

На правах рукописи

Калюжный Дмитрий Алексеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ
ДИНАМИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ
ПОСАДКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
В МОРСКИХ УСЛОВИЯХ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ
(технические науки)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете (СПбГМТУ)

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор Нечаев Ю.И.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Геппенер В.В.

заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук,
профессор Шауб П.А.

Ведущая организация: Санкт-Петербургский Государственный университет.

Защита состоится « 23 » декабря 2009г. в 17 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.01 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, с подписями, заверенными гербовой печатью, просим направлять в адрес диссертационного совета.

Автореферат разослан « 18 » ноября 2009г.

Ученый секретарь совета

Пантелеев М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В диссертационной работе рассматриваются вопросы моделирования и визуализации одной из сложных динамических ситуаций, связанных с контролем поведения системы «Летательный аппарат – Плавающий динамический объект» в морских условиях. Посадка летательных аппаратов (ЛА) в сложных гидрометеорологических условиях – одна из сложных операций пилотирования. Эта операция осуществляется на посадочные площадки плавучих динамических объектов (ДО), а также на суда и плавучие технические средства освоения океана, оборудованные вертолетной площадкой. Опыт морской посадки ЛА насчитывает уже более 50 лет. За эти годы отработана техника пилотирования при выполнении операций вертикальной и горизонтальной посадки, постоянно совершенствуется теоретическая база динамики полета, созданы системы безопасности при автоматической и полуавтоматической посадке в сложных условиях.

Разработка системы посадки ЛА на плавучие технические средства освоения океана представляет сложную комплексную проблему, которая заключается в учете всего многообразия задач оценки поведения ДО и ЛА при взаимодействии с внешней средой. Недостатки существующих способов прогнозирования поведения посадочной площадки снижают эффективность использования судовой авиации в сложной гидрометеорологической обстановке и нередко приводят к тяжелым авариям. Анализ аварий свидетельствует о просчетах и ошибочных действиях пилотов и лиц, принимающих решения в экстремальных ситуациях во время взлетно-посадочных операций, вследствие острого дефицита времени. Для реализации принципов обработки информации при посадке ЛА морского базирования необходимо выполнить следующие условия:

- разработать динамическую базу знаний контроля посадки ЛА в режиме реального времени;
- выделить структуры, методы и модели, описывающие поведение системы «ЛА – ДО» в условиях сложного гидроаэродинамического взаимодействия;
- разработать адаптивные алгоритмы контроля посадки ЛА и установить закономерности между особенностями исследуемых процессов и поведением ДО при различной интенсивности внешних возмущений.

Диссертация посвящена реализации идей совершенствования методов контроля и прогноза при посадке ЛА в морских условиях на основе патента научного руководителя, позволяющего построить алгоритм

обработки измерительной информации, обеспечивающий выделение области колебательного движения ДО – «окна безопасной посадки» и значительно расширить интервал упреждения при прогнозировании этой сложной операции.

Целью работы является разработка и исследование модели динамической базы знаний, обеспечивающей обработку данных измерений при контроле посадки ЛА в морских условиях при неопределенности и неполноте исходной информации. Для достижения этих целей в диссертации решались следующие основные задачи:

- разработка и обоснование модели динамической базы знаний на основе концепции «Окна безопасной посадки»;
- разработка алгоритмов функционирования динамической базы знаний при обработке информации при посадке ЛА в морских условиях и программного комплекса, их реализующего;
- моделирование и визуализация динамики взаимодействия системы «ЛА – ДО» с внешней средой при различном уровне внешних возмущений.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе были использованы системный анализ, методы математического моделирования, методы вычислительной математики, теория вероятностей и математической статистики, теория графов, аппарат линейной алгебры, теория нейронных сетей, а также методы искусственного интеллекта и прикладного программирования.

Объект исследования. Объектом исследования являются ситуации, определяющие сложное гидроаэродинамическое взаимодействие системы «ЛА – ДО» при принятии решений по обеспечению безопасности посадки ЛА в морских условиях.

Научную новизну работы составляют:

- модель динамической базы знаний посадки ЛА в морских условиях, разработанная в рамках принципа конкуренции на основе концепции «окна безопасной посадки»;
- методы и алгоритмы обработки измерительной информации при контроле поведения ЛА и ДО на основе конкурирующих вычислительных технологий;
- моделирование динамики системы «ЛА – ДО» на основе новых представлений о динамике ветроволновых режимов с использованием концепции «климатических спектров», а также математической модели колебательного движения ДО, включающей нелинейную функцию продольного восстанавливающего момента, учитывающую развал бортов в оконечностях ДО.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработана модель динамической базы знаний и алгоритмы анализа измерительной информации при оценке поведения системы «ЛА – ДО» в сложных ситуациях;
- разработан программный комплекс, обеспечивающий решение задач моделирования и визуализации при функционировании системы «ЛА – ДО».

Практическая значимость диссертационного исследования обеспечена прикладной направленностью и созданием конкретных методов, алгоритмов и программных средств в системах интеллектуальной поддержки оператора бортовой ИС контроля поведения системы «ЛА – ДО» в сложных ситуациях.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Концептуальная модель поддержки принятия решений при контроле поведения системы «ЛА – ДО», интегрирующая знания предметной области в рамках принципов обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде.

2. Методы и алгоритмы анализа сложных ситуаций при различном уровне внешних возмущений, определяющих поведение системы «ЛА – ДО» в рамках представления «Окна безопасной посадки».

3. Модель взаимодействия ДО с внешней средой, построенная на основе нового представления о динамике ветроволновых возмущений на основе концепции «Климатического спектра» морского волнения и математических моделей, включающих нелинейные функции восстанавливающего момента при продольной и бортовой качке ДО на волнении.

4. Программный комплекс поддержки принятия решений при анализе и прогнозе сложных ситуаций, определяющих гидроаэродинамическое взаимодействие системы «ЛА – ДО».

Достоверность научных результатов и выводов подтверждаются строгостью доказательства утверждений и наложенных ограничений, обоснованностью применения математического аппарата, оценкой адекватности математических моделей, результатами тестирования алгоритмов и программного обеспечения.

Внедрение результатов работы

Разработанные методы, алгоритмы и программные средства внедрены в ФГУП «Адмиралтейские верфи» для реализации при разработке новых типов судов и используются в учебном процессе СПбГМТУ при проведении лабораторных и курсовых работ по курсу «Инженерия знаний» в рамках магистерской подготовки студентов

специальности 220400 «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем».

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на национальных и международных научно-технических конференциях:

1. Международная конференция МОРИНТЕХ'2008, Санкт-Петербург, 2008;

2. Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2006, Санкт-Петербург, 2006;

3. Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2007, Санкт-Петербург, 2007;

4. Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2008, Санкт-Петербург, 2008;

5. Национальная конференция «Управление и информационные технологии» УИТ-2008, Санкт-Петербург, 2008;

6. Национальная конференция «Научное программное обеспечение в образовании и научных исследованиях», Санкт-Петербург, 2008;

7. Всероссийская научно-методическая конференции «Телематика-2008», Санкт-Петербург, 2008;

8. Всероссийская научно-методическая конференции «Телематика-2009», Санкт-Петербург, 2009.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них – 8 статей (5 статей опубликовано в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК), а также 8 работ и докладов в трудах международных и всероссийских конференций.

Объем и структура работы

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Объем – 186 страниц, в том числе 71 рисунок, 15 таблиц. Список литературы включает 285 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации.

Первая глава содержит анализ состояния и перспективы развития проблемы пилотирования ЛА морского базирования. Основное внимание уделяется перспективным тенденциям использования быстродействующих вычислительных средств и интеллектуальных технологий при реализации концепции мягких вычислений при контроле поведения системы «Внешняя среда – ДО – ЛА». Глава также содержит аналитический обзор состояния вопроса, формулировку целей и задач исследования и общую характеристику диссертационной работы.

Вторая глава посвящена разработке концептуальной модели построения системы интеллектуальной поддержки оператора (руководитель посадки, пилот) бортовой ИС, функционирующей на основе данных динамических измерений, формализованной системы знаний и методов математического моделирования. Концептуальная модель предусматривает применение современных высокопроизводительных средств обработки информации в рамках концепции мягких вычислений. Алгоритмы и программное обеспечение системы реализованы с использованием принципа конкуренции, предполагающего генерацию альтернатив и выбор предпочтительной вычислительной технологии с учетом методов традиционной математики, нечетких и нейросетевых моделей.

Одной из центральных проблем использования методов ИИ в системе интеллектуальной поддержки является формирование инвариантного ядра системы, включающего в себя предметную область, базу знаний и базу данных. Для создания этой совокупности формируется концептуальная модель системы. В функциональном аспекте эта модель включает следующие компоненты:

$$\langle S(F), S(M), S(W), P_F, T_F, A, X, Y \rangle \quad (1)$$

где $S(F) = \{S_{F1}, \dots, S_{FN}\}$ – совокупность функциональных подсистем интеллектуальной поддержки; $S(M)$ – структурная схема системы, включающая множество $\text{Set}(S(M)) = S = \{S_1, \dots, S_N\}$ элементов $S_i \in S$ и имеющая собственную организацию $\text{Org}(S_M)$; $S(W)$ – условия формирования целостной системы (цели функционирования, принципы и алгоритмы управления, качество результата решения задачи и эффективность); P_F – множество функциональных параметров; T_F – множество моментов времени, инвариантных объектам моделирования, уровню их организации и предметной области; $A: X \rightarrow Y$ – оператор, определяющий процесс интерактивного взаимодействия «Руководитель посадки – Пилот – ИС» при функционировании системы $S(F)$; $X = X_j (j = \overline{1, n})$ и $Y = Y_i (i = \overline{1, m})$ – вектор-множество входных и выходных данных. Реализация концептуальной модели ИС, представлена на рис.1.



Рис.1. Поток информации о состоянии внешней среды и поведении ДО на волнении

Цепочка преобразования исходных данных на рис.1 обеспечивает диагностику текущего состояния объекта управления, распознавание и классификацию ситуации, поиск управляющего решения и выдачу команд пилоту и руководителю посадки.

Одной из важных характеристик, исследуемых при обработке измерительной информации, является определение «окна безопасной посадки» – Windows of Safety Landing (WSL). Использование понятия WSL позволяет выделять области незначительной качки и использовать эту информацию при проведении операций морской посадки ЛА. Анализ процессов колебательного движения ДО осуществляется при различном характере внешних возмущений.

При незначительной качке ДО, не превышающей допустимых значений амплитуд $\theta^*, \Psi^*, \dots, \zeta^*$, временной интервал τ_{WSL} , характеризующий «окно безопасной посадки», имеет большую протяженность и достаточен для реализации операции посадки $\tau_{WSL} > \tau^*$, где τ^* – допустимое значение интервала. Принятие решений по управлению операцией посадки исходя из поведения ДО в этих условиях реализовано на основе стандартного алгоритма краткосрочного прогноза. В случае сильной качки используются алгоритмы долгосрочного и краткосрочного прогноза. Воздействие экстремального волнения приводит к сужению «окна безопасной посадки» и ужесточению требований к ее реализации.

Общая структура исходной информации при разработке базы знаний формируется на основе семантической сети, с помощью которой дается описание рассматриваемых ситуаций интеллектуальной поддержки оператора и методов их решения. Исходная информация характеризуется вектором:

$$X = X_A \cup X_K \cup X_S, \quad (2)$$

где X_A – общие данные о текущей ситуации, X_K – результаты, установленные на основе ее анализа, X_S – данные специфичные для каждой ситуации и результатов ее анализа. Эти данные поступают на вход *логической системы*, осуществляющей процедуру вывода.

Динамическая база знаний включает в себя алгоритмы обработки информации в виде последовательности логических заключений с использованием встроенных процедур на основе данных измерений о поведении ДО и ЛА. Основные понятия и описания исследуемой предметной области и логическая последовательность действий характеризуют модель предметной области:

$$M = \{(G(S), D(S), C)\}t\}. \quad (3)$$

Здесь $S=S_i(S)$, ($i=1, \dots, m$) – множество ситуаций; $D(S)=D_j(S)$, ($j=1, \dots, n$) – множество данных, сформированных по ситуациям из множества S в виде узлов сети; $C = C_k$ ($k=1, \dots, K$) – множество процессов, определяющих модели логического вывода; t – временной фактор. На рис.2 изображен пример нечеткой системы с 2-мя входами (X, Y), одним выходом и двумя правилами.

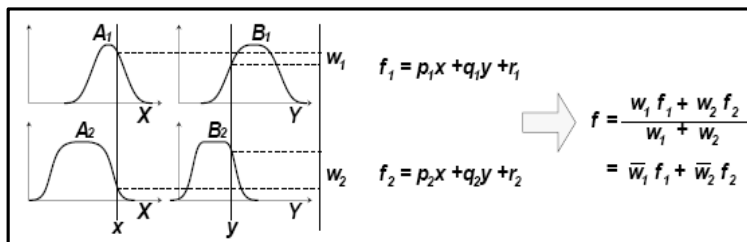


Рис. 2. Система нечеткого вывода на основе модели Сугено

Нечеткое управление посадкой ЛА реализуется с помощью 6-ти отдельных (формальных) систем нечеткого вывода, отвечающих за следующие параметры: скорость полета; высота полета; тангаж; траектория полета; курс; крен. Каждая формальная система включает 9 – 25 нечетких правил и представляет собой модель нечеткого вывода с импликацией Сугено с 2-мя входами, одним выходом. На рис.2 изображен пример нечеткой системы с 2-мя входами (X, Y), одним выходом и двумя правилами.

Объединенные модели нечеткого вывода представляют собой интегрированную систему нечеткого управления посадкой ЛА в морских условиях. На рис.3 изображен поток информации при осуществлении нечеткого управления посадкой ЛА.

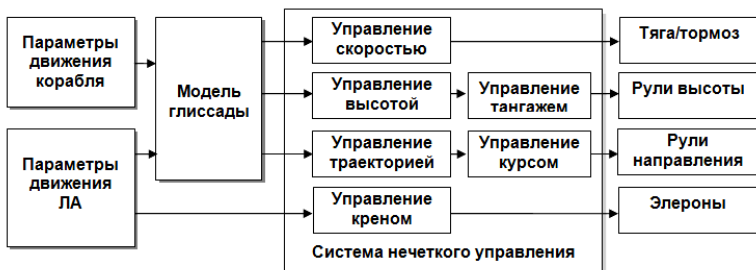


Рис. 3. Поток информации при управлении посадкой ЛА в морских условиях

Вывод решения на основе формальной модели $M_i(i=1, \dots, n)$ поддерживается правилами нечеткого вывода со структурой $X^* \bullet (X \rightarrow Y)$, где X^* и X – нечеткие множества, описывающие состояние проблемной области (между X^* и X определено нечеткое отношение сходства); Y – нечеткое множество допустимых воздействий; \bullet – операция, определяющая композиции нечетких множеств. Система нечеткого вывода представлена в виде нейро-нечеткой сети (рис.4).

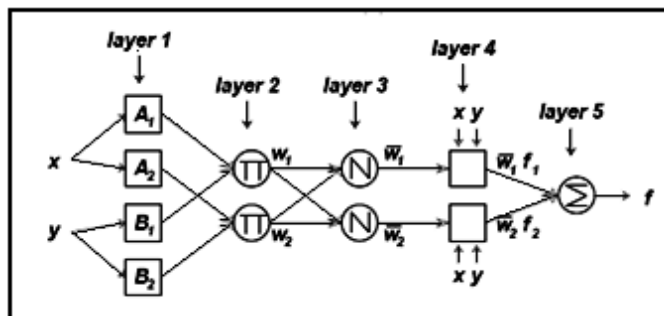


Рис. 4. Многослойная нейронная сеть, реализующая механизм нечеткого вывода

Первый слой обеспечивает фаззификацию входных сигналов и содержит функции принадлежности. В данном случае каждому входному сигналу соответствует по 2 функции принадлежности: A_1 и A_2 для X , B_1 и B_2 для Y . Второй слой осуществляет умножение входных параметров с целью реализации операции AND ($w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), i=1,2$). Третий слой вычисляет отношение веса заданного правила к сумме весов всех правил $\bar{w}_i = w_i / (w_1 + w_2), i = 1,2$. В четвертом слое вычис-

ляются выходы для каждого правила $f_i = p_i x + q_i y + r_i$. Пятый слой вычисляет общий выход системы как сумму сигналов.

В приведенной нейронной сети ANFIS (Adaptive-Neuro-Fuzzy Inference System) узлы, обозначенные кружками, являются фиксированными, а узлы в виде квадратиков – адаптируемыми. Представляя систему нечеткого управления ЛА таким образом, можно получить интегрированную нейронную сеть, функции которой зависят от текущей ситуации и решаемой задачи. Наиболее сложную функцию реализуют адаптивные узлы с параметрами, изменяющимися в процессе обучения. Более простая функция характерна для постоянных узлов, параметры которых сохраняются неизменными в процессе обучения.

Оценка опасности ситуации заключается в проверке условий, сформулированных в моделях нечеткой логической системы, которые связаны с анализом значений параметров и их изменений:

$$P * R \pm \varepsilon \rightarrow S_i, \quad dP/dt * R \pm \varepsilon \rightarrow S_i, \quad (4)$$

где S_i – идентифицируемая ситуация; P – значение параметра; R – величина, с которой сравнивается значение P ; * – предикатный символ ($=, <, >, \geq, \leq$); ε – допустимая ошибка рассогласования; dp/dt – изменение параметра за время dt . Функционирование нейронечеткой системы реализует схема на рис.5.

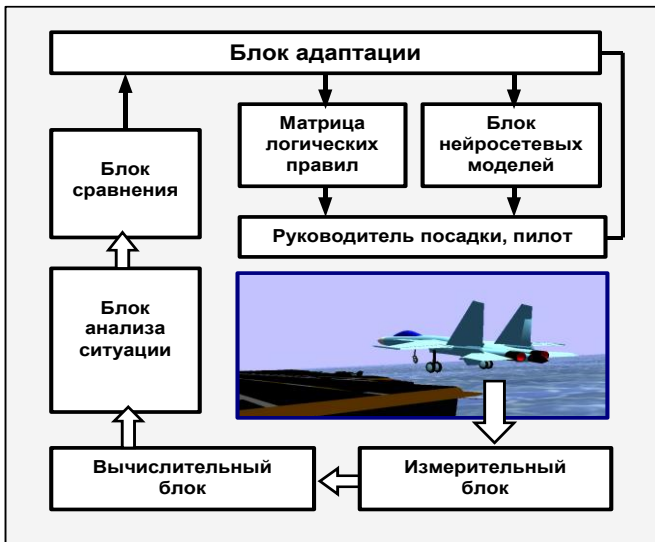


Рис.5. Концепция посадки ЛА в морских условиях

Такая модель представляет собой систему, реализуемую с помощью блока анализа ситуации на основе методов классической математики и блока адаптации в виде матрицы логических правил и блока нейросетевых моделей. Блок адаптации формирует управляющие воздействия, изменяющие правые части матрицы лингвистических правил. Процедура адаптации заключается в корректировке нужного правила из матрицы нечетких логических правил.

Для обеспечения адаптивности системы в условиях многорежимности используются несколько матриц логических правил. Адаптация нечетких логических правил заключается в выборе подходящей модели из ансамбля матриц логических правил (или ансамбля нейросетевых моделей), соответствующих различным режимам движения системы «ЛА – ДО».

Более сложная структура многорежимной системы принятия решений по управлению посадкой ЛА в морских условиях содержит адаптивный блок, реализуемый на основе концепции «мягких вычислений» и осуществляющий контроль текущей ситуации на основе методов идентификации, нечеткой адаптивной модели и нейросетевых ансамблей. Как показал анализ, разработанная система эффективна при достаточно сильной неопределенности, когда не полностью известно число возможных структур модели взаимодействия. Алгоритм функционирования нечеткой адаптивной модели состоит в выполнении последовательности шагов, определяющих анализ входной информации. Таким образом, осуществляется динамическая самоорганизация нечеткой системы знаний за счет «наращивания» новых и модификации наиболее «схожих» правил.

В особо сложных ситуациях, когда система испытывает затруднения, может быть осуществлен логический вывод по прецеденту с соответствующей реализацией динамической картины взаимодействия. Обобщенная модель вывода по прецедентам реализуется в следующем виде:

$$\langle S_{PB}, M(W), M(W, V), M_{FD} \rangle, \quad (5)$$

где S_{PB} – система нейросетевого представления базы прецедентов; $M(W)$ – модель нечеткого вывода по прецедентам; $M(W, V)$ – комплексная модель нечеткого вывода для совокупности исследуемых процессов; M_{FD} – модель анализа альтернатив и формирователя решений.

Для получения полной картины проведения операции посадки ЛА в морских условиях производится всесторонний анализ решений, свя-

занных с риском. В процессе анализа рисков используется формальная структура, получившая название *матрицы риска*. Такая интерпретация риска представляет собой зависимость частоты возникновения опасностей Р от уровня последствий А. При построении матрицы риска устанавливается обобщенный уровень риска R как произведение вероятности возникновения опасности Р на последствие А от воздействия указанной опасности на исследуемое событие.

Третья глава посвящена разработке и интерпретации математических моделей, описывающих сложное нелинейное взаимодействие в системе «ЛА – ДО». Разработанный подход определяет формализацию задачи моделирования на основе принципа конкуренции в рамках концепции мягких вычислений. Интегрированная математическая модель, описывающая динамику взаимодействия, предусматривает исследование поведения системы «ЛА – ДО» с использованием нового подхода к описанию ветроволновых полей и восстанавливающих компонент дифференциальных уравнений.

Моделирование динамики внешней среды – одна из важных задач, решаемых при разработке встроенных процедур и алгоритмов взаимодействия ДО с внешней средой при построении базы знаний ИС. Современный подход к решению этой задачи требует использования новых представлений о динамике ветроволновых полей на основе концепции «климатических спектров» морского волнения, принятой на 18 Ассамблее Межправительственной Морской Организации (Intergovernment Marine Organization – ИМО) в 1993 году вместе с понятием «волновой климат». С помощью этих понятий открываются возможности более детального, по сравнению с существующей практикой, описания особенностей волновой погоды в конкретных районах океана.

В рамках концепции «климатических спектров» морское волнение рассматривается как вероятностный геофизический процесс мелкомасштабного диапазона изменчивости с характерными временными и пространственными масштабами. Гидродинамическая модель волнения в спектральной форме представляется как уравнение баланса волновой энергии:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial N}{\partial \varphi} \dot{\varphi} + \frac{\partial N}{\partial \theta} \dot{\theta} + \frac{\partial N}{\partial k} \dot{k} + \frac{\partial N}{\partial \beta} \dot{\beta} + \frac{\partial N}{\partial \omega} \dot{\omega} = G \quad (6)$$

Здесь N – спектральная плотность волнения, которая является функцией от широты φ , долготы θ , волнового числа k и угла β между направлением волнового вектора и параллелью, а также от частоты ω и

времени t . Уравнение (6) связывает между собой явления притока энергии от ветра, диссипации и ее перераспределения и нелинейного взаимодействия между частотными составляющими процесса волнения. Функция источника G записывается в виде суммы трех компонент $G = G_{in} + G_{nl} + G_{ds}$: поступления энергии от ветра к волнам, нелинейного взаимодействия в спектре ветрового волнения и диссипации волновой энергии.

Типичными нормированными спектрами морского волнения, определенными в рамках концепции «климатических спектров», являются зыбь, ветровое волнение, смешанное волнение с разделением систем и преобладанием зыби, смешанное волнение с разделением систем и преобладанием ветрового волнения, смешанное волнение без разделения систем с преобладанием зыби и ветрового волнения. Реализация концепции «климатических спектров» в задачах контроля и прогнозирования динамики системы «ЛА – ДО» позволила разработать сценарии развития шторма и получить реалистические картины взаимодействия исследуемых ДО при различном уровне внешних возмущений.

В качестве стандартной модели взаимодействия используется расширенная система дифференциальных уравнений, описывающих поведение ДО на волнении с помощью уравнений бортовой и продольной (килевой и вертикальной) качки:

$$\begin{aligned}
 & (J_x + \mu_{\theta\theta})\theta'' + M_R(\theta') + M(\theta, \varphi, t) = M_x(t); \\
 & (D/g + \mu_{33})\zeta_G'' + v_\zeta \zeta_G' + \rho g S \zeta_G + \mu_{33} x_1 \psi'' + \\
 & + (v_{\zeta\psi} - v_0 \mu_{33})\psi' + (\rho g S l - v_0 v_\zeta)\psi = F_{W\zeta}(\chi, x, t); \quad (7) \\
 & (J_\psi + \mu_{55})\psi'' + [v_\zeta + (v_0^2/\sigma^2)v_\zeta]\psi' + M(\psi) + \mu_{33} x_1 \zeta_G'' + \\
 & + (v_{\zeta\psi} + v_0 \mu_{33})\zeta_G' + (\rho g S l + v_0 v_\zeta)\zeta_G = M_{W\psi}(\chi, x, t),
 \end{aligned}$$

где $(J_x + \mu_{\theta\theta})\theta''$, $M_R(\theta')$, $M(\theta, \varphi, t)$, $M_x(t)$ – инерционная, демпфирующая, восстанавливающая и возмущающая компоненты; $F_{W\zeta}(\chi, x, t)$ и $M_{W\psi}(\chi, x, t)$ – возмущающие сила и момент волновой природы, рассчитываемые посредством интегрирования по длине корабля и с учетом возвышения водной поверхности над уровнем моря $\xi W(x, y, t)$. Все уравнения в (7) записаны в абсолютной системе координат, что характерно для задачи обеспечения безопасной посадки. Коэффициенты демпфирования, собственные частоты и коэффициенты связи вычис-

ляются согласно стандартным методикам, для моментов инерции и присоединенных масс используются приближенные формулы. Функция $M(\theta, \varphi, t)$ определяет общий случай изменения восстанавливающего момента ДО относительно волны. В частном случае, при положении лагом к волнению, влияние нелинейности восстанавливающего момента учитывается с помощью кубической параболы.

При произвольном положении ДО относительно волны восстанавливающий момент $M(\theta, \varphi, t)$ определяется сложной нелинейной пространственной функцией, полученной на основе статистической обработки результатов физического эксперимента. Полученная аппроксимация позволяет вычислять текущие значения функции $M(\theta, \varphi, t)$ в широком диапазоне углов крена θ и курса φ в условиях сложного нелинейного взаимодействия ДО с внешней средой на нерегулярном волнении, заданном соответствующей конфигурацией «климатического спектра». С учетом функции $M(\theta, \varphi, t)$ дифференциальное уравнение бортовой качки в модели (7) может быть описано с помощью модифицированного уравнения Матье, удобного при исследовании нелинейных динамических систем.

Нелинейная функция, описывающая восстанавливающий момент на продольном волнении, определяется с учетом влияния развала бортов в оконечностях ДО. Общий вид этой функции имеет вид $M(\Psi) = Dn(\Psi + k\Psi^3)$, где угол Ψ ограничен входом верхней кромки палубы в оконечностях ДО. Так, что уравнение килевой качки, входящее в модель (7) с учетом используемой функции восстанавливающего момента, приводится к обобщенной форме уравнения Дуффинга.

При моделировании задачи обеспечения безопасной посадки ЛА с использованием методов планирования эксперимента основное внимание уделялось выделению «окна безопасной посадки», контролю движения ЛА по глиссаде, оценке интервалов прогноза посадки ЛА в морских условиях, а также использованию фильтра Калмана при оценке характеристик системы «ЛА – ДО». Анализ выполнен в рамках принципа конкуренции применительно к горизонтальной посадке ЛА и посадке вертолета в морских условиях. Интерпретация результатов моделирования сопровождалась визуализацией динамических картин взаимодействия (рис.6).

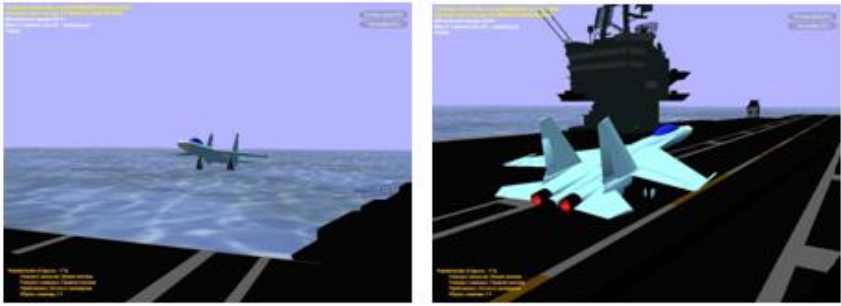


Рис.6. Динамические картины захода на посадку и касания ЛА полетной палубы в морских условиях

Для определения интервала времени безопасной посадки использовались два алгоритма, реализующие долгосрочный и краткосрочный прогноз. Долгосрочный прогноз обеспечивает определение момента наступления «окна безопасной посадки» t_0 и его продолжительность $T_{БП}$. Краткосрочный прогноз устанавливает время подачи сигнала к посадке t_{sign} так, чтобы ЛА достиг полетной палубы (посадочной площадки) в момент времени t_{land} при наиболее благоприятных условиях (в случае вертикальной качки скорость перемещений точки касания палубы была бы положительна и мала). Процедура краткосрочного прогноза функционирует только в рамках «окна безопасной посадки» и реализуется с использованием стандартных алгоритмов (рис.7).

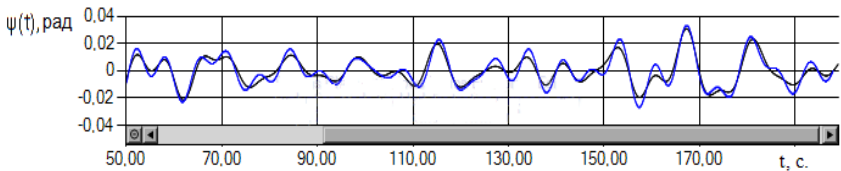


Рис.7. Результаты прогноза килевой качки на основе фильтра Калмана

Момент наступления «окна безопасной посадки» считается нулевым отсчетом времени, относительно которого определяются величины t_{sign} и t_{land} . Метод долгосрочного прогноза основан на вероятностной аппроксимации огибающей колебательного движения ДО. Правило осуществления прогноза «окна безопасной посадки» WSL иллюстрирует рис.8, на котором кривыми 1 и 2 обозначены верхняя и нижняя границы прогноза, а θ^* , Ψ^* , ζ^* – предельные значения характеристик качки.

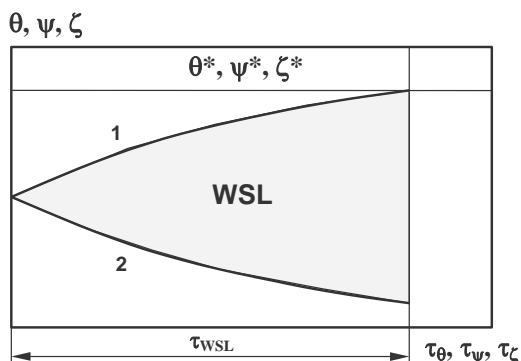


Рис.8. Правило осуществления прогноза «окна безопасной посадки»

Метод краткосрочного прогноза базируется на аппроксимации вертикальных колебаний ДО тригонометрическим полиномом и экстраполяции моментов времени, наиболее благоприятных для проведения операции посадки. Исходными данными для процедуры краткосрочного прогноза ЛА при вертикальной посадке являются: высота зависания вертолета над уровнем моря H ; скорость снижения вертолета при посадке V ; длина «окна безопасной посадки» τ_{WSL} ; цифровая запись вертикальных колебаний корабля $\{\zeta\}$ с дискретизацией Δ .

Сравнительные данные моделирования интервала «окна безопасной посадки» (сек.) на основе стандартного алгоритма и ИНС приведены в табл.1. Здесь данные в числителе относятся к интенсивности волнения 7 баллов, а в знаменателе – 8 баллов.

Таблица 1. Результаты прогноза «окна безопасной посадки»

Виды качки ДО	Стандартный алгоритм	ИНС-алгоритм
Бортовая качка	34/23	33/25
Килевая качка	25/16	23/18
Вертикальная качка	28/17	27/15

Из табл.1 видно, что прогноз, реализуемый ИНС во всех случаях дает менее «оптимистичные» результаты по сравнению с данными стандартного алгоритма. Таким образом, концепция «окна безопасной посадки» особенно актуальна при интенсивных колебаниях ДО, вызванных значительными внешними возмущениями в экстремальных ситуациях.

Моделирование динамики системы «ЛА – ДО» осуществлялось в рамках принципа конкуренции с использованием фильтра Калмана и

нейросетевых моделей. Функционирование фильтра Калмана обеспечивалось на основе данных о ДО и системе измерения. Математическая модель, описывающая динамику ДО в пространстве состояний, имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} A_W & 0 & 0 \\ 0 & A_m & B_m C_F \\ B_F C_W & 0 & A_F \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} B_W \\ B_m D_F \\ 0 \end{bmatrix}; C = [0 \quad C_M \quad 0], \quad (8)$$

где $A_W, B_W, C_W, A_m, B_m, C_M, A_F, B_F, C_F, D_F$ – матрицы, представляющие соответственно модели волнения, возмущающих сил и непосредственно продольной качки ДО.

Разработанный программный комплекс обеспечивает анализ информации о функционировании системы «ЛА – ДО» в рамках принципа конкуренции. Компьютерная программа позволяет определять и прогнозировать координаты вектора состояния с заданным периодом дискретизации и упреждением. Шумовые последовательности, воздействующие на векторы состояния и измерений, генерируются с помощью специальных подпрограмм. Возмущения типа «белый шум» имеют нулевые средние и дисперсии, варьируемые в процессе вычислительного эксперимента. Одновременно с фильтром Калмана программа предусматривает оценку и прогноз координат вектора состояния с использованием нейросетевых технологий. В процессе анализа текущие оценки исследуемых параметров на каждом шаге итерации для рассматриваемых вычислительных технологий сравнивались с истинными (номинальными) значениями параметров матриц состояния. При достижении установленного значения числа итераций фиксировались текущие оценки искомым параметров и их среднеквадратические отклонения от номинальных.

Результаты сравнительной оценки алгоритмов, использующих фильтр Калмана и ИНС представлены в табл.2, где содержатся выборочные данные оценки (1) и прогноза (2) для килевой (ψ) и вертикальной (ζ) качки. Истинные (номинальные) значения параметров матриц состояния принимались в качестве «образца». С этими данными сравнивались результаты, полученные на выходе ИНС и установленные после оценки и прогноза параметров на основе математической модели (8) и алгоритма фильтра Калмана. В таблице приведены значения среднеквадратических отклонений.

Таблица 2. Результаты моделирования

Вычислительные технологии	ε_{ψ}^2		ε_{ζ}^2	
	(1)	(2)	(1)	(2)
Стандартный алгоритм	0,058	0,127	0,088	0,141
Нейросетевой алгоритм	0,063	0,131	0,079	0,148

Анализ полученных данных показал, что рассматриваемые вычислительные технологии приводят к практически одинаковому качественному результату. В частности, сходимость данных в оценке и прогнозе параметров существенно зависят от априорных данных начального значения вектора состояния контролируемой системы при фиксированном числе итераций.

Одна из практически важных задач при создании ИС контроля посадки ЛА в морских условиях связана с разработкой методов оценки риска, позволяющих в процессе разработки ИС принять решение о безопасности ДО и оценить возможные сценарии развития ситуаций морской посадки. В отличие от традиционных моделей оценки рисков, в работе рассмотрен подход, связанный с введением новых знаний о климатических спектрах волнения и понятии шторма как пространственно-временного волнового поля. Рассмотрены ситуации, связанные с учетом этих особенностей на перераспределение вероятности риска: качка ДО на смешанном волнении с разделенными системами волн и развитие шторма различной интенсивности. Результаты исследования свидетельствуют о том, что не учет новой информации о динамике внешней среды может приводить к значительной ошибке в оценке риска, причем эта ошибка часто будет в опасную сторону. Анализ различных сценариев штормов показал, что форма усиления и затухания шторма очень важна при оценке риска в задачах морской посадки.

Оценка адекватности используемых математических моделей выполнялась с использованием данных натурального эксперимента. Процедура валидации реализована на основе метода Балчи. Эксперименты с математической моделью динамики системы «ЛА – ДО», описывающей взаимосвязь существенных факторов, проведены путем последовательного статистического анализа. В заключительной части главы содержится оценка надежности принимаемых решений с использованием матрицы риска.

Четвертая глава диссертации содержит описание программного комплекса моделирования и визуализации динамики системы «ЛА – ДО». Содержательная часть этой главы посвящена разработке про-

граммных модулей, обеспечивающих контроль взаимодействия в системе «ЛА – ДО» на основе конкурирующих вычислительных технологий, представленных традиционными, нечеткими и нейросетевыми моделями, а также модуля, реализующего анализ альтернатив и принятие решений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Сформулированы теоретические принципы и концепция создания системы интеллектуальной поддержки принятия решений по обеспечению безопасности посадки ЛА морского базирования. Разработана математическая модель взаимодействия, учитывающая реальную структуру волнового поля с использованием концепции «климатических спектров». Откорректировано уравнение килевой качки в задаче горизонтального взлета-посадки (модифицированное уравнение Дуффинга) с учетом нелинейной функции продольного восстанавливающего момента. Откорректировано уравнение бортовой качки за счет включения нелинейной пространственной функции восстанавливающего момента, играющей определяющую роль при посадке вертолетов в морских условиях.

2. Разработаны алгоритмы обработки информации при контроле операций посадки в морских условиях. Сформулирован общий подход и разработаны теоретические аспекты математического моделирования динамики взаимодействия в системе «ЛА – ДО» с использованием конкурирующих вычислительных технологий. Математическое обеспечение системы интеллектуальной поддержки позволяет реализовать эффективные алгоритмы анализа практических задач анализа и прогноза поведения ЛА и ДО в рамках концепции мягких вычислений (Soft Computing). В результате открываются возможности анализа и интерпретации информации на основе «Принципа конкуренции», позволяющего выбирать предпочтительную вычислительную технологию в зависимости от особенностей ситуации. При этом основное внимание уделяется использованию алгоритма, построенного на основе нелинейного фильтра Калмана и нейронечетких технологий.

3. Проведено математическое моделирование и визуализация типичных задач анализа и прогноза сложных ситуаций в рамках концепции «Окна безопасной посадки». Оценка адекватности разработанных математических моделей и алгоритмов их реализации осуществлена с использованием схемы Балчи и результатов физического эксперимента.

4. Разработан программный комплекс моделирования и визуализации динамических ситуаций при проведении операции морской посадки. Определена *функция выбора*, на основе которой получены оценки эффективности принимаемых решений.

**Опубликованные научные работы по теме диссертации
в изданиях, определенных ВАК:**

1. Калюжный Д.А. Инструментальное средство моделирование динамики корабля при обеспечении безопасности посадки летательных аппаратов в морских условиях [Текст] / Калюжный Д.А., Нечаев Ю.И.//Морской вестник. №4 (7) – 2007. – с.37 – 40.

2. Калюжный Д.А. Анализ и прогноз ситуации при выборе условий безопасной посадки летательных аппаратов корабельного базирования [Текст] / Калюжный Д.А., Нечаев Ю.И., Петров О.Н.// Информационно-измерительные и управляющие системы. №9. – 2008. – с.65 – 72.

3. Калюжный Д.А. Интерфейс «Оператор – ИС» в системе корабельной посадки [Текст] // Информационно-измерительные и управляющие системы. №8. Т.6. – 2008. – с.57 – 64.

4. Калюжный Д.А. Нейронечеткий контроль динамики летательного аппарата при посадке в морских условиях [Текст] / Калюжный Д.А., Нечаев Ю.И.// Информационно-измерительные и управляющие системы. №2. Т.7. – 2009. – с.34 – 40.

5. Калюжный Д.А. Структура базы знаний интеллектуальной системы корабельной посадки летательных аппаратов [Текст] / Калюжный Д.А., Нечаев Ю.И. // Информационно-измерительные и управляющие системы. №2. т.7. 2009, с.67– 72.

В других изданиях:

6. Калюжный Д.А. Анализ и прогноз ситуации при выборе условий безопасной посадки летательных аппаратов корабельного базирования [Текст] / Калюжный Д.А., Нечаев Ю.И., Петров О.Н. // Бортовые интеллектуальные системы. Ч.3. Системы корабельной посадки летательных аппаратов. – М.: Радиотехника. – 2008. – с.65 – 72.

7. Калюжный Д.А. Интерфейс «Оператор – ИС» в системе корабельной посадки [Текст] // Бортовые интеллектуальные системы. Ч.3. Системы корабельной посадки летательных аппаратов. – М.: Радиотехника. – с.57 – 64.

8. Нечаев Ю.И. Контроль и визуализация динамических сцен при посадке летательных аппаратов морского базирования [Текст] / Нечаев Ю.И., Калюжный Д.А. // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2006. – Санкт-Петербург. – 2006. т.2. – с.54 – 57.

9. Нечаев Ю.И. Neuro-Fuzzy модели контроля динамики летательного аппарата в морских условиях [Текст] / Нечаев Ю.И., Калюжный Д.А. // Сборник Докладов на X Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2007. – Санкт-Петербург. – 2007. т.2. – с.297 – 301.

10. Калюжный Д.А. Программный комплекс контроля характеристик сложного динамического объекта с использованием нейросетевых технологий [Текст] / Калюжный Д.А., Нечаев Ю.И. // Труды научно-технической конференции «Научное программное обеспечение в образовании и научных исследованиях». – Санкт-Петербург: Изд-во политехнического университета. – 2008, – с.190 – 194.

11. Калюжный Д.А. Алгоритмы посадки летательных аппаратов корабельного базирования [Текст] / Калюжный Д.А., Нечаев Ю.И. // Материалы 7-й общероссийской конференции и выставки по морским интеллектуальным технологиям «МОРИНТЕХ-2008». Санкт-Петербург. – 2008. – с.70 – 73.

12. Калюжный Д.А. Neuro-Fuzzy реализация фильтра Калмана в системах контроля посадки летательных аппаратов морского базирования [Текст] / Калюжный Д.А., Нечаев Ю.И. // Труды XV Всероссийской научно-методической конференции «Телематика-2008». – Санкт-Петербург. Т.1. – с.91 – 92.

13. Нечаев Ю.И. Нечеткая интерпретация фильтра Калмана при контроле посадки летательного аппарата морского базирования [Текст] / Нечаев Ю.И., Калюжный Д.А. // Сборник докладов XI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2008. Санкт-Петербург. – 2008. т.2. – с.45 – 48.

14. Калюжный Д.А. Контроль посадки летательного аппарата морского базирования с помощью Neuro-Fuzzy системы [Текст] / Калюжный Д.А., Нечаев Ю.И. // Доклады 2-й российской мультikonференции по проблемам управления и 5-й научной конференции «Управление и информационные технологии УИТ-2008» Т.2. – Санкт-Петербург. – 2008. – с.113 – 118.

15. Калюжный Д.А. Анализ физических картин взаимодействия при контроле динамики сложного объекта в экстремальной ситуации [Текст] // Труды XVI Всероссийской научно-методической конференции «Телематика-2009». Санкт-Петербург. Т.2, с. 429-231.

16. Калюжный Д.А. Контроль динамики летательного аппарата при посадке в морских условиях [Текст] / Калюжный Д.А., Нечаев Ю.И. // Морские интеллектуальные технологии. №2. – 2009. – с. 34 – 40.