

На правах рукописи



Якименко Вячеслав Анатольевич

**РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПРОГРАММНОГО
ПРОТОТИПА ИНДИВИДУАЛЬНО-АДАПТИРОВАННОЙ
СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ДЕЙСТВИЙ
ПИЛОТА НА ЭТАПЕ ПОСАДКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА**

Специальность 05.13.01
Системный анализ, управление и обработка информации
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2016 г.

Работа выполнена на кафедре
«Информационно-управляющие комплексы»
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: кандидат технических наук,
Ким Роман Валерьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Базлев Дмитрий Анатольевич;
кандидат технических наук, доцент
Канушкин Сергей Владимирович

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие
«Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации»

Защита состоится «27» декабря 2016 г. в 16:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.125.12 в Федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский университет)» – МАИ по адресу:
125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
Кандидат технических наук,

А.В.Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы На сегодняшний день доля авиационных происшествий и катастроф, вызванных ошибочными действиями летного состава, до сих пор остается недопустимо высокой. В перспективе влияние человеческого фактора на безопасность полетов будет только возрастать, поскольку развитие авиационной техники, совершенствование динамических характеристик летательных аппаратов (ЛА) и расширение спектра решаемых с их использованием задач неминуемо приведет к тому, что летчик будет вынужден практически мгновенно оценивать обстановку и осуществлять соответствующие управляющие действия. Таким образом, деятельность летчика характеризуется крайней степенью информационной загруженности. С целью ее снижения усилия разработчиков авиационной техники во всем мире направлены на создание бортовых систем, реализующих функции интеллектуальной поддержки летчика.

Внедрение в состав бортового оборудования систем интеллектуальной поддержки является одним из перспективных подходов к обеспечению безопасности полетов и эффективности эксплуатации авиационной техники. Также при рассмотрении данной проблемы следует принять во внимание тот факт, что, несмотря на очевидный прогресс в области совершенствования средств бортовой индикации и внедрение более совершенных систем объективного контроля, реализующих информационную поддержку экипажа, их использование не приводит к адекватному этим усилиям снижению числа авиационных происшествий и катастроф, вызванных человеческим фактором, что подтверждает анализ многолетних статистических данных.

Одной из причин подобной ситуации является то, что все разработки в области создания систем, реализующих в том или ином виде функции поддержки летчика, не учитывают его личностную специфику, проявляющуюся в особенностях его психофизиологических реакций, свойственной ему манере управления самолетом, сложившейся под влиянием накопленного опыта и квалификации. Все образцы систем подобной специализации ориентированы на некоторого «усредненного», «среднестатистического» летчика, характеристики управляющих реакций которого укладываются в среднестатистические рамки.

Иными словами, дальнейшее повышение уровня безопасности эксплуатации авиационной техники требует решения проблемы создания бортовых систем, реализующих функции индивидуально-адаптированной поддержки летчика, адекватно учитывающих специфику его психофизиологических реакций, индивидуальную манеру управления самолетом, квалификацию и текущий опыт. В работе проблема индивидуально-адаптированной поддержки летчика рассмотрена применительно к этапу посадки, как наиболее аварийно-опасному полетному режиму. Для этого полетного режима реализация индивидуально-адаптированной поддержки пилота подразумевает решение следующих задач:

1. Статистический анализ траекторных параметров и параметров, характеризующих перемещения органов управления, в целях подтверждения наличия у пилота индивидуальной манеры пилотирования.

2. Разработка алгоритмов построения индивидуально-адаптированной модели действий пилота при выполнении посадки.

3. Разработка алгоритмов формирования рекомендаций, направленных на повышение точности приведения ЛА на взлетно-посадочную полосу (ВПП).

4. Разработка специализированного программно-математического обеспечения, составляющего основу функционально-программного прототипа индивидуально-адаптированной системы поддержки пилота на этапе посадки.

5. Проведение имитационного моделирования режима посадки с использованием индивидуально-адаптированной системы поддержки пилота и количественная оценка эффекта, достигаемого за счет использования индивидуально-адаптированной системы поддержки летчика в контуре ручного управления самолетом при выполнении посадочного режима.

Решение в комплексе перечисленных задач является новым и актуальным направлением исследований, открывающим дополнительные возможности на пути повышения безопасности эксплуатации самолетов военной и гражданской авиации.

Цель работы. Целью работы является повышение безопасности полетов путем разработки функционально-программного прототипа индивидуально-адаптированной системы поддержки управляющих действий пилота. В рамках данного исследования под функционально-программным прототипом подразумевается программно-аппаратный комплекс, реализующий функции контроля и поддержки управляющих действий летчика в замкнутой эргатической системе «самолет-летчик».

Объектом исследования является замкнутая эргатическая система «самолет-летчик».

Предметом исследования выступают алгоритмы и программно-математическое обеспечение индивидуально-адаптированного контроля и поддержки управляющих действий летчика на этапе посадки.

Методы исследования. В работе использованы методы теории вероятностей, математической статистики, искусственных нейронных сетей, методы математического моделирования, объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна работы. Научная новизна работы проявляется в следующем:

1. Проведен статистический анализ траекторных параметров и параметров, характеризующих перемещения органов управления, в целях подтверждения наличия у пилота индивидуальной манеры пилотирования. Показано, что индивидуальная манера пилотирования, присущая конкретному летчику, статистически достоверно проявляется в значениях траекторных параметров и параметров, характеризующих перемещения органов управления.

2. Разработаны алгоритмы построения индивидуально-адаптированной модели действий пилота на этапе посадки с использованием аппарата искусственных нейронных сетей. В качестве базовой архитектуры нейронной сети использована нейронная сеть типа многослойный перцептрон. Индивидуальная адаптация нейросетевой модели достигается за счет различий в составе входных параметров сети, их количестве и весовых коэффициентов нейронов.

3. Предложены алгоритмы формирования рекомендаций, направленных на повышение точности приведения ЛА на срез ВПП, основанные на использовании искусственных стимулирующих поправок к показаниям курсо-глиссадного прибора, либо на формировании дополнительных информационных сигналов, отображаемых на многофункциональных индикаторах.

4. Разработано специализированное программно-математическое обеспечение, составляющее основу функционально-программного прототипа индивидуально-адаптированной системы поддержки пилота на этапе посадки.

5. Проведено имитационное моделирование режима посадки на программно-аппаратном симуляторе самолет МИГ-АТ, с использованием индивидуально-адаптированной системы поддержки пилота. Полученные результаты продемонстрировали возможность полного исключения посадок, не удовлетворяющих требованиям по точности, подтвердив тем самым эффективность использования предложенных алгоритмов.

Достоверность результатов. Достоверность результатов, полученных в работе, подтверждается:

- математической обоснованностью и адекватностью моделей действий летчика;
- математической обоснованностью и адекватностью моделей, реализованных в аппаратно-программном симуляторе самолета МиГ-АТ, использованном в процессе имитационного моделирования;
- результатами имитационного моделирования процесса выполнения посадки на аппаратно-программном симуляторе самолета МиГ-АТ.

Практическая ценность. Практическая ценность результатов работы заключается в том, что разработанный функционально-программный прототип индивидуально-адаптированной системы поддержки летчика позволяет снизить количество полетов, выполненных с нарушением заданных требований по точности приведения ЛА на срез ВПП. Показано, что использование индивидуально-адаптированной нейросетевой модели, обеспечивающей прогноз точности приведения самолета на срез ВПП путем решения задачи регрессии, позволяет вдвое снизить процент неудачных посадок, выполненных с нарушением заданных требований (с 40% до 20%). Использование для целей поддержки летчика индивидуально-адаптированной нейросетевой модели, обеспечивающей прогноз точности приведения самолета на срез ВПП путем решения задачи классификации, позволило полностью исключить неудачные посадки.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на:

- Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2014» г. Москва. 22 – 24 апреля 2014 г.;
- Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2015» г. Москва. 21 – 23 апреля 2015 г.;
- X-ой Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических систем ЛА» г. Москва. 26 июня 2015 г.;

- XII-ой Международной молодежной конференции «Гагаринские чтения» г. Москва. 12-15 апреля 2016 г.;
- VII-ой Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ФГУП «НПЦАП» г. Москва 14-15 апреля 2016 г.;
- XXI-ой Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» Крым, Евпатория. 3-10 июля 2016 г.;
- Совместном научном семинаре кафедр «Информационно-управляющие комплексы» и «Системный анализ и управление» Московского авиационного института, 2016 г.

Внедрение результатов работы. Результаты работы использованы в учебном процессе кафедры «Информационно-управляющие комплексы» МАИ, а также в НИР «Борт-интеграция-технология», выполняемой по заказу ФГУП «ГосНИИАС», что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- 1) архитектура функционально-программного прототипа индивидуально-адаптированной системы поддержки пилота на этапе посадки;
- 2) индивидуально-адаптированная нейросетевая модель действий пилота на этапе посадки и алгоритмы ее построения на основе полетных данных, источниками которых являются штатные бортовые средства регистрации полетной информации;
- 3) алгоритмы формирования рекомендаций, направленных на повышение точности приведения ЛА на срез ВПП;
- 4) специализированное программно-математическое обеспечение, составляющее основу функционально-программного прототипа индивидуально-адаптированной системы поддержки пилота на этапе посадки;
- 5) результаты имитационного моделирования режима посадки на программно-аппаратном симуляторе самолет МИГ-АТ с использованием индивидуально-адаптированной системы поддержки пилота, подтверждающие эффективность индивидуально-адаптированной поддержки пилота как средства повышения точности выполнения посадочного режима.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 117 страницах машинописного текста, содержит 24 рисунка, 10 таблиц и 35 наименований литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность разработки систем поддержки пилота при выполнении типовых полетных режимов, в особенности на этапе посадки, а также необходимость учета в таких системах индивидуальной манеры пилотирования, присущей летчику.

В первой главе представлены результаты анализа многолетних статистических данных по авиационным происшествиям и катастрофам, имевшим место в гражданской и военной авиации. В результате поведенного анализа показано, что ошибки пилотирования в настоящее время остаются наряду с отказами бортового оборудования основной причиной особых ситуаций, что указывает на

необходимость внедрения в состав бортового оборудования систем поддержки действий летчика.

Рассмотрены современные направления в области разработки подобных систем. Показано, что в основе большинства из них лежит идея расширения информационного поля пилота путем добавления дополнительных информационных сигналов, позволяющих исключить опасность возникновения особых ситуаций и повысить качество выполнения целевых задач. При этом системы поддержки действий экипажа, основанные на использовании математических моделей, потенциально обладают более высоким уровнем универсальности по сравнению с информационно-экспертными системами и лишены существенного недостатка, связанного со сложностью учета субъективных мнений специалистов-экспертов при формировании методов и алгоритмов принятия решений. Проблема заключается в том, что все существующие модели действий оператора (летчика) ориентированы на его среднестатистические характеристики, что не позволяет учесть индивидуальные особенности управляющих действий конкретного летчика.

На основе анализа современных подходов к разработке бортовых систем, реализующих функции поддержки летчика, в первой главе диссертации приведена математическая постановка задачи разработки индивидуально-адаптированной модели управляющих действий летчика.

В работе задача сформулирована применительно к режиму посадки, целью которого является приведение ЛА на срез ВПП с выполнением заданных ограничений. Выбор режима посадки обусловлен следующими фактами:

- данный режим является максимально «жестким» и характеризуются высоким уровнем регламентации управляющих действий летчика требованиями «Руководства по летной эксплуатации самолета». Следовательно, если для этих, достаточно «жестких» условий проведения эксперимента, будут выявлены индивидуальные различия в реализации траекторий посадки различными летчиками, с большой степенью уверенности можно утверждать, что свойственная им индивидуальная манера пилотирования будет проявляться и на других типовых режимах полета;

- данный режим наряду с боевыми режимами остается наиболее сложным для пилотов, не обладающих обширным профессиональным опытом, именно на этот этап полета приходится наибольшее количество авиационных происшествий и катастроф. Следовательно, необходимость поддержки пилота на этом режиме проявляется в наибольшей степени.

В рамках рассматриваемой постановки задачи предполагается, что текущее состояние замкнутой эргатической системы «самолет-летчик» описывается вектором $Z = (z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_n)^T, i = 1..n$, компонентами которого являются текущие траекторные и динамические параметры ЛА, а также управляющие действия пилота (перемещения ручки управления самолетом (РУС), ручки управления двигателем, педалей). Успешное выполнение посадочного режима предполагает приведение ЛА

в терминальную область (ТО) в пространстве параметров состояния системы «самолет-летчик», представляющую параллелепипед и определяемую допустимыми отклонениями параметров движения самолета от заданных значений на срезе ВПП (рис 1.).

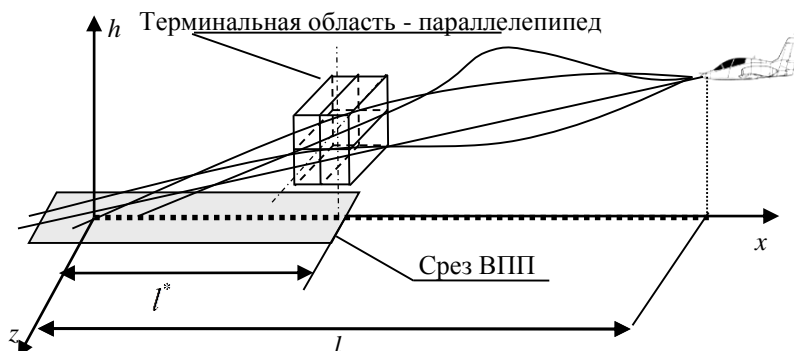


Рис. 1. Возможные траектории приведения ЛА в терминальную область

Под моделью летчика в работе понимается зависимость $\mu_i(Z, l)$, которая для каждого момента выполнения посадочного режима, характеризующегося дальностью l от среза ВПП, и соответствующего этому моменту состояния Z системы «самолет-летчик» определяет прогнозируемую точность приведения самолета на ВПП, выраженную скалярной величиной μ_i :

$$\mu_i = \frac{z_i(l^*) - 0,5(z_{i,\min} + z_{i,\max})}{0,5(z_{i,\min} - z_{i,\max})} \quad (1)$$

При этом величины $z_{i,\min}$, $z_{i,\max}$ представляют собой заданные ограничения, накладываемые на параметры состояния системы «самолет летчик» на срезе ВПП. При таком подходе значения скалярной функции μ_i , характеризующие штатное приведение самолета на срез ВПП по отдельному контролируемому параметру z_i , будет лежать в диапазоне от -1 до 1. Таким образом, задача сводится к отысканию способа построения зависимостей $\mu_i(Z, l)$, которые обеспечили бы учет индивидуальной манеры управления, присущей летчику, и разработке способов отображения пилоту рекомендаций, сформированных на основе прогнозного значения μ_i .

Вторая глава посвящена обоснованию необходимости использования индивидуально-адаптированных моделей летчика в системах контроля и поддержки его управляющих действий. Рассмотрена структура программно-аппаратного симулятора самолета МиГ-АТ, использованного для проведения моделирования посадочного режима, описаны методика проведения моделирования и полученные результаты.

С целью обоснования необходимости использования индивидуально-адаптированных моделей летчика в системах контроля и поддержки его управляющих действий в процессе выполнения диссертационной работы была проведена серия экспериментов, в ходе которых летчики, обладающие различной квалификацией и опытом, многократно выполняли посадочный режим. При этом учитывался разброс параметров движения самолета в точке выхода на посадочную

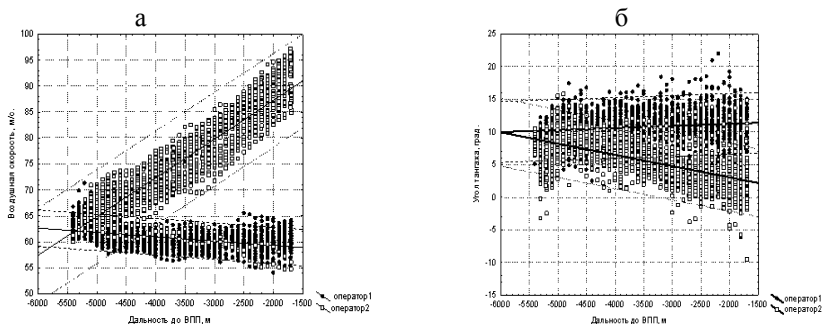


Рис 2. Зависимость значений воздушной скорости (а) и угла тангажа (б) дальности до ВПП

глиссаду, ветровые возмущения, которые моделировались посредством струйных горизонтальных порывов. В качестве примера на рис. 2 представлены графики таких траекторных параметров, как воздушная скорость (рис. 2.а) и угол тангажа (рис. 2.б). Даже на основе визуального анализа (рис. 2) видно, что параметры траекторий, соответствующих различным летчикам при выполнении посадочного режима, могут существенным образом отличаться друг от друга. Однако факт наличия таких различий, обусловленных спецификой управляющих действий летчика, требует более строгого обоснования.

Задача статистически достоверного обоснования наличия индивидуальной манеры пилотирования, решалась путем подтверждения следующих двух предположений:

- лётчик обладает устойчивой, характерной только для него манерой управления самолетом, которая проявляется в характеристиках траекторных параметров ЛА и параметров перемещения органов управления при выполнении типовых полетных режимов и, в частности, при выполнении посадки;
- индивидуальные манеры пилотирования двух различных летчиков при выполнении типовых полетных режимов (в частности, при выполнении посадки) отличаются друг от друга.

Для проверки сформулированных предположений в диссертационной работе была проведена статистическая обработка траекторий посадки, выполненных на аппаратно-программном симуляторе самолета МиГ-АТ двумя различными операторами, каждый из которых выполнил по 50 посадок.

С целью статистически достоверного подтверждения первого предположения 50 траекторий, выполненных первым летчиком, были разбиты на две группы по 25 каждая. Для каждого из траекторных параметров с использованием критерия Уилкоксона проверялась гипотеза о том, что распределения двух случайных величин подчиняется одному и тому же закону. В табл. 1 приведены нормированное значение статистики Уилкоксона и соответствующие им уровни значимости. Серым цветом выделены параметры движения, для которых базовая гипотеза не подтверждается. Из приведенных результатов можно видеть, что начиная с дальности 4000 м до среза ВПП, для большинства параметров эта гипотеза не может быть отвергнута. Этот результат подтверждает то, что конкретному летчику присуща определенная манера пилотирования, которая сохраняется при многократном выполнении посадочных режимов, даже в условиях действия возмущений.

Таблица 1. *Результаты статистической обработки траекторий посадки, выполненных одним летчиком*

Дальность до ВПП	5000 м	4000 м	3000 м	2000 м
Параметр				
Воздушная скорость	3.085714	1.197358	0.470871	1.009009
	0.002031	0.231168	0.637733	0.312971
Угол отклонения руля высоты	1.400000	1.197358	0.605406	0.578499
	0.161514	0.231168	0.544910	0.562928
Скорость изменения угла рысканья	2.428571	0.390150	0.363234	1.009009
	0.015159	0.696426	0.716423	0.312971
Скорость изменения угла тангажа	1.257143	1.304985	0.309429	0.390150
	0.208703	0.191899	0.756995	0.696426
Проекция перегрузки на ось OX₁ связанной системы координат	2.000000	0.255616	0.121081	0.228709
	0.045501	0.798248	0.903627	0.819095
Проекция перегрузки на ось OZ₁ связанной системы координат	2.200000	0.632312	0.713033	0.174895
	0.027808	0.527183	0.475826	0.861162
- угол атаки	2.000000	0.605406	0.524685	1.035916
	0.045501	0.544910	0.599803	0.300242
Угол рысканья	2.371429	2.488889	1.16637	0.551592
	0.017720	0.012815	0.264150	0.581229
Проекция воздушной скорости на ось OX земной нормальной с.к.	3.085714	1.035916	0.686126	1.197358
	0.002031	0.300242	0.492634	0.231168

Для проверки второго предположения использовался критерий Манна-Уитни для двух независимых выборочных совокупностей, каждая из которых объединяла по 50 полетов, выполненных различными летчиками. Оценивалась статистическая достоверность различий траекторных параметров, полученных в процессе многократного повторения летчиками посадочных режимов. Из приведенных в табл. 2 результатов видно, что для большинства параметров на различном удалении от среза ВПП наблюдаются статистически достоверные (на уровне значимости $p < 0.05$) различия между параметрами траекторий, выполненных разными летчиками.

Таблица 2. *Результаты статистической значимости различий между параметрами посадочных траекторий, выполненных разными летчиками*

Дальность до ВПП	5000 м	4000 м	3000 м	2000 м
Параметр				
Воздушная скорость	-7.54184	-8.71345	-8.16244	-7.84591
	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Угол отклонения руля высоты	-1.18574	-6.78079	-6.46240	-7.21015
	0.235727	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Скорость изменения угла рысканья	-1.53732	3.51572	2.94091	0.33956
	0.124215	0.000439	0.003273	0.734191
Скорость изменения угла тангажа	-3.72956	0.17150	0.36809	0.63576
	0.000192	0.863832	0.712808	0.524930
Проекция перегрузки на ось Ox_1 связанной системы координат	-5.60468	4.15554	5.39229	7.55693
	< 0.05	0.000032	< 0.05	< 0.05
Проекция перегрузки на ось Oz_1 связанной системы координат	-1.06165	3.04740	2.98644	-0.87418
	0.288396	0.002309	0.002823	0.382023
Угол атаки	3.336609	8.52876	7.94993	7.81701
	0.000848	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Угол рысканья	-1.37187	0.96303	3.94271	3.22939
	0.170105	0.335533	0.000081	0.001241
Проекция воздушной скорости на ось Ox земной нормальной с.к.	-7.52116	-8.72004	-8.16244	-7.83146
	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05

Приведенные результаты подтвердили сформулированные предположения. При этом наличие индивидуальной манеры пилотирования статистически достоверно проявляется для подавляющего большинства регистрируемых траекторных параметров и параметров перемещения органов управления. Полученные результаты являются подтверждением того, что летчику присуща индивидуальная манера пилотирования, которая должна учитываться в системах поддержки его управляющих действий.

В третьей главе описывается подход к разработке индивидуально-адаптированной модели управляющих действий летчика и ее использованию в интересах контроля и поддержки его действий при выполнении режима посадки. Ранее отмечалось, что подобная модель может быть реализована на основе зависимостей $\mu_i(Z, l)$, обеспечивающих возможность прогноза точности приведения ЛА на срез ВПП по каждому из контролируемых параметров.

В силу отсутствия на сегодняшний день фундаментальной основы к созданию моделей управляющих действий пилота, как элемента замкнутой эргатической системы «самолет-летчик», построение зависимостей $\mu_i(Z, l)$ аналитическими методами не представляется возможным. В этих условиях, с учетом подтвержденного предположения о том, что индивидуальная манера пилотирования проявляется в значениях траекторных параметров и параметров, характеризующих перемещения органов управления, наиболее конструктивным представляется подход, предполагающий построение экспериментальной модели

управляющих действий летчика в виде набора зависимостей $\mu_i(Z, l)$ на основе информации, накопленной в процессе его предшествующей деятельности.

Исходя из этого предполагается, что имеется выборка реализаций вектора состояния $Z^j(l_t)$, зарегистрированных в дискретные моменты времени, каждому из которых соответствует значение дальности l_t , $t = 1, \dots, T$, в j -том полете, $j = 1, \dots, N$, накопленная в результате многократного выполнения конкретным летчиком посадочных режимов. Первоначально эта выборка может формироваться на основе результатов выполнения посадочных режимов летчиком на пилотажных стендах и в дальнейшем обновляться в процессе его деятельности с учетом накопленного опыта и квалификации. Каждая посадочная траектория «помечена» значениями индикаторных функций μ_i^j , $j = 1, \dots, N$, характеризующих достигнутую точность приведения самолета на срез ВПП по каждому контролируемому параметру. При наличии этой информации задача поиска конкретной зависимости $\mu_i(Z, l)$ сводится к построению экспериментальной модели путем аппроксимации накопленных данных.

Для этой цели могут использоваться как классические методы регрессионного анализа, так и аппарат искусственных нейронных сетей. Преимуществом нейросетевого подхода является отсутствие необходимости выбора структуры аппроксимирующих функций. Существующий нейросетевой аппарат предоставляет широкий спектр моделей сетей, позволяющих решать подобную задачу. В настоящей работе использована нейронная сеть типа двухслойный перцептрон. Такой выбор обоснован в первую очередь простотой модели и способа ее обучения методом обратного распространения ошибки, а так же тем фактом, что двухслойный перцептрон (ДСП) является универсальным аппроксиматором и способен описать любую непрерывную функцию с любой заданной точностью, отличной от нуля. Это свойство непосредственно следует из определения структуры такой нейронной сети и теоремы об универсальной аппроксимации, являющейся естественным расширением теоремы Вейерштрасса, которая в свою очередь основана на следствии из теоремы Колмогорова. Таким образом, искомая зависимость $\mu_i(Z, l)$ определяется на основе соотношения (2), описывающего «прямой» проход входных сигналов через ДСП.

$$\mu_i(Z, l) = f\left(\sum_{r=1}^{n_1^i} W_r^i f\left(\sum_{v=0}^{n_0^i} W_{v,r}^i z_v^o\right) + W_0^i\right) : \left|\mu_i^p - \mu_i(Z, l)\right| < \varepsilon_T \quad (2)$$

В этом выражении μ_i^p - реальное значение отклонения, μ_i - определенное на основе предложенной модели значение отклонения, ε_T - требуемая точность, n_1^i и n_0^i , количество нейронов скрытого слоя и количество входных сигналов, W_0^i , W_r^i и $W_{v,r}^i$ - весовые коэффициенты выходного и скрытого слоя,

$$f(S_\Sigma) = \frac{1}{1 + e^{-S_\Sigma}} \quad (3)$$

функция активации нейронов, $Z_i^i = (z_1^i, \dots, z_{n_0}^i)$ - вектор входных сигналов ДСП, имеющий следующую структуру $Z_i^i = (1, z_1, \dots, z_n, l)$, где компоненты z_1, \dots, z_{n_0} - элементы вектора состояния Z системы «самолет-летчик». Параметры модели n_1^i и n_0^i - определяются эвристически на основе анализа достигаемой точности модели ε_T . Величины весовых коэффициентов W_0^i, W_r^i и $W_{v,r}^i$ определяются в процессе обучения ДСП на выборке сформированной из данных, накопленных в предыдущих полетах.

Процесс обучения ДСП представляет собой задачу оптимизации значений W_0^i , W_r^i и $W_{v,r}^i$ в смысле минимума критерия вида:

$$E_i = \frac{1}{NT} \sum_{j^o=1}^{NT} \frac{1}{2} (\mu_{i,j^o}^p - \mu_{i,j^o})^2, \quad (4)$$

представляющего собой среднее значение квадрата рассогласования между модельными и фактическими значениями выходной переменной. В (4) j^o - номер примера в обучающей выборке. В работе данная задача решается с помощью метода обратного распространения ошибки, суть которого сводится к «обратному» проходу по сети и коррекции весовых коэффициентов W_0^i, W_r^i и $W_{v,r}^i$, на основании соотношений (5), где $\Delta W_g^i(j^o)$ и $\Delta W_{v,r}^i(j^o)$ - величина коррекции весов выходного и скрытого слоя, на обучающем примере номер j^o , соответственно.

$$\begin{aligned} \Delta W_g^i(j^o) &= -\eta^i \mu_i^2(j^o) (\mu_i^p(j^o) - \mu_i(j^o)) (1 - \mu_i(j^o)), \quad g = 0..n_1^i \\ \Delta W_{v,r}^i(j^o) &= -\eta^i \delta_r f \left(\sum_{v=0}^{n_0^i} W_{v,r}^i(j^o) z_v^i(j^o) \right) \\ \delta_r &= \phi_r' \mu_i(j^o) (\mu_i^p(j^o) - \mu_i(j^o)) (1 - \mu_i(j^o)) W_r(j^o) \\ \phi_r' &= f \left(\sum_{v=0}^{n_0^i} W_{v,r}^i(j^o) z_v^i(j^o) \right) \left(1 - f \left(\sum_{v=0}^{n_0^i} W_{v,r}^i(j^o) z_v^i(j^o) \right) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

В работе рассмотрены два варианта применения нейронной сети для целей поддержки управляющих действий летчика. Проиллюстрируем существо этих вариантов на примере использования зависимости $\mu_H(Z, l)$, определяющей прогнозируемую точность приведения самолета на срез ВПП по высоте H . Условием штатного приведения самолета на срез ВПП по высоте является выполнение неравенства:

$$|\mu_H(Z, l)| \leq 1 \quad (6)$$

Если в какой-либо момент выполнения посадочного режима, характеризующегося дальностью до среза ВПП l , наблюдается нарушение условия

(6), реализуется поддержка управляющих действий летчика посредством формирования индивидуальных стимулирующих поправок к положению глissадной планки на курсо-глissадном приборе на основе следующего соотношения:

$$\Delta\delta_H = [1 - K(l)]A(\mu_H(Z, l)) \quad (7)$$

Коэффициент $K(l)$, используемый в выражении (7), имеет вид представленной на рис. 3 зависимости и необходим для того, чтобы снизить эффект биения планки,

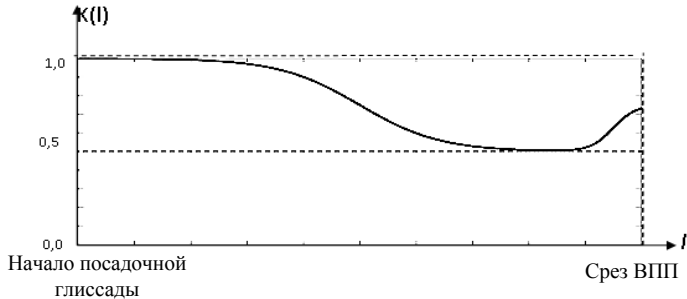


Рис. 3. Вид зависимости $K(l)$, используемой в алгоритме формирования стимулирующих поправок для курсо-глissадных планок

вызванный скачкообразными изменениями прогнозируемой точности приведения самолета на срез ВПП по высоте.

Второй из предложенных вариантов предполагает отказ от прогноза непосредственных значений параметров, характеризующих точность выполнения посадки, и переход от задачи регрессии к задаче классификации (рис. 4).

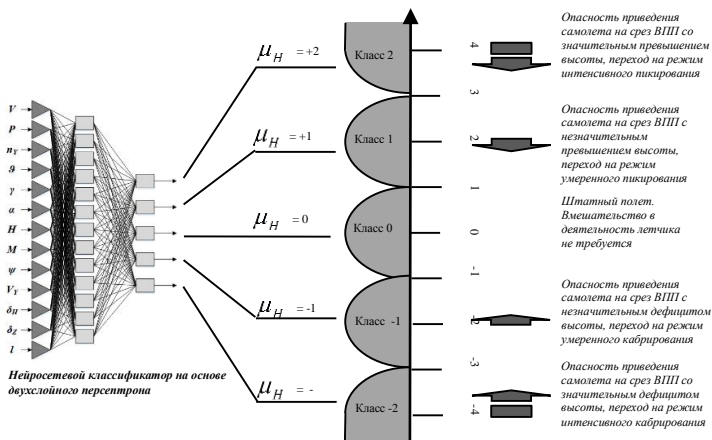


Рис. 4. Возможный интерфейс отображения рекомендаций, основанных на решении задачи классификации, при переходе от непрерывного показателя точности приведения в терминальную область к набору классов

Такой переход осуществляется путем разбиения области значений параметра, характеризующего точность приведения самолета на срез ВПП по высоте, на конечное число интервалов и постановку в соответствие каждому из них соответствующего эталонного класса. В данном случае нейронная сеть используется для прогноза приведения ЛА в заданный интервал на основе текущего вектора состояния, то есть решает задачу классификации в ее традиционной постановке. В качестве обучающей выборки, аналогично предыдущему варианту, используются данные $\mu_n^j, j=1, \dots, N$ и $Z^j(l_t), j=1, N; t=1, \dots, T$, накопленные в результате выполнения предыдущих полетов, при этом величина μ_n^j выражает не прогнозируемую точность приведения самолета на срез ВПП, а принимает значения $\mu_n^j = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$, определяющие принадлежность значения промаха к одному из эталонных классов. В данном случае нейронная сеть является уже не аппроксиматором, а классификатором, позволяющим на основе текущего вектора состояния осуществить прогноз попадания в определенный класс. Рекомендации в этом случае формируются не как поправки к показаниям штатных приборов, а как дополнительные информационные сигналы, индицируемые на многофункциональных индикаторах или наשלемных системах. Иными словами, если прогнозируется попадание в класс, отличный от 0 (соответствующего приведению в ТО) пилоту отображается стрелка, длина которой указывает на интенсивность выполнения маневров пикирования или кабрирования. При этом, в зависимости от попадания в соответствующие классы может варьироваться цвет или длина этой стрелки.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена описанию архитектуры (рис. 5) функционально-программного прототипа (ФПП) индивидуально-адаптированной системы поддержки управляющих действий пилота на этапе посадки и анализу результатов применения разработанного ФПП для целей поддержки действий летчика.

Интеллектуальным ядром ФПП является индивидуально-адаптированная нейросетевая модель, описанная выше. Предусматривается два режима работы системы:

1) режим послеполетной обработки информации, предполагающий обновление базы данных полетной информации с учетом результатов выполнения посадочного режима в последнем полете. Источником получения этих данных является защищенный бортовой накопитель. На основе данных представленных в БД полетной информации реализуется «обучение» нейросетевой модели с учетом новой информации.

2) оперативный режим, который реализуется непосредственно в полете и предполагает реализацию мер индивидуально-адаптированной поддержки летчика путем формирования стимулирующих поправок к курсо-глиссадным планкам или путем стрелочной индикации рекомендуемого маневра.

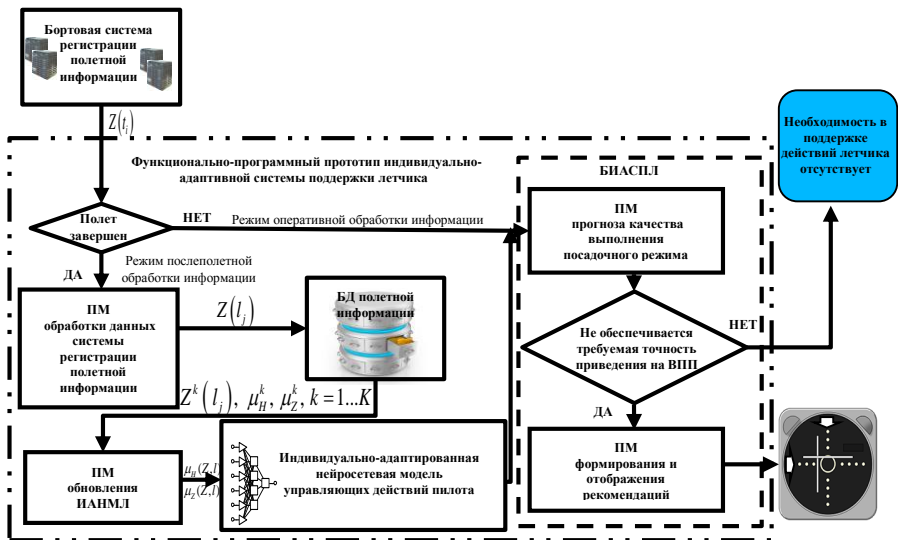


Рис 5. Архитектура функционально-программного прототипа индивидуально-адаптированной системы поддержки управляющих действий пилота на этапе посадки

С целью апробации разработанного ФПП системы индивидуально-адаптированной поддержки летчика проведена серия стендовых экспериментов с использованием аппаратно-программного симулятора самолета МиГ-АТ. В экспериментах участвовали два пилота, обладающие различной квалификацией (№1 – высококвалифицированный летчик, №2 – начинающий летчик, не обладающий достаточным опытом выполнения полетов). Каждым из них было выполнено по $N=50$ посадочных режимов. В результате обработки данных, накопленных после выполнения $N=20$, $N=40$, $N=50$ посадочных режимов, были

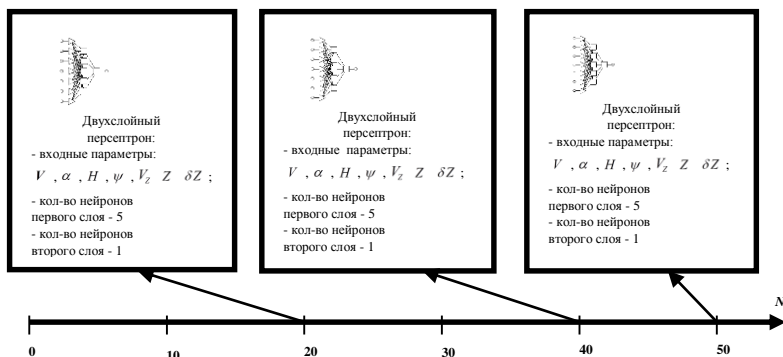


Рис. 6. Изменение индивидуального качественного профиля оператора №1 в процессе деятельности.

получены нейросетевые модели, описывающее прогноз отклонения от центра терминальной области в продольном канале, представленные на рис.6, 7.

Видим, что во всех случаях индивидуальная модель действий оператора №1 (рис. 6) описывается двухслойным персептроном с одним и тем же составом входных параметров и одинаковым числом нейронов, что подтверждает наличие у него устоявшейся манеры пилотирования.

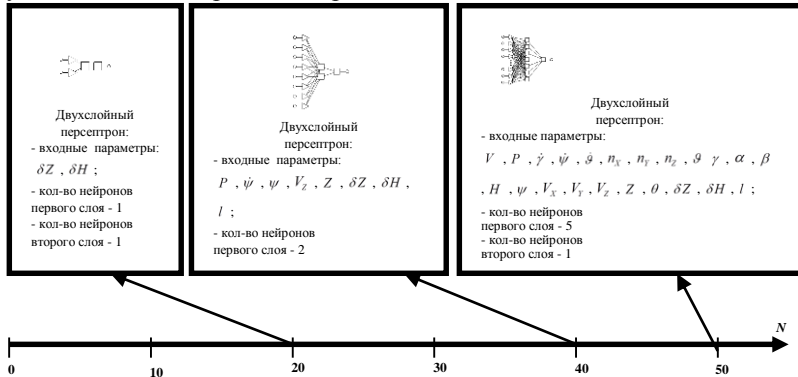


Рис. 7. Изменение индивидуального качественного профиля оператора №2 в процессе деятельности.

В качестве оператора №2 в эксперименте участвовал специалист, не обладающий достаточным опытом выполнения посадочных режимов для того, чтобы у него сформировался собственный летный «почерк». Этот факт проявляется в структуре и наборе входных сигналов его нейросетевых моделей (рис. 7), соответствующих различным периодам деятельности.

С целью анализа эффективности использования предложенных индивидуально-адаптированных моделей и алгоритмов была проведена серия экспериментов, предусматривающих три варианта использования системы поддержки:

- в режиме прогноза значения точности приведения;
- в режиме прогноза приведения в заданный интервал;
- выполнение посадки без использования системы поддержки.

Полученные результаты, представленные на рис. 8 в виде доверительных интервалов для отклонения $\mu_N^j, j=1, \dots, 150$ от центра ТО по высоте H , в полной мере подтвердили эффективность использования предлагаемого подхода. Показано, что использование системы в режиме прогноза значения точности приведения (рис. 8, интервал I_1) позволяет снизить процент неудачных посадок (таких, для которых не удовлетворялись требования по точности приведения самолета в заданную область) практически вдвое – до 20%, по сравнению с 40% - без использования системы поддержки (рис. 8, интервал I_0). Использование же системы в режиме

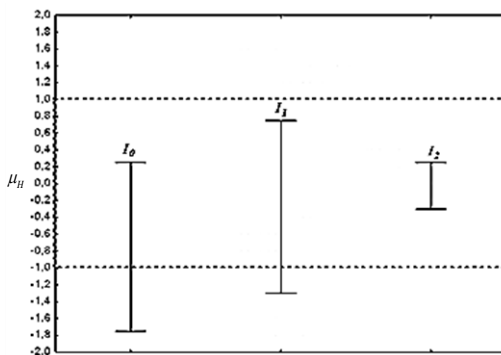


Рис. 8. Точность приведения ЛА на срез ВПП с использованием системы поддержки действий пилота и без таковой. Доверительные интервалы для отклонения от центра терминальной области в продольном канале

прогноза приведения в заданный интервал (рис. 8, интервал I_2) позволило полностью исключить неудачные посадки. Этот результат указывает на целесообразность и эффективность использования предложенного подхода и, в частности, предложенных моделей действий летчика, для решения задачи контроля и поддержки его управляющих действий.

В заключении сформулированы основные результаты полученные в процессе проведения исследований описанных в работе.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Рассмотрены современные подходы к разработке систем поддержки действий летчика. В основе большинства подобных систем лежит идея расширения информационного поля пилота путем использования дополнительных информационных сигналов. Показано, что наибольшей универсальностью среди систем поддержки принятия решений обладают системы, основанные на использовании в том или ином виде моделей деятельности летчика.

2. Проведен анализ существующих подходов к разработке математических моделей деятельности летчика. Показано, что основным недостатком, присущим большинству из них, является невозможность учёта индивидуальных особенностей конкретного летчика при реализации мер контроля и поддержки его управляющих действий. Это обстоятельство может существенным образом ограничивать эффективность использования таких моделей, особенно в условиях совершенствования технического сегмента эргатических систем типа «самолет-летчик».

3. Путем статистической обработки данных, накопленных в процессе моделирования выполнения посадочных режимов на аппаратно-программном симуляторе самолета МиГ-АТ, подтверждено наличие у летчика индивидуальной устойчивой манеры пилотирования, которая проявляется в значениях

характеристик параметров движения ЛА и параметров, характеризующих управляющие действия летчика. Полученный результат подтверждает необходимость учета индивидуальной манеры в системах контроля и поддержки управляющих действий летчика.

4. Рассмотрена возможность использования аппарата искусственных нейронных сетей для решения задачи формирования индивидуально-адаптированной экспериментальной модели управляющих действий летчика. Показано, что для решения данной задачи может быть использована нейронная сеть типа многослойный персептрон с одним скрытым слоем. Рассмотрены алгоритмы формирования индивидуально-адаптированной нейросетевой модели управляющих действий летчика, основой которых является процедура обучения нейронной сети с использованием данных, накопленных в результате предшествующей деятельности летчика.

5. Предложены алгоритмы формирования рекомендаций летчику на основе его индивидуально-адаптированной нейросетевой модели и текущего вектора состояния системы «самолет-летчик». Такие рекомендации могут формироваться как на основе прогнозирования значения промаха, так и на основе решения задачи классификации.

6. Проведено стендовое моделирование, подтвердившее эффективность предложенных алгоритмов контроля и поддержки управляющих действий летчика на основе индивидуально-адаптированной нейросетевой модели его действий. Показано, что использование предложенных моделей и алгоритмов позволяет статистически достоверно повысить точность приведения ЛА в заданную область при выполнении посадки. При этом использование подхода, предполагающего решение задачи аппроксимации для прогноза отклонения от центра ТО при выполнении посадки позволяет повысить точность приведения ЛА в ТО в 2 раза, в то время как использование подхода, предполагающего решение задачи классификации для прогноза отклонения от центра ТО при выполнении посадки позволяет полностью исключить полеты, в которых не выполняются требования по точности приведения ЛА в ТО.

7. Предложена архитектура функционально-программного прототипа индивидуально-адаптированной системы поддержки управляющих действий пилота на этапе посадки в соответствии с которой функционирование системы осуществляется двух режимах. В режиме поддержки действий летчика система на основе текущего состояния системы «самолет-летчик» и нейросетевой модели летчика осуществляет контроль его управляющих действий и, в случае необходимости, формирует соответствующие рекомендации. В режиме послеполетной обработки информации осуществляется обработка данных, полученных в последнем полете и уточнение на их основании нейросетевой модели летчика.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Все результаты, представленные в работе, получены лично автором, тема диссертации отражена в 4 статьях [1,2,3,4] в изданиях из перечня рекомендованного

ВАК Минобрнауки России, в 2 свидетельствах о регистрации программы для ЭВМ [5,6] и в сборниках тезисов и сборниках трудов 5 конференций [7,8,9,10,11].

Статьи в журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ

1. **В.Н.Евдокименков, Р.В.Ким, А.Б.Векишина, В.А.Якименко** Исследование индивидуальных особенностей управляющих действий летчиков в процессе посадки на основе нейросетевых моделей // Вестник МАИ 2015 т22 №3 гор. Москва. с.17-30
2. **В.Н.Евдокименков, Р.В.Ким, В.А.Якименко** Согласование технического и биологического сегментов эргатической системы «самолет-летчик» с использованием нейросетевого подхода // Труды МАИ 2016 № 89 г. Москва
3. **В.Н.Евдокименков, Р.В.Ким, В.А.Якименко** Индивидуально-адаптированный контроль и поддержка управляющих действий летчика на основе нейросетевых моделей // Вестник компьютерных и информационных технологий, (принята в печать) Москва 2016г.
4. **Д.М.Кружков, В.А.Якименко** Методы и алгоритмы оценки эффективности эксплуатации транспортных средств // Научное обозрение 2016 №11 Саратов с.142-148

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

5. **В.Н.Евдокименков, Р.В.Ким, В.А.Якименко** Программа формирования индивидуально-адаптированной нейросетевой модели управляющих действий летчика при выполнении типовых полетных режимов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016610115 от 11.01.2016
6. **Д.М.Кружков, В.А.Якименко** Оценка качества эксплуатации транспортного средства на основе обработки измерительной информации с использованием априорной функции потерь. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015613801 от 26.03.2015

Другие публикации

7. **Р.В.Ким, А.Б.Векишина, В.А.Якименко** Контроль функционирования систем летательного аппарата на ранних этапах эксплуатации с использованием эллипсоидальной модели состояний. // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2014» Москва. 22 – 24 апреля 2014 г. Тезисы доклада. с. 195-196.
8. **А.Б.Векишина, В.А.Якименко** Разработка индивидуально-адаптированной системы поддержки летчика с использованием нейросетевой модели // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2015» гор. Москва. 21 – 23 апреля 2015г. Тезисы доклада. с. 68
9. **В.Н.Евдокименков, Р.В.Ким, А.Б.Векишина, В.А.Якименко** Нейросетевая модель управляющих действий как основа формирования подсказок в индивидуально-адаптивной системе поддержки летчика // X-я Всероссийская юбилейная научно-техническая конференция «Проблемы совершенствования робототехнических систем ЛА» гор. Москва. 26 июня 2015г. Текст доклада. с. 11-13
10. **В.А.Якименко** Индивидуально-адаптированная система поддержки управляющих действий летчика при выполнении типовых полетных режимов //

XLII Международная молодежная конференция «Гагаринские чтения», Москва. 12-15 апреля 2016г. Тезисы доклада с. 46-47

11. **В.Н.Евдокименков, Р.В.Ким, В.А.Якименко** Использование нейросетевых моделей для согласования операторских возможностей пилота с характеристиками технического сегмента эргатической системы «самолет-летчик» // XXI Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация», Евпатория. 3-10 июля 2016г. Тезисы доклада с. 97-100