

На правах рукописи

УДК: 629.7:004.51



Грешников Иван Игоревич

**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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный психолого-педагогический университет» (МПШУ)

Научный руководитель: **Куравский Лев Семёнович**,
доктор технических наук, профессор, декан факультета информационных технологий, зав. кафедрой прикладной информатики и мультимедийных технологий по совместительству

Официальные оппоненты: **Аристов Антон Олегович**
доктор технических наук, доцент национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Колбин Илья Сергеевич
кандидат физико-математических наук, научный сотрудник федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА), 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Защита состоится «24» ноября 2022 года в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=165678

Автореферат разослан: «_____» _____ 2022 г.

Отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации, просим отправлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Отдел Ученого и диссертационных советов МАИ.

Учёный секретарь диссертационного совета
24.2.327.03, д.т.н., доцент

А. В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Оптимизация ИУП – сложный и многоступенчатый процесс, предполагающий большой объём исследовательской работы по созданию удобного и интуитивно понятного человеко-машинного интерфейса. Для внедрения перспективных компонентов ИУП на новый тип воздушного судна (ВС) необходим предварительный анализ существующих решений и нормативной базы через призму применения на конкретном ВС в контексте функциональной необходимости и сертификационных требований. Чем совершеннее ИУП, тем меньше психологическая нагрузка на экипаж и ниже вероятность негативного проявления человеческого фактора.

Важную роль при оптимизации ИУП играет процесс эргономической оценки. Все решения, принимаемые в рамках разработки концепции ИУП и апробации прототипов кабины, должны проходить оценку лётных экспертов, имеющих соответствующий уровень квалификации. Однако проблема заключается в том, что зачастую эксперты высказывают противоположные мнения, а иногда их выводы содержат внутренние противоречия. Для решения данной проблемы автором предлагаются специально разработанный математический метод и ПО, объединённые в комплекс эргономических оценок ИУП. При помощи данных методов обеспечиваются проведение последовательной и согласованной эргономической оценки и получение обоснованных результатов.

Под оптимизацией понимается разработка нового, более совершенного ИУП. Процесс оптимизации включает анализ существующих решений; формирование концепции перспективного ИУП, на базе которой разрабатывается ПО для стендовой базы; апробацию данной концепции с участием лётных экспертов с использованием специальных математических методов и ПО; принятие или коррекцию предлагаемой концепции.

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

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

По сравнению с субъективными подходами, опирающимися на экспертные оценки, преимущество предлагаемого решения состоит в возможности получения количественных численных оценок эргономического качества элементов ИУП и оптимизации элементов ИУП в автоматическом режиме.

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

В работах Кукушкина Ю.А. и Еремина А.Л. анализ уровня подготовки строится на определении резервов внимания пилота. При всех достоинствах данного подхода стоит отметить, что такая оценка носит косвенный характер. В монографии Пономаренко А.В., помимо оценки резервов внимания, представлен метод, позволяющий оценивать показатели уровня подготовки экипажа на отдельных режимах полёта, основанный на вычислении отклонения отдельных параметров от эталонных значений. В то же время автор отмечает важность решения проблемы интегральной оценки данных показателей на всех возможных режимах.

Предлагаемый метод анализа уровня подготовки экипажа строится на основе анализа наборов временных рядов, описывающих динамику параметров ВС и анализа ГДА пилотов. Методы дискриминации временных рядов (Lacaille J., Eerland W.J.) имеют существенные ограничения для их применения на практике, особенно при анализе полётных данных. В случае анализа показателей ГДА используется малоэффективное сравнение тепловых карт (Барабанщиков В.А., Жегалло А.В.). При сравнении динамики изменения параметров бортовых систем применяется непосредственное сравнение временных рядов, критически чувствительное к временным сдвигам (Wei J., Wilson A.).

Преимущество предлагаемых автором методов состоит:

– в снятии проблемы точной синхронизации начала сравниваемых фрагментов полётов, не позволявшей ранее выполнять оценки в автоматическом режиме (за счёт перехода в пространство вейвлет-коэффициентов допускаются сдвиги до 20-25% от продолжительности фрагмента, ранее допускалось не более 5%, что требовало подготовки данных в ручном режиме и идентификации полиномов высоких степеней во временной области);

– в возможности выявления причин аномально выполненных упражнений, используя содержательную интерпретацию относительных вкладов лётных параметров, которыми

обусловлены отличия оцениваемого фрагмента полёта от эталонного, в соответствующую общую оценку различий в заданной метрике;

– в допустимости использования для построения оценок малых выборок лётных манёвров (пилотный анализ требует всего 60 упражнений; применявшиеся ранее подходы требовали порядка 500);

– в наличии вероятностных критериев для отбора аномально выполненных фрагментов полётов, построенных на основе дискриминантного анализа (ранее применялись только ненормированные количественные оценки в так называемой косинус-метрике);

– в возможности решать задачи в реальном времени (применявшиеся ранее подходы требовали недельной ручной работы, причём для ограниченного набора лётных манёвров).

Учитывая большой объём когнитивной и эмоциональной нагрузки, связанной с пилотированием, а также груз ответственности за пассажиров, можно однозначно утверждать, что оптимизация ИУП и анализ уровня подготовки пилотов являются важными и актуальными задачами, напрямую связанными с обеспечением безопасности полётов.

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

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

Объект исследования: ИУП кабины ВС и подготовка пилотов.

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

Задачи работы:

- (1) разработка новых методов анализа уровня подготовки пилотов, основанных на использовании эмпирической базы данных паттернов лётных упражнений, состоящей из параметров бортовых систем и ГДА;
- (2) разработка нового метода объективной оценки и оптимизации ИУП, основанного на определении оптимального взаимного расположения элементов индикации с применением средств видеоокулографии;
- (3) разработка комплексов программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов, основанных на разработанных методах и интеграции данных программ в универсальный стенд прототипирования (УСП) кабины пилотов.

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

Научная новизна работы состоит:

- (1) в создании математической модели, представляющей полёт ВС в пространстве вейвлет-коэффициентов, вычисленных по репрезентативным параметрам, с использованием евклидовой метрики и метрики Кохонена для сравнения фрагментов полётов;
- (2) в создании математической модели, представляющей ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения взора;
- (3) в разработке численного метода определения взаимного расположения элементов индикации, согласованного с эталонным стационарным распределением частот пребывания в зонах фиксации взора, путём оптимизации матрицы вероятностей переходов между ними с последующим двумерным шкалированием оценок вероятностей указанных переходов;
- (4) в предложении концепции комплексов программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов.

Положения, выносимые на защиту:

- (1) математическая модель, представляющая полёт ВС в пространстве вейвлет-коэффициентов, вычисленных по репрезентативным параметрам, обеспечивающая оценку уровня подготовки экипажа на УСП;
- (2) математическая модель, представляющая ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения взора, обеспечивающая оценку уровня их подготовки на УСП;
- (3) численный метод определения взаимного расположения элементов индикации, согласованного с эталонным распределением частот пребывания в зонах фиксации взора, путём оптимизации матрицы вероятностей переходов между ними;
- (4) комплексы программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов, установленные на УСП ГосНИИАС.

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

- (1) использовать разработанные методы, математический аппарат и комплексы программ для анализа уровня подготовки пилотов любого ВС;
- (2) использовать разработанные методы, математический аппарат и комплексы программ для проведения эргономической оценки ИУП кабины ВС и любого другого ИУП;
- (3) применять разработанные комплексы программ в составе стендов прототипирования ИУП; часть программных компонентов может быть использована в составе бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) самолёта с минимальными доработками.

Достоверность результатов работы подтверждается:

- (1) сопоставлением результатов вычислительных экспериментов и данных эмпирических исследований, включая проверку гипотез по статистическим критериям согласия;
- (2) проведёнными оценками разработанных методов и ПО лётными экспертами ФГУП «ГосНИИГА» и ФГУП «ПИЦ».

Апробация результатов.

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

Реализация и внедрение результатов работы.

Работа проводилась на базе УСП кабины пилотов, созданного в ФАУ «ГосНИИАС», где автор работает в должности начальника сектора. Разработанные комплексы программ использовались при прототипировании кабин самолётов MC21 и SSJNEW, а также в ряде НИР, проведённых в рамках соответствующих государственных контрактов. Разработанный комплекс эргономических оценок внедрён на стенде прототипирования самолёта SSJNEW.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (110 наименований). Общий объём работы составляет 134 страницы, включая таблицы и рисунки.

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, дана общая характеристика работы.

В главе 1 приведён анализ современных критериев и методов эргономической оценки и анализ исследований в области оценки состояния и уровня подготовки пилотов. Сделаны выводы о важности задачи оптимизации ИУП кабины, обусловленной необходимостью снижения нагрузки на экипаж и, как следствие, повышения безопасности полёта. Также отмечена необходимость создания надёжных средств, позволяющих оценивать уровень подготовки пилотов и, при необходимости, отстранять от управления ВС, возложив данные функции на автоматику, что особенно важно в контексте перехода к одночленному экипажу.

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

Уровень подготовки пилота определяется на основе интегральных сравнений исследуемых фрагментов полёта с сопоставимыми фрагментами (паттернами) из специализированной базы данных, которые характеризуют выполнение лётных упражнений экипажами с различным уровнем подготовки. Паттерны представляют характерные фрагменты полётов с помощью наборов временных рядов, которые содержат значения параметров, определяющих движение и состояние систем ВС. На исследуемый фрагмент полёта переносятся характеристики паттерна, ближайшего в заданной метрике. Определение ближайшего паттерна сопровождается распознаванием аномального пилотирования и параметров полёта, характеризующих ошибки экипажа. Аномальность фрагментов полёта

выявляется через принадлежность к заданным кластерам паттернов. При этом выявляются параметры, ответственные за принадлежность к определённым кластерам, а также за различия между паттернами.

Информация, собранная в специализированной базе данных, включает в себя временные ряды, содержащие значения параметров выполнения упражнений, а также комментарии с экспертными оценками, содержащими данные об ошибках экипажа в терминах параметров деятельности.

Действия, реализуемые пилотами с разным профессиональным качеством выполнения, а также фрагменты полётов разных типов отделяются друг от друга в достаточной степени в многомерном пространстве шкалирования, сформированном с помощью специальной процедуры в подобранных метриках. Это утверждение опирается на результаты проведённых вычислительных экспериментов. Результат решения задачи определяется выбором паттернов.

Необходимый результат достигается применением сложной комбинации процедур анализа случайных процессов и многомерного статистического анализа. «Интеллект» средств распознавания содержится в эмпирических данных, представленных паттернами, и может гибко изменяться по мере их накопления. Эмпирические данные включают комбинированную информацию о динамике полёта и управлении ВС, распределении визуального внимания пилотов, а также экспертные оценки результатов выполнения лётных упражнений.

Используя результаты применения метода главных компонент, многомерного шкалирования и кластерного анализа параметров полёта и траекторий движения глаз пилотов, формируются кластеры фрагментов полётов различных типов и качества исполнения, которые используются для классификации манёвров в пространстве шкалирования и выявления некорректных действий экипажа.

Итоговые заключения о принадлежности к целевым кластерам, связанным с типами упражнений и качеством пилотирования, строятся на основе вычисления вероятностного профиля, что обеспечивается средствами дискриминантного анализа. Для содержательного анализа причин некорректного выполнения манёвров детализируются относительные вклады параметров полёта в элементы матриц взаимных расстояний между фрагментами полётов в заданной метрике, что позволяет определять параметры, характеризующие ошибки пилота с целью выявления их причин.

Предлагается два подхода к оценке уровня подготовки экипажа: 1) с использованием математической модели, представляющей полёт ВС в пространстве вейвлет-коэффициентов, вычисленных по репрезентативным параметрам; 2) с использованием математической модели, представляющей ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения взора. Данные подходы к моделированию обеспечивают представления движения ВС и ГДА пилотов, позволяющие обоснованно оценивать уровень их подготовки. Они имеют общую основу и отличаются применением различных метрик в зависимости от вида анализируемых

параметров. Структура данных методов представлена на рисунке 1 (зелёным выделены компоненты, связанные с моделью полёта ВС в пространстве вейвлет-коэффициентов, синим – компоненты, связанные с моделью ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения взора).



Рисунок 1. Оценка уровня подготовки пилотов на основе анализа параметров полёта и данных ГДА, поступающих в процессе выполнения лётных упражнений

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

Заданы:

- исследуемый фрагмент полёта, представляющий временные ряды значений параметров полёта, взятых с фиксированным временным шагом, который получен в реальном времени из текущей полётной информации с помощью динамического «временного окна»;

- специализированная база данных, содержащая классифицированные паттерны нормальных и anomalously фрагментов полётов, соответствующих различным фазам полёта и типам лётных манёвров, и включающая содержательные интерпретации этих паттернов с точки зрения оценки уровня подготовки экипажа.

Следует определить:

- содержательную интерпретацию и атрибуты фрагмента полёта из специализированной базы данных, ближайшего к исследуемому фрагменту в заданной метрике, приписав эту интерпретацию и атрибуты исследуемому фрагменту полёта.

Содержание подхода:

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

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

$$Cx = \lambda x,$$

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

3) Перевести временные ряды B_i ($i=1, \dots, M$) в наборы соответствующих им вейвлет-коэффициентов $W(B_i)$ с помощью кратномасштабного анализа, сформировав прямоугольную матрицу результатов вейвлет-преобразований $W(B) = [W(B_1), W(B_2), \dots, W(B_M)]$.

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

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

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

4) Приписать исследуемому фрагменту полёта интерпретацию (нормальность/аномальность и т.д.), соответствующую выявленному ближайшему классифицированному паттерну.

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

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

Для содержательной интерпретации ошибок пилотирования вычисляется распределение относительных вкладов $\{\rho(W(Bi), W(BiЭ)) / \rho(W(B), W(BЭ))\}_{i=1}^M$, наиболее значимых с точки зрения анализа лётных параметров, которыми обусловлены отличия оцениваемого фрагмента полёта от заданного эталонного (с индексом Э) выполнения манёвра данного типа, в соответствующую общую оценку расстояния в заданной метрике.

На рисунке 2 представлено схематическое описание рассматриваемого метода и графические интерфейсы ПО, разработанного на его основе.

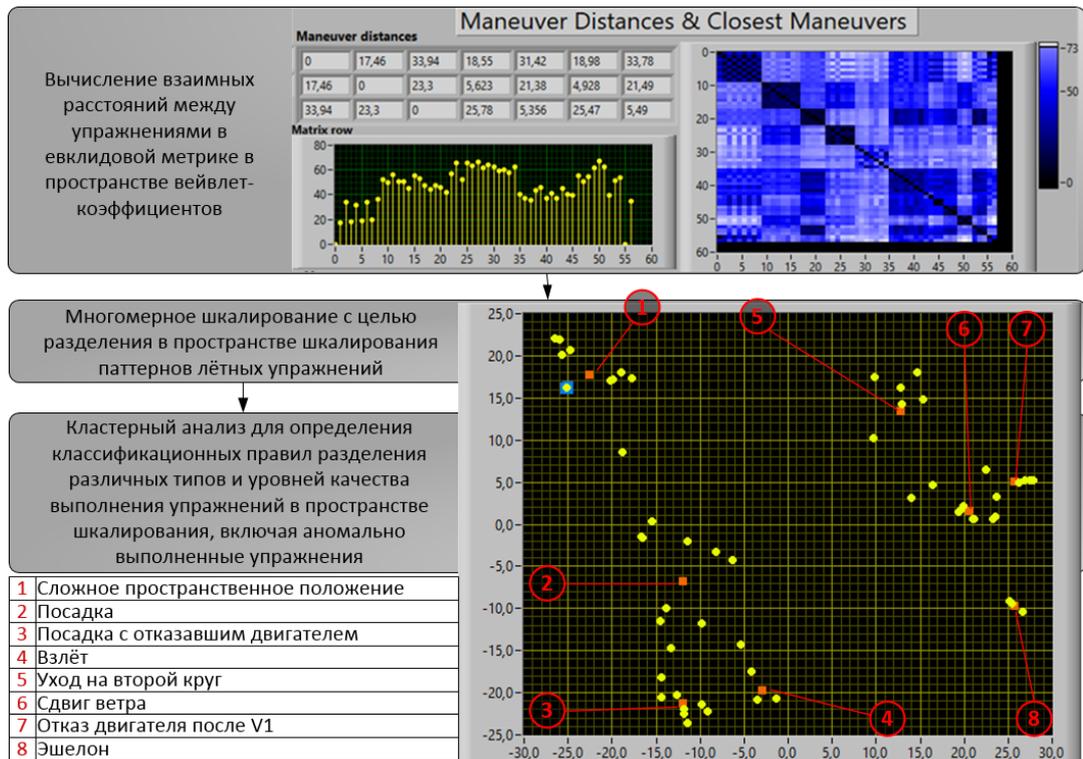


Рисунок 2. Процедура определения принадлежности текущего фрагмента полёта к группе наиболее близких паттернов

Особенности метода моделирования ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения взора состоят в следующем. Динамика вероятностей пребывания в состояниях модели как функций дискретного времени определяется следующим матричным уравнением:

$$p(t + 1) = M_1 p(t),$$

где t – дискретное время; $0 \leq t \leq T$; $t, T \in N$; T – конечный момент времени; N – множество натуральных чисел; вектор $p(t) = (p_0(t), \dots, p_n(t))^T$ представляет вероятности пребывания в состояниях модели в момент времени t ; n – число состояний марковского процесса; $M_1 = \|m_{ij,l}\|$ – стохастическая матрица вероятностей переходов между состояниями цепи Маркова порядка n , в которой $m_{ij,l}$ – вероятность перехода из состояния j в состояние i для исследуемого фрагмента полёта l .

Идентификация рассмотренных марковских моделей для исследуемых фрагментов $l \in \{0, \dots, z\}$ выполняется, используя экспериментальные данные о частотах переходов из одной

зоны индикации в другую. Каждый исследуемый фрагмент l имеет свою идентифицированную матрицу M_l .

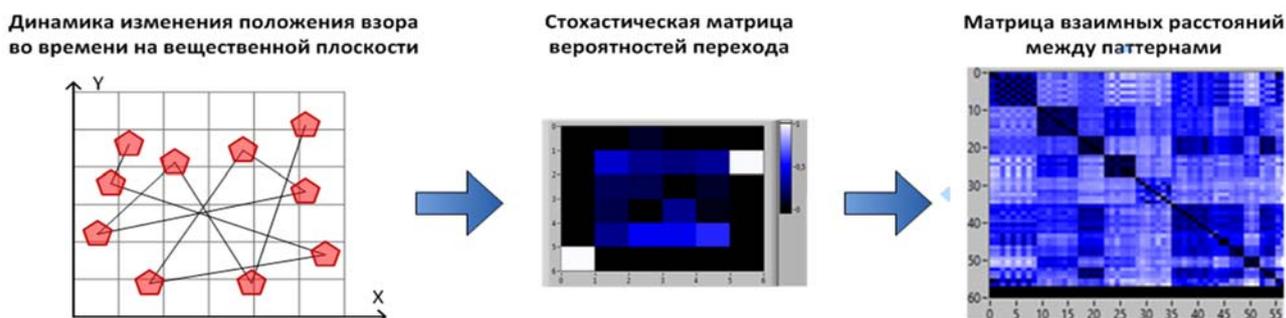


Рисунок 3. Представление динамики изменения положения взора через стохастическую матрицу вероятностей перехода между зонами индикации

Для вычисления вероятностей $P(v_r|C_l)$ прохождения последовательности из r состояний марковского процесса при условии принадлежности к исследуемому фрагменту l , где C_l – факт принадлежности к исследуемому фрагменту l , а v_r – событие, представляющее собой прохождение последовательности из r состояний, используются элементы матриц M_l :

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

Величины $\ln P(v_r|C_l)$ применяются в качестве оценок правдоподобия прохождения последовательности из r состояний при условии принадлежности к исследуемому фрагменту l . Использование оценок правдоподобия вместо соответствующих вероятностей при анализе динамики прохождения состояний модели обусловлено низкими порядками указанных вероятностей, которые неудобны для машинных вычислений.

Для регистрации ГДА применяются бесконтактные технические средства – айтрекеры, позволяющие исключить ощущение дискомфорта у пилота.

В главе 3 представлен метод определения взаимного расположения элементов индикации.

Расположение зон индикации обусловлено следующими *опытными фактами*:

- высокая частота взаимных переходов между элементами индикации свидетельствует о необходимости одновременного получения информации с соответствующих зон, а переход между геометрически близкими зонами индикации выполняется быстрее;

- близость зон индикации позволяет при считывании информации с одного индикатора контролировать за счёт периферического зрения другой, обеспечивая одновременный контроль информации, необходимой для выполнения манёвра, и уменьшая время её считывания;

- распределение времени пребывания в зонах индикации является устойчивой наблюдаемой характеристикой, определяемой, в первую очередь, типом лётного манёвра,

уровнем подготовки пилотов и взаимным расположением зон индикации, но слабо зависящей от вариативности индивидуальных особенностей перемещения взора;

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

Перемещения взора характеризуются последовательностями просмотренных зон индикации, которые интерпретируются как последовательности состояний. Для моделирования динамики перемещений взора по зонам индикации используются цепи Маркова, в которых указанным зонам соответствуют определённые состояния, образующие полную систему. Пребывание в состоянии определяется нахождением взора в соответствующей ему зоне индикации.

Такт дискретного времени – в зависимости от объёма накопленных эмпирических данных – либо задаётся определённым (и, как правило, небольшим) интервалом времени, либо соответствует интервалу времени, определяющему переход от одной фиксации взора к другой. Вероятности переходов между состояниями являются параметрами модели.

Динамика вероятностей пребывания в состояниях марковской модели определяется приведённым выше матричным уравнением.

Заданы:

– множество n элементов индикации, которые рассматриваются как зоны фиксаций взора (зоны индикации), например: высота, угол атаки, пространственное положение, приборная и вертикальная скорости;

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

Следует определить:

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

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

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

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

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

Задача (1) решается численным методом, разработанным в рамках диссертации.

Задача (2) решается методом многомерного шкалирования с точностью до ортогонального преобразования.

Стационарное распределение вероятностей пребывания в зонах индикации определяется решением следующего уравнения:

$$P^* = Mp^*,$$

где p^* – собственный вектор *стохастической* матрицы M , соответствующий собственному значению 1 . Поскольку элементы векторов p^* интерпретируются как вероятности, их значения требуют нормировки:

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

При последующем решении задачи *двумерного шкалирования* симметризованная матрица вероятностей переходов $M_s = M + M^T$ рассматривается как *матрица сходств*, в которой m_{ij} количественно характеризует степень близости между j -й и i -й зонами индикации. В результате шкалирования зоны индикации с большей вероятностью взаимного перехода будут расположены ближе друг к другу на приборной панели.

Процедура вычисления оптимального взаимного расположения элементов индикации состоит из следующих этапов:

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

2) применение численного метода определения матрицы вероятностей переходов, обеспечивающей минимальное значение критерия хи-квадрат, с помощью итерационной процедуры (рисунок 4);

3) определение оптимального взаимного расположения заданных элементов индикации с помощью процедуры многомерного шкалирования; при этом симметризованная матрица вероятностей переходов рассматривается как матрица сходств, количественно характеризующая относительные показатели близости между парами элементов индикации;

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

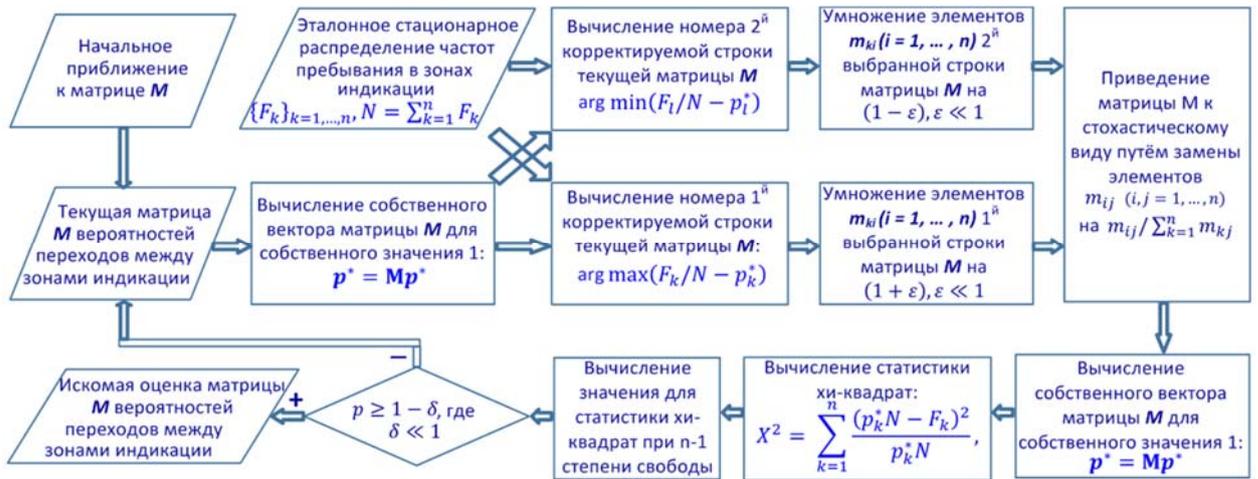


Рисунок 4. Численный метод определения взаимного расположения элементов индикации

На основе оптимизированного расположения зон индикации был произведён синтез варианта компоновки пилотажного кадра для сложного пространственного положения с учётом требований эстетики и нормативных документов (рисунок 5, справа). Для этого была произведена расстановка и видоизменение зон индикации в соответствии с выходными параметрами оптимизации. Зона индикации, связанная с отображением угла атаки, ранее имевшая ленточный тип, была заменена на круговую шкалу, что позволило придать итоговой компоновке завершённый и эстетически приемлемый вид. Для сравнения на рисунке 5 слева отображён исходный (неоптимизированный) пилотажный кадр с выделенными зонами индикации.

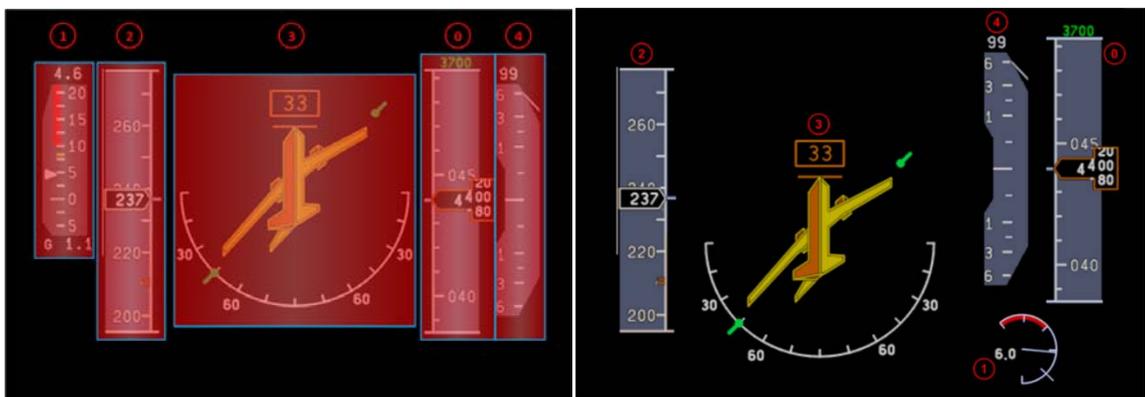


Рисунок 5. Исходный и оптимизированный варианты компоновки пилотажного кадра

В главе 4 представлены комплексы программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов, установленные на УСП.

Разработано ПО:

- для анализа уровня подготовки пилотов;
- для проведения комплексной эргономической оценки на базе УСП и анализа результатов данной оценки;
- для моделирования и оценки:

- ИУП на базе сенсорных дисплеев, в том числе оценки перспективной индикации системы самолётовождения, кадров управления системами ВС, штатных и аварийных чек-листов с применением авиационного стандарта ARINC 661, адаптированных к сенсорному управлению;

- перспективной пилотажно-навигационной индикации;

- резервного контура управления индикацией, конфигурацией и бортовыми системами, в том числе на основе кноппеля, взгляда и голоса.

Данное ПО является фундаментом для моделирования и эргономической оценки перспективных функций кабины ВС перед их внедрением на борт и для объективных систем контроля уровня подготовки пилотов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Математическая модель, представляющая полёт ВС в пространстве вейвлет-коэффициентов, вычисленных по репрезентативным параметрам, и математическая модель, представляющая ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения взора, которые обеспечивают оценку уровня подготовки экипажа на УСП и имеют следующие особенности [5, 8, 11, 22]:

- вместо непосредственного представления исследуемых процессов временными рядами используется их представление вейвлет-коэффициентами, что сняло проблему синхронизации сопоставляемых процессов, существенно тормозившую работы в данном направлении;

- основной формой представления анализируемых данных являются матрицы взаимных расстояний исследуемых процессов в различных метриках;

- в зависимости от типа задачи применяются три вновь разработанные метрики для сравнения исследуемых фрагментов полётов;

- фрагменты полётов в пространстве шкалирования представляются и распределяются по типам путём применения многомерного шкалирования к матрицам взаимных расстояний и последующего кластерного анализа;

- относительные вклады параметров в элементы матриц взаимных расстояний между фрагментами полётов оцениваются с целью выявления аномально выполненных манёвров и определения параметров, динамика которых свидетельствует об ошибках пилотов.

2. Численный метод определения взаимного расположения элементов индикации, согласованного с эталонным распределением частот пребывания в зонах фиксации взора, путём оптимизации матрицы вероятностей переходов между ними, особенностями которого являются [4, 21]:

- применение марковских процессов для описания распределения внимания по зонам индикации;

– оптимизация на основе сравнения стационарных распределений матриц вероятностей перехода между зонами индикации;

– применение итерационной численной процедуры для поиска минимального значения расхождения между распределениями, используя статистику хи-квадрат;

– применение многомерного шкалирования для графического представления расстояний между зонами индикации, вычисляемых с помощью соответствующих матриц вероятностей переходов.

3. Комплексы программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов, установленные на УСП ГосНИИАС [1-3, 6, 7, 9-10, 12-20, 23-39], позволяющие обеспечить:

– возможность объективной оценки уровня подготовки пилота;

– высокую степень автоматизации эргономической оценки с возможностью проведения оценки «от и до», в том числе инженерам, не имеющим опыта в данной области;

– возможность моделирования перспективных функций ИУП кабины пилотов;

– высокую производительность и масштабируемость ПО за счёт использования современных подходов.

Автору принадлежат основные теоретические и практические результаты, представленные в работе: математическая модель, представляющая полёт ВС в пространстве вейвлет-коэффициентов; математическая модель, представляющая ГДА пилотов в метрике правдоподобия траекторий движения взора; численный метод определения взаимного расположения элементов индикации; комплексы программ моделирования ИУП, эргономической оценки и анализа уровня подготовки пилотов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛАХ ИЗ ПЕРЕЧНЯ ВАК

1. Грешников И.И. Внедрение функции управления взглядом в информационно-управляющее поле кабины пилотов // Информационные технологии, 2021. Т. 27. N 8. С. 445-448. DOI: 10.17587/it.27.445-448.
2. Методика субъективных оценок информационно-управляющего поля кабины пилотов / И.И. Грешников, Г.А. Лаврова, Т.Д. Сальников, В.И. Златомрежев, Г.В. Сергеева // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2020. N 3. С. 18-25. DOI: 10.18127/j19998554-202003-02.
3. Грешников И.И., Златомрежев В.И. Внедрение сенсорных дисплеев в информационно-управляющее поле кабины пилотов с применением стандарта ARINC 661 // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2021. N 3. С. 5-13. DOI: 10.18127/j19998554-202104-01.

ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛАХ, ИНДЕКСИРУЕМЫХ В МЕЖДУНАРОДНЫХ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ БАЗАХ ДАННЫХ

4. Kuravsky L.S., Greshnikov I.I. Optimizing the Mutual Arrangement of Pilot Indicators on an Aircraft Dashboard and Analysis of this Procedure from the Viewpoint of Quantum Representations // Journal of Applied Engineering Science, 2021. N 4. Pp. 1-10. DOI: 10.5937/jaes0-31855.
5. Оценка действий экипажа самолёта по данным видеоокулографии // Л.С. Куравский, Г.А. Юрьев, В.И. Златомрежев, И.И. Грешников, Б.Ю. Поляков / Экспериментальная психология, 2021. N 1. С. 204-222. DOI: 10.17759/exppsy.2021140110.
6. Greshnikov I.I., Salnikov T.D., Ivanov A.S. Expert Assessment of the Cockpit Crew Information and Control Field // Journal of Physics: Conference Series, 11, Moscow, 10-11 Dec. 2020. Pp. 204-222. DOI: 10.1088/1742-6596/1958/1/012018.
7. Greshnikov I., Zlatomregey V., Davydov D. Optimization of Cockpit Displays and Controls Using Touch Displays / 17th Intern. Conf. on Condition Monitoring and Asset Management, CM 2021: 17, London, Virtual, 15-17 June 2021.
8. An Approach to Diagnostics Based on Video Oculography Data Analysis // L.S. Kuravsky, G.A. Yuryev, V.I. Zlatomrezhev, I.I. Greshnikov, B.Y. Polyakov / 17th Intern. Conf. on Condition Monitoring and Asset Management, CM 2021: 17, London, Virtual, 15-17 June 2021.

ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛАХ И СБОРНИКАХ НАУЧНЫХ ТРУДОВ

9. Грешников И.И. Разработка архитектуры системы объективных и субъективных оценок ИУП для универсального стенда прототипирования кабины пилотов // Тр. ГосНИИАС. Сер. Вопросы авионики, 2020. N 5. С. 30-42.
10. Златомрежев В.И., Грешников И.И. Разработка перспективной индикации на лобовом стекле // Тр. ГосНИИАС. Сер. Вопросы авионики, 2021. N 1. С. 16-26.
11. Грешников И.И., Куравский Л.С., Юрьев Г.А. Принципы построения программно-аппаратного комплекса для интеллектуальной поддержки экипажа и оценки уровня его подготовки // Моделирование и анализ данных, 2021. Т. 11. N 2. С. 5-30. DOI: 10.17759/mda.2021110201.
12. Грешников И.И., Златомрежев В.И. Применение сенсорных дисплеев в перспективной кабине пилотов / III Всерос. науч.-техн. конф. «Моделирование авиационных систем». М.: ФГУП «ГосНИИАС», 21.11.18.
13. Разработка демонстратора ИУП кабины с использованием элементов виртуальной реальности на основе функции синтезированного и улучшенного видения // В.В. Князь, О.В. Выголов, А.В. Никаноров, И.И. Грешников, В.И. Златомрежев / III Всерос. научно-техн. конф. «Моделирование авиационных систем». М.: ФГУП «ГосНИИАС», 21.11.18.

14. Юльбердин Ю.Ф., Грешников И.И., Мазур Е.Ф. Разработка ЧМИ перспективных систем индикации кабины экипажа с использованием продуктов SCADA / III Всерос. науч.-техн. конф. «Моделирование авиационных систем». М.: ФГУП «ГосНИИАС», 21.11.18.

15. Грешников И.И., Златомрежев В.И. Перспективное ИУП кабины, реализующее новые способы информационного обеспечения экипажа и управления информационным полем ВС // 5-я Межд. науч.-практ. конф. «Перспективные направления развития бортового оборудования гражданских ВС». М.: ФГУП «ГосНИИАС», 29.08.19.

16. Грешников И.И., Златомрежев В.И. Использование передовых технологий для оптимизации ИУП кабины перспективного самолёта / XVIII Всерос. науч. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение». М.: МГППУ, 17.03.2020.

17. Разработка комплекса эргономических оценок кабины пилотов // И.И. Грешников, А.А. Денщиков, Т.Д. Сальников, Е.Ю. Ефремов, В.И. Златомрежев / IV Всерос. науч.-техн. конф. «Моделирование авиационных систем». М.: ФГУП «ГосНИИАС», 26.11.20.

18. Управление ИУП кабины пилотов при помощи взгляда // И.И. Грешников, А.Д. Касимовский, В.И. Златомрежев, А.В. Гнедов / IV Всерос. науч.-техн. конф. «Моделирование авиационных систем». М.: ФГУП «ГосНИИАС», 26.11.20.

19. Грешников И.И., Сальников Т.Д., Иванов А.С. Экспертная оценка ИУП экипажа кабины / XI Межд. Юбил. науч.-техн. конф. «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов». М.: МАИ, 10.12.20.

ПАТЕНТЫ И СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ

20. Пат. 101331 РФ. Комплекс оборудования (стенд) прототипирования интерфейса кабины ВС / Желтов С.Ю., Федосов Е.А., Чуянов Г.А., Златомрежев В.И., Грешников И.И.; Опуб. 2016.

21. Пат. 203394 РФ. Установка регистрации глазо-двигательной активности стенда прототипирования / Голиков С.Н., Златомрежев В.И., Грешников И.И., Михайлов А.Ю.; Опуб. 2021.

22. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2021668683 «The Intelligent System for Flight Analysis v. 3.3» (ISFA v. 3.3) / Куравский Л.С., Юрьева Н.Е., Юрьев Г.А., Порохин В.А., Грешников И.И., Златомрежев В.И.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2021668197; Заявл. 17.11.2021; Зарег. 18.11.2021. РОСПАТЕНТ.

23. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2020611051 «Аварийные чеклисты с применением ARINC 661, адаптированные к сенсорному управлению» / Златомрежев В.И., Грешников И.И., Грешникова Е.А.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2019667617; Заявл. 30.12.2019; Зарег. 23.01.2020. РОСПАТЕНТ.

24. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2020610986 «Кадр TCAS/WXR с применением ARINC 661, адаптированный к сенсорному управлению» / Златомрежев В.И., Грешников И.И.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2019667682; Заявл. 30.12.2019; Зарег. 23.01.2020. РОСПАТЕНТ.

25. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2020610899 «Кадры управления самолетными системами с применением ARINC 661» / Златомрежев В.И., Грешников И.И., Давыдов Д.А.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2019667569; Заявл. 30.12.2019; Зарег. 21.01.2020. РОСПАТЕНТ.

26. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2020610886 «Модуль отображения и взаимодействия с форматами индикации сенсорных дисплеев» / Златомрежев В.И., Грешников И.И.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2019667572; Заявл. 30.12.2019; Зарег. 21.01.2020. РОСПАТЕНТ.

27. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2020610987 «Резервный контур управления индикацией» / Златомрежев В.И., Грешников И.И., Денщиков А.А.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2019667681; Заявл. 30.12.2019; Зарег. 23.01.2020. РОСПАТЕНТ.

28. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2020611050 «Штатные чеклисты (карты контрольных проверок) с применением ARINC 661, адаптированные к сенсорному управлению» / Златомрежев В.И., Грешников И.И., Грешникова Е.А.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2019667618; Заявл. 30.12.2019; Зарег. 23.01.2020. РОСПАТЕНТ.

29. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2020611433 «Модуль обеспечения общей памяти для компонентов ПО и управления отдельными функциями демонстратора сенсорной кабины» / Златомрежев В.И., Грешников И.И.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2019667561; Заявл. 30.12.2019; Зарег. 30.01.2020. РОСПАТЕНТ.
30. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2020611432 «Набор кадров системы самолётовождения» / Златомрежев В.И., Грешников И.И.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2019667563; Заявл. 30.12.2019; Зарег. 30.01.2020. РОСПАТЕНТ.
31. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2020663271 «ExpertEvaluationAnalyzer» / Сальников Т.Д., Грешников И.И., Златомрежев В.И.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2020662425; Заявл. 15.10.2020; Зарег. 26.10.2020. РОСПАТЕНТ.
32. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2020663272 «ExpertEvaluationCollector» / Златомрежев В.И., Грешников И.И.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2020662422; Заявл. 15.10.2020; Зарег. 26.10.2020. РОСПАТЕНТ.
33. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2020663266 «ПО постобработки результатов экспериментов глазодвигательной активности» / Денщикова А.А., Ефремов Е.Ю., Грешников И.И.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2020662389; Заявл. 15.10.2020; Зарег. 26.10.2020. РОСПАТЕНТ.
34. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2020664916 «Виртуальные пульта управления кабины самолёта» / Грешников И.И., Голиков С.Н., Шатилина Н.А.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2020663480; Заявл. 03.11.2020; Зарег. 19.11.2020. РОСПАТЕНТ.
35. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2020663265 «Модуль управления взглядом в кабине пилотов» / Грешников И.И., Касимовский А.Д., Златомрежев В.И.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2020662396; Заявл. 15.10.2020; Зарег. 26.10.2020. РОСПАТЕНТ.
36. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2021615088 «Синоптические кадры самолётных систем абстрактного самолёта» / Давыдов Д.А., Грешников И.И.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2021613850; Заявл. 23.03.2021; Зарег. 02.04.2021. РОСПАТЕНТ.
37. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2021615029 «Синоптический кадр индикатора на лобовом стекле абстрактного самолёта» / Давыдов Д.А., Грешников И.И., Златомрежев В.И.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2021613843; Заявл. 23.03.2021; Зарег. 02.04.2021. РОСПАТЕНТ.
38. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2021614739 «Ядро упрощённой системы самолётовождения абстрактного самолёта» / Грешников И.И., Ушаков А.В., Трынкин С.В., Цветкова А.В.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2021613853; Заявл. 23.03.2021; Зарег. 29.03.2021. РОСПАТЕНТ.
39. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ N 2021615091 «Программа имитации внекабинных акустических шумов абстрактного самолёта» / Грешников И.И.; Прав. ФГУП «ГосНИИАС» (РФ). Заявка N 2021613795; Заявл. 23.03.2021; Зарег. 02.04.2021. РОСПАТЕНТ.