

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**  
**«Московский авиационный институт**  
**(национальный исследовательский университет)»**



На правах рукописи  
УДК 629.7.05

**Иед Каисс**

**Формирование системы предупреждения авиационных  
происшествий при энергичном маневрировании спортивного самолёта  
по результатам имитационного летного эксперимента**

Специальность 05.07.09 –  
Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
Масленникова Галина Евгеньевна

Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** **Масленникова Галина Евгеньевна**  
доктор технических наук  
начальник отдела ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации.

**Официальные оппоненты:** **Киселев Михаил Анатольевич**  
доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой АКПЛА Московский  
государственный технический университет  
гражданской авиации.

**Приходько Станислав Юрьевич**  
кандидат технических наук  
инженер 220 военного представительства Министерства  
обороны РФ (АО "НЦВ Миль и Камов")

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Национальный исследовательский центр «Институт  
имени Н.Е. Жуковского»

Защита состоится «10» декабря 2020 года в 14.00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, а также на сайте института по адресу: [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=118089](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=118089)

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Ученый совет МАИ.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.12,  
кандидат технических наук, доцент



Старков Александр Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена вопросам разработки математической модели для исследования влияния ошибок пилота на изменение траекторных параметров при выполнении энергичных манёвров на спортивном самолете с целью повышения безопасности выполнения фигур высшего пилотажа на спортивном самолете путем разработки системы тренажерной подготовки с предупреждением о вероятном столкновении с землей.

**Актуальность темы исследования.** Соревнования по высшему пилотажу проводят на самолётах с высокими аэродинамическими и пилотажными качествами. Ярким примером летательных аппаратов (ЛА) такого класса является одноместный самолёт Як-55М. Соревнования на таких спортивных самолётах (СпС) проводятся на специальных аэродромах, соответствующих правилам Международной авиационной федерации (ФАИ). Комплексы пилотажа составляются с использованием списка фигур из системы Арести, за исключением дисциплины «фристайл». Выполнение манёвров пилотажа в зоне пилотирования размером 1000 x 1000 м, предписываемой правилами соревнований, сопровождается повышенной вероятностью авиационных происшествий. По статистике каждый год происходит в среднем 25 происшествий на соревнованиях и авиашоу различного уровня. Исследование авиационных инцидентов и происшествий показывает, что их основной причиной является потеря управления при выполнении фигур высшего пилотажа. При этом в действующих Нормах летной годности отсутствуют четкие требования и критерии безопасности выполнения фигур пилотажа на СпС, следовательно, повышенный уровень риска в авиаспорте требует разработки специальных мер по увеличению безопасности полётов.

Для сравнения следует сказать, что в гражданской авиации (ГА) для обеспечения безопасности полёта опасные режимы выявляют заранее при помощи специальных инструментальных средств, входящих в автоматическую бортовую систему управления самолётом (АБСУ). Данная система предусматривает выполнение всех сложных навигационных расчетов, включая точную оценку местоположения самолета по информации, собранной из навигационных датчиков, а также прогноз поведения других участников воздушного движения с целью предотвращения столкновений с землёй и с другими летательными аппаратами.

В АБСУ входят автоматы, обеспечивающие ограничение значений некоторых заданных величин, характеризующих полёт. Примером такой системы может служить система предупреждения столкновения с землей (СПСЗ), основанная на измерениях высоты полета за счет использования информации точных навигационных вычислителей, цифровых аэронавигационных баз данных и цифрового рельефа подстилающей поверхности, а также связи с системами ГЛОНАСС или GPS. Однако система управления СпС характеризуется, как правило, предельной простотой и не дополняется возможностью автоматического управления. Таким образом, единственным способом повышения безопасности пилотажа СпС является отработка мышечных навыков у пилотов путем разработки системы предупреждения, не основанной на автоматическом уходе с опасной высоты, а содержащей только предупреждение об уровне вероятности возникновения опасной ситуации и возможности перехода этой ситуации в катастрофическую. В силу приведенных выше соображений исследования, направленные на создание модели систем предупреждения для тренажерной подготовки пилотов к выполнению нисходящих маневров, являются **актуальными**.

В связи с тем, что для СпС ранее не разрабатывались системы предупреждения о возникающих опасностях при выполнении фигур высшего пилотажа, требуется разработать концепцию такой системы, основывающейся на маневрах уклонения. Для этого, в первую очередь, нужно провести исследование диапазона безопасных значений скорости, высоты и перегрузки во время маневров на СпС при выполнении различных фигур пилотажа из списка Арести.

В настоящее время ведущие самолетостроительные фирмы мира для исследования динамики полёта широко используют компьютерное моделирование. Применительно к рассматриваемой задаче, перспективной для исследования изменения траектории самолётов при выполнении манёвров является математическая модель пространственного движения с 6 степенями свободы 6-DOF в Matlab. Платформа 6-DOF способна имитировать любые управляемые перемещения исследуемых объектов в пространстве и обеспечить максимальную свободу движений при маневрировании. Кроме того, значительное распространение в последнее время получили расчетные методы, основанные на применении искусственных нейронных сетей (НС). Это обусловлено способностью НС обучаться аппроксимировать функции и экстраполировать их значения,

разделять множество данных о динамике ЛА на классы и отбирать наиболее информативные признаки, несущие в себе наиболее полную информацию о безопасности полёта. Немаловажно также, что указанные вычисления НС легко поддаются распараллеливанию и могут выполняться в условиях ограниченной информации. Исследования математических моделей движения ЛА, основанных на нейросетевых принципах работы, показывают, что применение данного математического инструмента может расширить решаемый класс задач динамики движения СпС в условиях выполнения ими фигур высшего пилотажа.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами, связанными с системами предупреждения для самолётов, занимаются различные организации, в частности, ИКАО, Международная ассоциация воздушного транспорта, Федеральное управление гражданской авиации США, NASA Langley Research Center, NASA Armstrong Flight Research Center. В России существенный вклад в решение проблемных вопросов безопасности полетов внесли ГосНИИ ГА, МАИ, ГЦБПВТ, МГТУ ГА. В решении рассматриваемой проблемы значительны достижения таких исследователей, как В.В. Воробьев, Г.Н. Гипич, Mark A. Skoog, А.Г. Гузий, С. Howell, Б.В. Зубков, Е.А. Куклев, James L. Less.

В части создания и использования нейросетевых алгоритмов для решения различных прикладных проблем существует обширная литература. Что касается создания искусственных нейронных сетей различных видов, а также алгоритмов их обучения, следует отметить значительный вклад таких ученых, как Ф. Розенблатт, Б. Уидроу, С. Гроссберг, Дж. Андерсон, Т. Кохонен, Дж. Хопфилд, Д. Румельхарт, Дж. Хинтон, С. Хайкин, А.И. Галушкин, В.Л. Дунин-Барковский, А.Н. Горбань. Значительный вклад в решение прикладных проблем с использованием нейросетевых средств внесли такие исследователи как К.М. Бишоп, П. Вербос, Ф.Л. Льюис, Л.А. Станкевич, В.Д. Кошур, А.Н. Васильев, Д.А. Тархов, А.Ю. Дорогов, Н.Г. Макаренко, Д.В. Прохоров. Применение этих средств для решения задач, связанных с моделированием, идентификацией и управлением движением летательных аппаратов рассматривается в работах Ю.И. Нечаева и Ю.В. Тюменцева. Однако задачи обеспечения безопасности полета ЛА в упомянутой выше трактовке в работах перечисленных исследователей не рассматривались.

**Цель работы** состоит в разработке модели системы предупреждения о возникновении опасной ситуации при выполнении нисходящих маневров для

улучшения качества тренажерной подготовки пилотов и для решения вопроса целесообразности использования такой системы непосредственно на борту самолета.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- изучены и освоены методы моделирования динамики полёта спортивных самолётов;
- изучены возможные ошибки пилотирования СпС и их влияние на изменение траектории манёвра;
- разработана нейросетевая модель, позволяющего рассчитать безопасные высоты пилотажа спортивного самолета.
- проведен модельный эксперимент по выполнению манёвра уклонения на спортивном самолёте при наиболее вероятных ошибках пилотирования;
- разработана концепция работы устройства предупреждения о необходимости прекращения маневра для подготовки летчика-спортсмена.

**Объектом исследования** является модель спортивного самолета, не оборудованного автоматической системой управления, предназначенного для участия в соревнованиях и авиашоу путем выполнения различных пилотажных фигур, в том числе на низких высотах и малых скоростях полета.

**Научная новизна** проведенного исследования состоит в том, что предложен подход к контролю маневрирования при выполнении фигур высшего пилотажа применительно к спортивному самолету, нацеленный на повышение безопасности полета. Методика этого контроля основана на поиске закономерностей между ошибками пилотирования и их последствиями, которые могут приводить к возникновению критических ситуаций в полете при выполнении конкретных маневров различного вида. Соотношение, описывающее такого рода закономерности, является нелинейной функцией нескольких переменных, которая строится на основе неполных и неточных исходных данных, полученных экспериментальным путем. Реализация полученной закономерности осуществлена в виде нейросетевой модели. На этой основе разработан метод вычисления комплекса безопасных манёвров уклонения СпС при заданном пилотажном комплексе, составленном на основе фигур из списка Арести. Этот метод основан на расчете диапазона допустимых высот и скоростей выполнения маневра с учётом возможных ошибок пилотирования и вероятности их возникновения.

Разработана концепция работы устройства предупреждения для подготовки летчика-спортсмена о необходимости прекращения выполняемого маневра и совершения манёвра уклонения.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в том, что для совершенствования тренажерной подготовки пилота к выполнению пилотажа на спортивном самолете предложено использовать разработанную автором концепцию предупреждающего устройства для предотвращения возникновения аварийных ситуаций. В рамках этой концепции разработана нейросетевая модель, связывающая ошибки пилотирования и их последствия, которые могут приводить к возникновению критических ситуаций в полете. Предложенная концепция может послужить основой для разработки соответствующих устройств, устанавливаемых на самолеты рассматриваемого класса, что обеспечит для них повышение безопасности полета при выполнении фигур пилотажа.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе использованы методы математического моделирования пространственного движения самолёта, статистический анализ и теория вероятностей, нейросетевое моделирование, теория аэродинамического подобия, а также имитационное моделирование.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- Искусственная нейронная сеть, описывающая зависимость между ошибками пилотирования и их последствиями;
- включение вероятностных оценок ошибок пилотирования в систему определения минимальной высоты пилотажа;
- алгоритм вычисления безопасной высоты начала маневра, основанный на нейросетевом представлении соотношения между ошибками пилотирования и их последствиями;
- алгоритм формирования предупреждающего сигнала для выбора маневра уклонения при выполнении энергичного нисходящего маневра;
- методика использования системы предупреждения при тренажерной подготовке летчиков-спортсменов для отработки навыков совершения маневра уклонения.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов подтверждена сопоставлением результатов численного моделирования с результатами, полученными на стенде-имитаторе.

**Апробация.** Основные положения и результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях: XLIV и XLV Международных молодёжных научных конференциях «Гагаринские чтения»; Актуальные проблемы безопасности полетов, 2018 г; 17-ой и 18-ой международных конференциях «Авиация и космонавтика».

По теме диссертации опубликовано четыре статьи, три из них в рецензируемых изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, а также одна статья в журнале, индексируемом в базе данных Scopus.

Кандидатская диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы, включающем 109 наименования. Диссертация представлена на 100 страницах, и содержит 32 рисунков, 12 таблиц.

## **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и определены задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов работы. Описаны структура и объем диссертации

**В первой главе** проводится анализ причин авиационных происшествий (АП) со спортивными самолетами (СПС) и ошибок пилотирования, приводятся требования норм летной годности и показано влияние ошибок пилотирования на безопасность полетов. Важность проблемы обеспечения безопасности полётов возрастает в связи с усложнением ЛА и расширением спектра выполняемых манёвров.

Точные данные о количестве аварий спортивных самолетов (СПС) в мире отсутствуют, однако имеются точные сведения о количествах аварий на авиашоу, которые показаны на диаграмме (рис. 1). Как видно из диаграммы, за период с 2010 по 2014 год число происшествий постепенно снизилось более чем в 2 раза, но до 2017 г снова отмечен небольшой рост числа АП на авиашоу.



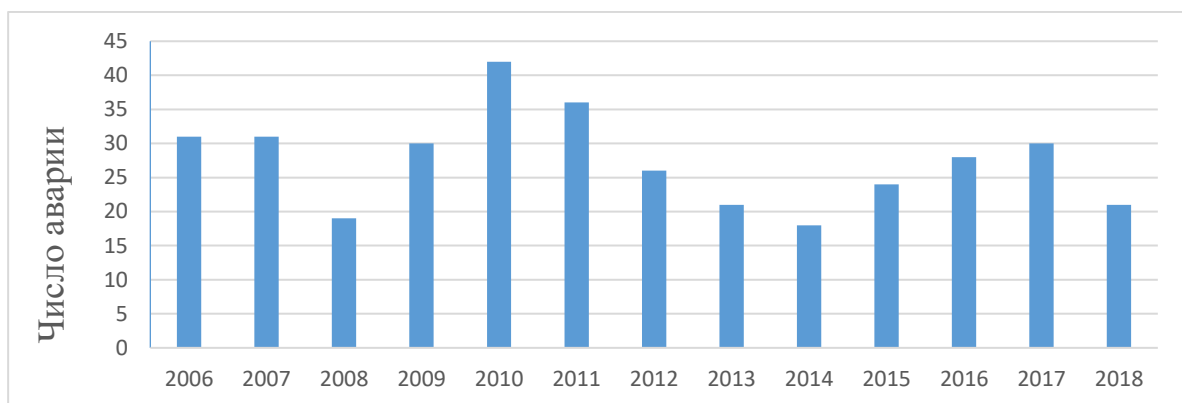


Рисунок 1 – Статистика происшествий на авиашоу с 2006 по 2018 г.

Около 25% всех АП в мире относятся к пилотированию спортивных самолетов. Основные причины АП на спортивных самолетах и их процентное соотношение за период с 2012 по 2016 гг. показаны на рис. 2.

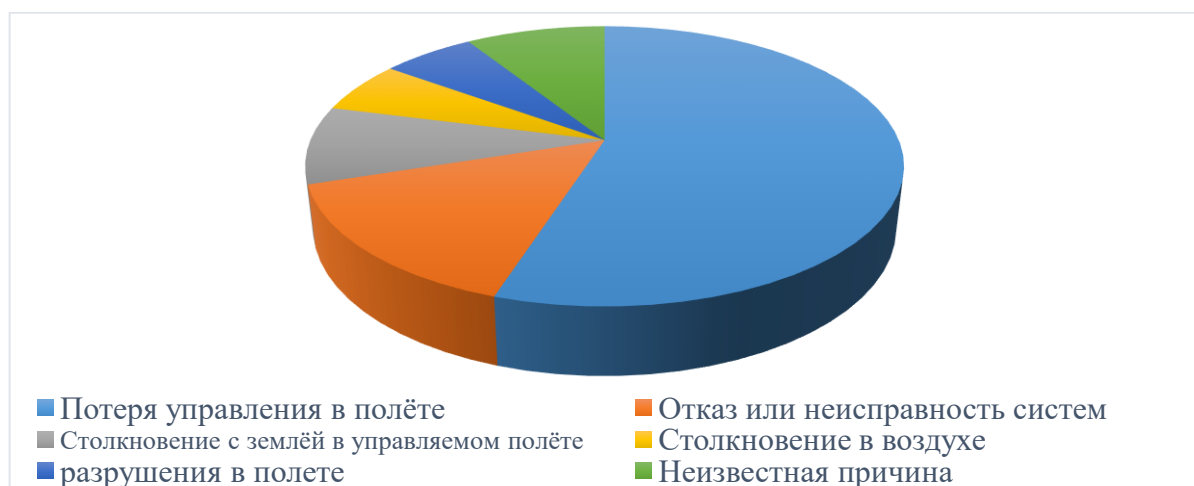


Рисунок 2 – Процентное соотношение АП спортивных самолетов, 2012-2016 гг.

Как видно из диаграммы, основные причины АП следующие:

- потеря управления в полёте, в ходе которого происходит частичная или полная потеря управления летательным аппаратом – это наиболее частая причина АП, на ее долю приходится 55% всех АП;
- столкновение в воздухе – 6%;
- столкновение с землёй в управляемом полёте – 9%;
- техническая неисправность системы или агрегата– 15%;
- разрушение элементов конструкции самолета в полете – 6%;

На долю других причин приходится 9% АП. Наибольший процент летных происшествий на СпС связан с ошибками пилотирования, а также с выполнением пилотажа на высотах, скоростях и при перегрузках, недопустимых для данного класса ЛА.

Согласно существующим нормам летной годности, самолеты пилотажной и акробатической категории должны обеспечивать безопасность выполнения фигур, однако не указано, каким образом должно проверяться обеспечение выполнения данного требования. Четкая методика и условия отработки навыков пилотирования при выполнении пилотажа на спортивных самолетах в нормах летной годности отсутствуют. Также в консультативных циркулярах 23-8В и FAA-H-8083-3А отсутствует методика проверки безопасной скорости и начальной высоты выполнения элементов пилотажа. Поэтому разработка методики таких исследований и критериев безопасности пилотажа, в том числе и при ошибках пилотирования, является на сегодняшний день весьма актуальной задачей.

Рассматривая влияние ошибок пилотирования на безопасность полетов, следует отметить, что по данным мировой статистики ошибки пилотирования являются причиной 60...70% авиационных катастроф.

Достигнутый в настоящее время в авиации высокий уровень безопасности полетов не должен заслонять тот факт, что многие авиационные катастрофы можно было бы предотвратить. Важно понимать, что меры безопасности и защиты в такой сфере, как авиация, не могут быть достаточными. Их совершенствование должно быть направлено на полную ликвидацию АП. К тому же, действующие в настоящее время меры безопасности неадекватны, а также порой игнорируются, что приводит к возникновению аварийных ситуаций.

Перспективным направлением повышения уровня безопасности полетов является разработка стратегий вмешательства, направленных на снижение вероятности и/или последствий ошибки пилота.

**Выводы по главе 1:** Основные причины авиационных происшествий связаны с ошибками оценки пространственного положения самолета и его управляемости. Для детального изучения влияния ошибок пилотирования на безопасность полета необходимо проводить специальные летные или модельные исследования, а также совершенствовать тренажерную подготовку пилотов для предотвращения возможной потери управляемости и столкновения с землей в полете.

**Вторая глава** посвящена обзору существующих в авиации систем безопасности. В целях обеспечения безопасности полёта целесообразно заранее выявлять опасные режимы при помощи специальных инструментальных средств,

входящих в автоматическую бортовую систему управления самолётом (АБСУ). Общий принцип действия специальных инструментальных средств предупреждения критических режимов полета (СПКР) основан на слежении за определенными пилотажными параметрами и скоростями их изменения. Система сигнализирует экипажу, если установленные значения отклоняются от допустимых, и формирует рекомендации по устранению опасной ситуации.

Для предотвращения столкновений с землёй используется система предупреждения о близости земли (Ground Proximity Warning System, GPWS) – система воздушного судна, предназначенная для предупреждения пилотов об угрозе столкновения с землёй или иным препятствием. Основным прибором систем предупреждения, определяющий возможные опасные условия, это радиовысотомер. С его помощью система отслеживает высоту, на которой летит самолёт, производит вычисления и на их основании определяет, является ли ситуация опасной. В случае опасных ситуаций пилот получает различные предупреждения, с предложением процедур, которые должны следовать для выхода из возникшей ситуации. Однако пилоты не всегда оказываются в состоянии выполнить требуемые инструкции, что также может привести к аварии.

Кроме того, если выпущены шасси и закрылки, то система не подаёт предупреждений экипажу, так как ожидает нормальной посадки самолёта. Еще одно слабое место традиционных GPWS-систем – слишком позднее оповещение экипажа об опасности в случае резкого изменения рельефа (например, появления крутого склона). В этом случае у пилота останется крайне мало времени для каких-либо действий на уклонение. Для борьбы с этим недостатком в 1990-е гг. была разработана усовершенствованная система предупреждения о близости земли (Enhanced Ground Proximity Warning System, EGPWS), работа которой основана на GPS-технологии, а в ее базе данных содержится информация о рельефах местности по всей планете. Ведется постоянная работа над совершенствованием данной системы с целью ликвидации ошибок при отсутствии сигнала предупреждения или его запаздывании, а также с целью предотвращения некорректных инструкций, выдаваемых летчику.

В настоящее время разработчики систем подобного рода во всем мире занимаются поиском решения проблем, обозначенных выше.

Современные СППЗ предназначены для установки на все типы самолетов, том числе и на СпС с поршневыми двигателями. В таблице 1 представлены

сравнительные данные по характеристикам отечественных и зарубежных СППЗ, устанавливаемых на самолетах гражданской авиации РФ.

Таблица 1 – Технические характеристики самолетных систем СППЗ

Технические характеристики		ТТА-12(S)	СРПБЗ	СРППЗ-2000	EGPWS Mark-V	ST-3400	T <sup>2</sup> CAS
Виды индикации		1)сверху 2)сбоку	1)сверху 2) сбоку	1) сверху 2) сбоку	сверху	сверху	сверху
Наличие ПИ СНС		+	–	–	+	–	–
Наличие дополнительных режимов	Avoid Terrain	–	–	–	–	+	+
	RAAS	–	–	–	+	–	–
	Сдвиг ветра	–	–	–	–	–	+

В существующих вариантах систем предупреждения приближения земли (СППЗ) для малой авиации не используются автопилоты, а их работа основана на предупреждении пилота о необходимости выполнения маневров уклонения, для чего система предупреждения должна контролировать допустимую скорость и высоту начала маневра.

Установка СППЗ существенно повышает безопасность полетов. Так, в результате проведенного тестирования СППЗ для самолета Cirrus SR22 было определено, что время реакции пилота на индикацию о маневре уклонения составляет от 0,5 до 3,6 с, что в принципе достаточно для предотвращения аварии.

Однако местность, на которой будут проводиться соревнования, заранее определяется их организаторами, а основной характеристикой авиашоу является зрелищность, что подразумевает использование минимальных высот и скоростей полета. Это обстоятельство, в сочетании с требованиями FAI по проведению соревнований, приводит к тому, что установка СППЗ на СпС не практикуется, а кроме того, существует тенденция максимально упрощать конструкцию и бортовое оборудование самолётов для соревнований. Таким образом на первое место при обеспечении безопасности выполнения пилотажа на спортивном самолете выходит отработка мышечных навыков пилота для безопасного выполнения маневров в процессе тренажерной подготовки.

Система управления спортивным самолетом, не предусматривает использования средств автоматизации. Соответственно, на данный момент СпС не

имеют эффективной системы автоматического предупреждения столкновения с землей на основе прогнозирования траектории маневра уклонения. Эту проблему можно решить путём внедрения в СПСЗ устройства, которое будет анализировать диапазон допустимых высот и скоростей выполнения маневра с учётом возможных ошибок пилотирования и их вероятности возникновения.

Для обеспечения безопасности выполнения элементов пилотажа на СПС недостаточно просто рассчитать диапазон допустимых для выполнения маневра скоростей и высот полета, необходимо еще разработать концепцию устройства, позволяющего летчику получить предупреждение об опасности, в случае, если возможные ошибки при выполнении маневра смогут привести к потере управляемости и столкновению с землей.

**В выводах ко второй главе** указывается, что существующие системы предупреждения обеспечивают защиту в основном при наличии систем автоматического управления, и неприменимы для СПС. Система, направленная на увеличение безопасности полетов СПС должна быть основана на выработке навыков выхода из режима на основе предупреждающего сигнала, а уровень предупреждения должен быть непосредственно связан со степенью опасности маневра.

**В третьей главе** описывается процесс изучения численной модели 6-DOF для анализа движения ЛА с 6 степенями свободы, которая используется в данном исследовании для уточнения требований к безопасности полетов. Математическая модель 6-DOF построена на платформе MATLAB/Simulink с использованием коэффициентов аэродинамических сил и моментов. Точность нелинейной модели 6-DOF была подтверждена вычислительными экспериментами, её отклики изучались с использованием данных авиасимулятора с применением метода параллельного сравнения.

В качестве платформы, на основе которой разработана модель в этом исследовании, был выбран самолет Як-55М, предназначенный для тренировки лётчиков-спортсменов и выступлений на соревнованиях по высшему пилотажу.

В разделе 3.1 проводится расчет аэродинамических характеристик самолета Як-55М. Аэродинамические силы и моменты рассчитывались с использованием аэродинамических коэффициентов. Полученные результаты в дальнейшем использованы для определения управляемости ЛА, устойчивости, и для построения

траектории. Адекватность полученной на основе коэффициентов модели была подтверждена путем применения метода параллельного сравнения траекторий, полученных численным моделированием, с данными авиасимулятора X-Plane 11, который может служить генератором полетных данных различных ЛА, в том числе спортивных самолетов, включая самолет Як-55М.

В разделе 3.2 описывается нелинейную модель движения с шестью степенями свободы для самолета Як-55М. Эта модель 6-DOF построена на платформе MATLAB / Simulink Структура модели разбита на несколько модулей, каждый из которых описан в этой главе. Структура модели 6-DOF показана на рис.3.



Рисунок 3 – Блок-схема нелинейной модели 6-DOF

Из материалов, полученных методами математического моделирования, следует, что в случае ошибки пилотирования, заключающейся в запаздывании начала вывода из пикирования, для обеспечения эквивалентной рекомендованному способу вывода безопасности полетов, рекомендуется увеличить диапазон отклонения руля высоты, но при этом управление не должно быть ступенчатым.

**Выводы по главе 3.** Наличие ошибок пилотирования существенным образом изменяет траекторию маневра и влияет на безопасность его выполнения, так как существенно увеличивается потеря высоты в случае изменения темпа отклонения рулей. Результаты исследований в целом совпадают с данными численного моделирования, что позволяет говорить об адекватности модели, построенной для проведения численного эксперимента, а также для разработки рекомендаций по выполнению манёвра уклонения на спортивном самолёте при изучаемых ошибках пилотирования. Наличие ошибок пилотирования существенным образом изменяет

траекторию маневра и влияет на безопасность его выполнения, так как существенно увеличивают потери высоты в случае изменения темпа отклонения рулей.

**В четвертой главе** производится экспериментальное исследование ошибок пилотирования на авиасимуляторе. Для построения системы предупреждения, кроме определения безопасной высоты начала маневра, также необходимо определить вероятностные характеристики ошибок пилотирования. Создание функциональной зависимости, основанной на исследовании изменения высоты в случае ошибок пилотирования с учетом вероятности возникновения этих ошибок, позволит с заранее определенной вероятностью определять безопасную высоту начала маневра.

В разделе 4.1 производится исследование оценки вероятности ошибок пилотирования при выполнении пикирования и переворота. Определение вероятностных характеристик ошибок пилотирования выполнено путем численного эксперимента на авиасимуляторе X-Plane 11, с оценкой изменения параметров полета по сравнению с рекомендованной техникой пилотирования.

При исследовании запаздывания вывода из переворота от предлагаемой скорости начала вывода из переворота, равной 210 км/ч, была получена диаграмма распределения, показанная на рис. 4.

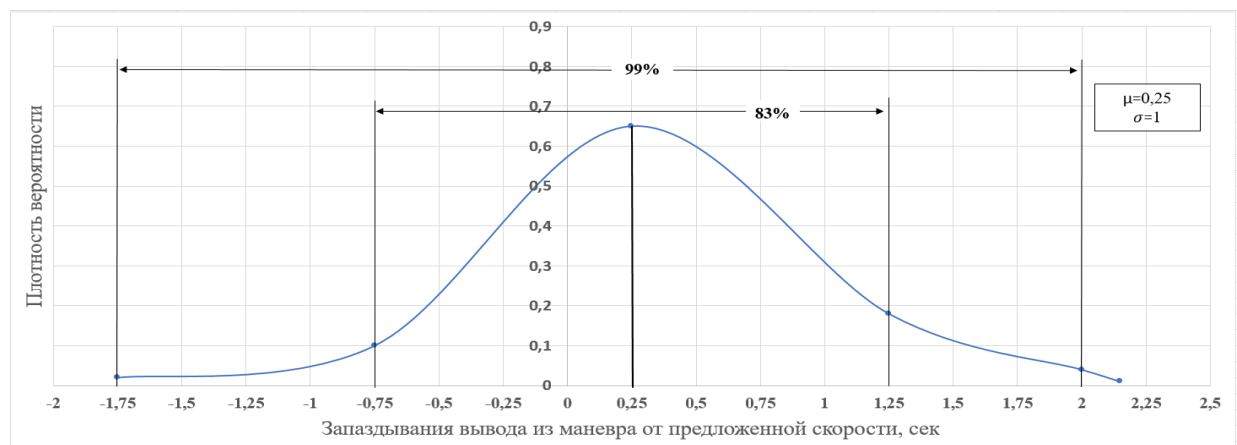


Рисунок 4 – Диаграмма распределения запаздывания выхода из переворота при рекомендованной скорости начала вывода 210 км/ч

При полученном распределении установлено, что с вероятностью 99% запаздывание дачи рулей на вывод не превысит 2 сек. Проведем исследование изменения траектории полета при таком запаздывании отклонения рулей на математической модели самолета Як-55М.

В разделе 4.2 проводится исследование изменения траектории полета при таком запаздывании отклонения рулей (2 сек) на математической модели самолета Як-55М. Цель данного исследования – улучшить понимание влияния ошибки пилота на безопасность полета при выполнении маневров. По сравнению со стандартным выводом из переворота при достижении рекомендованной скорости, скорость на выводе в этом случае возрастает, кроме того, незначительно возрастает перегрузка на выходе из переворота и увеличивается потеря высоты. В диссертации описаны два вида управления рулем высоты в случае запаздывания вывода самолета из переворота:

**Стратегия 1.** Полное взятие ручки управления «на себя» для вывода из переворота при линейно-нарастающем в течение 1 сек отклонении руля высоты «на себя».

В этом случае максимальная скорость в процессе вывода не увеличивается, а уменьшается, и на выходе из переворота достигает скорости 165 км/час. Кроме того, в процессе этого маневра нормальная перегрузка увеличивается до 8,6 ед., т.е. при таком характере управления опасность превышения предельной максимальной перегрузки (9 g) [61] и выхода на недопустимые углы атаки резко увеличивается. С другой стороны, потеря высоты во время выполнения маневра в этом случае увеличивается более чем на 55 м, по сравнению с потерей высоты при рекомендованном управлении.

Изменение параметров траектории в этом случае представлено на рис. 4.4.

**Стратегия 2.** Входное линейно-нарастающее в течение 2 сек отклонение руля высоты «на себя» до полного расхода. Результаты моделирования траектории выхода показаны на рис. 4.4. Из представленных данных видно, что в этом случае максимальная нормальная перегрузка, равная 7.4 единиц, на выходе из переворота достигается при скорости, повышенной относительно рекомендованной 280 км/час, то есть, при таком характере управления нагрузки на конструкцию возрастают, что также может привести как к потере управляемости, так и к остаточным деформациям конструкции самолета. Потеря высоты во время выполнения маневра в этом случае увеличивается более чем на 120 м, по сравнению с потерей высоты при рекомендованном управлении.

На рис. 5 представлены графики сравнительных результатов исследования изменения траектории полета при описанных выше законах управления рулем высоты на выходе из переворота.



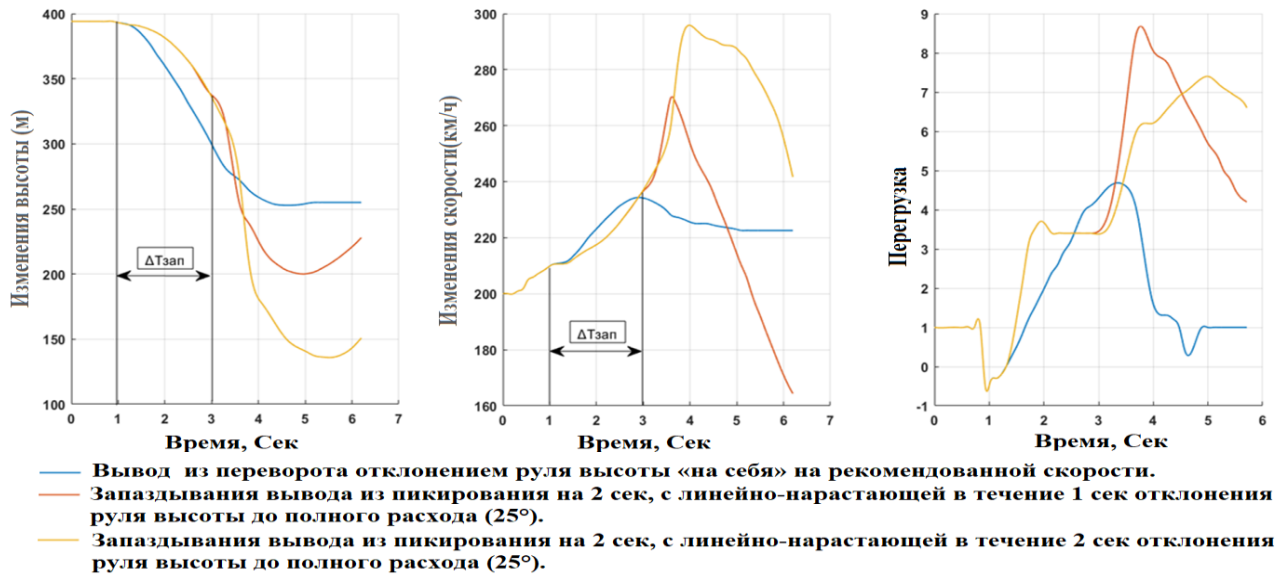


Рисунок 5 – Исследование зависимости изменения высоты, скорости и нормальной перегрузки от темпа отклонения руля высоты при выполнении переворота

Результаты проведенного исследования показали, что при использовании полного расхода руля высоты «на себя», потери высоты по сравнению со стандартным выводом из переворота могут возрасти до 82%.

**Выводы по главе 4.** Экспериментальное исследование ошибок пилотирования на авиасимуляторе позволило получить вероятностное распределение различного типа ошибок пилотирования и таким образом определить опасность выполнения маневра с заданной вероятностью.

**В главе 5** предложена методика для контроля маневрирования при выполнении фигур высшего пилотажа применительно к спортивному самолету, направленная на повышение безопасности полета при отработке техники пилотирования в процессе тренажерной подготовки. Методика включает в себя модель системы предупреждения, позволяющую отработать при наземной подготовке навыки, способствующие предупреждению попадания в аварийные ситуации при выполнении пилотажа на спортивном самолете. Данная методика основана на поиске закономерностей между ошибками пилотирования и их последствиями, которые могут приводить к возникновению критических ситуаций в полете при выполнении различных маневров. Соотношение, описывающее такого рода закономерности, является нелинейной функцией нескольких переменных, которую необходимо построить на основе неполных и неточных исходных данных, полученных экспериментальным путем. Как показывает опыт решения подобных задач, в качестве инструмента для получения требуемого результата можно

использовать искусственные нейронные сети, являющиеся эффективным средством представления нелинейных многопараметрических зависимостей.

В разделе 5.1 проводится формирование искусственной нейронной сети, описывающей зависимость между ошибками пилотирования и их последствиями.

Требуемый набор данных, используемых для обучения и тестирования нейронной сети, формировался путем выполнения серии экспериментов с использованием авиасимулятора X-Plane 11. В общей сложности было выполнено 600 маневров (переворотов, пикирований, петель Нестерова, поворотов на вертикали).

В разделе 5.2 описано проведение серии экспериментов для определения рационального значения числа скрытых слоев в формируемой сети, а также числа нейронов в этих слоях. В результате была получена нейронная сеть, реализующая соотношение вида:

$$y_i = f^{III} \left( \sum_{m=1}^{10} w_{mi}^{III} f^{II} \left( \sum_{j=1}^5 w_{jm}^{II} f^I \left( \sum_{k=1}^3 w_{kj}^I x_k + b_j^I \right) + b_m^{II} \right) + b_i^{III} \right). \quad (4)$$

Данное соотношение представляет собой нелинейное параметризованное отображение из трехмерного входного пространства в трехмерное выходное. В соотношении (4) активационные функции слоев определены как:

$$f^I(x) = f^{II}(x) = \text{tansig}(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1, \quad (5)$$

$$f^{III}(x) = \text{purelin}(x) = x. \quad (6)$$

Структура формируемой нейронной сети показана на рис. 6. В найденной рациональной структуре сети 3-5-10-3 числовые значения параметров (веса связей  $w^I, w^{II}, w^{III}$  и смещения  $b^I, b^{II}, b^{III}$ ) были получены с помощью алгоритма обратного распространения ошибки.

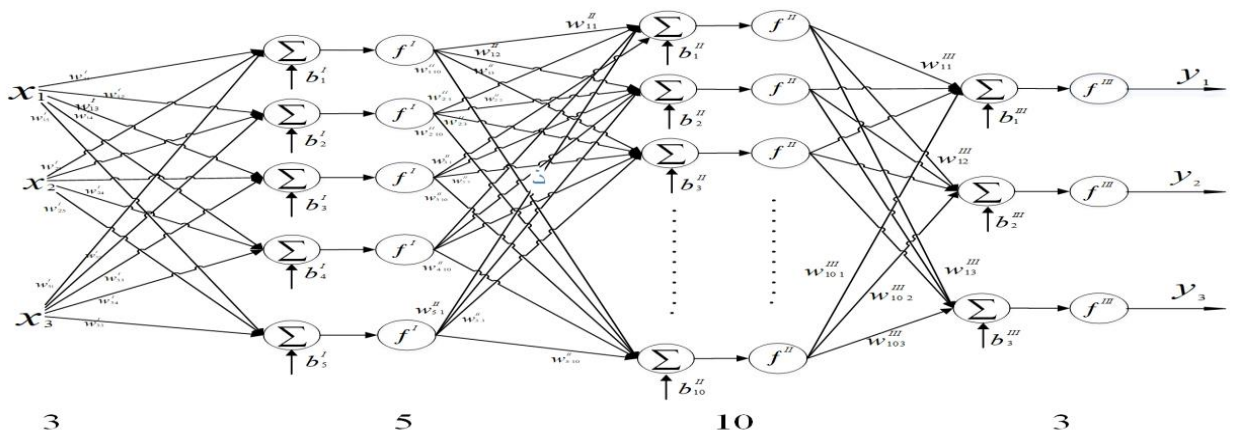


Рисунок 6 – Мультиперсептрон с двумя скрытыми слоями

В разделе 5.3 разработан алгоритм системы предупреждения (СП), структурная схема которого показана на рис. 7. В состав системы предупреждения пилота об опасных ситуациях при возникновении ошибок пилотажа входят измерительные приборы, система преобразования информации, вычислитель и индикатор.

В разделе 5.4 описаны принципы работы системы предупреждения пилота об опасных ситуациях при возникновении ошибок пилотирования.

Уведомление летчика о допустимости предпринимаемого маневра осуществляется с помощью двух устройств: вибросигнализатора и аудиосигнала в гарнитуру пилота.

Вибросигнализатор, воздействующий на ручку управления самолетом, состоит из электродвигателя, соединенного с намеренно несбалансированным маховиком. В гарнитуру пилота аудиосигнал, отображает допустимость предпринимаемого маневра.

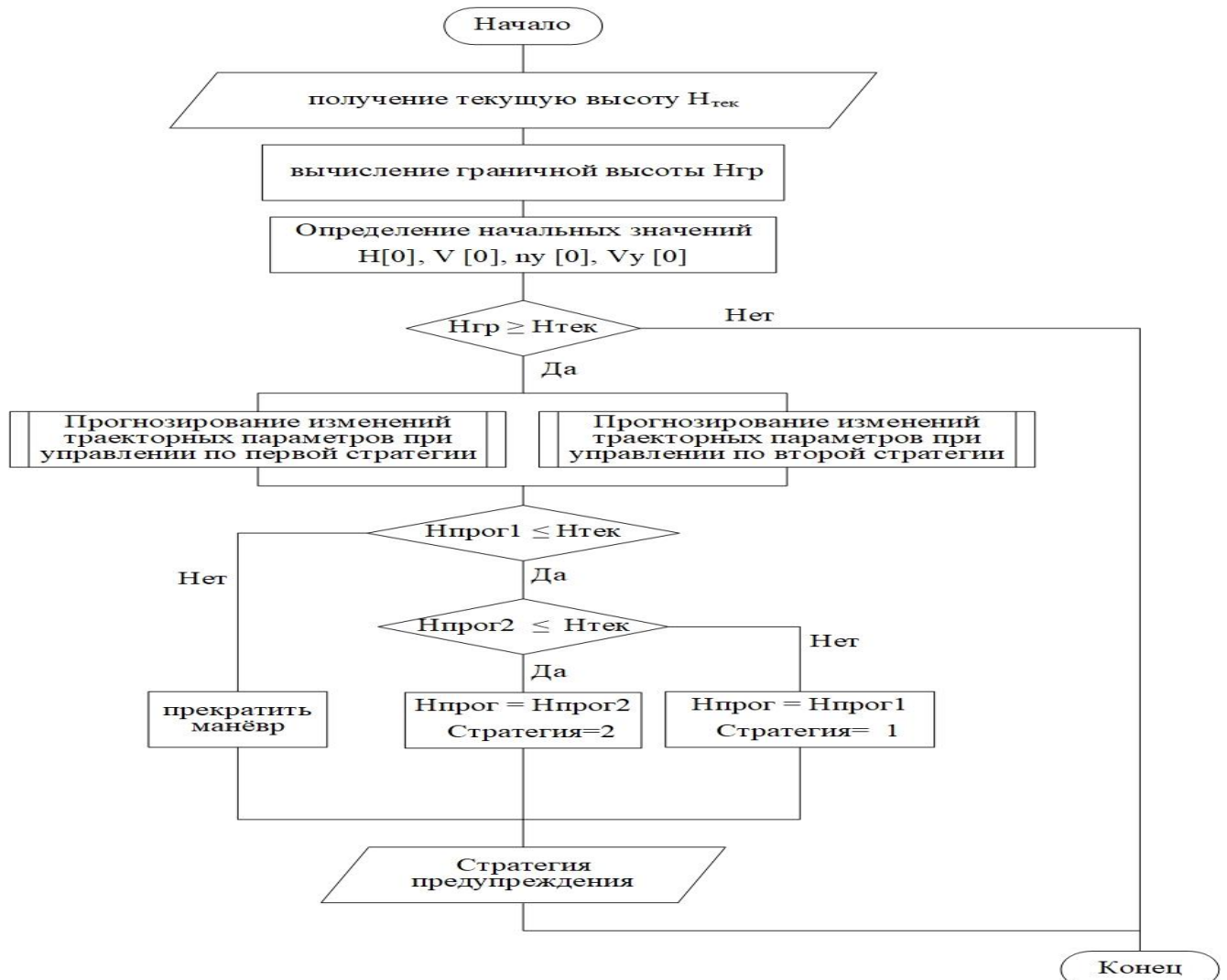


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма работы системы предупреждения

Принцип работы системы предупреждения пилота об опасных ситуациях при возникновении ошибок пилотажа основан на том, что по величине входных сигналов рассчитываются прогнозируемые значения высот завершения маневра при использовании предложенной выше математической модели и разных стратегий для выхода из маневра. Эти значения сравниваются между собой, и система выбирает стратегию, которая приводит к меньшей потере высоты и, следовательно, обеспечивает повышение безопасности полета.

В разделе 5.6 проведена количественная оценка результатов применения системы предупреждения с точки зрения повышения безопасности маневрирования. Для получения статистических данных была проведена серия маневров на авиасимуляторе X-Plane 11 с добавлением к модели самолета Як-55М устройства, максимально приближенного к изучаемой системе предупреждения. Также было выполнено несколько маневров на модели самолета Як-55М без использования системы предупреждения о возникновении опасных ситуаций. Результаты выполнения маневров на авиасимуляторе X-plane с использованием системы предупреждения (СП) и без нее указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты выполнения маневров на авиасимуляторе X-plane

Время запаздывания выхода из манёвра, с $\Delta t_{\text{зап}}$	Вероятность возникновения критической ситуации	
	Без СП	С СП
1	18,2%	6%
1,15	18,2%	1%

Как видно из таблицы 2, вероятность возникновения критической ситуации при маневрировании с использованием системы предупреждения снижается в 18 раз (при  $\Delta t_{\text{зап}} = 1,15$  сек).

Таким образом, проведенные на авиасимуляторе X-Plane 11 испытания показали улучшение показателей безопасности полета при использовании системы предупреждения пилота. В случае возникновения ошибок пилотирования применение системы предупреждения пилота об опасных ситуациях снижает вероятность возникновения критической ситуации.

**Выводы по главе 5** заключаются в выявлении связи ошибок пилотирования с безопасностью полета при выполнении ряда маневров, характерных для тренировочных и демонстрационных полетов спортивных самолетов. Эта

взаимосвязь была реализована в виде многослойной нейронной сети прямого распространения, позволяющей формировать указания, выдаваемые летчику с помощью аудиосигналов и вибросигнализации через ручку управления самолетом.

Рассмотренная выше модель была реализована и протестирована применительно к спортивному самолету Як-55М и показала эффективность предлагаемого подхода к повышению безопасности полета при выполнении фигур высшего пилотажа. Опыт показал, что применение системы позволит увеличить безопасность полета при подаче предварительного сигнала перед достижением скорости начала выхода из маневра от 3 до 18 раз.

### **Заключение**

В диссертации на основе данных модельного эксперимента было изучено влияние ошибок пилотирования на изменение траектории полета. Эксперимент проводился на базе модели 6DOF, построенной на платформе MATLAB Simulink с использованием аэродинамических коэффициентов самолета Як-55М.

Для решения задачи предотвращения летных происшествий применительно к СпС была разработана методика расчета безопасных параметров начала маневра, основанная на использовании многослойной нейронной сети прямого распространения.

Полученные результаты используются для разработки системы предупреждения об опасных ситуациях при возникновении ошибок пилотажа и информировании пилота о выполнении им маневра на несоответствующей высоте.

Главным результатом проведенного исследования явилась разработанная по данным экспериментального изучения пилотажа спортивного самолёта модель системы предупреждения пилота о возникновении опасной ситуации для отработки мышечных навыков выхода из опасного маневра в процессе тренажерной подготовки.

Проведенные на авиасимуляторе X-plane11 испытания показали, что применение системы предупреждения пилота в случае возникновения ошибок пилотирования позволит с вероятностью 99% снизить максимальную потерю высоты в среднем на 15% по сравнению с вариантом без использования такой системы. При этом значительно снижается вероятность возникновения критической ситуации.

## Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Иед К. Разработка методики создания системы предупреждения об опасных ситуациях при возникновении ошибок пилотажа // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – № 3. – С. 201–209.
2. Иед К., Масленникова Г.Е., Тюменцев Ю.В. Расчет безопасных параметров начала маневра спортивных самолетов с использованием искусственной нейронной сети // Вестник Московского авиационного института. – 2020. – № 2. – С. 169–182.
3. Иед К., Масленникова Г.Е. Исследование влияния особенностей пилотирования на безопасность выполнения пикирования на самолете Як-55М // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2018. – №23. – С. 62–74.
4. Ied K., Maslennikova G.E. Investigating the effect of pilot errors and its probability to change trajectory parameters during maneuvers // Journal of Advanced Research in Dynamical & Control Systems. – 2019. – Vol. 11, 11-Special Issue. – P. 28–45.