необходимым шагом на пути к разработке адекватной модели на основе нечеткой логики. При использовании подхода моделирования на основе данных предполагается отсутствие предварительных знаний о рассматриваемой системе [18].

Анализ результатов научных исследований позволяет сделать вывод о необходимости совершенствования системы первоначальной профессиональной подготовки пилотов на основе разработки научно обоснованных подходов совместного применения средств объективного контроля параметров полета и методов диагностики состояния обучающихся с последующим проектированием моделей из полученных экспериментальных данных.

Выводы по главе 1

1. Одним из эффективных путей обеспечения требуемого уровня безопасности полетов в гражданской авиации является повышение качества ПП ЛС ГА. В этой связи разработка предложений, связанных со снижением негативного влияния ЧФ и повышением качества профессиональной подготовки пилотов имеет актуальное значение для ГА.

2. Кардинальные изменения в структуре деятельности членов летных экипажей требует разработки новых подходов к методам их профессиональной подготовки и оценки ее качества, в основе которых должен лежать рекомендованный Международной организацией гражданской авиации ICAO компетентностный подход к обучению. В соответствии с данным подходом оценка качества подготовки должна осуществляться на основе четко сформулированных целей, соответствующих профессиональной деятельности, и количественно отражать величины, выражающие степень освоения как технических, так и нетехнических компетенций.

3. Анализ отечественной и зарубежной практики применения методов диагностики состояния пилотов показал, что применение метода окулометрических измерений и метода ВКМ позволяет решать задачи в области оценки качества техники пилотирования пилота гражданской авиации и согласуется с рекомендуемой практикой и стандартами ИКАО.

4. Анализ существующих моделей оценки качества техники пилотирования пилота гражданской авиации показал, что на сегодняшний день применяемые методы тренажерной подготовки летного состава предполагают использование далеко не всех возможностей современных летных тренажеров. И особенно это касается процесса оценивания качества техники пилотирования, в котором основная роль, как и много лет назад, отводится субъективному мнению инструктора и в комплексе не учитываются показатели ГДА и ПФН. В связи с этим оценка качества техники пилотирования является недостаточно объективной. Кроме того с учетом возрастания количества обрабатываемой информации, неопределенности и неполноты исходных данных целесообразным является применение систем интеллектуального анализа данных.

Таким образом, было определено основное направление совершенствования системы первоначальной профессиональной подготовки пилотов: разработка научно-обоснованных подходов применения средств объективного контроля параметров полета и методов диагностики состояния обучающихся с последующим проектированием моделей на основе полученных экспериментальных данных.

ГЛАВА 2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕХНИКИ ПИЛОТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ПИЛОТА

2.1. Выбор критериев для оценки точности выдерживания заданных параметров полета

В настоящее время развитие авиационных тренажеров идет как в направлении повышения адекватности моделирования различных режимов полета, в первую очередь сваливания и сложного пространственного положения, так и в направлении совершенствования методов фиксации процесса выполнения упражнений. Последнее предполагает запись параметров полета, видео и аудиозапись процесса работы членов летного экипажа в кабине. Комплексное решение этой задачи предлагает один из наиболее известных в мире производителей авиационных тренажеров – канадская компания CAE, которая для повышения эффективности тренажерной подготовки устанавливает на новых тренажерах систему SOQA (Simulator Operations Quality Assurance). Достигается это за счет непрерывной записи параметров процесса подготовки и сравнения полученных результатов с требуемыми. При этом особое внимание уделяется контролю правильности выполнения стандартных операционных процедур.

Несмотря на работу по совершенствованию тренажеров и устанавливаемых на них средств объективного контроля, следует признать, что на сегодняшний день применяемые методы тренажерной подготовки летного состава предполагают использование далеко не всех возможностей современных летных тренажеров [17]. И особенно это касается процесса оценивания качества техники пилотирования, в котором основная роль, как и много лет назад, отводится субъективному мнению инструктора. Очевидно, что назрела необходимость разработки «электронного помощника» инструктора, который будет обеспечивать инструктору сбор, представление и анализ

информации о выполнении полета на тренажере. Это позволит освободить инструктора от рутинной работы и сосредоточиться на контроле выполнения обучающимися наиболее важных элементов упражнений.

Однако для того, чтобы «электронный помощник» стал действительным помощником инструкторского состава, необходимо, чтобы его методы оценки соответствовали методам, которые применяет инструкторский состав, а представление результатов его работы было для них понятным и наглядным.

Для описания и оценивания степени подобия двух отличающихся объектов применяются различные меры сходства. Следует отметить, что термин «сходство» не является общепринятым, часто в качестве синонимов используют понятия «ассоциативность», «связанность», «подобие», «близость». Еще большее разнообразие наблюдается в методах вычисления мер сходства и интерпретации полученных результатов. Будем придерживаться классификации коэффициентов сходства, предложенной в [30], разделив эти коэффициенты на три группы:

- 1) меры расстояния;
- 2) коэффициенты корреляции;
- 3) коэффициенты ассоциативности.

Сразу отметим, что коэффициенты ассоциативности можно применять лишь в том случае, когда необходимо установить сходство между объектами, описываемыми бинарными переменными (например, значение переменной, равное 1, указывает на наличие какого-то свойства, а на его отсутствие – значение, равное 0). Основные параметры полета, позволяющие оценить качество техники пилотирования (приборная и воздушная скорости самолета, магнитный курс, величина углов крена и тангажа, высота, режим работы двигателя и др.), не являются бинарными, поэтому применение коэффициентов ассоциативности для оценки точности выдерживания указанных параметров полета далее рассматривать не будем.

Главным недостатком коэффициента корреляции как меры сходства графиков двух функций является то, что он чувствителен к форме графика за

счет снижения чувствительности к величине различий между переменными. Поэтому часто говорят, что коэффициент корреляции нечувствителен к масштабированию функций.

Обратим внимание на коэффициенты, относящиеся к первой группе. По сути, коэффициенты, относящиеся к этой группе, определяют меру несходства объектов. В то время как для рассмотренных выше коэффициентов корреляции значение, близкое к нулю, свидетельствует о том, что исследуемые объекты не похожи друг на друга, равное нулю расстояние между объектами можно получить только в том случае, если два объекта идентичны, так как описывающие их переменные принимают одинаковые значения. Обычно меры расстояния не ограничены сверху и зависят от выбора шкалы (масштаба) измерений. Наиболее известными мерами расстояния являются [30]:

1) евклидово расстояние, вычисляемое по формуле

$$d(\vec{f}, \vec{g}) = \sqrt{(f_1 - g_1)^2 + (f_2 - g_2)^2 + \dots + (f_n - g_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - g_i)^2}; \quad (2.1)$$

2) манхэттенское расстояние (расстояние городских кварталов), определяемое как

$$d(\vec{f}, \vec{g}) = \sum_{i=1}^n |f_i - g_i|. \quad (2.2)$$

Следует отметить, что обе указанные метрики имеют похожие свойства, так как являются частными случаями метрики Минковского – параметрической метрики на евклидовом пространстве, вычисляемой по формуле

$$d(\vec{f}, \vec{g}) = \left(\sum_{i=1}^n |f_i - g_i|^p \right)^{1/p}, \quad (2.3)$$

из которой получим евклидову метрику (2.1) при $p = 2$ или манхэттенское расстояние (2.2) при $p = 1$.

Выбрав манхэттенское расстояние в качестве меры сходства графиков двух функций $f(t)$ и $g(t)$, перейдем от суммирования к интегрированию на интервале от $t_0 = a$ до $t_n = b$ и получим неограниченный сверху коэффициент

$$d_{fg} = \int_a^b |f(t) - g(t)| dt. \quad (2.4)$$

Если функция $f(t)$ в формуле (2.4) соответствует наблюдаемым значениям параметра полета в ходе тренажерной подготовки, а функция $g(t)$ – эталонным значениям, то нормировка относительно площади криволинейной трапеции, ограниченной сверху графиком функции $g(t)$, позволяет сделать коэффициент d_{fg} безразмерным

$$\bar{d}_{fg} = \frac{\int_a^b |f(t) - g(t)| dt}{\int_a^b g(t) dt}. \quad (2.5)$$

Чем ближе значение \bar{d}_{fg} к нулю, тем точнее выдерживаются параметры полета. Если $g(t) \geq 0$, то отрицательных значений этот коэффициент принимать не может, а его положительное значение в долях единицы (или в процентах) показывает какую часть от общей площади под криволинейной трапецией, ограниченной сверху графиком функции $g(t)$, составляет площадь, заключенная между графиками двух функций $f(t)$ и $g(t)$ (рис. 2.1).

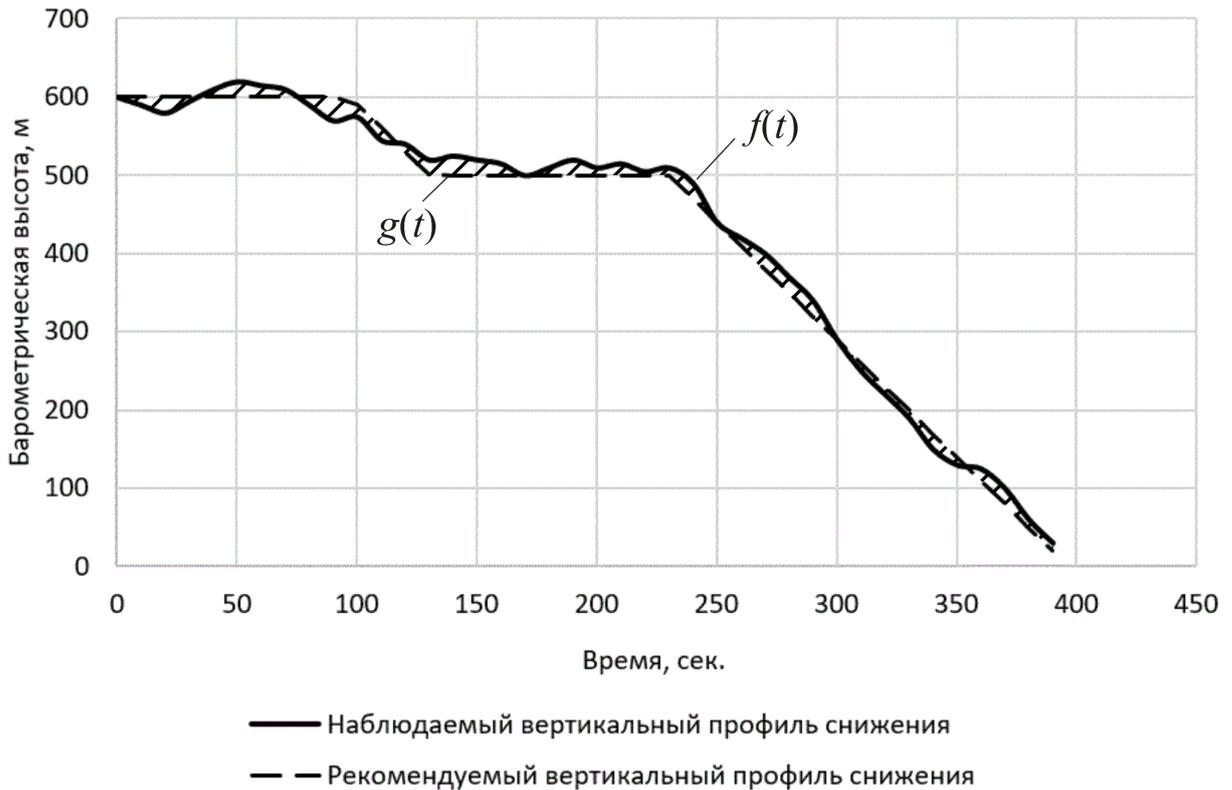


Рисунок 2.1 – Площадь как мера сходства графиков двух функций

Использование предложенного критерия для оценки точности выдерживания заданных параметров полета позволит максимально использовать возможности современных учебных самолетов и тренажеров для анализа полетной информации.

2.2. Применение метода анализа иерархий для реализации системного подхода при экспертном оценивании качества техники пилотирования

Для разработки программ подготовки пилотов документами ИКАО рекомендован компетентностный подход, в соответствии с которым критерии для оценки качества ПП ЛС должны быть определены на основе четко сформулированных целей, которые должны определяться на основе анализа профессиональной деятельности и формулироваться в виде, позволяющем осуществлять их наблюдение и измерение [54, 55]. Основная цель измерения в данном случае заключается в получении численных эквивалентов степени выраженности интересующего признака.

Очевидно, что такой анализ и измерение проводится на основе экспертного оценивания. Следует отметить, что экспертная оценка не только по своей природе является субъективной и поэтому иногда противоречивой, но нередко проводится с учетом сразу нескольких факторов. Данное обстоятельство приводит к внутренней несогласованности оценок при парном сравнении одним и тем же экспертом нескольких объектов или противоречивым оценкам одного объекта несколькими экспертами. Наиболее удобным математическим инструментом для системного подхода к принятию решений в таких сложных условиях является метод анализа иерархий (МАИ, Analytic Hierarchy Process), разработанный американским математиком Т. Л. Саати [3, 68, 69].

Применяя МАИ, на первом шаге необходимо структурировать проблему в виде иерархической структуры, которая включает цель анализа, факторы, влияющие на выбор, и имеющиеся альтернативы. Каждый элемент иерархии может представлять различные аспекты решаемой задачи, причем во внимание могут быть приняты измеряемые количественные параметры, качественные характеристики, объективные данные и субъективные экспертные оценки.

На следующем шаге необходимо сформировать сравнительные суждения о важности факторов с точки зрения поставленной цели. Для этого экспертам необходимо выполнить попарные сравнения факторов относительно цели, выработать общее суждение для каждой пары и записать суждения в матрицу парных сравнений (табл. 2.1). На этом этапе необходимо оценить, какой из двух факторов важнее для достижения цели и насколько важнее. Результаты этих сравнений записываются в положительную матрицу, элементы которой обратно

симметричны, т. е. $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ для всех $i, j = \overline{1, n}$ (где n – число факторов), поэтому

для ее заполнения достаточно задать $\frac{n(n-1)}{2}$ значений.

В рамках МАИ для оценки доминирования одного фактора над другим используется вербальная и соответствующая числовая оценка в виде целого

числа в диапазоне от 1 (отсутствие доминирования) до 9 (абсолютное доминирование) [3, 68, 69]. На главной диагонали матрицы парных сравнений всегда стоят единицы. В случае необходимости суждения экспертов можно представить не только целыми, но и дробными значениями из указанного интервала.

Таблица 2.1 – Идеальная матрица парных сравнений факторов ($\mu = 0$)

	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Координаты собственного вектора	Приоритеты факторов
Фактор 1	1	2	8	8	0,615
Фактор 2	0,5	1	4	4	0,308
Фактор 3	0,125	0,25	1	1	0,077

Сравнения в парах выполняют независимо друг от друга, хотя в действительности между ними есть связь. Например, если эксперт считает, что Фактор 1 вдвое важнее, чем Фактор 2, а Фактор 2 в 4 раза важнее, чем Фактор 3, то при идеальной согласованности суждений можно ожидать, что Фактор 1 будет в 8 раз важнее, чем Фактор 3 (табл. 2.1). На практике идеально согласованные матрицы парных сравнений встречаются довольно редко. В таблице 2.2 приведен пример «неидеальной» матрицы.

Таблица 2.2 – Неидеальная матрица парных сравнений факторов
($\mu = 0,0125$)

	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Координаты собственного вектора	Приоритеты факторов, w_i
Фактор 1	1	2	5	5,848	0,570
Фактор 2	0,5	1	4	3,420	0,333
Фактор 3	0,2	0,25	1	1	0,097

Для вычисления приоритетов рассматриваемых факторов необходимо найти главный собственный вектор матрицы парных сравнений (вектор Фробениуса-Перрона), который позволяет получить приоритеты даже в тех случаях, когда суждения экспертов частично несогласованы. Все элементы

матрицы парных сравнений положительны, поэтому согласно теореме Фробениуса-Перрона наибольшее по модулю собственное значение λ_{\max} является действительным положительным простым корнем характеристического уравнения, а соответствующий собственный вектор имеет положительные координаты, который можно нормировать так, чтобы сумма его координат (w_i) была равна единице. Найденные координаты нормированного собственного вектора определяют приоритеты рассматриваемых экспертами факторов [3, 68, 69].

Для положительной обратно симметричной матрицы A справедливо неравенство $\lambda_{\max} \geq n$, а равенство достигается лишь тогда, когда матрица A идеально согласована. Поэтому в МАИ для оценки отклонения от идеальной согласованности матрицы парных сравнений используется индекс согласованности

$$\mu = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1},$$

который принимает только неотрицательные значения [68]. Например, для идеально согласованной матрицы, приведенной в таблице 2.1, получим $\lambda_{\max} = 3$ и $\mu = 0$, а для матрицы из таблицы 2 имеем $\lambda_{\max} = 3,025$ и $\mu = 0,0125$.

Следует особо отметить, что анализ логических, психологических и организационных аспектов деятельности экспертов при составлении матриц парных сравнений показал, что отклонения от идеальной согласованности и даже нарушение свойства транзитивности (когда из условий $a > b$ и $b > c$ обязательно следует $a > c$) может быть не ошибкой эксперта, а результатом применения к его знаниям более грубой технологии оценивания, которая является причиной искажающего эффекта. Считается, что в ряде случаев нетранзитивность оценок эксперта является адекватным отражением объективной ситуации [3, 53].

На следующем этапе эксперты должны попарно сравнить рассматриваемые альтернативы по каждому фактору. В таблице 2.3 приведены примеры матриц парных сравнений четырех альтернатив (A, B, C, D) по трем

факторами из таблицы 2.2. Вычисление локальных приоритетов альтернатив проводится аналогично расчету приоритетов учитываемых факторов.

Таблица 2.3 – Матрицы парных сравнений альтернатив

Фактор 1	A	B	C	D	Координаты собственного вектора	Локальные приоритеты альтернатив
A	1	4	7	9	12,930	0,635
B	0,25	1	3	6	4,683	0,230
C	0,143	0,333	1	2	1,749	0,086
D	0,111	0,167	0,5	1	1	0,049
	$\lambda_{\max} = 4,092$		$\mu = 0,0306$			
Фактор 2	A	B	C	D	Координаты собственного вектора	Локальные приоритеты альтернатив
A	1	1	0,2	3	2,324	0,156
B	1	1	0,25	2	2,192	0,148
C	5	4	1	8	9,345	0,629
D	0,333	0,5	0,125	1	1	0,067
	$\lambda_{\max} = 4,038$		$\mu = 0,0127$			
Фактор 3	A	B	C	D	Координаты собственного вектора	Локальные приоритеты альтернатив
A	1	3	0,5	0,333	0,321	0,162
B	0,333	1	0,25	0,125	0,122	0,061
C	2	4	1	0,5	0,540	0,272
D	3	8	2	1	1	0,504
	$\lambda_{\max} = 4,016$		$\mu = 0,0053$			

Следующим шагом является синтез обобщенных приоритетов альтернатив, для вычисления которых необходимо умножить локальные приоритеты рассматриваемых альтернатив (табл. 2.3) на приоритеты соответствующих факторов (табл. 2.2). Последующее суммирование полученных значений по всем факторам дает компоненты вектора обобщенных приоритетов альтернатив (табл. 2.4).

Таблица 2.4 – Синтез глобальных приоритетов альтернатив

Альтернативы	Фактор 1 (0,570)	Фактор 2 (0,333)	Фактор 3 (0,097)	Обобщенные приоритеты альтернатив
A	0,635	0,156	0,162	0,430
B	0,230	0,148	0,061	0,186
C	0,086	0,629	0,272	0,285
D	0,049	0,067	0,504	0,100

В рассматриваемом примере лучшей является альтернатива А, хотя она по мнению экспертов доминирует над остальными альтернативами только по Фактору 1 (со значением 4 над альтернативой В, 7 – над альтернативой С и 9 – над альтернативой D). Безусловным лидером по Фактору 2 является альтернатива С, которая в итоге получила второй по величине обобщенный приоритет. Хотя альтернатива D доминировала по Фактору 3, о чем свидетельствует соответствующий максимальный локальный приоритет, но после умножения на очень низкий приоритет Фактора 3 получен самый низкий обобщенный приоритет для альтернативы D.

Таким образом, МАИ является эффективным средством проведения комплексного экспертного анализа и может быть использовано для анализа профессиональной деятельности ЛС, многокритериального выбора наилучшей программы ПП, оценки качества ПП ЛС, которая может включать нетранзитивные зависимости и обратные связи.

Отношения доминирования транзитивны в случае сравнения невзаимодействующих между собой объектов с помощью одного одномерного фактора. Однако для взаимодействующих объектов, описываемых многомерным пространством характеристик, проблема ранжирования или выбора лучшего объекта из нескольких альтернатив может перейти в разряд алгоритмически неразрешимых, что не исключает возможности решения многих конкретных задач методом анализа иерархий.

Поскольку МАИ помогает осмыслить процесс принятия решения, его можно применять для анализа самых разных задач, в том числе для решений, принимаемых интуитивно. Этот метод позволяет экспериментировать с составом и уровнем важности факторов, влияющих на выбор оптимального решения. Также можно оценить чувствительность полученных результатов, изменяя структуру комплекса альтернатив [3, 129]. При этом МАИ позволяет комбинировать измеряемые количественные параметры, качественные характеристики и субъективные экспертные оценки.

2.3. Комплексный показатель глазодвигательной активности, характеризующий распределение и переключение зрительного внимания пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации

Основу взаимодействия пилота с электронной системой отображения информации (EFIS) составляет визуальная информация. В связи с этим технология ай-трекинга может быть использована для выявления объективных характеристик РПЗВ пилота [115].

В процессе записи ГДА фиксируются окулометрические параметры, основные из которых представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Окулометрические параметры

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Описание
1.	Saccades Count (SC)	шт.	Общее количество саккад
2.	Reverse Saccades (RS)	шт.	Общее количество возвратных саккад
3.	Fixation Count (FC)	шт.	Общее количество фиксаций
4.	Fixation Total Time (FTT)	шт.	Общая длительность фиксаций

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Описание
5.	First Fixation Duration (FFD)	мс.	Длительность первой фиксации
6.	Fixation Average Time (FAT)	мс.	Среднее время фиксаций
7.	Blinks Count (BC)	шт.	Количество морганий

Модуль обработки и визуализации данных ай-трекинга позволяет выделить области индикации на зрительном стимуле, в роли которого может выступать основной пилотажный дисплей самолета PFD. В качестве примера на рисунке 2.2 представлены области индикации на PFD самолета DA 40 NG [4, 85].



Рисунок 2.2 – Выделенные области индикации на PFD самолета DA 40 NG

Каждая выделенная область индикации соответствует определенному индикатору или группе индикаторов на PFD, среди которых:

- 1) Информация о параметрах работы авиадвигателя (Engine);

- 2) Индикатор приборной и истинной воздушной скоростей (IAS);
- 3) Авиагоризонт (Attitude);
- 4) Барометрический высотомер (Altitude);
- 5) Вариометр (VS);
- 6) Дополнительное окно движущейся карты (MAP);
- 7) Плановый навигационный индикатор (HSI).

Учитывая, что авиагоризонт позволяет считывать параметры углов тангажа и крена, целесообразно выделить две дополнительные зоны индикации:

- 1) Индикатор угла тангажа самолета (Pitch);
- 2) Индикатор угла крена самолета (Roll).

В ходе выполнения приборного полета каждая область индикации имеет определенную важность или приоритет, количественная оценка которой возможна только на основе экспертного оценивания. Наиболее удобным математическим инструментом для принятия решения в таких сложных условиях является МАИ, применение которого рассмотрено в предыдущем разделе.

В соответствии с МАИ основная цель анализа в данном случае – это выбор наиболее важных с точки зрения выполняемой задачи параметров полета, подлежащих оценке инструктором. Альтернативы – это имеющиеся области индикации на PFD. На следующем шаге экспертами выполняются попарные сравнения альтернатив относительно определяющего фактора, вырабатывается общее суждение для каждой пары и записывается в матрицу парных сравнений.

Таким образом, применение МАИ позволяет определить численное значение важности или приоритета каждой области индикации. В результате комплексный показатель ГДА, характеризующий РПЗВ пилота при работе с EFIS, предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^k E_{ROI} w_k}{\sum_{i=1}^n E_{ROI} w_n}, \quad (2.6)$$

где E_{ROI} – индекс, характеризующий параметр ГДА в области индикации;

w – численное значение важности или приоритет области индикации, рассчитанный на основе МАИ;

k – количество областей индикации, контролируемых на заданном режиме полета;

n – общее количество областей индикации.

Таким образом, возможно рассчитать комплексный показатель ГДА для определенного окулометрического параметра, который фиксируется в процессе записи ГДА.

Апробация и исследование предложенного комплексного показателя ГДА, характеризующего РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS, будут представлены в главе 3 данного диссертационного исследования.

2.4. Применение энтропийного моделирования для оценки распределения и переключения зрительного внимания пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации

Понятие энтропии широко используется для моделирования сложных систем в различных областях знаний. В настоящее время не существует общепринятого определения энтропии. В общем случае – это количественная мера беспорядка системы. Увеличение энтропии соответствует увеличению беспорядка в системе (дезорганизации), а уменьшение энтропии – упорядочиванию системы (организации) [56].

Рассмотрим некоторые примеры применения энтропийного моделирования для оценки РПЗВ пилотов.

Вопросы применимости энтропии для оценки ГДА пилотов рассматриваются в работах [103, 122]. Определение энтропии осуществляется с помощью методов, основывающихся на концепции теории информации, которая описывает количество необходимой информации для генерации данной последовательности в качестве меры общей неопределенности. Принимая во внимание данную концепцию, в основе определения энтропии взгляда лежит метод, в котором уравнение энтропии Шеннона применяется к распределению вероятности координат фиксации взгляда пилота для вычисления среднего уровня неопределенности в пространственном распределении последовательности фиксаций, сгенерированной в данный период времени:

$$S = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

где p_i – вероятность появления i -го символа (i -го набора координат фиксации взгляда) из кода, содержащего n символов (весь набор возможных координат взгляда), $\sum_{i=1}^n p_i = 1$, $p_i \geq 0$, $i=1, \dots, n$. (в каждый момент времени).

В этом случае более высокая энтропия или неопределенность указывает на более широкое распределение фиксаций по всему зрительному полю, что свидетельствует о большей дисперсии взгляда.

В работе [112] применяется другой метод – энтропия перехода взгляда. Данный метод основан на стационарном распределении фиксаций для дальнейшего изучения закономерностей при визуальном сканировании. Для этого уравнение условной энтропии применяется к цепям Маркова цепных переходов фиксаций. Это обеспечивает среднюю меру предсказуемости шаблонов визуального сканирования, где более высокая энтропия предполагает менее структурированный или более случайный характер распределения внимания.

Таким образом, применение энтропийных моделей является актуальным и перспективным направлением для оценки РПЗВ. Однако существующие

модели в основном носят частный характер и связывают энтропию с отдельными фактическими характеристиками ГДА. К тому же рассмотренные модели не имеют явных переменных, воздействуя на которые можно было бы изменять значение энтропии и таким образом осуществлять управление РПЗВ.

В связи с этим, целью данной работы является рассмотрение нового подхода к энтропийной оценке РПЗВ, который позволяет учитывать одновременно все основные характеристики ГДА пилота с учетом их взаимосвязей.

Для моделирования РПЗВ предлагается подход, основанный на дифференциальной энтропии случайного вектора. Данный вектор описывается в виде многомерной случайной величины $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)^T$. Отдельные компоненты вектора $Y_i, (i=1, 2, \dots, m)$ в свою очередь представляются одномерными случайными величинами, представляющими показатели ГДА пилота. Данные компоненты при этом могут быть взаимозависимыми.

Формула дифференциальной энтропии случайного нормально распределенного вектора $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)^T$ представляется следующим образом [79]:

$$H(Y) = \sum_{i=1}^m H(Y_i) + \frac{1}{2} \ln |R|, \quad (2.7)$$

где $|R|$ – определитель корреляционной матрицы R случайного нормально распределенного вектора Y ;

$H(Y_i)$ – энтропия каждой из нормальных случайных величин, равная [79]:

$$H(Y_i) = \frac{1}{2} \ln \left[(2\pi e) \sigma_{Y_i}^2 \right], \quad i, j = 1, 2, \dots, m,$$

где $\sigma_{Y_i}^2$ – дисперсия случайной величины Y_i .

В случае, если вектор Y не имеет нормальное распределение, энтропийная модель имеет вид [79]:

$$H(Y) = \sum_{i=1}^m H(Y_i) + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^m \ln(1 - R_{Y_k / Y_1 \dots Y_{k-1}}^2),$$

где $R_{Y_k / Y_1 \dots Y_{k-1}}^2$ – индексы детерминаций соответствующих регрессионных зависимостей, $k=2 \dots m$.

Исходя из анализа составляющих модели (2.7) можно сделать вывод, что изменение энтропии происходит за счет изменения дисперсии, ее компонент и/или изменения корреляционных взаимосвязей между ними.

Компоненту $H(Y)_V = \sum_{i=1}^m H(Y_i)$ энтропии (2.7) можно описать как составляющую, соответствующую фактору независимости элементов системы РПЗВ. Компоненту $H(Y)_R = 0,5 \ln |R|$ можно описать как составляющую, соответствующую фактору самоорганизации системы РПЗВ.

Применение формулы (2.7) как суммы компонент в некоторых случаях может не точно характеризовать различные состояния РПЗВ. Для повышения диагностических свойств модели (2.7) можно рассматривать ее не в скалярной, а векторной форме $h(Y) = (h_V; h_R) = (H(Y)_V; H(Y)_R)$. Направление и величину энтропийного вектора в рамках конкретных задач следует задавать исходя из особенностей исследуемой системы РПЗВ. Предлагается ввести показатель «энтропийное расстояние» РПЗВ:

$$\rho_H = (Y^{(1)}, Y^{(2)}) = \sqrt{[H(Y^{(1)})_V - H(Y^{(2)})_V]^2 + [H(Y^{(1)})_R - H(Y^{(2)})_R]^2}. \quad (2.8)$$

Данный показатель позволит оценить степень отклонения диагностируемого РПЗВ от эталонного, за основу которого могут браться РПЗВ пилота-инструктора.

Энтропийная модель (2.7) представляет собой общую диагностическую модель оценки РПЗВ пилота. Рассмотрим развитие данной модели для задач динамической оценки РПЗВ. Под динамической оценкой понимается последовательный процесс сбора, обработки и анализа информации о

параметрах ГДА пилота с последующим использованием данной информации для обучения рациональным методам РПЗВ [88, 89].

Пусть случайные векторы $Y_1^{(1)} = (Y_1^{(1)}, Y_2^{(1)}, Y_3^{(1)})$ и $Y_1^{(2)} = (Y_1^{(2)}, Y_2^{(2)}, Y_3^{(2)})$ характеризуют РПЗВ на данном и предыдущем этапе контроля и их компоненты имеют нормальное распределение. Тогда формула динамической оценки РПЗВ будет представлена в следующем виде [80]:

$$H(Y) = \sum_{i=1}^3 \ln \frac{\sigma_{Y_k^{(2)}}}{\sigma_{Y_k^{(1)}}} + 0,5 \ln \frac{|R_{Y^{(2)}}|}{|R_{Y^{(1)}}|}. \quad (2.9)$$

где $|R_{Y^{(u)}}|$ – определитель корреляционной матрицы $R_{Y^{(u)}}$ случайного вектора $Y^{(u)}$, $u=1,2$, $i=1 \dots 3$;

Представив:

$$\Delta H(Y)_V = \sum_{i=1}^3 \ln \frac{\sigma_{Y_k^{(2)}}}{\sigma_{Y_k^{(1)}}},$$

$$\Delta H(Y)_R = 0,5 \ln \frac{|R_{Y^{(2)}}|}{|R_{Y^{(1)}}|}.$$

выражение (2.8) примет следующий вид:

$$\Delta H(Y) = \Delta H(Y)_V + \Delta H(Y)_R \quad (2.10)$$

где $\Delta H(Y)_V$ и $\Delta H(Y)_R$ – изменение энтропии вследствие изменения дисперсий и определителей корреляционных матриц соответственно.

Формула (2.10) справедлива в случае, если изменения в системе, происходящие за исследуемый период времени, не влекут изменения закона распределения случайных величин. В противном случае вид формулы поменяется [80, 81]:

$$\Delta H(Y) = H(Y^{(2)}) - H(Y^{(1)}) = \sum_{i=1}^4 \ln \frac{\sigma_{Y_k^{(2)}}}{\sigma_{Y_k^{(1)}}} + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^4 \ln \frac{1 - R_{Y_k^{(2)}/Y_1^{(2)} \dots Y_{k-1}^{(2)}}^2}{1 - R_{Y_k^{(1)}/Y_1^{(1)} \dots Y_{k-1}^{(1)}}^2},$$

где $\sigma_{Y_k^{(u)}/Y_1^{(u)} \dots Y_{k-1}^{(u)}} = \sigma_{Y_k^{(u)}} \sqrt{1 - R_{Y_k^{(u)}/Y_1^{(u)} \dots Y_{k-1}^{(u)}}^2}$ и $R_{Y_k^{(u)}/Y_1^{(u)} \dots Y_{k-1}^{(u)}}^2$ – индексы

детерминации соответствующих регрессионных зависимостей, $k=2 \dots 4$, $u=1,2$.

Таким образом, динамическая оценка РПЗВ пилота состоит из следующих этапов:

1. Оценка изменений энтропии за анализируемый период.
2. Выявление периодов, в которых наблюдалось максимальное изменение энтропии.
3. Анализ компонент самоорганизации и хаотичности в периодах максимальных изменений энтропии, на предмет того, какая из компонент в наибольшей степени повлияла на ее изменение.
4. Анализ составляющих компоненты энтропии (комплексных показателей ГДА), за счет которых произошло изменение энтропии.

Полученные в результате значения изменения энтропии отражают динамику формирования РПЗВ пилота за исследуемый период времени. Возможны следующие варианты: если $\Delta H(Y) \approx 0$, то за исследуемый период не наблюдалось изменений; при $\Delta H(Y) < 0$ можно говорить о тенденции к формированию рационального РПЗВ пилота, $\Delta H(Y) > 0$ характеризует обратное явление [88, 89].

2.5. Методика разработки модели оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики

С учетом рекомендаций ИКАО совершенствования ПП ЛС ГА предполагает проведение научных исследований, направленных на разработку моделей оценки качества техники пилотирования. В основе их разработки

должна лежать комплексная оценка степени освоения как двух технических компетенций: автоматическое управление траекторией полета воздушного судна (ВС) (автоматическое управление) и ручное управление траекторией полета ВС (ручное управление), так и шести нетехнических компетенций (применение процедур, коммуникация, лидерство и работа в команде, устранение проблем и принятие решений, ситуационная осведомленность, управление рабочей нагрузкой) [58, 59]. Современные тренажеры позволяют фиксировать все необходимые для оценки компетенций параметры полета, что совместно с применением систем регистрации движения глаз и средств психофизиологического мониторинга дает возможность разработать новый подход к всесторонней и более объективной оценке качества техники пилотирования пилота.

В настоящем исследовании предлагается использовать модели, разработанные на основе нечеткой логики.

Нечеткое моделирование обеспечивает эффективное средство для описания приблизительной и неточной природы реального мира. По мере роста сложности систем становится все труднее описывать их точными математическими моделями. Нечеткая логика может описывать такие сложные системы с помощью лингвистических правил «ЕСЛИ-ТО» [110]. Наиболее важными приложениями нечеткой логики являются системы управления и системы поддержки принятия решений.

Типовая структура системы нечеткого вывода представлена на рисунке 2.3.

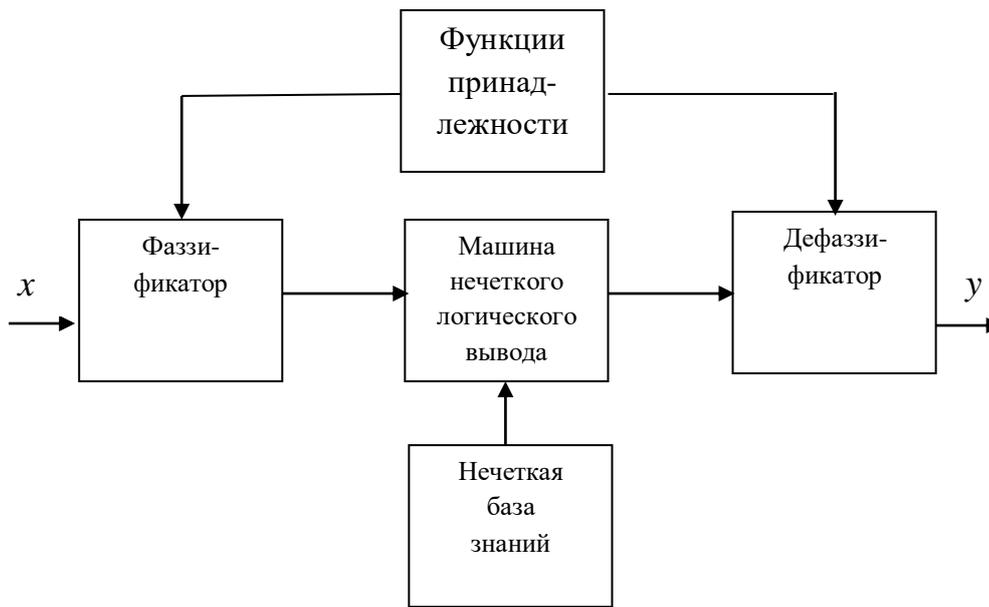


Рисунок 2.3 – Типовая структура системы нечеткого логического вывода

Моделирование на основе нечеткой логики включает в себя следующие этапы:

- 1) фаззификация – преобразование четких входов в нечеткие значения;
- 2) построение базы знаний, которая содержит нечеткие правила вместе со словарем, определяющим функции принадлежности;
- 3) реализация механизма вывода, который применяет нечеткое рассуждение для получения нечеткого выходного сигнала;
- 4) дефаззификация – преобразование нечеткого выхода в четкое значение.

Модели на основе нечеткой логики различаются по способу определения следствий правил, а также процессу импликации. В данной работе рассматриваются два основных типа моделей на основе нечеткой логики: Мамдани и Сугено [18, 91].

Успешное проектирование нечеткой системы на основе правил зависит от нескольких факторов, таких как выбор базы правил, функций принадлежности, механизма вывода и стратегии дефаззификации. Из этих факторов выбор подходящей базы правил является наиболее важным и сложным. Часто для нечетких моделей базу правил строят на основе знаний и опыта экспертов в

конкретной области. Такой подход известен как моделирование на основе знаний. Этот подход к моделированию становится сложным, когда имеющиеся знания неполны или когда эксперту трудно установить взаимосвязь между входными и выходными переменными и описать ее в виде правил «ЕСЛИ-ТО». Несмотря на то, что эта методология проектирования привела к большому количеству успешных приложений, она требует много времени и в большинстве своем не имеет установленных принципов и систематических методик. Для устранения данного недостатка необходимы подходы к разработке нечетких моделей без привлечения экспертов. Таким образом, извлечение соответствующего набора правил из наблюдаемых данных является важным и необходимым шагом на пути к разработке адекватной модели на основе нечеткой логики. При использовании подхода моделирования на основе данных предполагается отсутствие предварительных знаний о рассматриваемой системе.

В виду сложности и трудоемкости классического подхода к построению моделей на основе нечеткой логики в работе предложена методика, которая предполагает взамен методики основанной на знаниях эксперта проектирование нечетких правил модели путем извлечения их из экспериментальных данных, представленной зависимостью между входными и выходными переменными модели. База правил представляет собой лингвистические правила «ЕСЛИ-ТО», которые отражают нелинейную взаимосвязь между входными и выходными переменными. Правила генерируются автоматически в результате экстракции нечетких знаний из экспериментальных данных на основе алгоритмов кластеризации, в частности, с помощью метода «горной кластеризации» (субтрактивной кластеризации) [23] при разработке модели Сугено и алгоритма нечетких S -средних при разработке модели Мамдани. Выявленные кластеры интерпретируются как нечеткие правила [123, 134].

Рассмотрим подробнее алгоритмы кластеризации при разработке моделей Сугено и Мамдани.

Разработка модели Сугено состоит из двух этапов:

1. Нахождение основной структуры модели с помощью субтрактивной кластеризации.
2. Настройка параметров модели с применением ANFIS-алгоритма (ANFIS – Adaptive Network Based Fuzzy Inference System).

Алгоритм субтрактивной кластеризации состоит из следующих этапов:

1. Первоначальное определение количества кластеров.
2. Определение точки, которая может быть центром кластера.
3. Расчет для каждой точки значения потенциала, показывающего возможность формирования кластера.
4. Ранжирование потенциалов центров кластеров.
5. Перерасчет центров кластеров и выделение центров кластеров до тех пор, пока максимальное значение потенциала превышает изначально заданный порог [91, 137].

Разработка модели Мамдани осуществляется на основе метода нечеткой кластеризации *C*-средних.

Метод нечеткой кластеризации *C*-средних – это метод кластеризации данных, в котором каждая точка данных принадлежит кластеру в некоторой степени, которая определяется степенью принадлежности. Этот метод был первоначально представлен Джимом Бездеком в 1981 году [100] как совершенствование более ранних методов кластеризации.

Алгоритм нечеткой кластеризации *C*-средних начинается с первоначального предположения о центрах кластеров. Первоначальное предположение, скорее всего, неверно. Итеративно обновляя центры кластеров и оценки принадлежности для каждой точки данных, центры кластеров перемещаются в нужное место в наборе данных. Эта итерация основана на минимизации целевой функции, которая представляет расстояние от любой заданной точки данных до центра кластера, взвешенное по степени принадлежности этой точки данных.

Таким образом, задача разработки модели на основе нечеткой логики состоит в идентификации нечетких правил, связывающих входные данные (x) с выходом (y):

$$(\mathbf{X}_r, y_r), r=\overline{1, M}, \quad (2.11)$$

где X_r – вектор входных данных, соответствующий r -ой строке набора данных;
 y_r – значение выходной переменной;

M – количество пар экспериментальных данных.

Настройка модели происходит по критерию среднего квадратического отклонения (Root Mean Square Error, RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1, M} (y_r - F(\mathbf{P}, \mathbf{W}, \mathbf{X}_r))^2}, \quad (2.12)$$

где P – вектор параметров функций принадлежности переменных (x) и (y);

W – вектор весовых коэффициентов правил базы знаний;

$F(P, W, X_r)$ – результат расчета моделью на основе нечеткой логики.

Таким образом, проектирование модели на основе нечеткой логики с применением алгоритмов кластеризации заключается в нахождении кластеров в исходных данных и представление этих кластеров в виде нечетких правил [91].

Выводы по главе 2

1. Для формирования критериев оценки качества профессиональных компетенций предлагается использовать меры расстояния (манхэттенское расстояние), позволяющие максимально использовать возможности современных учебных самолетов и летных тренажеров для анализа полетной информации, и методы экспертного опроса с участием опытного летно-инструкторского состава. Для обработки результатов экспертного опроса допустимо использование метода анализа иерархий, позволяющего повысить объективность выставляемой оценки.

2. Предложен комплексный показатель ГДА, характеризующий РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS.

3. Предложена энтропийная модель оценки РПЗВ пилота. Показано, что энтропия данной величины включает в себя, как компоненту, характеризующую степень определенности (самоорганизации) РПЗВ пилота, так и компоненту, определяющую степень хаотичности (неопределенности). Представлен алгоритм динамической оценки РПЗВ пилота, позволяющий выявить тенденции в формировании РПЗВ и предложить рекомендации для корректировки и формирования рационального РПЗВ. Также предложен показатель «энтропийное расстояние» РПЗВ и показан его диагностический потенциал. Данный показатель позволяет оценить степень отклонения диагностируемого РПЗВ пилота от эталонного, за основу которого могут браться РПЗВ пилота-инструктора.

4. Предложен новый подход к оценке качества техники пилотирования при первоначальной летной подготовке, отличающийся от существующих подходов применением моделей на основе нечеткой логики и позволяющий учитывать наряду с данными средств объективного контроля параметров полета методы диагностики состояния обучающихся.

ГЛАВА 3. АПРОБАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕХНИКИ ПИЛОТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ПИЛОТА

3.1. Исследование особенностей глазодвигательной активности пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации

Для решения поставленной задачи была выбрана система траекторного слежения за движением глаз, основанная на методе высокоточных измерений и анализа движения глаз и реакции зрачка. При проведении эксперимента использовался внешний ай-трекер Gazepoint 3HD, оборудованный инфракрасными датчиками оценки движения глаз и реакции зрачков (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Ай-трекер Gazepoint 3HD

Ай-трекер Gazepoint 3HD устанавливался на приборной панели кабины пилота (рис. 3.2) и после непродолжительной калибровки готов к использованию [67].



Рисунок 3.2 – Расположение ай-трекера Gazerpoint 3HD на приборной панели кабины пилота: 1 – ай-трекер Gazerpoint 3HD; 2 – инфракрасные датчики

Технические характеристики этого устройства, такие как частота дискретизации, диапазон линейных и угловых параметров, точность и разрешение позволяет обеспечить необходимую точность результатов РПЗВ пилота в процессе тренажерной подготовки. Устройство позволяет фиксировать параметры ГДА, представленные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры ГДА

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Описание
1.	Saccades Count (SC)	шт.	Общее количество саккад
2.	Reverse Saccades (RS)	шт.	Общее количество возвратных саккад
3.	Fixation Count (FC)	шт.	Общее количество фиксаций
4.	Fixation Total Time (FTT)	шт.	Общая длительность фиксаций
5.	First Fixation Duration (FFD)	мс.	Длительность первой фиксации
6.	Fixation Average Time (FAT)	мс.	Среднее время фиксаций
7.	Blinks Count (BC)	шт.	Количество морганий

Программное обеспечение ай-трекера Gazepoint 3HD, которое было разработано для проведения экспериментальных исследований, позволяет решать три группы прикладных задач:

- проведение видеоокулографического эксперимента (и регистрация метаданных проведенного исследования);
- выборка данных исследований для просмотра и экспорта необработанных данных исследований;
- проведение анализа данных ГДА, записанных при помощи ай-трекера, с одной стороны, на основе аппаратно выявленных данных о фиксациях и саккадах, а с другой стороны, на основе координат траектории взора, учитывая нестандартные случаи положения ай-трекера относительно глаз испытуемого.

С помощью модуля обработки и визуализации данных возможно формирование областей индикации для стимульного материала, и построение по таким областям срезов распределений измеряемых параметров для анализа

временной локализации зрительного внимания для заданных областей (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Выделенные области индикации на PFD самолета DA 40 NG

Возможна визуализация фиксаций и «пути сканирования» для выбранного временного отрезка по заданной траектории, а также формирование свернутого представления временного ряда координат взора, так называемых, анимированных «тепловых карт» распределения визуального внимания по данным исследования на поверхности стимула, загруженного при выполнении записи (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Пример распределения фиксации взгляда курсанта на PFD

С целью апробации комплексного показателя ГДА, энтропийной модели оценки РПЗВ пилота, модели оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики на базе тренажерного центра ФГБОУ ВО УИ ГА было проведено экспериментальное исследование, в котором приняли участие 3 группы испытуемых: группа 1 – курсанты, не приступившие к летной практике (15 чел.), группа 2 – курсанты, приступившие к летной практике (15 чел.), группа 3 – пилоты-инструкторы (4 чел.).

Экспериментальный полет состоял из следующих этапов различной степени психофизиологической загрузки курсанта:

1. Спокойный этап.
2. Нагруженный этап.
3. Спокойный этап.
4. Нагруженный этап.
5. Спокойный этап.
6. Завершающий этап с внезапным введением интенсивной турбулентности.

Методикой эксперимента предусматривалось выполнение приборного полета в соответствии с заданным сценарием (рис. 3.5):

1. Первый участок – горизонтальный полет в течение 3 минут, при котором нужно было выдерживать приборную скорость 105 узлов, высоту 1000 футов.

2. Второй участок – восходящая спираль, при которой нужно было выдерживать приборную скорость 92 узла, крен 30 градусов, вертикальную скорость +600 футов/мин до высоты 3000 футов.

3. Третий участок – горизонтальный полет в течение 3 минут, при котором нужно было выдерживать приборную скорость 105 узлов, высоту 3000 футов.

4. Четвертый участок – нисходящая спираль, при которой нужно было выдерживать скорость 92 узла, крен 45 градусов и вертикальную скорость -500 футов/мин до высоты 1000 футов.

5. Пятый участок – горизонтальный полет в течение 3 минут, при котором нужно было выдерживать приборную скорость 105 узлов, высоту 1000 футов.

6. После выполнения 5 участка инструктор неожиданно для курсанта вводил условия интенсивной турбулентности «TURBULENCE SEVERE», при этом курсант должен продолжить полет в течение последующих 3 мин., выдерживая параметры горизонтального полета.

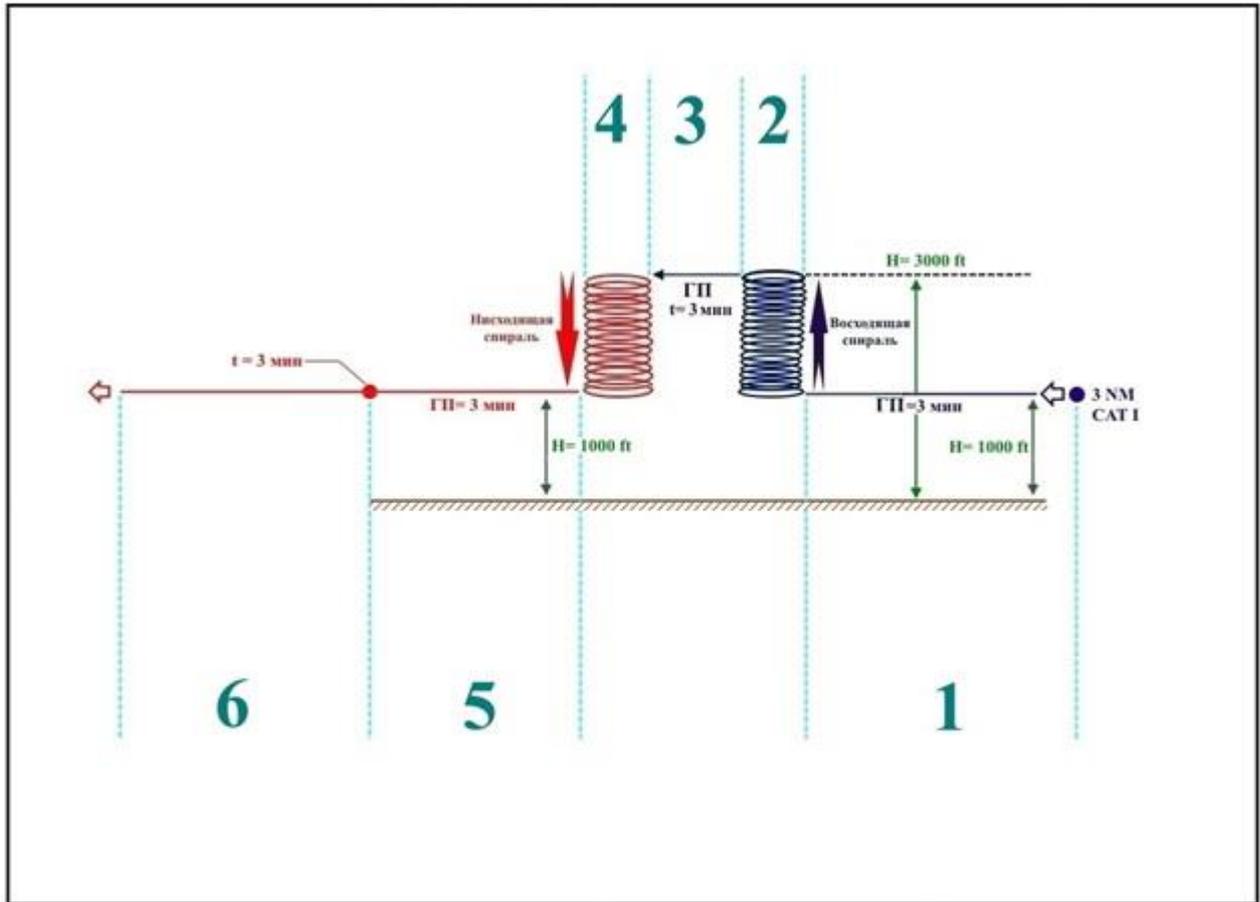


Рисунок 3.5 – Схема экспериментального полета

Для того чтобы избежать ведения курсантом визуальной ориентировки и оценить умение летать по правилам приборных полетов, при проведении эксперимента на тренажере задавались условия, исключающие возможность выполнения визуального полета.

До и после посадки в самолет курсанты проходили психофизиологическое обследование и анкетирование, в котором они оценивали свое эмоциональное состояние и отвечали на вопросы, касающиеся возникавших трудностей и психофизиологического состояния во время проведения эксперимента. Психофизиологическое исследование включало в себя проведение следующих тестов: заполнение личного опросника Айзенка (экстра- и интроверсия, нейротизм), оценку тревожности состояния по Спилбергеру (STAI) и метода САН (самочувствие-активность-настроение), который заполнялся перед началом полета и после полета. Во время полета

инструктор оценивал технику пилотирования, а также качество выдерживания параметров полета (скорости, курса и высоты).

Важно отметить, что испытуемый считывал параметры систем и приборов исключительно с PFD, работающего в режиме Display BackUp, то есть воспроизводящий дополнительно масштабную карту местности совместно с показаниями авиадвигателя. Резервные приборы были отключены, а также закрыты непрозрачным экраном, чтобы их показания невозможно было считать.

Анализ экспериментальных данных проводился с использованием методов факторного, корреляционного и кластерного анализов в программе STATISTICA 10 [19, 101, 133]. Применение факторного анализа решало задачу сокращения числа параметров ГДА и показателей, характеризующих психофизиологический профиль курсанта. Результаты факторного анализа (применялся метод «варимакс») параметров ГДА курсантов представлены на рисунке 3.6. Исходя из анализа матрицы факторных нагрузок (рис. 3.6а), видно, что на основе критерия Кайзера следует выделить только два фактора для курсантов 4 курса. Для группы курсантов 5 курса выделим один фактор (рис. 3.6б), так как значения переменных во втором факторе близки к граничному значению.

Для группы курсантов 4 курса анализ структуры взаимосвязей между переменными в первом факторе позволяет сделать вывод, что ведущим параметром является параметр ГДА «Общее количество возвратных саккад» (Reverse Saccades, RS). Во втором факторе ведущим параметром является параметр ГДА «Длительность первой фиксации» (First Fixation Duration, FFD).

Для группы курсантов 5 курса в первом факторе ведущим параметром также является параметр ГДА «Общее количество возвратных саккад» (Reverse Saccades, RS).

Variable	Factor Loadings (Varimax raw) (data)	
	Factor 1	Factor 2
Reverse_saccades	-0.984114	-0.043373
Saccades_count	0.683927	0.241568
Fix count	-0.827128	0.255260
First fix_dur	0.201513	-0.967471
Fix total time	-0.195845	-0.935974
Expl.Var	2.199339	1.937441
Prp.Totl	0.439868	0.387488

а

Variable	Factor Loadings (Varimax raw) (data)	
	Factor 1	Factor 2
Reverse_saccades	0.970312	-0.173462
Saccades_count	-0.305564	0.707839
Fix count	0.966880	0.083128
First fix_dur	0.195109	0.727173
Fix total time	0.889506	0.010174
Expl.Var	2.799021	1.066918
Prp.Totl	0.559804	0.213384

б

Рисунок 3.6 – Матрицы факторных нагрузок параметров ГДА курсантов:
4 курс – а; 5 курс – б

Результаты факторного анализа показателей, характеризующих психофизиологический профиль курсантов, представлены на рисунке 3.7.

Variable	Factor Loadings (Varimax raw) (data)			
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Diff health	0.435893	0.763696	-0.123617	0.177858
Diff activity	-0.053985	0.456096	-0.713237	0.042898
Diff mood	-0.185995	0.871003	0.074850	0.154564
Extraversion	-0.098370	0.335313	0.814015	-0.231687
Neuroticism	0.972802	0.083283	-0.027018	-0.054920
Lie scale	0.025456	-0.170073	0.056930	-0.949743
State anxiety	0.331844	-0.298962	0.675544	0.405095
Trait anxiety	0.678631	-0.557466	0.334117	0.132955
Expl.Var	1.754839	2.098343	1.764175	1.197849
Prp.Totl	0.219355	0.262293	0.220522	0.149731

а

Variable	Factor Loadings (Varimax raw) (data)	
	Factor 1	Factor 2
Diff health	0.146720	0.871804
Diff activity	0.024156	0.833721
Diff mood	0.876934	0.039494
Extraversion	0.457394	-0.632649
Neuroticism	-0.602516	0.679908
Lie scale	0.386455	0.598992
State anxiety	-0.847026	-0.235384
Trait anxiety	-0.844735	0.178615
Expl.Var	2.943736	2.765313
Prp.Totl	0.367967	0.345664

б

Рисунок 3.7 – Матрицы факторных нагрузок параметров, характеризующих психофизиологический профиль курсантов:

4 курс – а; 5 курс – б

Исходя из анализа матрицы факторных нагрузок, представленной на рисунке 3.7, видно, что на основе критерия Кайзера следует выделить четыре фактора для курсантов 4 курса. Для группы курсантов 5 курса можно выделить два фактора (рис. 3.7б). Как видно для курсантов 4 курса показатели тревожности не имеют важного влияния, в то время как для курсантов 5 курса

не играют ключевой роли показатели экстраверсии-интроверсии и оценки эмоциональной стабильности-нестабильности (нейротизма).

Таким образом, в результате факторного анализа было проведено сокращение числа параметров, по которым в дальнейшем был проведен кластерный анализ.

Кластерный анализ курсантов обеих групп был проведен итерационным методом k -средних. Элементы кластеров курсантов 4 курса представлены на рисунке 3.8. Рассматриваются 2 кластера курсантов.

Members of Cluster Number 1 (data) and Distances from Respective Cluster Center Cluster contains 7 cases	
	Distance
R3	0.983466
R6	1.441674
R7	0.770828
R8	0.761885
R10	0.602576
R11	0.640629
R13	0.981352

а

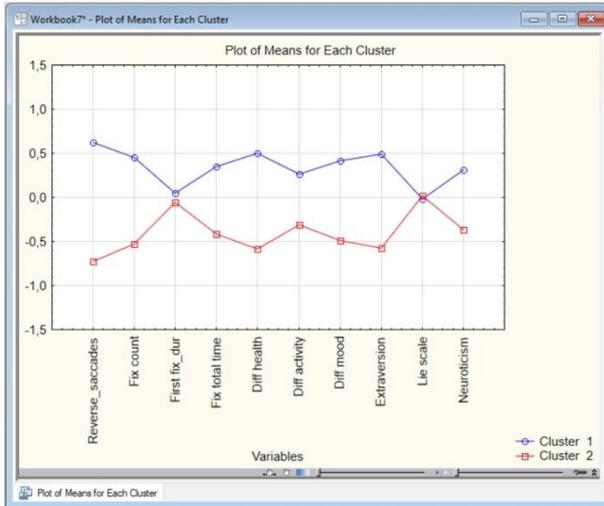
Members of Cluster Number 2 (data) and Distances from Respective Cluster Center Cluster contains 6 cases	
	Distance
R1	0.580901
R2	0.901861
R4	1.036796
R5	0.840792
R9	0.600943
R12	0.622560

б

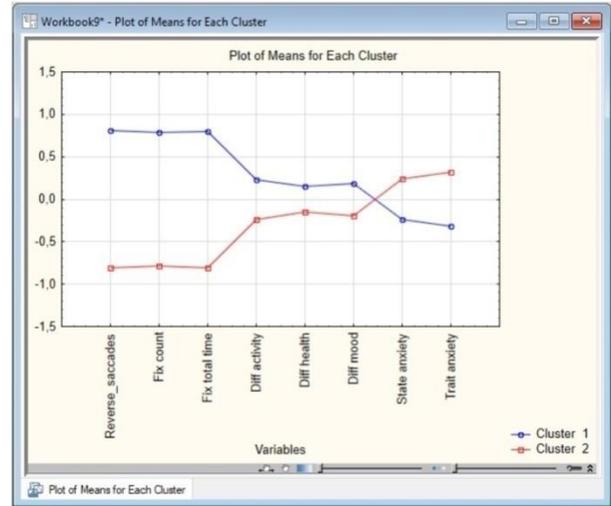
Рисунок 3.8 – Состав кластеров курсантов 4 курса:

1 кластер – а; 2 кластер – б

На рисунке 3.8 представлен график средних значений для каждого кластера. По горизонтали отложены ключевые показатели участвующие в классификации, а по вертикали – средние значения показателей для каждого кластера.



а



б

Рисунок 3.9 – График средних значений кластеров: 4 курс – а; 5 курс – б

Как видно из рисунка 3.9а:

1. Первый кластер курсантов отличается высокими значениями общего количества возвратных саккад и фиксаций в областях индикации. Наблюдаются высокие значения практически всех показателей, характеризующих психофизиологический профиль («Самочувствие», «Активность», «Настроение» и других). При этом в данном кластере 42 % курсантов имели опыт полетов либо на авиационных симуляторах, либо на реальных самолетах.

2. Второй кластер во многом противоположен первому. Курсанты имеют низкие значения общего количества возвратных саккад и фиксаций в областях индикации при длительности первых фиксаций практически равным значениям в первом кластере. При этом в данном кластере только 33 % курсантов имели опыт полетов либо на авиационных симуляторах, либо на реальных самолетах.

Аналогично был также проведен кластерный анализ курсантов 5 курса. Элементы кластеров 1 и 2 представлены на рисунке 3.10.

Members of Cluster Number 1 (data) and Distances from Respective Cluster Center Cluster contains 6 cases	
	Distance
R5	0,730095
R7	0,780191
R8	0,398252
R10	1,038375
R11	0,871528
R13	0,924550

а

Members of Cluster Number 2 (data) and Distances from Respective Cluster Center Cluster contains 6 cases	
	Distance
R1	0,860730
R2	0,754208
R3	0,517907
R4	1,119559
R9	0,693586
R12	0,632577

б

Рисунок 3.10 – Состав кластеров группы подготовленных курсантов:
1 кластер – а; 2 кластер – б

На рисунке 3.10 представлены элементы кластеров курсантов 5 курса. Анализ кластеров согласно графику средних значений (рис. 3.9б) показывает, что первый кластер, в отличие от второго, отличается высокими значениями общего количества возвратных саккад, большей длительностью первых фиксации и общей длительностью фиксации в областях индикации. Наблюдаются низкие значения показателей тревожности.

Анализ корреляции между параметрами ГДА курсантов четвертого курса и показателями их тренажерной результативности показан на рисунке 3.11.

Correlations (data) Marked correlations are significant at $p < ,05000$ N=13 (Casewise deletion of missing data)				
Variable	Reverse_sacca des	Fix count	First fix_dur	Fix total time
Eval tech	0,690280	0,677124	-0,458772	-0,134528
Speed	0,658391	0,666986	-0,546151	-0,207437
Heading	0,632980	0,594486	-0,374208	-0,128611
Altitude	0,750049	0,753276	-0,436622	-0,067666

а

Correlations (data) Marked correlations are significant at $p < ,05000$ N=6 (Casewise deletion of missing data)				
Variable	Reverse_sacca des	Fix count	First fix_dur	Fix total time
Eval tech	0,479867	0,021510	-0,589099	-0,033164
Speed	0,334452	-0,103042	-0,841166	-0,172808
Heading	0,320652	-0,097907	-0,423756	-0,280649
Altitude	0,566737	0,235571	-0,353343	0,364540

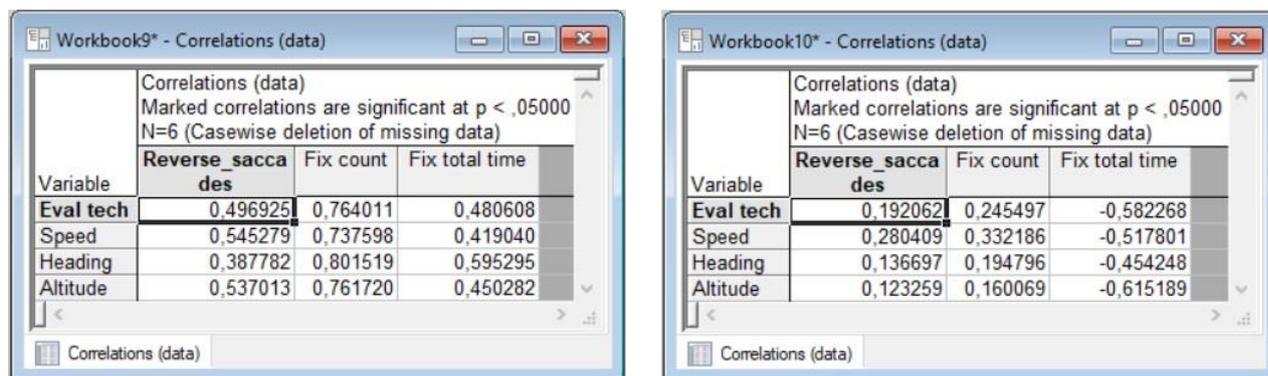
б

Рисунок 3.11 – Результаты корреляционного анализа 4 курс:
1 кластер курсантов – а; 2 кластер курсантов – б

Видно, что в первом кластере курсантов параметр ГДА «Общее количество возвратных саккад» и «Общее количество фиксации» имеет достаточно сильную корреляцию с показателями их тренажерной

результативности. Во втором кластере наблюдается обратная корреляция между параметром ГДА «Общая длительность первой фиксации» и показателем «Скорость».

Анализ корреляции между параметрами ГДА курсантов 5 курса и показателями их тренажерной результативности показан на рисунке 3.12.



а

б

Рисунок 3.12 – Результаты корреляционного анализа 5 курс:

1 кластер курсантов – а; 2 кластер курсантов – б

Видно, что в первом кластере курсантов параметры ГДА «Общее количество возвратных саккад» и «Общее количество фиксаций» также имеет достаточно сильную корреляцию с показателями их тренажерной результативности. При этом во втором кластере наблюдается обратная корреляция между параметром ГДА «Общее время фиксации» и показателями тренажерной результативности [133].

Таким образом, проведенное исследование позволило выявить три параметра ГДА, которые взаимосвязаны с показателями тренажерной результативности пилотов:

1. общее количество фиксаций (*FC*);
2. общая длительность фиксаций (*FD*);
3. общее количество возвратных саккад (*RS*).

В ходе дальнейшего исследования на основе выявленных параметров ГДА предлагается формировать комплексный показатель ГДА, характеризующий РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS.

3.2. Апробация и исследование комплексного показателя глазодвигательной активности, характеризующего распределение и переключение зрительного внимания пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации

Апробацию комплексного показателя ГДА, характеризующего РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS, представим на примере выполнения курсантами УИ ГА горизонтального полета (рис. 3.5) [85].

В результате применения МАИ были определены численные значения приоритета или важности области индикации при выполнении горизонтального полета. В таблице 3.2 приведена матрица парных сравнений областей индикации при выполнении испытуемыми горизонтального полета по приборам.

Таблица 3.2 – Матрица парных сравнений областей индикации
при выполнении горизонтального полета по приборам

Области индикации	Roll	Pitch	Speed	Altitude	HSI	Engine	VS	Map	Координаты собственного вектора	Важность области индикации
Roll	1	1	1/3	1/5	5	1/3	1/3	3	3,930	0,073
Pitch	1	1	5	5	3	3	5	7	16,990	0,315
Speed	3	1/5	1	1	7	1	5	7	8,971	0,166
Altitude	5	1/5	1	1	7	3	3	7	9,290	0,172
HIS	1/5	1/3	1/7	1/7	1	1/7	1/5	3	1,529	0,028
Engine	3	1/3	1	1/3	7	1	1/7	5	4,973	0,092
VS	3	1/5	1/5	1/3	5	7	1	5	7,260	0,135
Map	1/3	1/7	1/7	1/7	1/3	1/5	1/5	1	1	0,019

С применением формулы (2.6) было вычислено значение комплексного показателя ГДА, характеризующего РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS, для трех параметров ГДА: общее количество фиксаций (FC), общая длительность фиксаций (FD), общее количество возвратных саккад (RS), (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Значения комплексного показателя ГДА, характеризующего РПЗВ пилота при выполнении горизонтального полета по приборам

Испытуе- мые	Группа 1			Испытуе- мые	Группа 2		
	E_{FC}	E_{FD}	E_{RS}		E_{FC}	E_{FD}	E_{RS}
R1	0,9202	0,8600	0,9194	R16	0,9756	0,9839	0,9764
R2	0,9705	0,9727	0,9708	R17	0,9672	0,9437	0,9693
R3	0,9657	0,9745	0,9686	R18	0,9757	0,9853	0,9754
R4	0,9175	0,9393	0,9166	R19	0,9616	0,9684	0,9672
R5	0,9515	0,9464	0,9516	R20	0,9884	0,9929	0,9894
R6	0,9931	0,9947	0,9927	R21	0,7995	0,7638	0,7944
R7	0,9985	0,9998	0,9985	R22	0,9892	0,9977	0,9890
R8	0,9871	0,9893	0,9887	R23	0,9876	0,9948	0,9879
R9	0,8761	0,8640	0,8766	R24	0,9457	0,9216	0,9464
R10	0,9442	0,9716	0,9420	R25	0,8971	0,8833	0,8952
R11	0,9754	0,9911	0,9751	R26	0,9765	0,9858	0,9796
R12	0,9898	0,9944	0,9901	R27	0,9701	0,9796	0,9700
R13	0,9342	0,9616	0,9520	R28	0,9691	0,9596	0,9650
R14	0,9798	0,9844	0,9701	R29	0,9791	0,9896	0,9750
R15	0,9452	0,9678	0,9556	R30	0,9796	0,9886	0,9766

Далее проведем кластерный анализ для исследуемых групп. На первом шаге проведем анализ данных методом Варда, выбрав в качестве меры расстояния «квадрат Евклидова расстояния». На рисунке 3.13 представлена полученная дендрограмма для 30 испытуемых.

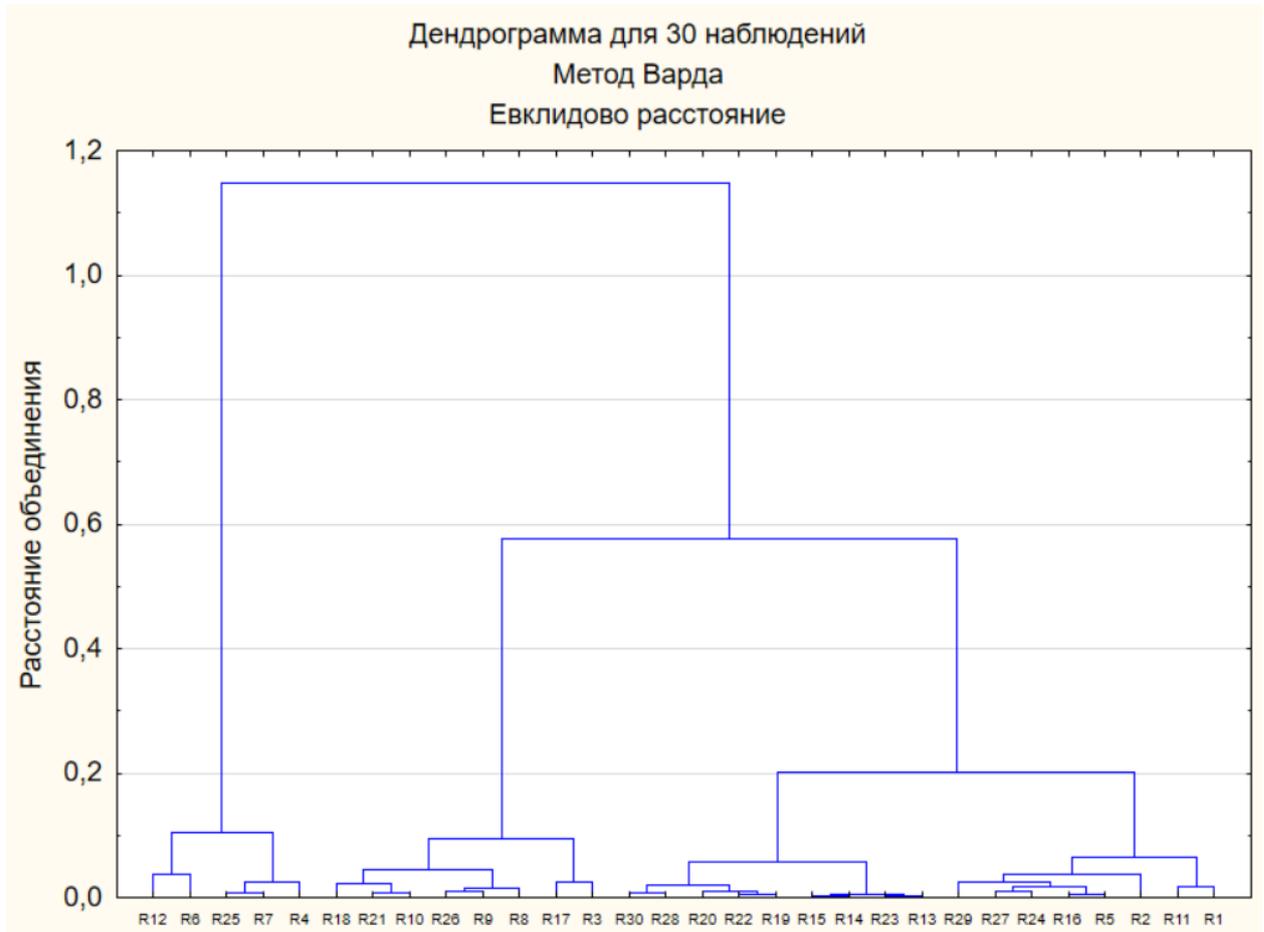


Рисунок 3.13 – Дендрограмма наблюдений

В соответствии с дендрограммой наблюдений, приведенной на рисунке 3.13, предлагается рассматривать четыре кластера респондентов. Для проверки предположения о четырех кластерах респондентов был проведен кластер-анализ методом k -средних. На рисунке 3.14 представлены респонденты, входящие в выявленные кластеры, а также расстояния до центров этих кластеров.

Workbook1* - Members ...

Элементы кластера 1
и расстояния до центра кластера
Кластер содержит 8 набл.

	Distance
R3	0,021790
R8	0,008328
R9	0,012575
R10	0,011844
R17	0,017904
R18	0,012944
R21	0,007228
R26	0,007277

Members of Cluster Number 1 (Дискримин: < >)

а)

Workbook1* - Members ...

Элементы кластера 2
и расстояния до центра кластера
Кластер содержит 8 набл.

	Distance
R1	0,011237
R2	0,012612
R5	0,011010
R11	0,016969
R16	0,008274
R24	0,005616
R27	0,004692
R29	0,008919

Members of Cluster Number 2 (Дискримин: < >)

б)

Workbook1* - Members ...

Элементы кластера 3
и расстояния до центра кластера
Кластер содержит 5 набл.

	Distance
R4	0,010468
R6	0,010765
R7	0,015541
R12	0,029840
R25	0,016371

Members of Cluster Number 3 (Дискримин: < >)

в)

Workbook1* - Members ...

Элементы кластера 4
и расстояния до центра кластера
Кластер содержит 9 набл.

	Distance
R13	0,007138
R14	0,004754
R15	0,004476
R19	0,003014
R20	0,008284
R22	0,005353
R23	0,006448
R28	0,006212
R30	0,005958

Members of Cluster Number 4 (Дискримин: < >)

г)

Рисунок 3.14 – Элементы и расстояния до центров кластеров

а) состав кластера № 1; б) состав кластера № 2

в) состав кластера № 3; г) состав кластера № 4

В результате проведенного анализа, можно сделать вывод, что наблюдается схожая кластерная структура респондентов по результатам применения двух методов кластеризации. Данный результат характеризует устойчивую кластеризацию респондентов и возможность в дальнейшем использовать предложенный комплексный показатель ГДА [84, 85].

Для углубленного анализа найденных кластеров рассмотрим «график средних значений кластеров», который представлен на рисунке 3.15.

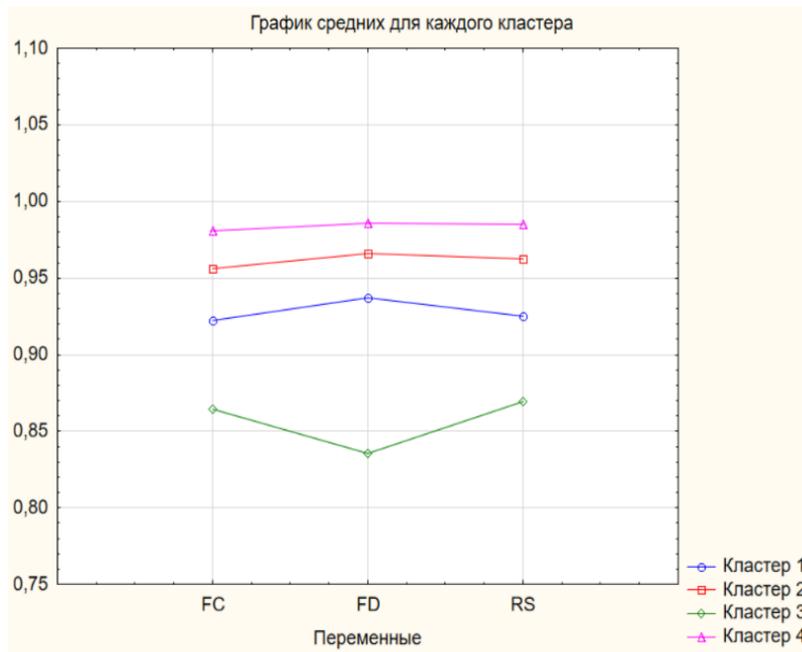


Рисунок 3.15 – График средних значений для каждого кластера

Опишем два кластера исходя из анализа рисунка 3.15:

1. Третий кластер характеризуется самыми низкими значениями комплексного показателя ГДА для всех трех окулометрических параметров относительно значений аналогичных параметров других кластеров. Респонденты имели наименьшую длительность фиксации взгляда на областях индикации (среднее значение показателя равно 0,835) и количество возвращений к ним (среднее значение показателя равно 0,869).

2. Четвертый кластер характеризуется самыми высокими значениями комплексного показателя ГДА для всех трех окулометрических параметров относительно значений аналогичных параметров других кластеров. Респонденты имели наибольшую длительность фиксации взгляда на областях индикации (среднее значение показателя равно 0,985) и количество возвращений к ним (среднее значение показателя равно 0,984) [84].

Проведенный кластерный анализ позволил установить четыре основные группы пилотов-курсантов, внутри которых респонденты используют схожие схемы РПЗВ.

Апробация предложенного комплексного показателя ГДА, характеризующего РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS, показала, что с его

применением получается устойчивая кластеризация испытуемых в пространстве сформированных наборов признаков.

При проведении дальнейших исследований предлагается использовать комплексный показатель ГДА, характеризующий РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS, для разработки энтропийной модели оценки РПЗВ пилота и модели оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики.

3.3. Апробация и исследование энтропийной модели оценки распределения и переключения зрительного внимания пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации

В результате проведенного эксперимента, описанного в разделе 3.1, были получены значения трех наиболее информативных окулометрических параметров (FC, FD, RS), на основе которых затем рассчитаны комплексные показатели ГДА в векторе $Y^k = (Y_1^k, Y_2^k, Y_3^k)$. Для того чтобы корректно использовать предложенные формулы дифференциальной энтропии необходимо оценить распределение комплексного показателя ГДА. На рис. 3.21 представлена гистограмма распределения комплексного показателя ГДА, рассчитанного для окулометрического параметра FC «Общее количество фиксаций» в группе курсантов, не приступивших к летной практике (группа 1). Анализ распределения данного показателя проводился с использованием критерия Шапиро-Уилка. Критерий проверяет гипотезу об отсутствии различий между наблюдаемым распределением и теоретически ожидаемым нормальным распределением.

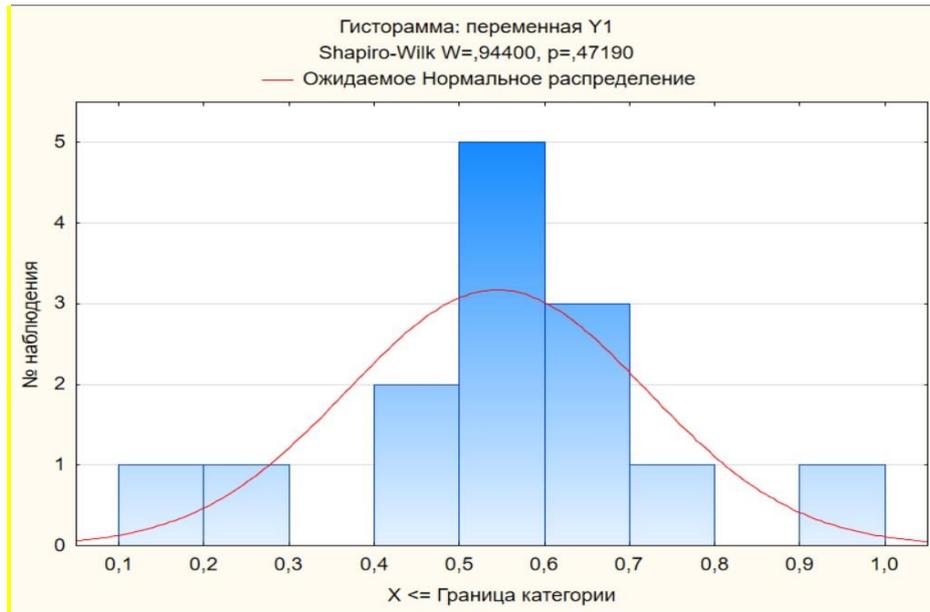


Рисунок 3.16 – Гистограмма распределения показателя Y_1

В результате проведенного теста уровень статистической значимости критерия превышает 0,05 (рис. 3.16), что позволяет сделать вывод, о том, что распределение переменной статистически значимо не отличается от нормального распределения. Это позволяет использовать предложенные формулы (2.7), (2.8), (2.9), (2.10). Аналогичные результаты были получены для показателей Y_2 и Y_3 .

Проведем далее сравнительный анализ РПЗВ пилота на основе анализа энтропии случайного вектора Y . В таблице 3.4 приведены данные случайного вектора Y для третьего этапа полета трех групп испытуемых.

Таблица 3.4 – Данные случайного вектора Y для третьего этапа полета трех групп испытуемых

Испытуе- мые	Группа 1			Испытуе- мые	Группа 2		
	Этап 3				Этап 3		
	Y_1	Y_2	Y_3		Y_1	Y_2	Y_3
R1	0,9202	0,8600	0,9194	R16	0,9756	0,9839	0,9764
R2	0,9705	0,9727	0,9708	R17	0,9672	0,9437	0,9693
R3	0,9657	0,9745	0,9686	R18	0,9757	0,9853	0,9754
R4	0,9175	0,9393	0,9166	R19	0,9616	0,9684	0,9672
R5	0,9515	0,9464	0,9516	R20	0,9884	0,9929	0,9894
R6	0,9931	0,9947	0,9927	R21	0,9695	0,9738	0,9644
R7	0,9985	0,9998	0,9985	R22	0,9892	0,9977	0,9890
R8	0,9871	0,9893	0,9887	R23	0,9876	0,9948	0,9879
R9	0,8761	0,8640	0,8766	R24	0,9457	0,9216	0,9464
R10	0,9442	0,9716	0,9420	R25	0,8971	0,8833	0,8952
R11	0,9754	0,9911	0,9751	R26	0,9765	0,9858	0,9796
R12	0,9898	0,9944	0,9901	R27	0,9701	0,9796	0,9700
R13	0,9771	0,9793	0,9687	R28	0,9865	0,9958	0,9896
R14	0,9525	0,9564	0,9536	R29	0,9646	0,9664	0,9682
R15	0,9342	0,9616	0,9320	R30	0,9557	0,9516	0,9664

Испытуемые	Группа 3		
	Этап 3		
	Y_1	Y_2	Y_3
R31	0,9987	0,9998	0,9993
R32	0,9997	0,9999	0,9997
R33	0,9909	0,9901	0,9906
R34	0,9991	0,9997	0,9990

В результате расчета по модели (2.8) получены значения $\rho_{H^{(1)}} = 7,9$, $\rho_{H^{(2)}} = 6,65$ для групп 1 и 2 соответственно. Энтропийное расстояние в группе курсантов, приступивших к летной практике, на 1,25 меньше, чем в группе курсантов, не приступивших к летной практике. С одной стороны, это подтверждает очевидный факт, но вместе с тем показывает, что предложенный критерий обладает диагностическим потенциалом и может быть использован в процессе тренажерной подготовки для оценки сформированности РПЗВ пилотов. Аналогичные результаты были получены и для других этапов полета [88].

В таблице 3.5 представлены соответствующие корреляционные матрицы для трех групп испытуемых.

Таблица 3.5 – Корреляционные матрицы для группы 1 (а), группы 2 (б) и группы 3 (в)

Группа 1	Y_1	Y_2	Y_3	Группа 2	Y_1	Y_2	Y_3
Y_1	1	0,9014	0,9994	Y_1	1	0,9129	0,9973
Y_2	0,9014	1	0,8993	Y_2	0,9129	1	0,9017
Y_3	0,9994	0,8993	1	Y_3	0,9973	0,9017	1

а)

б)

Группа 3	Y_1	Y_2	Y_3
Y_1	1	0,9958	0,9977
Y_2	0,9958	1	0,9990
Y_3	0,9977	0,9990	1

в)

Одним из способов снижения энтропии является проведение мероприятий по изменению корреляционных связей между элементами системы. Для этого необходимо выявить точки роста для осуществления управляющих воздействий. Для решения задачи выбора направления воздействия на систему можно использовать градиентный метод.

Выбор направления воздействия на систему с помощью градиентного метода:

$$|R| = f(r_{12}, r_{13}, r_{23}),$$

$$f = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & 1 & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & 1 \end{vmatrix} = 1 - r_{23}^2 - r_{12}^2 - r_{13}^2 + 2r_{12}r_{23}r_{31},$$

$$-grad(f) = -(2(r_{23}r_{31} - r_{12}), 2(r_{12}r_{23} - r_{13}), 2(r_{12}r_{13} - r_{23})) =$$

$$-grad(f) = -(2(r_{23}r_{31} - r_{12}), 2(r_{12}r_{23} - r_{13}), 2(r_{12}r_{13} - r_{23})) =$$

$$-(2(0,8993 \times 0,9994 - 0,9014), 2(0,9014 \times 0,8993 - 0,9994), 2(0,9014 \times 0,9994 - 0,8993)) =$$

$$= -(-0,0053, -0,3775, 0,0031)$$

Вычислив антиградиент функции определителя корреляционной матрицы, необходимо определить те компоненты РПЗВ, увеличение или уменьшение значения корреляционных связей которых в наибольшей степени повлияет на изменение энтропии. В рассматриваемом случае необходимо предпринимать меры по уменьшению корреляционной связи между параметрами Y_1 и Y_3 , и увеличению корреляции между параметрами Y_2 и Y_3 . Следовательно, при увеличении количества возвращений к области индикации, необходимо также увеличить и длительность фиксации на данной области, уменьшая в свою очередь количество фиксаций.

Проведем сравнительный анализ полученных результатов с рассчитанными значениями информационной энтропии Шеннона. В таблице 3.6 приведены соответствующие данные информационной энтропии для каждого испытуемого на третьем этапе полета.

Таблица 3.6 – Данные информационной энтропии Шеннона

Испытуе- мые	Группа 1	Испытуе- мые	Группа 2	Испытуе- мые	Группа 3
R1	10,91826	R16	6,495539	R31	4,281797
R2	12,45594	R17	5,204692	R32	3,187008
R3	8,364762	R18	8,205257	R33	2,206735
R4	12,66447	R19	6,768641	R34	4,144975
R5	9,009506	R20	6,545965		
R6	9,936646	R21	8,330965		
R7	11,93732	R22	6,800325		
R8	11,27436	R23	7,9555		
R9	9,065055	R24	8,083869		
R10	10,35757	R25	5,259888		
R11	10,12336	R26	6,889093		
R12	9,853912	R27	4,987926		
R13	9,822912	R28	6,809093		
R14	9,064285	R29	5,987926		
R15	10,25336	R30	5,977888		

Согласно таблице 3.6 информационная энтропия уменьшается от группы 1 к группе 3. Данный факт позволяет утверждать, что с опытом неопределенность РПЗВ уменьшается. Это свидетельствует о том, что информационная энтропия также позволяет получать информацию о состоянии сформированности РПЗВ пилота.

Однако анализ на основе предложенной векторной энтропийной модели дает более глубокую оценку сущности и характера изменения РПЗВ пилота, а также позволяет выявлять управляющие компоненты РПЗВ. Выяснить это, проводя анализ по переходам фиксации взгляда пилота, в большинстве случаев не удастся.

Таким образом, проведена апробация энтропийной модели оценки РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS. Предложен показатель «энтропийное расстояние» РПЗВ и показан его диагностический потенциал. Данный показатель позволяет оценить степень отклонения диагностируемого РПЗВ пилота от эталонного, за основу которого могут браться РПЗВ опытного пилота или инструктора.

В результате применения модели (2.9) и алгоритма динамической оценки РПЗВ пилота, описанного в параграфе 2.4, были получены следующие результаты [89].

1. Рассмотрим динамику общей энтропии системы РПЗВ с течение 5 этапов полета в виде графика (рис. 3.17).

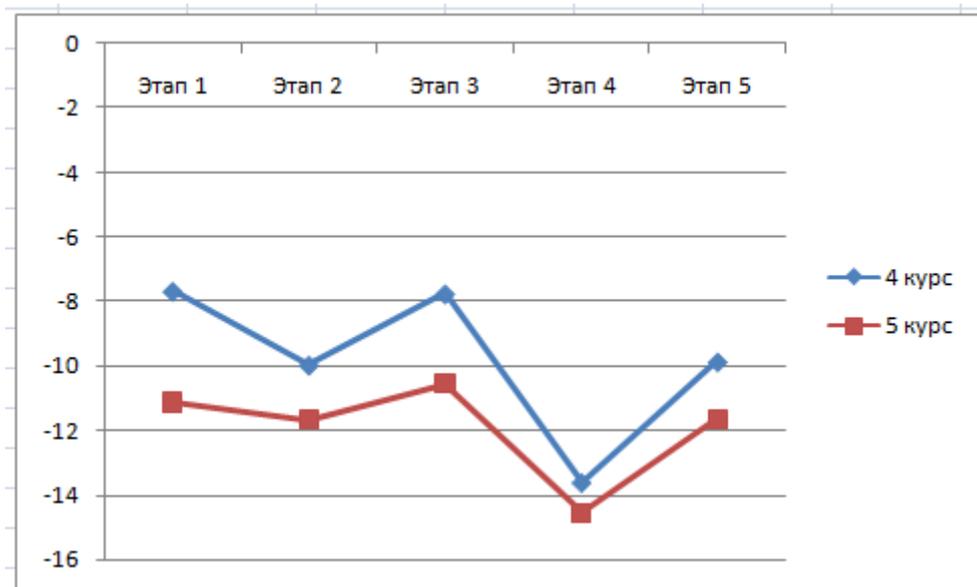


Рисунок 3.17 – Динамика общей энтропии РПЗВ пилота

По рисунку 3.17 можно сделать вывод о том, что на этапах 2 и 4 наблюдалось увеличение стабильности системы. Такое поведение объяснимо, так как этапы восходящей и нисходящей спирали являются сложными и требуют большей концентрации внимания пилота.

2. Вычислим динамику энтропии хаотичности и энтропии самоорганизации с целью определения характера изменения энтропий на этапах 2 и 4.

Группа 1: $\Delta H(Y)_V^2 = -2,15$, $\Delta H(Y)_V^4 = -4,55$, $\Delta H(Y)_R^2 = -0,15$, $\Delta H(Y)_R^4 = -0,85$;

Группа 2: $\Delta H(Y)_V^2 = -1,04$, $\Delta H(Y)_V^4 = -3,69$, $\Delta H(Y)_R^2 = 0,51$, $\Delta H(Y)_R^4 = -2,11$.

Следовательно, на увеличение стабильности в группах 1 и 2 в большей степени повлияло уменьшение энтропии хаотичности. Однако, в группе 2 на увеличение стабильности системы существенное влияние оказала также энтропия самоорганизации.

3. Для того чтобы определить какой параметр ГДА повлиял на изменение энтропии в большей степени, вычислим максимальное значение энтропии хаотичности каждой подсистемы для групп 1 и 2.

Группа 1: Этап 2: $\Delta H(Y_1)_V = -0,7$, $\Delta H(Y_2)_V = -0,88$, $\Delta H(Y_3)_V = -0,63$;

Этап 4: $\Delta H(Y_1)_V = -1,23$, $\Delta H(Y_2)_V = -2,19$, $\Delta H(Y_3)_V = -1,13$;

Группа 2: Этап 2: $\Delta H(Y_1)_V = -0,31$, $\Delta H(Y_2)_V = -0,49$, $\Delta H(Y_3)_V = -0,22$;

Этап 4: $\Delta H(Y_1)_V = -1,35$, $\Delta H(Y_2)_V = -1,35$, $\Delta H(Y_3)_V = -1$;

Видим, что на увеличение стабильности РПЗВ в группе 1 оказала наибольшее влияние подсистема Y_2 , соответствующая параметру ГДА «Общая длительность фиксаций». В группе 2 увеличение стабильности достигнуто за счет двух параметров – это «Общая длительность фиксаций» и «Общее количество фиксаций».

4. Рассмотрим динамику изменения корреляционных связей между параметрами подсистемы на этапах 2 и 4 обеих групп. В таблице 3.7 представлены соответствующие корреляционные матрицы.

Таблица 3.7 – Корреляционные матрицы для группы 1 (а – этап 2, б – этап 4), группы 2 (в – этап 2, г – этап 4)

Группа 1	Y_1	Y_2	Y_3
Y_1	1	0,8146	0,9777
Y_2	0,8146	1	0,8358
Y_3	0,9777	0,8358	1

а)

Группа 1	Y_1	Y_2	Y_3
Y_1	1	0,8853	0,9983
Y_2	0,8853	1	0,8793
Y_3	0,9983	0,8793	1

б)

Группа 2	Y_1	Y_2	Y_3
Y_1	1	0,9454	0,9850
Y_2	0,9454	1	0,9342
Y_3	0,9850	0,9342	1

в)

Группа 2	Y_1	Y_2	Y_3
Y_1	1	0,9966	0,9996
Y_2	0,9966	1	0,9948
Y_3	0,9996	0,9948	1

г)

С помощью градиентного метода определим, какой параметр оказал влияние на энтропию самоорганизации.

$$-grad(f) = -(2(r_{23}r_{31} - r_{12}), 2(r_{12}r_{23} - r_{13}), 2(r_{12}r_{13} - r_{23})) =$$

$$\begin{aligned} -grad(f) &= -(2(r_{23}r_{31} - r_{12}), 2(r_{12}r_{23} - r_{13}), 2(r_{12}r_{13} - r_{23})) = \\ &= -(2(0,8793 \times 0,9983 - 0,8853), 2(0,8853 \times 0,8793 - 0,9983), 2(0,8853 \times 0,9983 - 0,8793)) = \\ &= -(-0,0115, -0,4397, 0,0090) \end{aligned}$$

В рассматриваемом случае необходимо предпринимать меры по увеличению корреляции между параметрами Y_2 и Y_3 . Полученные результаты согласуются с результатами, полученными в разделе 3.2.

Следовательно, при последующей оценке РПЗВ пилота необходимо анализировать энтропию хаотичности, уменьшение которой достигается за счет окулометрических параметров FD (общая длительность фиксаций) и FC (общее

количество фиксации), а также энтропию самоорганизации, уменьшение которой достигается за счет усиления корреляционной связи между окулометрическими параметрами FD (общая длительность фиксации) и RS (общее количество возвратных саккад).

Таким образом, применение энтропийной модели динамической оценки РПЗВ пилота позволяет:

1. Установить периоды максимальной стабильности или нестабильности изменений РПЗВ пилота.
2. Выявить причины стабильности или нестабильности данных изменений.
3. Предложить рекомендации для корректировки РПЗВ пилота [89].

3.4. Апробация и исследование модели оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики

Для апробации и исследования модели оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики было проведено экспериментальное исследование в соответствии с методикой, представленной на рисунке 3.5. С целью разработки модели был выбран участок выполнения испытуемыми нисходящей спирали с выдерживанием заданных параметров приборной скорости (Speed, SP), вертикальной скорости (Vertical Speed, VS) и угла крена (Bank Angle, BK). С целью фиксации параметров полета использовалась видеокамера GoPro. Параметры ГДА фиксировались с помощью ай-трекера Gazepoint 3HD. Для мониторинга ЭКГ использовался прибор Ntrend-EEG20.

В качестве входных данных модели использовались три группы показателей [86].

Первая группа показателей включала 3 показателя: SP, VS и BK, которые позволяли оценить точность выдерживания заданных параметров полета и рассчитывались по формуле (2.5).

Вторая группа показателей включала значения комплексного показателя ГДА для трех окулометрических параметров (FC, FD, RS) и рассчитывалась по формуле (2.6).

В качестве показателя ПФН выступал стресс-индекс (SI) [11, 12]. Этот показатель зависит от психологического и физиологического состояний испытуемых и рассчитывался на основе данных электрокардиографии.

В приложении к работе приведены входные и выходные данные, используемые для разработки моделей Мамдани и Сугено.

Проектирование моделей Мамдани и Сугено осуществлялось в пакете Fuzzy Logic Toolbox программы MATLAB 17. На первом этапе с целью разработки модели Сугено применялся алгоритм субтрактивной кластеризации. Экспериментальные данные были разбиты на две выборки. Обучающая выборка включала показатели 18 курсантов, тестовая – показатели 8 курсантов. Радиус кластеров в алгоритме субтрактивной кластеризации при разработке нечеткой модели Сугено был выбран равным 0,8 (значение устанавливается из диапазона $[0, 1]$). Схема модели представлена на рисунке 3.18.

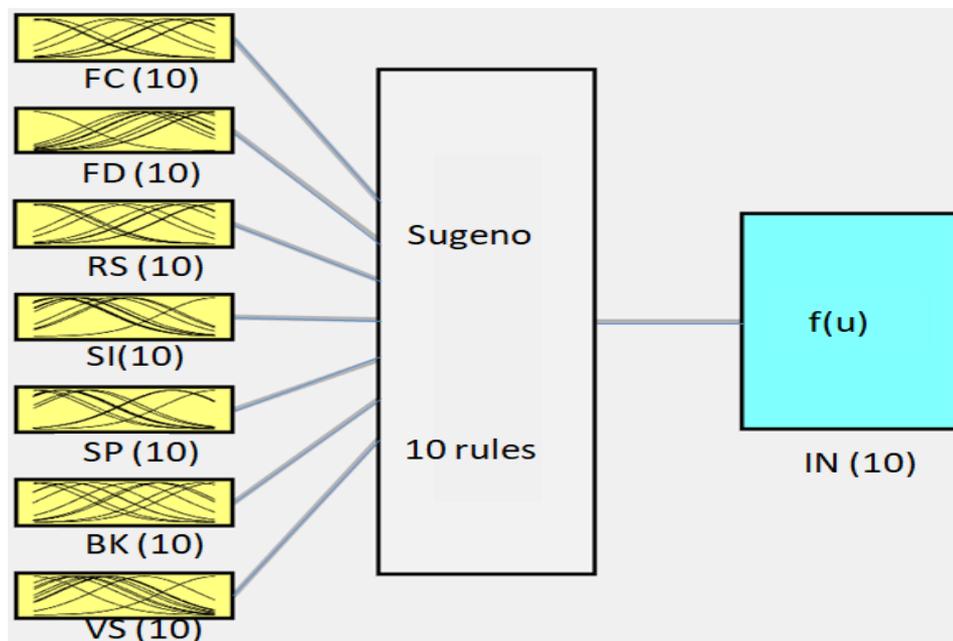


Рисунок 3.18 – Схема разработанной модели Сугено

В результате кластерного анализа были найдены 10 кластеров, которые как было описано выше характеризуют 10 правил вывода модели Сугено:

1. ЕСЛИИ (FC is in1cluster1) И (FD is in2cluster1) И (RS is in3cluster1) И (SI is in4cluster1) И (SP is in5cluster1) И (BK is in6cluster1) И (VS is in7cluster1),
ТО (IN is out1cluster1).

2. ЕСЛИИ (FC is in1cluster2) И (FD is in2cluster2) И (RS is in3cluster2) И (SI is in4cluster2) И (SP is in5cluster2) И (BK is in6cluster2) И (VS is in7cluster2),
ТО (IN is out1cluster2).

3. ЕСЛИИ (FC is in1cluster3) И (FD is in2cluster3) И (RS is in3cluster3) И (SI is in4cluster3) И (SP is in5cluster3) И (BK is in6cluster3) И (VS is in7cluster3),
ТО (IN is out1cluster3).

4. ЕСЛИИ (FC is in1cluster4) И (FD is in2cluster4) И (RS is in3cluster4) И (SI is in4cluster4) И (SP is in5cluster4) И (BK is in6cluster4) И (VS is in7cluster4),
ТО (IN is out1cluster4).

5. ЕСЛИИ (FC is in1cluster5) И (FD is in2cluster5) И (RS is in3cluster5) И (SI is in4cluster5) И (SP is in5cluster5) И (BK is in6cluster5) И (VS is in7cluster5),
ТО (IN is out1cluster5).

6. ЕСЛИИ (FC is in1cluster6) И (FD is in2cluster6) И (RS is in3cluster6) И (SI is in4cluster6) И (SP is in5cluster6) И (BK is in6cluster6) И (VS is in7cluster6),
ТО (IN is out1cluster6).

7. ЕСЛИИ (FC is in1cluster7) И (FD is in2cluster7) И (RS is in3cluster7) И (SI is in4cluster7) И (SP is in5cluster7) И (BK is in6cluster7) И (VS is in7cluster7),
ТО (IN is out1cluster7).

8. ЕСЛИИ (FC is in1cluster8) И (FD is in2cluster8) И (RS is in3cluster8) И (SI is in4cluster8) И (SP is in5cluster8) И (BK is in6cluster8) И (VS is in7cluster8),
ТО (IN is out1cluster8).

9. ЕСЛИИ (FC is in1cluster9) И (FD is in2cluster9) И (RS is in3cluster9) И (SI is in4cluster9) И (SP is in5cluster9) И (BK is in6cluster9) И (VS is in7cluster9),
ТО (IN is out1cluster9).

10. ЕСЛИ (FC is in1cluster10) И (FD is in2cluster10) И (RS is in3cluster10) И (SI is in4cluster10) И (SP is in5cluster10) И (BK is in6cluster10) И (VS is in7cluster10), ТО (IN is out1cluster10).

Результаты проверки модели Сугено с тестовой и обучающей выборками представлены на рисунке 3.19.

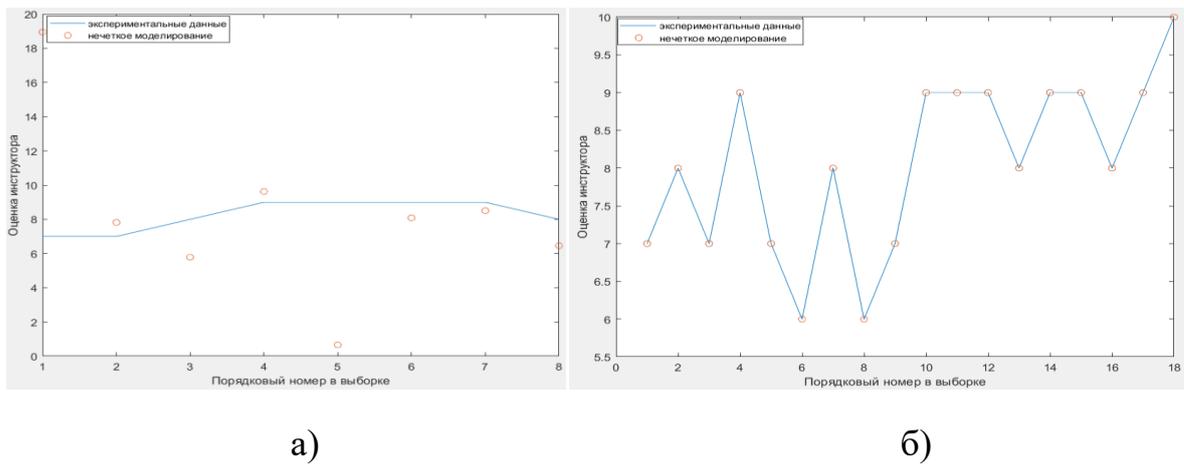


Рисунок 3.19 – Результаты проверки модели Сугено:
с тестовой выборкой – а; с обучающей выборкой – б

Из рисунка 3.19 видно, что результаты проверки модели Сугено демонстрируют незначительные расхождения между экспериментальными данными и результатами нечеткого моделирования на тестовой и обучающей выборках.

Функции принадлежности входных переменных имеют вид гауссовских кривых. Данные кривые описываются по следующей формуле [91]:

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}},$$

где b – координата максимума функции принадлежности;

c – коэффициент концентрации функции принадлежности.

В качестве примера на рисунке 3.20 представлены функции принадлежности для входной переменной FC.

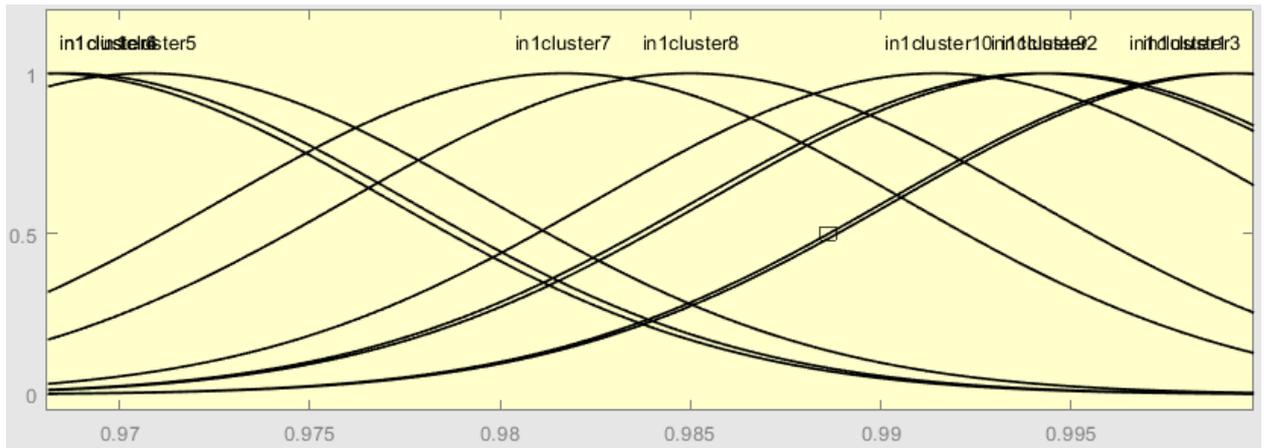


Рисунок 3.20 – Пример функций принадлежности переменной FC

Параметры функции для первых 3 кластеров представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Параметры функций принадлежности переменной FC

Входная переменная	Кластер	Параметры	
		b	c
FC	cluster1	0,999	0,00896
	cluster2	0,9945	0,00896
	cluster3	0,9994	0,00896

На втором этапе осуществлялось проектирование модели Мамдани. Основным параметром алгоритма разработки модели Мамдани является количество кластеров или нечетких правил. Исходя из результатов проектирования модели Сугено значение данного параметра было выбрано равным 10. Вторым важным параметром является экспоненциальный вес, который определяет уровень нечеткости. Исходя из опыта проектирования моделей его устанавливают равным 2. В результате кластеризации получена матрица координат центров нечетких кластеров (каждая строка матрицы описывает центр одного кластера) и матрица степеней принадлежности объектов кластерам.

Из экспериментальных данных была разработана модель Мамдани, схема которой представлена на рисунке 3.21.

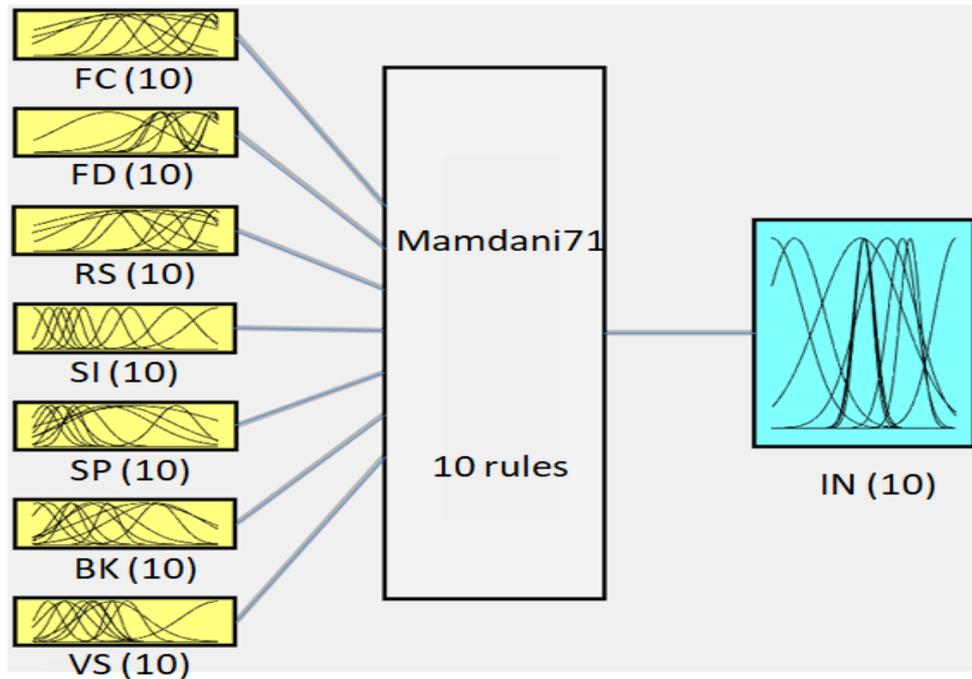


Рисунок 3.21 – Схема разработанной модели Мамдани

Результаты проверки модели Мамдани с обучающей и тестовой выборками представлены на рисунке 3.22.

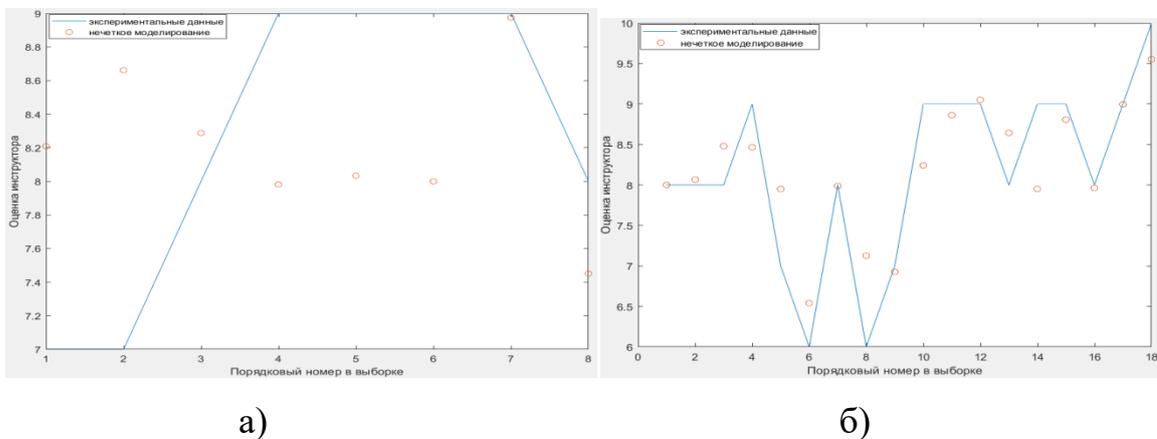


Рисунок 3.22 – Результаты проверки модели Мамдани:
с тестовой выборкой – а; с обучающей выборкой – б

Из рисунка 3.22 видно, что результаты проверки модели Мамдани демонстрируют значительные расхождения между экспериментальными данными и результатами нечеткого моделирования на тестовой выборке (рис. 3.22а) и расхождения в некоторых случаях – на обучающей выборке (рис. 3.22б).

Оценку компактности полученных 10 кластеров произведем с помощью индекса Хей-Бени (Хей-Бени, ХВ), который рассчитывается по следующей формуле [91]:

$$\chi = \frac{\sum_{i=1, c} \sum_{k=1, M} (\mu_{ki})^m \|X_k - V_i\|^2}{M \min_{i \neq j} (\|X_k - V_i\|^2)}.$$

Полученное значение индекса составило 0,4604. Оптимальный результат разбиения на нечеткие кластеры соответствует критерию $\chi < 1$. Полученное значение индекса составило 0,4604. Можно сделать вывод о том, что выбор количества кластеров является оптимальным.

Третьим этапом проводился сравнительный анализ разработанных моделей. Оценка осуществлялась на основе численного значения критерия среднеквадратической ошибки (Root Mean Square Error, RMSE).

Таблица 3.9 – Результаты сравнения полученных моделей

Модель	MSE на тестовой выборке	MSE на обучающей выборке
Модель Сугено	0,9734	0,0047
Модель Мамдани	5,265	0,5445

Результаты сравнения полученных моделей показали, что модель Сугено точнее, чем модель Мамдани описывает зависимость между показателями, характеризующими точность выдерживания заданных параметров полета и показателями психофизиологического состояния пилота.

Таким образом, в данной работе апробирован новый подход к оценке качества техники пилотирования, позволяющий учитывать параметры ГДА и психофизиологического состояния пилота и отличающийся от существующих подходов применением моделей на основе нечеткой логики, которые

автоматически генерируются из экспериментальных данных без привлечения экспертов.

3.5. Экспериментальная проверка повышения надежности оценки качества техники пилотирования с применением разработанной модели, обработка результатов эксперимента

Разработанная модель оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики использовались в процессе экспериментального полета, описанного в разделе 3.2, в котором дополнительно приняли участие 40 пилотов-курсантов ФГБОУ ВО УИ ГА специализации «Организация летной работы». Целью экспериментального полета являлось обоснование повышения надежности оценки качества техники пилотирования с использованием разработанной модели при выполнении тренажерного полета.

Оценка качества выполнения экспериментального полета осуществлялась двумя способами:

1. Оценка качества техники пилотирования осуществлялась пилотом-инструктором УИ ГА в соответствии с Программой учебной и производственной практики подготовки коммерческих пилотов в ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева» [63].

2. Оценка осуществлялась с помощью разработанной модели оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики.

Необходимо отметить, что в экспериментальном исследовании принимали участие молодые пилоты-инструкторы, недавно завершившие обучение в учебных заведениях гражданской авиации и имеющие опыт инструкторской работы не более 3 лет.

Результаты оценок инструктора и модели представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Результаты оценок инструктора и модели в спокойной и турбулентной атмосфере

	Инструктор	Модель	Инструктор
	Спокойный воздух		Турбулентность
R1	5	3,487	1
R2	8	7,995	6
R3	9	8,441	6
R4	5	3,999	2
R5	8	4,105	2
R6	7	4,015	2
R7	6	7,465	7
R8	7	6,162	4
R9	6	4,997	4
R10	6	5,107	3
R11	8	7,947	7
R12	9	7,671	6
R13	6	5,023	4
R14	4	2,987	2
R15	8	7,345	6
R16	9	6,853	6
R17	7	2,993	2
R18	7	3,435	2
R19	6	4,487	2
R20	9	6,349	7
R21	8	6,952	5
R22	7	5,177	4
R23	7	5,157	3
R24	9	7,047	7
R25	9	8,171	7

	Инструктор	Модель	Инструктор
	Спокойный воздух		Турбулентность
R26	8	5,023	4
R27	7	4,957	3
R28	9	8,037	7
R29	9	8,471	6
R30	6	4,523	4
R31	7	6,952	5
R32	6	5,177	4
R33	7	5,157	3
R34	8	7,047	7
R35	9	8,171	7
R36	7	5,023	4
R37	7	4,957	3
R38	9	8,037	7
R39	10	8,471	6
R40	7	4,523	4

На основе полученных данных были рассчитаны значения выборочного коэффициента корреляции r_{xy} для оценок разработанной модели (x_i) и инструктора (y_i), выставленных курсантам при выполнении тренажерного полета в спокойной и турбулентной атмосфере:

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}, \quad (3.1)$$

где n – количество испытуемых.

При сравнении оценок разработанной модели с оценками инструктора, выставленных курсантам при выполнении тренажерного полета в спокойной

атмосфере, получен выборочный коэффициент корреляции $r_{xy1} = 0,769$. Для оценок, выставленных при выполнении тренажерного полета в турбулентной атмосфере, выборочный коэффициент корреляции составил $r_{xy2} = 0,916$.

Значимость выборочных коэффициентов корреляции проверялась с помощью критерия Стьюдента. По опытным данным вычислялся наблюдаемый коэффициент Стьюдента:

$$T_{\text{набл}} = \frac{|r_{xy}| \cdot \sqrt{k}}{\sqrt{1 - r_{xy}^2}}, \quad (3.2)$$

где k – число степеней свободы, $k = n - 2$.

$$T_{\text{набл } 1} = \frac{|r_{xy1}| \cdot \sqrt{k}}{\sqrt{1 - r_{xy1}^2}} \approx 7,419,$$

$$T_{\text{набл } 2} = \frac{|r_{xy2}| \cdot \sqrt{k}}{\sqrt{1 - r_{xy2}^2}} \approx 14,032.$$

Наблюдаемые значения коэффициента Стьюдента сравнивались с критическим $t_{\text{кр}} = 2,024$, найденным для заданного уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы k . Так как в обоих случаях $T_{\text{набл}} > t_{\text{кр}}$, то можно сделать вывод о наличии статистически значимой линейной корреляционной связи между оценками, полученными на основе разработанной модели, и оценками инструктора, выставленными курсантам при выполнении тренажерного полета в спокойной и турбулентной атмосфере.

Для получения выводов о количественной оценке тесноты линейной корреляционной связи была использована шкала Чеддока (таблица 3.11), что позволило в первом случае интерпретировать тесноту связи как среднюю, а во втором как сильную.

Таблица 3.11 – Шкала Чеддока

Теснота связи	Величина r_{xy}	
	положительная	отрицательная
Линейной связи нет	0...0,2	-0,2...0
Слабая	0,2...0,5	-0,5...-0,2
Средняя	0,5...0,75	-0,75...-0,5
Сильная	0,75...0,95	-0,95...-0,75
Функциональная	0,95...1	-1...-0,95

Таким образом, выборочный коэффициент корреляции оценок качества техники пилотирования пилота при первоначальной летной подготовке, выставленных инструктором и полученных с помощью разработанной модели, возрастает примерно на 15% при оценивании техники пилотирования в турбулентной атмосфере по сравнению с оценками, выставленными в ходе тренажерного полета в спокойной атмосфере.

Практика показывает, что пилоты, не овладевшие рациональным РПЗВ, могут обеспечить необходимое качество пилотирования самолета по приборам. Однако при возникновении в полете усложняющих обстоятельств, например, связанных с увеличением психофизиологической нагрузки или ухудшением характеристик устойчивости и управляемости ВС, у них не остается необходимого резерва распределения внимания для того, чтобы справиться с особыми случаями полета.

Проведенное экспериментальное исследование позволило утверждать, что использование пилотом-инструктором предложенной модели позволяет повысить надежность оценки качества техники пилотирования пилота при первоначальной летной подготовке на 15%, что подтверждает практическую значимость модели.

Выводы по главе 3

1. Проведены апробация и исследование комплексного показателя ГДА, характеризующего РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS. В ходе апробации выявлены четыре классификационные группы пилотов, соответствующие четырем типам используемых схем РПЗВ. В отличие от действующей методики подготовки курсантов-пилотов, предполагающей конечную оценку качества техники пилотирования, новый подход позволит оценивать текущий уровень развития навыка РПЗВ.

2. Проведена апробация энтропийной модели оценки РПЗВ пилота. Предложен показатель «энтропийное расстояние» РПЗВ и показан его диагностический потенциал. Данный показатель позволяет оценить степень отклонения диагностируемого РПЗВ пилота от эталонного, за основу которого могут браться РПЗВ пилота-инструктора. Представлен алгоритм динамической оценки РПЗВ, позволяющий выявить тенденции в формировании РПЗВ и предложить рекомендации для корректировки и формирования рационального РПЗВ пилота.

3. Предложен новый подход к оценке качества техники пилотирования пилота, позволяющий учитывать параметры средств объективного контроля, ГДА и ПФН, отличающийся от существующих подходов применением моделей на основе нечеткой логики, которые автоматически генерируются из экспериментальных данных без привлечения экспертов. По результатам экспериментального исследования синтезированы две модели. Результаты сравнения показали, что модель Сугено точнее описывает исследуемую зависимость, чем модель Мамдани.

4. Проведение эксперимента и обработка его результатов позволили утверждать, что надежность оценки качества техники пилотирования пилота при первоначальной летной подготовке повышается на 15%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие научные и практические результаты:

1. Проведен анализ теоретических подходов и практического опыта построения моделей оценки качества техники пилотирования пилота гражданской авиации.

2. Предложен комплексный показатель ГДА, основанный на использовании метода анализа иерархий и характеризующий РПЗВ пилота при работе с EFIS.

3. Предложена и апробирована энтропийная модель оценки РПЗВ пилота, которая позволяет проводить комплексную оценку РПЗВ пилота и отличается от существующих моделей тем, что выделяет показатели ГДА и связи между ними в качестве отдельных переменных, позволяющих осуществлять управление процессом формирования рационального РПЗВ пилота.

4. Предложен и апробирован новый подход к оценке качества техники пилотирования пилота, отличающийся применением моделей на основе нечеткой логики и позволяющий учитывать показатели, характеризующие точность выдерживания заданных параметров полета, глаздвигательную активность и психофизиологическую напряженность испытуемых и повысить надежность оценки качества техники пилотирования пилота при первоначальной летной подготовке на 15%.

Полученные результаты позволяют решить поставленную в диссертационной работе научную задачу оценивания качества первоначальной профессиональной подготовки пилотов и соответствуют пункту 15 «Совершенствование технических средств обучения, систем подготовки, переподготовки, повышения квалификации и аттестации авиационного персонала» паспорта научной специальности 2.9.6. Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники.

Направления дальнейших исследований:

- разработка алгоритмов автоматизированных средств контроля глазодвигательной активности пилота в режиме реального времени;
- разработка с использованием предложенных моделей методики первоначальной летной подготовки пилотов гражданской авиации, позволяющей выявить недостатки в подготовке каждого пилота и разработать индивидуальную траекторию обучения.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

BAAA	–	Bureau of Aircraft Accidents Archives
BK	–	Bank Angle
CBTA	–	Competence-based Training and Assessment
EBT	–	Evidence Based Training
EFIS	–	Electronic Flight Instrument System
FAA	–	Federal Aviation Administration
FC	–	Fixation Count
FD	–	Fixation Duration
ICAO	–	International Civil Aviation Organization
RMSE	–	Root Mean Square Error
RS	–	Reverse Saccades
VS	–	Vertical Speed
SP	–	Speed
ВКМ	–	вариационная кардиоинтервалометрия
ВС	–	воздушное судно
ГА	–	гражданская авиация
ГДА	–	глазодвигательная активность
КТС	–	комплексный тренажер самолета
МАИ	–	метод анализа иерархий

- ПКП – пилотажно-командный прибор
- ПП ЛС – профессиональная подготовка летного состава
- ПФН – психофизиологическая напряженность
- РПЗВ – распределение и переключение зрительного внимания
- РФ – Российская Федерация
- ФАВТ – Федеральное агентство воздушного транспорта
- ЧФ – человеческий фактор

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айдаркин, Д. В. Метод объективной оценки качества пилотирования на комплексных тренажерах самолетов / Д. В. Айдаркин, С. В. Когут, С. Г. Косачевский, Л. И. Фролова // Научный вестник УИ ГА. – № 12. – Ульяновск : УИ ГА, 2020. – С. 41-47.

2. Айдаркин, Д. В. Обеспечение структурной связности модулей профессиональной подготовки летного состава с целью повышения уровня безопасности полетов : специальность 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Айдаркин Дмитрий Викторович. – Ульяновск, 2012. – 198 с.

3. Айдаркин, Д. В. Применение метода анализа иерархий для оценки качества профессиональной подготовки летного состава гражданской авиации / Д. В. Айдаркин, С. В. Когут, С. Г. Косачевский, Л. И. Фролова // Научный вестник УИ ГА.– № 11. – Ульяновск : УИ ГА, 2019. – С. 17-22.

4. Айдаркин, Д. В. Применение окулометрических измерений для совершенствования профессиональной подготовки летного состава гражданской авиации / Д. В. Айдаркин, С. Г. Косачевский, Л. И. Фролова, С. В. Когут, Н. А. Иргизов // Научный вестник УИ ГА. – № 13. – Ульяновск : УИ ГА, 2021. – С. 24-29.

5. Айдаркин, Д. В. Разработка и применение автоматизированных систем для профессиональной подготовки летного состава гражданской авиации : монография / Д. В. Айдаркин, редактор Е. А. Нестерова, компьютерная верстка И. А. Еремина. – Ульяновск : УВАУ ГА (И). – 2014. – 111 с.

6. Айдаркин, Д. В. Разработка критериев для оценки процесса формирования навыков пилотирования в ходе первоначального летного обучения пилотов / Д. В. Айдаркин, Д. В. Качан, С. Г. Косачевский // Научный вестник УИ ГА. – № 9. – Ульяновск : УИ ГА, 2017. – С. 91-97.

7. Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2019 году : Отчет Управления инспекции по безопасности полетов Федерального агентства воздушного транспорта от 30.04.2020.

8. Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2020 году : Отчет Управления инспекции по безопасности полетов Федерального агентства воздушного транспорта от 05.04.2021.

9. Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2021 году : Отчет Управления инспекции по безопасности полетов Федерального агентства воздушного транспорта от 04.04.2022.

10. Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2022 году : Отчет Управления инспекции по безопасности полетов Федерального агентства воздушного транспорта от 02.05.2023.

11. Баевский, Р. М. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) / Р. М. Баевский, Г. Г. Иванов, Л. В. Чирейкин, А. П. Гаврилушкин, П. Я. Довгалевский, Ю. А. Кукушкин, Т. Ф. Миронова, Д. А. Прилуцкий, Ю. Н. Семенов, В. Ф. Федоров, А. Н. Флейшман, М. М. Медведев // Вестник аритмологии. – 2001. – № 24. – С. 65-87.

12. Баевский, Р. М. Variability сердечного ритма в космической медицине // Материалы VI Всероссийского симпозиума, Ижевск, 11-12 октября 2016 года / Ижевск : Издательский дом «Удмуртский университет». – 2016. С. 15-19.

13. Барабанщиков, В. А. Регистрация и анализ направленности взора человека // В. А. Барабанщиков, А.В. Жегалло / Москва : Институт психологии РАН. – 2013. – 316 с.

14. Вельмисов, И. А. Показатели профессиональной деятельности авиационных специалистов / И. А. Вельмисов, С. А. Кудряков, Ю. Б. Остапченко, Е. Н. Шаповалов, Е. А. Рубцов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2018. – № 2 (19). – С. 26-37.

15. Верзилов, А. В. Применение компетентностного подхода в процессе профессиональной подготовки летного состава гражданской авиации / А. В. Верзилов, С. В. Когут, Л. И. Фролова // Гражданская авиация : XXI век : сборник материалов XI Международной молодежной научной конференции (Ульяновск, 18-19 апреля 2019 г.). – Ульяновск : УИ ГА, 2019. – С. 142-143.

16. Волков, Ал. К. Исследование профиля уязвимостей авиационного персонала к социоинженерным атакам / Ал. К. Волков, Ан. К. Волков, Л. И. Фролова // Научный Вестник МГТУ ГА. – Том 23. – № 02. – Москва : МГТУ ГА, 2020. – С. 20-32.

17. Волков, А. К. Методика актуализации сценариев тренажерной подготовки пилотов на основе нейросетевых моделей языка / А. К. Волков, З. Р. Заббаров, Л. И. Фролова // Авиакосмические технологии (АКТ-2022) : тезисы I тура XXIII Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов (23-24 июня 2022 г.). – Воронеж : ООО Фирма «Элист», 2022. – С. 68-70.

18. Волков, А. К. Оценка компетентности курсанта в процессе первоначальной летной подготовки на основе нечеткого моделирования / А. К. Волков, Л. И. Фролова, С. Г. Косачевский, З. Р. Заббаров // Научный вестник ГосНИИ ГА. - № 38 (349). – Москва : ФГУП Государственный НИИ гражданской авиации, 2022. – С. 105-115.

19. Волков, А. К. Совершенствование профессиональной подготовки летного состава с применением технологии Eye-tracking / А. К. Волков, Л. И. Фролова, Д. В. Айдаркин // Транспорт России : проблемы и перспективы : сборник материалов Международной научно-практической конференции (09–10 ноября 2021 г.). – Санкт-Петербург : ИПТ РАН, 2021. – С. 173-175.

20. Гандер, Д. В. Методологические и теоретические предпосылки психологических исследований летного труда на современном этапе развития авиации / Д. В. Гандер, А. А. Ворона, В. А. Пономаренко, М. С. Алексеенко // Психология и психотехника. – 2016. – №11(98). – С. 906-912. DOI: 10.7256/2454-0722.2016.11.22442.

21. Грешников, И. И. Моделирование элементов информационно-управляющего поля кабины и действий экипажа воздушного судна на универсальном стенде прототипирования : специальность 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Грешников Иван Игоревич. – Москва, 2022. – 134 с.

22. Грешных, А. А. Система неинвазивного мониторинга эмоционального состояния оператора / А. А. Грешных, М. Е. Комарова, С. А. Кудряков // Психолого-педагогические проблемы безопасности человека и общества. – 2012. – №2 (15). – С. 44-51.

23. Заде, Л. А. Кластеризация и кластер / Л.А. Заде, С. Рао [и др.]. – Москва : Мир, 1980. – 383 с.

24. Захарова, О. Г. Повышение эффективности профессиональной подготовки летного состава на основе совершенствования моделей и средств организации обучения : специальность 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Захарова Ольга Геннадьевна. – Ульяновск, 2014. – 149 с.

25. Зиньковская, С. М. Системное изучение человеческого фактора в опасных профессиях : специальность 19.00.01 «Общая психология, психология личности, история психологии» : диссертация на соискание ученой степени доктора психологических наук / Зиньковская Светлана Михайловна. – Москва, 2007. – 330 с.

26. Елисов, Л. Н. Анализ современного состояния проблемы тренажерной подготовки летного состава гражданской авиации / Л.Н. Елисов, С.В. Громов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 214. – С. 15-18.

27. Исследование и разработка методов профессиональной подготовки пилотов на основе оптимизации распределения внимания при эксплуатации самолетов с электронной системой отображения информации : отчет о НИР (заключ.) / Ульяновский институт гражданской авиации имени главного маршала авиации Б.П. Бугаева (УИ ГА) ; руководитель С. Г. Косачевский ; исполнитель Д. В. Айдаркин. – Ульяновск, 2017.

28. Истратов, В. А. Применение нейронных сетей для анализа признаков утомления в голосе человека / В. А. Истратов, Д. А. Леденёв, С. Г. Косачевский, Л. И. Фролова // Научный вестник УИ ГА. – № 14. – Ульяновск : УИ ГА, 2022. – С. 30-37.

29. Каплан, А. Я. Вариабельность ритма сердца и характер обратной связи по результату операторской деятельности у человека // Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова. – 1999. – Т. 49. – С. 345-350.

30. Ким, Дж.-О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.-О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка и др. ; пер. с англ. – Москва : Финансы и статистика, 1989. – 215 с.

31. Коваленко, Г. В. Летная эксплуатация. Часть II. Функционирование системы «экипаж – автоматизированное воздушное судно» : учебное пособие для вузов гражданской авиации / Г.В. Коваленко. – Санкт-Петербург : Политехника, 2012. – 354 с.

32. Коваленко, Г. В. Летная эксплуатация: учебное пособие для вузов гражданской авиации / Г. В. Коваленко, А. Л. Микинелов, В. Е. Чепига; под ред. Г. В. Коваленко. Москва : Машиностроение, 2007. – 416 с.

33. Коваленко, Г. В. Совершенствование профессиональной подготовки летного и диспетчерского составов / Г. В. Коваленко, Г. А. Крыжановский, Н. Н. Сухих, Ю. Е. Хорошавцев // Под ред. Г. А. Крыжановского. – Москва : Транспорт, 1996. – 320 с.

34. Косачевский, С. Г. Оценка эффективности методики первоначальной профессиональной подготовки пилотов для эксплуатации самолета с электронными системами отображения информации /

С. Г. Косачевский, Д. В. Айдаркин, Д. В. Качан // Научный вестник МГТУ ГА. – 2018. – Т. 21 (5) – С. 8-22.

35. Косачевский, С. Г. Проблемы реализации компетентностного подхода при первоначальной подготовке пилотов в образовательных учреждениях гражданской авиации Российской Федерации / С. Г. Косачевский, Д. В. Айдаркин, Л. И. Фролова // Вестник СПбГУ ГА. – № 3 (32). – Санкт-Петербург : СПбГУ ГА, 2021. – С. 54-64.

36. Кудряков, С. А. Профессиональная надежность в контексте подготовки современных специалистов / С. А. Кудряков, Ю. Б. Остапченко, Е. Н. Шаповалов // Теория и практика современной науки. – 2016. – № 10 (16). – С. 6-13.

37. Кузнецов, И. Б. Методология распределения внимания пилота: учебное пособие / И. Б. Кузнецов. – Санкт-Петербург : Политехника, 2012. – 167 с.

38. Кузнецов, И. Б. Экспериментальные исследования зрительной деятельности пилота при пилотировании ВС с электронной системой отображения информации / И. Б. Кузнецов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2011. – №172. – С. 122-128.

39. Кузнецов, И. Б. Результаты исследования эффективности обучения пилотов оптимизации зрительной деятельности / И.Б. Кузнецов // Глобальный научный потенциал. – 2023. – №3 (144). – С. 146–155.

40. Куравский, Л. С. Диагностика летного состава по результатам работы на авиационных тренажерах / Л. С. Куравский, П. А. Мармалюк, Г. А. Юрьев, О. Б. Беляева, О. Ю. Прокопьева // Экспериментальная психология. – 2016. – Т. 9.– №. 3. – С. 118-137.

41. Куравский, Л. С. Диагностика профессиональных навыков на основе вероятностных распределений глазодвигательной активности / Л. С. Куравский, П. А. Мармалюк, Г. А. Юрьев // Естественнонаучные и математические методы в гуманитарных исследованиях. – 2016. – № 3 (91). – С. 72-82.

42. Куравский, Л. С. Количественные критерии и концепция диагностики летного состава по данным видеоокулографии / Л. С. Куравский, Г. А. Юрьев, О. Б. Беляева, О. Ю. Прокопьева // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2015. – № 9. – С. 1-20.

43. Куравский, Л. С. Марковские модели глазодвигательной активности и их применение для тестирования профессиональных навыков / Л. С. Куравский, П. А. Мармалюк, С. Н. Баранов, В. И. Алхимов, Г. А. Юрьев, С. В. Артюхина // Информационные технологии. – 2014. – № 8. – С. 34-43.

44. Куравский, Л. С. Оценка действий экипажа самолета по данным видеоокулографии/ Л. С. Куравский, Г. А. Юрьев, В. И. Златомрежев, И. И. Грешников // Экспериментальная психология. – 2021. – Том 14.– № 1. – С. 204-222. DOI: 10.17759/exppsy.2021140110.

45. Лебедев, А. М. Разработка вероятностной математической модели надежности курсанта-пилота на основе анализа статистических данных по ошибкам, допущенным курсантами при выполнении учебных полетов / А. М. Лебедев, В. А. Неськин // Научный вестник МГТУ ГА. – № 174. – 2011. – С. 61-65.

46. Лобарь, С. Г. Совершенствование методов профессиональной подготовки членов экипажа воздушного судна к действиям в особых ситуациях полета : специальность 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лобарь Сергей Григорьевич. – Санкт-Петербург, 2002. – 216 с.

47. Макаров, А. А. Методология и методы системной организации комплексного мониторинга качества образования: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.13.10 / Макаров Алексей Алексеевич. – Москва, 1999. – 36 с.

48. Михальчевский, Ю. Ю. Метод профессиональной подготовки пилотов к принятию решений в полете в целях повышения безопасности полетов воздушных судов : специальность 05.22.14 «Эксплуатация воздушного

транспорта» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Михальчевский Юрий Юрьевич. – Санкт-Петербург, 2012. – 250 с.

49. Муравьев, И. С. Повышение эффективности методов обучения пилотов вертолетов навыкам безопасной посадки вне аэродрома в условиях неопределенности внешней информационной среды : специальность 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Муравьев Иван Станиславович. – Санкт-Петербург, 2015. – 175 с.

50. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия с самолетом Ан-148-100 RA-6170411.02.2018. – Текст : электронный // Межгосударственный авиационный комитет: [сайт]. – URL: https://mak-iac.org/upload/iblock/560/report_ra-61704.pdf.

51. О проведении онлайн конференции по новым технологиям обучения летного персонала, основанным на компетентности (CBTA/EBT) <https://mak-iac.org/press-tsentr/arkhiv-za-2020-god/117542/>.

52. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации : [утверждена указом Президента Российской Федерации 1 декабря 2016 года №642].

53. Поддьяков А. Н. Непереходность (нетранзитивность) отношений превосходства и принятие решений / А. Н. Поддьяков. // Психология. Журнал Высшей школы экономики. – 2006. – Т. 3, № 3. – С. 88-111.

54. Правила аэронавигационного обслуживания. Подготовка персонала. / Doc. 9868. – 2-е изд., перераб. – Монреаль: ИКАО, 2016. – 254 с.

55. Правила аэронавигационного обслуживания. Подготовка персонала. / Doc. 9868. – 3-е изд., перераб. – Монреаль: ИКАО, 2020. – 218 с.

56. Прангишвили, И. В. Энтропийные и другие системные закономерности : Вопросы управления сложными системы / И. В. Прангишвили. – Москва : Наука, 2003. – 428 с.

57. Прохоров, А.О. Психология состояний : учебное пособие / А. О. Прохоров, М. Е. Валиуллина, Г. Ш. Габдреева, В. Д. Менделевич. – Москва : Когито-Центр. – 2011. – 624 с.

58. Подготовка персонала на основе анализа фактических данных. Руководство по внедрению. – Монреаль - Женева: Международная ассоциация воздушного транспорта, 2014. – 223 с.

59. Подготовка персонала. Правила аэронавигационного обслуживания : Doc. 9868. – Монреаль : ИКАО, 2006. – 184 с.

60. Пономаренко, В. А. Психология человеческого фактора в опасной профессии. – Красноярск: Поликом, 2006. – 629 с.

61. Пономаренко, В. А. Безопасность полета – боль авиации. – Москва : МПСИ, Флинта, 2007. – 416 с.

62. Пономаренко, В. А. Теоретические и экспериментальные данные о профилактике безопасности полета. – Москва : Когито-центр, 2014. – 104 с.

63. Программа учебной и производственной практики подготовки коммерческих пилотов в ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева» / Министерство транспорта Российской Федерации – Федеральное агентство воздушного транспорта. – Ульяновск. – 2017. – 368 с.

64. Рисухин, В. Н. Разработка методологии повышения уровня безопасности и эффективности эксплуатации магистральных самолетов гражданской авиации на основе обеспечения надежности деятельности экипажей : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.22.14 / Рисухин Владимир Николаевич. – Москва, 2002. – 478 с.

65. Российская Федерация. Законы. Об образовании в Российской Федерации : Федеральный закон №273-ФЗ: принят Госдумой 21 декабря 2012 года : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2012 года. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174

66. Руководство по подготовке персонала на основе анализа фактических данных : Doc 9995-AN/497/ ICAO. – 1-е изд. – Монреаль : ICAO, 2013. – 170 с.

67. Руководство пользователя Gazeport Control версия 2.0. – 2014. – 10 с.

68. Саати, Т. Л. Об измерении неосязаемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений / Т. Л. Саати // Cloud of Science. – 2015. – Т. 2. № 1. – С. 5-39.

69. Саати, Т. Л. Относительное измерение и его обобщение в принятии решений. Почему парные сравнения являются ключевыми в математике для измерения неосязаемых факторов/ Т. Л. Саати // Cloud of Science. – 2016. – Т. 3. № 2. – С. 171-262.

70. Севостьянов, Д. А. Психофизиология профессиональной деятельности : учебное пособие / Новосибирский государственный аграрный университет, факультет ГМУ; автор-составитель Д. А. Севостьянов. Новосибирск : ИЦ НГАУ «Золотой колос». – 2017. – 207 с.

71. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников Соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2022 г. – Текст : электронный // Межгосударственный авиационный комитет : [сайт]. – URL: <https://mak-iac.org/upload/iblock/125/c2co11aksaur3c7ou08v0rb5c8siurrv/bp-22.pdf>.

72. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников Соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2021 г. – Текст : электронный // Межгосударственный авиационный комитет : [сайт]. – URL: <https://mak-iac.org/upload/iblock/448/cvhy5ylxegg5sghcxr6icz0irccnj2ge/bp-21.pdf>.

73. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников Соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2020 г. – Текст : электронный //

Межгосударственный авиационный комитет : [сайт]. – URL: <https://mak-iac.org/upload/iblock/1c1/bp-20-2.pdf>.

74. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников Соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2018 г. – Текст : электронный // Межгосударственный авиационный комитет : [сайт]. – URL: <https://mak-iac.org/upload/iblock/03e/bp-18-2.pdf>.

75. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников Соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2017 г. – Текст : электронный // Межгосударственный авиационный комитет : [сайт]. – URL: <https://mak-iac.org/upload/iblock/4b6/bp-17-2.pdf>.

76. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации – Текст : электронный // Федеральное агентство воздушного транспорта: [сайт]. – URL: <https://www.favt.ru/public/materials//9/d/6/8/1/9d6818dfa95927b207aa709dcf54d037.pdf>.

77. Столяров, Н. А. Результаты расчетно-экспериментальной оценки зрительной деятельности КВС на тренажере Ил-86 / Н. А. Столяров, А. Ф. Елисеев // Авиационная эргономика и подготовка летного состава : труды ГосНИИ ГА. – Москва : ГосНИИ ГА, 1985. – С. 53–61.

78. Столяров, Н. А. Экспериментальные исследования распределения и переключения зрительного внимания пилотов самолетов с EFIS / Н. А. Столяров, С. Г. Косачевский, Д. А. Локайчук, С. Д. Королев, В. В. Максимова, С. А. Калинина, А. Г. Меркулова // Научный вестник УВАУ ГА. – 2016. – Т. 8. – С. 50-56.

79. Тырсин, А. Н. Энтропийное моделирование многомерных стохастических систем : Монография. / А. Н. Тырсин. – Воронеж : Издательство «Научная книга», 2016. – 156 с.

80. Тырсин, А. Н. Исследование динамики многомерных стохастических систем на основе энтропийного моделирования / А. Н. Тырсин, О. В. Варфоломеева // Информатика и ее применение. – 2013.– Т. 7. – № 4. – С. 3-10.

81. Тырсин, А. Н. Энтропийно-вероятностное моделирование гауссовских стохастических систем / А. Н. Тырсин, И. С. Соколова // Математическое моделирование. – 2012. – Т. 24. – № 1.– С. 88-102.

82. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования - бакалавриат по направлению подготовки 25.03.03 Аэронавигация : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Министерства образования и науки РФ от 21 августа 2020 г. N 1084.

83. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования - специалитет по специальности 25.05.05 Эксплуатация воздушных судов и организация воздушного движения : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Министерства образования и науки РФ от 21 августа 2020 г. N 1086.

84. Фролова, Л. И. Диагностика схем распределения и переключения зрительного внимания пилотов при первоначальной летной подготовке / Л. И. Фролова, А. К. Волков, С. Г. Косачевский, З. Р. Заббаров // Научный вестник ГосНИИ ГА. – Москва : ГосНИИ ГА, 2023. – С. 19-27.

85. Фролова, Л. И. Комплексные показатели глагодвигательной деятельности, характеризующие распределение и переключение зрительного внимания пилота при взаимодействии с EFIS / Л. И. Фролова // Вестник СПбГУ ГА. – Санкт-Петербург : СПбГУ ГА, 2023. – С. 102-111.

86. Фролова, Л. И. Разработка и исследование нечеткой модели оценки компетентности курсанта-пилота / Л. И. Фролова, В. А. Чукин, И. В. Клириков // Состояние и основные тенденции развития гражданской авиации: сборник материалов Международной молодежной научно-практической конференции – Санкт-Петербург : СПбГУ ГА, 2023. – С. 545-552.

87. Фролова, Л. И. Сравнительный анализ различных методов оценки качества профессиональной подготовки летного состава гражданской авиации / Л. И. Фролова, С. В. Когут, Н. А. Иргизов // Гражданская авиация : XXI век : сборник материалов XIII Международной молодежной научной конференции (Ульяновск, 15–16 апреля 2021 г.). – Ульяновск : УИ ГА, 2021. – С. 236-237.

88. Фролова, Л. И. Энтропийная модель оценки и мониторинга распределения и переключения зрительного внимания пилота при первоначальной летной подготовке / Л. И. Фролова, А. К. Волков, С. Г. Косачевский, З. Р. Заббаров // Научный вестник ГосНИИ ГА. – Москва : ФГУП Государственный НИИ гражданской авиации, 2023. – С. 39-48.

89. Фролова, Л. И. Энтропийная модель мониторинга распределения и переключения зрительного внимания пилота при первоначальной лётной подготовке / Л. И. Фролова, А. К. Волков, С. Г. Косачевский, З. Р. Заббаров // Достижения науки и технологий-ДНиТ-II-2023 : сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции (27-28 февраля 2023 г.). – Красноярск : ОУ «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений», 2023. – Выпуск 7. – С. 97-102.

90. Фролова, Л. И. The problems of professional pilot training based on EBT / Л. И. Фролова, С. В. Когут, А. А. Горлова // Гражданская авиация : XXI век : сборник материалов XII Международной молодежной научной конференции (Ульяновск, 15–16 октября 2020 г.). – Ульяновск : УИ ГА, 2020. – С. 240-242.

91. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

92. Штовба, С. Д. Science and Telecommunications. – 2016. – № 1 (47). – С. 8-22.

93. Щипанов, В. В. Управление качеством подготовки инженеров на основе интегративно-дивергентного подхода к проектированию мультидисциплинарных комплексов: автореферат диссертации на соискание

ученой степени доктора технических наук : 05.13.10; 13.00.08 / Щипанов Владимир Викторович. – Москва, 2000. – 46 с.

94. Чернов, В. Г. Основы теории нечетких множеств : учебное пособие / В.Г. Чернов. – Владимир : Издательство Владимирского государственного университета, 2010. – 96 с.

95. Юрков, Н. К. Интеллектуальные компьютерные обучающие системы / Н. К. Юрков. – Пенза: Издательство ПГУ, 2010. – 304 с.

96. Ярушкина, Н. Г. Интеллектуальный анализ временных рядов : учебное пособие / Н. Г. Ярушкина, Т. В. Афанасьева, И. Г. Перфильева. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 320 с.

97. Aires, L. Industrial monitoring by evolving fuzzy systems / L. Aires, J. Araujo, A. Dourado // Joint World Congress of the International Fuzzy Systems Association and Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology. 2009. P. 1358-1363.

98. Arinicheva, O. V. Application of eye-tracking technology as a diagnostic tool for assessing flight operators. Part 1: Analyse of flight operators' attention distribution and switching using eye-tracking / O. V. Arinicheva, N. A. Lebedeva, A. V. Malishevskii // Transport Problems. 2020. Vol. 15, Issue 3. P. 167-179. DOI: 10.21307/tp-2020-042.

99. Arinicheva, O. V. Application of eye-tracking technology as a diagnostic tool for assessing flight operators. Part 2: A study of qualities important for operators in the aviation industry / O. V. Arinicheva, N. A. Lebedeva, A. V. Malishevskii // Transport Problems. 2020. Vol. 15, Issue 4, Part 1. P. 5-18. DOI: 10.21307/tp-2020-043.

100. Bezdek, J.C. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms / J. C. Bezdek.– 1st ed. – New York : Springer, 1981.– 272 p.

101. Brandt, S. Data Analysis. Statistical and Computational Methods for Scientists and Engineers / S. Brandt. – New York : Springer, 2014. – 523 p.

102. Coumel, P. Heart rate and heart rate variability / P. Coumel, P. Maison Blanche, D. Catuli // *Journal Heart Rate Variability*. – New York : Futura Publishing Company, 1995. P. 207-222.

103. Dehais, F. Embedded Eye Tracker in a Real Aircraft: New Perspectives on Pilot / Aircraft Interaction Monitoring / F. Dehais, M. Causse, J. Pastor // In *Proceedings of the 3rd International Conference on Research in Air Transportation*. – Fairfax : Federal Aviation Administration (Washington DC, USA), 2008. P. 303-309.

104. Duchowski, A. T. Eye Tracking Methodology Theory and Practice / A. T. Duchowski. – 3rd ed. – Springer : School of Computing Clemson University Clemson, SC, 2017. – 387 p.

105. Foyle, D. Human Performance Models of Pilot Behavior / D.Foyle, B. Hooey, M. Byrne, K. Corker, S. Deutsch, C. Lebiere, K. Leiden, C. Wickens // In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 49th Annual Meeting*. – Orlando, FL, USA, 26–30 September 2005. Vol. 49. P. 1109-1113. DOI: 10.1177/154193120504901202.

106. Heart Rate Variability Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and clinical Use Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology. – *Circulation*. 1996. Vol. 93, Issue 5. P. 1043-1065. DOI: 10.1161/01.CIR.93.5.1043.

107. Hess, R. Modeling Pilot Control Behavior with Sudden Changes in Vehicle Dynamics / R. Hess // *Journal Aircraft*. 2009. Vol. 46, Issue 5. P. 1584-1592. DOI: 10.2514/1.41215.

108. Holmqvist, K. Eye tracking: a comprehensive guide to methods and measures / K. Holmqvist, N. Nystrom, R. Andersson, R. Dewhurst, H. Jarodzka, J. Van de Weijer. – New York : Oxford University Press Inc., 2011. – 781 p.

109. Jirgl, M. Statistical Evaluation of Pilot's Behavior Models Parameters Connected to Military Flight Training / M. Jirgl, J. Boril, R. Jalovecky // *Energies*. 2020. Vol. 13. Issue 17. P. 1-13. DOI: 10.3390/en13174452.

110. Kosko, B. Fuzzy Systems as universal approximators / B. Kosko // In Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems. 1994. Vol. 43. No. 11. P. 1329-1333. DOI: 10.1109/12.324566.

111. Kuravsky, L. S. Assessing the Pilot Condition According to Video Oculography Data and Parameters of Brain Alpha Rhythms by Modeling the Neural Activity / L. S. Kuravsky, G. A. Yuryev, I. I. Greshnikov, V. I. Zlatomrezhev, B. Y. Polyakov, S. I. Orlova, N. E. Yuryeva // Experimental Psychology (Russia). 2022. Vol. 15, No. 2. P. 194-212. DOI: 10.17759/exppsy.2022150214.

112. Kuravsky, L. S. Mathematical foundations of flight crew diagnostics based on videooctography data / L. S. Kuravsky, P. A. Marmalyuk, G. A. Yuryev, O. B. Belyaeva, O. Yu. Prokopieva // Applied mathematical sciences. 2016. Vol. 10, No. 30. P. 1449-1466. DOI: 10.12988/ams.2016.6122.

113. Lefrançois, O. The role of Pilots' monitoring strategies in flight performance / O. Lefrançois, N. Matton, M. Causse, Y. Gourinat // In Proceedings of the 32nd Conference of the European Association for Aviation Psychology. – Cascais, Portugal, 26-30 September 2016. P. 1-12.

114. Li, W. The Development of Eye Tracking in Aviation (ETA) Technique to Investigate Pilot's Cognitive Processes of Attention and Decision-making in the Cockpit / W. Li, J. Lin, G. Braithwaite, M. Greaves // In Proceedings of the 32nd Conference of the European Association for Aviation Psychology. – Cascais, Portugal, 26-30 September 2016. P. 1-10.

115. Lounis, C. Visual scanning strategies in the cockpit are modulated by pilots' expertise: A flight simulator study / C. Lounis, V. Peysakhovich, M. Causse // PLoS ONE. 2021. Vol. 16, Issue 2. P. 1-25. DOI: 10.1371/journal.pone.0247061.

116. Lone, M. Review of pilot models used in aircraft flight dynamics / M. Lone, A. Cooke // Aerospace Science and Technology. 2014. Vol. 34, Issue 1. P. 55-74. DOI: 10.1016/j.ast.2014.02.003.

117. McRuer, D. T. Mathematical Models of Human Pilot Behavior / D. T. McRuer, E. S. Krendel // AGARD AG-188, NATO. 1974. – 92 p.

118. Merwe, K. Eye Movements as an Indicator of Situation Awareness in a Flight Simulator Experiment / K. Merwe, H. Dijk, R. Zon // *The International Journal of Aviation Psychology*. 2012. Vol. 22, Issue 1. P. 78-95.

119. Michael, J. Inferring User Knowledge Level from Eye Movement Patterns / J. Michael, J. G. Cole, L. Chang, J. B. Nicholas, Z. Xiangmin // *Information Processing & Management*. 2013. Vol. 49, No. 5. P. 1075-1091.

120. Muehlethaler, C. M. Situation Awareness Training for General Aviation Pilots using Eye Tracking / C. M. Muehlethaler, C. P. Knecht // *13th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*. – Kyoto, 30 August - 2 September 2016. – *IFAC-Papers On Line*. Vol. 49, Issue 19. P. 66–71. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.10.463.

121. Mumaw, R. J. A Simulator Study of Pilots' Monitoring Strategies and Performance on Modern Glass Cockpit Aircraft / R. J. Mumaw, M. I. Nolic, N. B. Sarter, C. D. Wickens // *Proceedings of the human factors and ergonomic society 45th annual meeting*. 2001. Vol. 45. P. 73-77. DOI: 10.1177/154193120104500216.

122. Naeeri, S. M. Investigation of Pilots' Visual Entropy and Eye Fixations for Simulated Flights Consisted of Multiple Take-Offs and Landings / S. M. Naeeri, Z. Kang, R. Palma Fraga // *Journal of Aviation Aerospace Education & Research*. 2022. Vol. 31, No.2. P. 1-33. DOI: 10.15394/jaaer.2022.1920.

123. Nauck, D. Foundations of Neuro-Fuzzy Systems / D. Nauck, F. Klawonn, R. Kruse // *Computer Science*, 1997. – 305 p.

124. Peissl, S. Eye-Tracking Measures in Aviation: A Selective Literature Review / S. Peissl, C. Wickens, R. Baruah // *The International Journal of Aerospace Psychology*. 2018. No. 28. P. 1-15. DOI: 10.1080/24721840/1514978.

125. Peysakhovich, V. The Neuroergonomics of Aircraft Cockpits: The Four Stages of Eye-Tracking Integration to Enhance Flight Safety / V. Peysakhovich, O. Lefrançois, F. Dehais, M. Causse // *Safety*. 2018. Vol. 4, Issue 1. P. 1-15. DOI: 10/3390/safety4010008.

- 126.** Pool, D. M. Pilot Equalization in Manual Control of Aircraft Dynamics / D. M. Pool, P. M. Zaal, H. J. Damveld, M. M. van Paassen, M. Mulder // In Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Antonio, TX, USA, 11-14 October 2009. P. 2480-2485.
- 127.** Risukhin, V. Controlling Pilot Error Automation / V. Risukhin.– New York : McGraw Hill, 2001. – 318 p.
- 128.** Romano, J. B. Eye Tracking in User Experience Design / J. B. Romano, A. J. Schall. – San Francisco : Elsevier, 2014. – 400 p.
- 129.** Saaty, T. L. The Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty. – New York : McGraw Hill, 1980. – 287 p.
- 130.** Safety Report. 2022 Edition. – Text : electronic // ICAO : [site]. – URL: https://www.icao.int/safety/Documents/ICAO_SR_2022.pdf.
- 131.** Study on Aeroplane State Awareness during Go-Around. – Text : electronic // BEA : [site]. – URL: <https://www.bea.aero/en/safety-studies/access-to-studies/aeroplane-state-awareness-during-go-around>
- 132.** Szabolci, R. Pilot-in-the-Loop Problem and Its Solution / R. Szabolci // Technical Sciences and Applied Mathematics. 2009. Vol. 1. P. 12-22.
- 133.** Volkov, Al. Eye-Tracking Study on Interaction of Cadet-Pilots with Electronic Flight Instrument System / Al. Volkov, L. Frolova, S. Kosachevsky, D. Aidarkin, Z. Zabbarov // AIP Conference Series : IV International Conference Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering (MIST Aerospace-IV – 2021). 2023. Vol. 2700. P. 1-8. DOI: 10/1063/5.0125010.
- 134.** Yager, R. Essentials of Fuzzy Modeling and Control / R. Yager, D. Filev. – New York: John Wiley & Sons, 1984. – 387 p.
- 135.** Zadeh, L. A. Generalized theory of uncertainty (GTU) – principal concepts and ideas / L. A. Zadeh // Computational statistic & Data analysis. 2006. No 51. P. 15-46.
- 136.** Zadeh, L. A. Fuzzy Sets / L. A. Zadeh // Information and Control. 1965. – 357 p.

137. Zadeh, L. A. Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic / L. A. Zadeh // *Fuzzy Sets and Systems*. 1997. Vol. 90. P. 111-127.

138. Ziv, G. Gaze Behavior and Visual Attention: A Review of Eye Tracking Studies in Aviation / G. Ziv // *The International Journal of Aviation Psychology*. 2016. Vol. 26, Issue 3-4. P. 75-104. DOI: 10.1080/10508414.2017.1313096.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Входные и выходные данные для разработки модели оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики

	FC	FD	RS	SI	SP	БК	VS	Instructor
Столбец1	Столбец2	Столбец3	Столбец4	Столбец5	Столбец6	Столбец7	Столбец8	Столбец9
R1	0,9794	0,9821	0,9802	615,7	0,222781902	0,027100271	0,856098	7
R2	0,9686	0,9885	0,9681	325,4	0,277131783	0,013781223	0,713023	6
R3	0,9804	0,9879	0,9848	378,7	0,273203824	0,021276596	0,802837	7
R4	0,9976	0,9890	0,9987	190,6	0,048201346	0,01521164	0,422024	9
R5	0,9648	0,9806	0,9646	396,8	0,092261905	0,034391534	0,933869	5
R6	0,9883	0,9799	0,9907	288,6	0,059994353	0,023088023	0,959091	7
R7	0,9622	0,9566	0,9598	260,9	0,09341288	0,022556391	0,836842105	5
R8	0,9898	0,9733	0,9797	319,3	0,066123188	0,057195767	0,533929	8
R9	0,9707	0,9870	0,9704	215,6	0,11489	0,120927152	0,763576159	6
R10	0,9850	0,9708	0,9847	241,2	0,07595	0,080707071	1,702597403	6
R11	0,9986	0,9891	0,9992	494,7	0,091723875	0,055484081	0,345614035	8
R12	0,9942	0,9875	0,9941	376,4	0,049516908	0,038888889	0,604444444	7
R13	0,9994	0,9896	0,9994	364,5	0,22	0,100938967	0,835	6
R14	0,9915	0,9914	0,9916	166,7	0,039272774	0,03412698	0,380952	9
R15	0,9909	0,9910	0,9906	143,2	0,092269851	0,056948357	0,570423	8
R16	0,9990	0,9995	0,9989	142,9	0,08345021	0,053894863	0,669892	8
R17	0,9945	0,9950	0,9944	178,3	0,079005636	0,037613169	0,3626851	9
R18	0,9958	0,9962	0,9959	142,6	0,079318631	0,071390231	0,273429952	8
R19	0,9983	0,9986	0,9985	140,6	0,08992174	0,057777778	0,3365	8
R20	0,9944	0,9946	0,9940	118,2	0,084508421	0,024024024	0,3642342	9
R21	0,9987	0,9992	0,9993	101,5	0,053231492	0,01021021	0,474054	9
R22	0,9992	0,9998	0,9991	121,0	0,073610347	0,026722925	0,567721519	9
R23	0,9981	0,9989	0,9986	173,2	0,06253591	0,003162	0,225110132	9
R24	0,9997	0,9990	0,9997	153,3	0,067071464	0,038314176	0,3611494	9
R25	0,9954	0,9956	0,9952	173,2	0,056253591	0,00783162	0,22110132	9
R26	0,9944	0,9956	0,9940	163,6	0,04253591	0,00783162	0,225113	9

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по ИРиИ ФГБОУ ВО УИГА
Д.В. Сулимов
« 15 » _____ 2023 г.



АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы
Фроловой Лидии Ивановны

Комиссия в составе:

председателя: декана ФЛЭиУВД В.Е. Борисова;
членов комиссии: заведующего кафедрой ЛЭиБП Е.Н. Коврижных;
профессора кафедры ЛЭиБП С.Г. Косачевского

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Фроловой Лидии Ивановны, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в отчет по научно-исследовательской работе «Оценка психофизиологического состояния пилотов при работе на летных тренажерах», выполненной в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева» в 2023 году.

При обработке результатов экспериментальных исследований были использованы разработанные в рамках диссертационных исследований:

- комплексный показатель глазодвигательной активности, характеризующий распределение и переключение зрительного внимания пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации;
- энтропийная модель оценки распределения и переключения зрительного внимания пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации;
- модель оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики.

Председатель комиссии

Члены комиссии:

В.Е. Борисов

Е.Н. Коврижных

С.Г. Косачевский



о внедрении результатов диссертационной работы
Фроловой Лидии Ивановны

Комиссия в составе:

председателя: проректора по ОР Р.Р. Файзуллин;
членов комиссии: командира летного отряда Ю.П. Соболев,
доцент кафедры ЛЭиП Д.В. Айдаркин

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Фроловой Лидии Ивановны, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в ходе проведения отборочного этапа конкурса профессионального мастерства «Транспортный лидер» среди курсантов 5 курса, обучающихся по специальности 25.05.05 Эксплуатация воздушных судов и организация воздушного движения, специализация 25.05.05_01 Организация летной работы в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева» в 2023 году.

При обработке результатов практического этапа отборочного конкурса в тренажерном центре были использованы разработанные в рамках диссертационных исследований:

- комплексный показатель глазодвигательной активности, характеризующий распределение и переключение зрительного внимания пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации;
- энтропийная модель оценки распределения и переключения зрительного внимания пилота при взаимодействии с электронными системами отображения информации;
- модель оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики.

Председатель комиссии

Члены комиссии:

Р.Р. Файзуллин

Ю.П. Соболев

Д.В. Айдаркин