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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева» (ФГБОУ ВО УИ ГА)

Научный руководитель: почетный работник высшего профессионального образования РФ, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Летной эксплуатации и безопасности полетов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева»
Косачевский Сергей Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, главный конструктор средств организации воздушного движения АО «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз-Антей» – Обуховский завод»
Плясовских Александр Петрович

кандидат технических наук, доцент, советник генерального директора АО «НПО «СПАРК»,
Рыбкин Павел Николаевич

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования **«Московский государственный технический университет гражданской авиации»**

Защита состоится «16» февраля 2024 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 42.2.002.01 на базе ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова по адресу: 196210, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова и на сайте: https://spbguga.ru/files/Dissovet/42.2.002.01/Dissertacia_Frolova.pdf

Автореферат разослан «11» декабря 2023 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета 42.2.002.01
кандидат технических наук, доцент Баранов Н.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важной тенденцией в развитии современных воздушных судов является высокая степень автоматизации управления, целью которой является уменьшение негативного влияния человеческого фактора на безопасность полетов. Автоматизация коренным образом изменила деятельность членов летных экипажей воздушных судов с высокой степенью автоматизации управления – вместо сенсомоторной деятельности на передний план вышла процедурная деятельность. Очевидно, что изменение характера профессиональной деятельности требует соответствующего изменения процесса профессиональной подготовки пилотов, в основе которого должны лежать рекомендованные Международной организацией гражданской авиации ICAO «Компетентностная система подготовки и оценки» (CBTA – Competency Based Training and Assessment) и «Подготовка на основе анализа фактических данных» (EBT – Evidence Based Training). Пути реализации данного подхода активно обсуждаются мировым авиационным сообществом, при этом основное внимание 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.

Изучение действующей Программы учебной и производственной практики подготовки коммерческих пилотов в образовательных учреждениях гражданской авиации России 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 глазодвигательной активности (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.

Диссертационная работа 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 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, C. M. Muehlethaler, W. Li, S. Peissl, G. Ziv.

Основные принципы проектирования моделей на основе нечеткой логики и энтропийного анализа изложены в работах M. Sugeno, B. Kosko, С. Д. Штовба, А. Н. Тырсина.

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 энтропийную модель оценки РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS.

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

Научная новизна работы

Научной новизной 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 приблизительно 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 приблизительно 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 приблизительно на 15 %;
- автоматизировать процесс анализа качества техники пилотирования и обработки данных ГДА пилотов и тем самым повысить их доступность для летно-инструкторского состава;

- повысить эффективность процесса формирования рационального РПЗВ 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 – CBTA/EBT 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 для совершенствования процесса профессиональной подготовки пилотов и проведения научных исследований.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

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. Обоснована достоверность полученных результатов исследования.

В первой главе рассмотрены вопросы взаимосвязи качества профессиональной подготовки летного состава гражданской авиации (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 человеческого фактора, остается практически постоянным.

Проведенный анализ стандартов и рекомендуемой практики ICAO позволил сделать вывод о том, что перспективным направлением исследований является разработка моделей оценки качества техники пилотирования пилотов на основе CBTA/EBT. Качественная подготовка в рамках CBTA/EBT 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 вариационной кардиоинтервалометрии (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.

Делаются выводы по первой главе и ставится задача исследования.

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 $Y = (Y_1, Y_2, ..., Y_m)^T$. Отдельные компоненты вектора $Y_i, (i=1,2,...,m)$ 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 $Y = (Y_1, Y_2, ..., Y_m)^T$ 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:

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

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

Исходя из анализа составляющих модели (2) можно сделать вывод о том, 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:

$$\mathbf{d}_{fg} = \int_{t_0}^{t_1} |f(t) - g(t)| dt \Big/ \int_{t_0}^{t_1} g(t) dt, \quad (4)$$

где $f(t)$ – функция, описывающая наблюдаемые значения некоторого параметра полета 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; 2) общая длительность фиксаций FD; 3) общее количество возвратных саккад RS.

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

$$SI = \frac{A_{Mo}}{2Mo(\Delta\text{МСИ})}, \quad (5)$$

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

Mo – мода распределения;

ΔМСИ – 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 курсанты специализации «Организация летной работы» и пилоты-инструкторы 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 электрокардиограммы 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 в соответствии с моделью (1) 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 курсантов (рис. 2).

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.

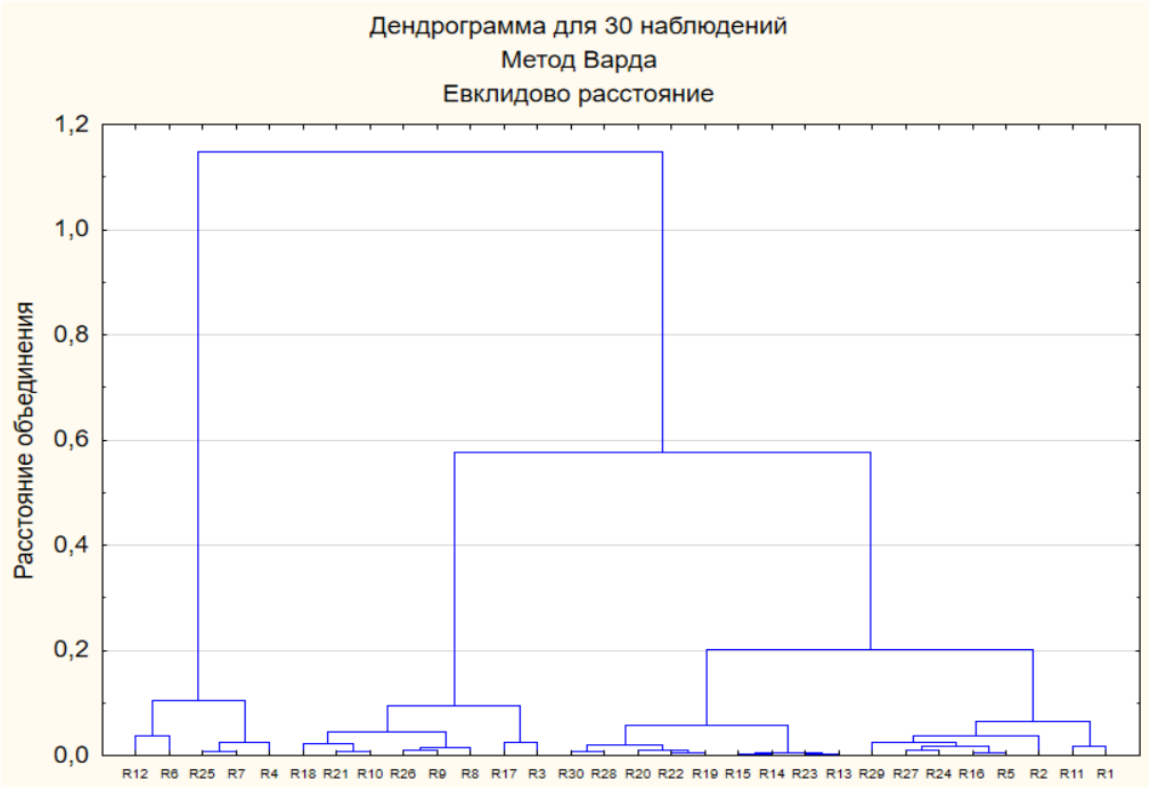


Рисунок 1 – Дендрограмма наблюдений

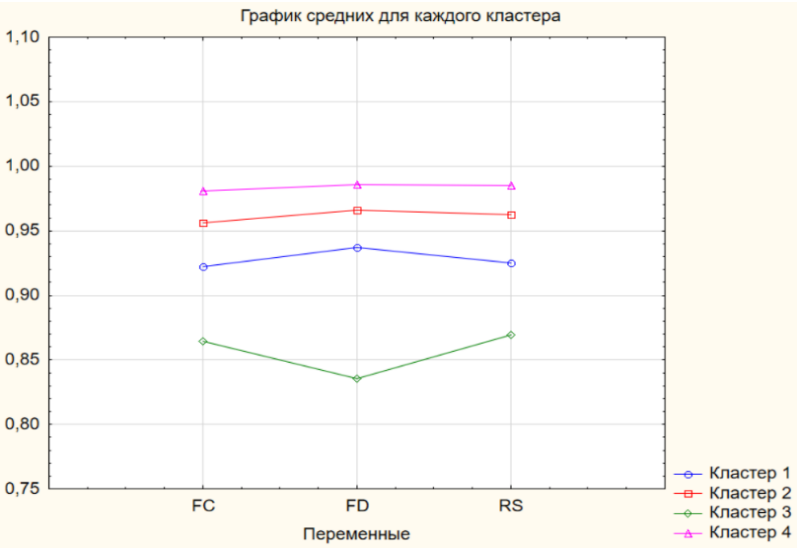


Рисунок 2 – График средних значений кластеров

<u>Апробация и исследование энтропийной модели оценки РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS</u>

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 $Y^{к} = (Y_1^{к}, Y_2^{к}, Y_3^{к})$, где

$Y_1^{к}$ – комплексный показатель, характеризующий общее количество фиксаций (FC);

$Y_2^{к}$ – комплексный показатель, характеризующий общую длительность фиксаций (FD);

$Y_3^{к}$ – 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

Испытуемые	**Группа 1**		
	Этап 3		
	Y_1	Y_2	Y_3
R1	0,9202	0,8600	0,9194
R2	0,9705	0,9727	0,9708
R3	0,9657	0,9745	0,9686
R4	0,9175	0,9393	0,9166
R5	0,9515	0,9464	0,9516
R6	0,9931	0,9947	0,9927
R7	0,9985	0,9998	0,9985
R8	0,9871	0,9893	0,9887
R9	0,8761	0,8640	0,8766
R10	0,9442	0,9716	0,9420
R11	0,9754	0,9911	0,9751
R12	0,9898	0,9944	0,9901
R13	0,9771	0,9793	0,9687
R14	0,9525	0,9564	0,9536
R15	0,9342	0,9616	0,9320

Испытуемые	**Группа 2**		
	Этап 3		
	Y_1	Y_2	Y_3
R16	0,9756	0,9839	0,9764
R17	0,9672	0,9437	0,9693
R18	0,9757	0,9853	0,9754
R19	0,9616	0,9684	0,9672
R20	0,9884	0,9929	0,9894
R21	0,9695	0,9738	0,9644
R22	0,9892	0,9977	0,9890
R23	0,9876	0,9948	0,9879
R24	0,9457	0,9216	0,9464
R25	0,8971	0,8833	0,8952
R26	0,9765	0,9858	0,9796
R27	0,9701	0,9796	0,9700
R28	0,9865	0,9958	0,9896
R29	0,9646	0,9664	0,9682
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:

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

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

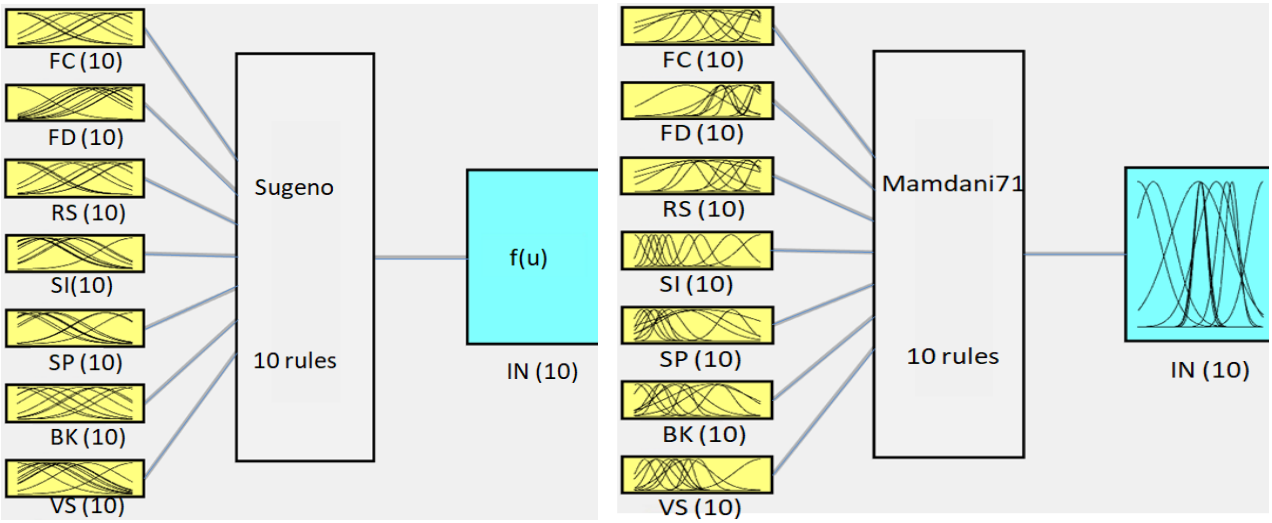
$$-grad(f) = -(2(r_{23}r_{31} - r_{12}), 2(r_{12}r_{23} - r_{13}), 2(r_{12}r_{13} - r_{23})) =$$

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

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 возвратных саккад, необходимо также увеличить и длительность фиксаций на данной области, уменьшая в свою очередь количество фиксаций.

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.

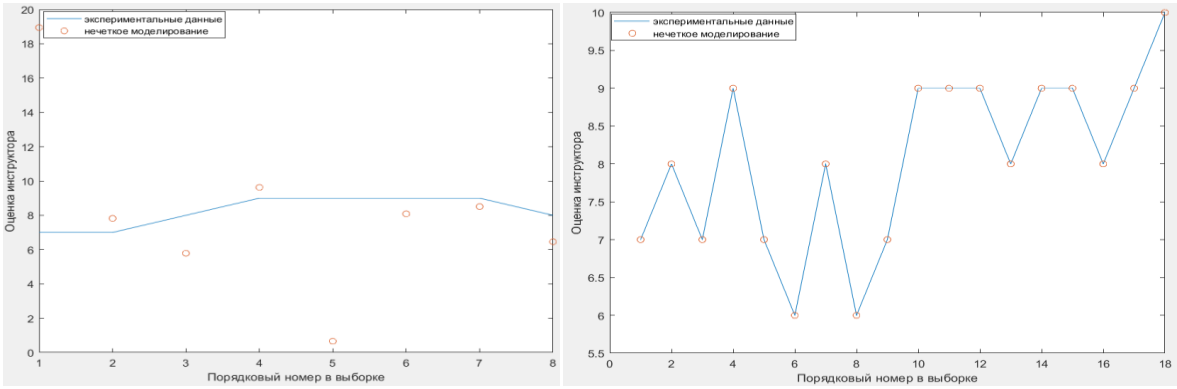


а) б)

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.



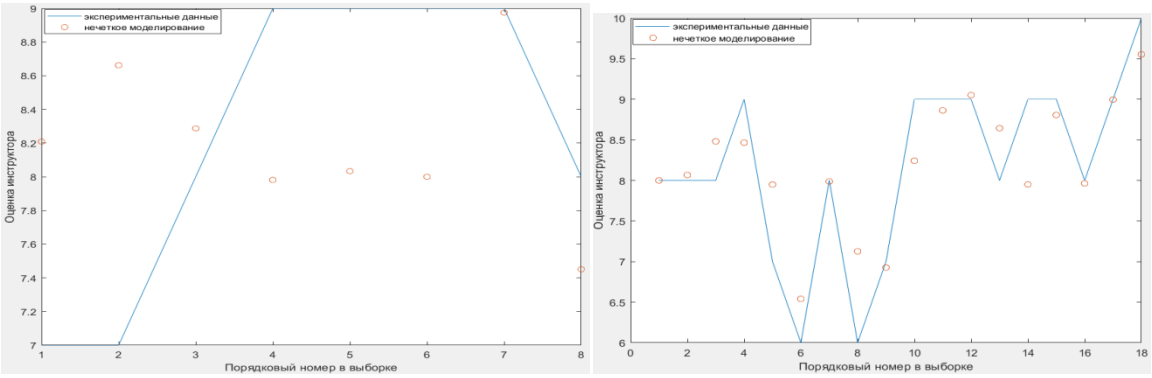
а) б)

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.

Разработанная модель Сугено использовалась для оценки качества техники пилотирования курсантов при выполнении эксперимента на тренажере, целью которого являлось сравнение надежности полученных с ее помощью оценок с оценками, выставленными пилотами–инструкторами в соответствии с действующей Программой

учебной и производственной практики подготовки коммерческих пилотов. Необходимо отметить, что в эксперименте 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 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:

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

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:

$$T_{\text{набл}} = \frac{\left|r_{xy}\right| \cdot \sqrt{k}}{\sqrt{1 - r_{xy}^2}},$$

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

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

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

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.

Таблица 4 – 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
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

Для получения выводов о количественной оценке тесноты линейной корреляционной связи была использована шкала Чеддока (табл. 5), что позволило в первом случае интерпретировать тесноту связи как среднюю, а во втором как сильную.

Таблица 5 – 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, выставленных пилотом-инструктором и полученных с помощью разработанной модели, возрастает приблизительно на 15% при оценивании техники пилотирования в турбулентной атмосфере по сравнению с оценками в спокойной атмосфере.

Можно предположить, что это различие связано с недостаточной сформированностью у курсантов навыков рационального РПЗВ при выполнении полета по приборам. Это наиболее сильно проявляется в усложненных условиях, в частности, в условиях турбулентной атмосферы.

Результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что использование пилотом-инструктором предложенной модели позволяет повысить надежность оценки качества техники пилотирования пилота при первоначальной летной подготовке приблизительно на 15%, что подтверждает практическую значимость разработанной модели.

Таким образом, разработанные в рамках диссертационного исследования комплексный показатель ГДА, характеризующий РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS, энтропийная модель оценки РПЗВ пилота при взаимодействии с EFIS, а также модель оценки качества техники пилотирования на основе нечеткой логики позволяют комплексно подходить к задаче оценки качества техники пилотирования пилота, обеспечивая ряд преимуществ по сравнению с существующим подходом, утвержденным Программой учебной и производственной практики подготовки коммерческих пилотов в образовательных учреждениях гражданской авиации России. Предложенные решения позволяют не только определить факт соответствия пилота требованиям, предъявляемым к нему, но также позволяют выявить слабые места в подготовке пилотов с последующей повторной отработкой соответствующих элементов, что является важной составляющей обеспечения безопасности полетов.

Не вызывает сомнений, что в ближайшей перспективе многогранная и достаточно сложная деятельность человека-оператора сложных эргатических систем, к которым можно отнести и профессиональную деятельность пилота, может быть всесторонне оценена только человеком, имеющим более высокий уровень подготовки. Поэтому, при проведении исследований ставилась задача разработки «электронного помощника» инструктора, но никак

не замены его автоматизированными средствами контроля. Данная задача видится перспективной для дальнейшего продолжения исследований и создания инноваций в виде систем искусственного интеллекта.

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, учитывающий показатели, характеризующие точность выдерживания заданных параметров полета, комплексный показатель ГДА и показатель психофизиологической напряженности испытуемых и позволяющий повысить надежность оценки качества техники пилотирования пилота при первоначальной летной подготовке приблизительно 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.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные публикации в изданиях, входящих в международную базу данных «Scopus» (1):

1. 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). Vol. 2700. P. 1-8. DOI: 10/1063/5.0125010.

Научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (6):

2. Комплексный показатель распределения и переключения зрительного внимания пилота при работе с электронными системами отображения информации / **Л. И. Фролова** // Вестник СПбГУ ГА. – № 3 (32). – Санкт-Петербург : СПбГУ ГА, 2023. – С. 102-111.

3. Энтропийная модель оценки и мониторинга распределения и переключения зрительного внимания пилота при первоначальной лётной подготовке / **Л. И. Фролова**, А. К. Волков, С. Г. Косачевский, З. Р. Заббаров // Научный вестник ГосНИИ ГА. – № 42. – Москва : ФГУП Государственный НИИ гражданской авиации, 2023. – С. 39-48.

4. 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 : ФГУП Государственный НИИ гражданской авиации, 2023. – С. 19-27.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

Публикации в трудах международных и российских конференций (8):

8. 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.

9. 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.

10. Применение энтропии для оценки распределения зрительного внимания пилота в процессе первоначальной летной подготовки / **Л. И. Фролова** // Гражданская авиация : XXI век : сборник материалов XIV Международной молодежной научной конференции (Ульяновск, 14–15 апреля 2022 г.). – Ульяновск : УИ ГА, 2022. – С. 200-201.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

Публикации в прочих изданиях (4):

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

Печатается в авторской редакции.
Подписано к печати 07.12.2023. Формат бумаги 60x90 1/16.
Тираж 100. Уч-изд.л. 1,44. Усл.печ.л. 1,5. С 135. Заказ 474.
Тип. Университета ГА. 196210 С.-Петербург, ул. Пилотов, д. 38