

*На правах рукописи*

**СМУРОВ Михаил Юрьевич**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЁТОВ  
ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ЭТАПАХ ВЗЛЁТА И ПОСАДКИ  
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИНФОРМАЦИИ  
О ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ**

**Специальность 05.22.14**

*"Эксплуатация воздушного транспорта"*

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург

-2004-

Работа выполнена в Академии гражданской авиации,  
на кафедре "Автоматизированные системы управления"

Научные консультанты:

доктор технических наук профессор

**КЕЙН ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ**

Заслуженный деятель науки и техники РФ

доктор технических наук профессор

**КРЫЖАНОВСКИЙ ГЕОРГИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук профессор

**БАРЗИЛОВИЧ ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ**

доктор технических наук профессор

**КУЗНЕЦОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ**

доктор технических наук профессор

**КОЩЕЕВ АНАТОЛИЙ БОРИСОВИЧ**

Ведущая организация: ФГУП Гос. НИИ ГА (г. Москва).

Защита диссертации состоится "....".....2004г. в.....часов  
на заседании диссертационного совета Д.223.011.01 при Московском  
государственном техническом университете гражданской авиации  
по адресу: 123898, г. Москва, Кронштадский бульвар, 20,

зал заседаний Учёного Совета

- диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке МТТУ ГА.

Автореферат разослан "....".....2004 г.

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью,  
просим направить в адрес Учёного Совета университета

**Ученый секретарь  
диссертационного совета**  
доктор технических наук  
профессор



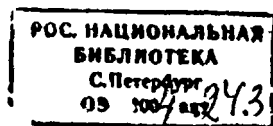
Камзолов С.К.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Повышение безопасности полётов в гражданской авиации является важнейшей проблемой разработчиков воздушных судов, эксплуатантов воздушного транспорта и системы организации воздушного движения, поскольку гражданская авиация является основным видом международного и отечественного пассажирского транспорта. Наиболее ответственным этапом полёта воздушного судна (ВС) является заход на посадку. На этом сравнительно краткосрочном этапе полёта, длительность которого составляет в среднем 4 % от всего полётного времени, происходит 36 % среди всех наиболее тяжёлых авиапроисшествий, аварий и катастроф. При заходе на посадку необходимо точно выдерживать траекторию движения и скорость полета при воздействии многих случайных и неопределённых возмущений, главными из которых являются турбулентность, сдвиг ветра со случайными к неопределёнными значениями скорости и направления воздействия. При переходе к системам автоматического захода на посадку наиболее трудными проблемами, подлежащими решению, являются осуществление точного управления траекторным движением ВС до начала выравнивания и обеспечение безопасности при посадке. Особое значение при решении этих проблем имеют вопросы построения автоматических и директорных систем управления ВС, обеспечивающих заданную точность захода на посадку и посадки в условиях внешних возмущений и информационных помех, а так же проблемы обеспечения устойчивости и контроля и управления безопасностью этих систем.

В связи с изложенным представляется актуальным проведение комплексного исследования и разработка проблем обеспечения точности траекторного движения воздушных судов при заходе на посадку и с учётом требований по безопасности при посадке. Эта задача имеет большое народно-хозяйственное значение.

Анализ сущности научных и методических аспектов сформулированной проблемы состоит в следующем. Для анализа и синтеза систем управления самолётом на посадке широко распространён вероятностный подход, основанный на предположении об известных статистических свойствах возмущений. Основным требованием, предъявляемым при этом к качеству функционирования системы управления, является обеспечение безопасности не только «в среднем», но и в каждом отдельном полёте. Поэтому при синтезе систем управления целесообразно ориентироваться на самые неблагоприятные возмущения из определенного множества типа экстремального и оценивать качество системы в области максимума по всем допустимым возмущающим функциям. Тогда закон управления можно строить так, чтобы достигнуть минимизации величины максимальной ошибки. Это и будет отражать минимаксный подход.



Неопределённость информации путём перекрытия диапазона неизвестных значений параметров их экстремальными ограничениями. В настоящее время проблемы построения и анализа законов управления самолётом на посадке в условиях совместного действия экстремальных возмущений и информационных помех недостаточно изучены.

#### **Цель диссертационного исследования •**

Цель диссертации состоит в том, чтобы на основе новых теоретических разработок найти методы выявления скрытых и не до конца использованных в гражданской авиации ресурсов системы "Экипаж — воздушное судно" на повышение безопасности полётов. Эта цель достигается путём использования минимаксного подхода как при решении задач по оцениванию уровня безопасности полётов, так и путем внедрения новых алгоритмов и методов управления самолётом при посадке и взлёте в условиях действия возмущений с неопределёнными характеристиками. "Кривая" авиационных происшествий по "Боингу" в известной публикации "Summary of Boeing's Flight Safety" (2001), представленная в главе 1, показывает, что не все ресурсы в ГА использованы для уменьшения опасности полётов. В связи с этим в работе произведено теоретическое обобщение известных достижений в области применения минимакса в гражданской авиации. Получено решение научной проблемы обеспечения безопасности полётов при неизвестных воздействиях и помехах, что имеет большое народнохозяйственное значение.

**Состояние вопроса.** Проблеме "минимакса" в гражданской авиации посвящено достаточно много работ, среди которых важнейшими являются работы Красовского Н.Н., Красовского А.А., Кейна В.М. и другие. Однако затронутая тема ещё не завершена. Дело в том, что в последнее время в связи с ростом интенсивности полётов в ГА и внедрением новых автоматизированных систем управления самолётами появилась необходимость и возможность практического использования полученных ранее теоретических разработок. Можно отметить, что благодаря применению на борту ВС новых весьма современных компьютерных систем появилась возможность реализации сложных вычислительных процедур метода "минимакса", что ранее было невозможно. Именно это обстоятельство обеспечивает перспективность возрождения разработок по внедрению методов "минимакса" в современных компьютерных системах управления самолётами ГА.

На необходимость рассмотрения вопросов "минимакса" в ГА было указано в работе Г.А. Крыжановского. Важность этих вопросов обсуждалась авторами Воробьевым В.А., Козловым А.И., Белгородским С.Л., Барзиловичем Е.Ю.

Общетеоретические основы метода "минимакса" и теории "дифференциальных игр" разработали известные российские ученые: названный выше Красовский Н.Н., Черноусько Л.С., Моисеев Н.Н., Поспелов Г.С. Проблемы реализации вычислительных процедур методов "дифференциальных игр" с учетом нелинейностей контура управления, разрабатывали Хоменюк С.Л. в г. Санкт-Петербурге (ЛГУ), Кирин Н.Ф., Гноенский Р.И., Кимурджунов В.Ф. и др.

Наиболее значительными в рассматриваемой области следует принять работы В.М. Кейна и Федорова С.М. Профессор Кейн В.М. один из первых еде-

лал попытку рассмотреть с единых позиций теоретические основы метода "минимакса" и соответствующих "вычислительных процедур" с учётом возможности их приборной реализации применительно к АБСУ ВС того времени (1980 - 90 гг.) на примере ВС Ту-154.

После относительно небольшого перерыва в появлении значительных публикаций в период 1996 - 2001 гг. вновь возродился интерес к названной теме. Это объясняется тем, что появились ВС нового поколения с повышенным уровнем автоматизации управления, как, например, на ВС А-340, В-707, Ту-204, Ил-96 и других. Другая причина отмеченного обстоятельства состоит в необходимости выявления дополнительных резервов повышения безопасности полётов за счет улучшения точности пилотирования ВС с учётом человеческого фактора (ЧФ) за счёт минимаксных алгоритмов на участках взлёта и посадки.

Поэтому автор настоящей диссертации счёл необходимым вернуться к начатым в 90-е годы разработкам и продолжить свои исследования с учётом новых открывшихся перспектив на внедрение минимакса в ГА на новом этапе её развития.

#### **В диссертации поставлены и решены следующие задачи:**

- Разработка метода оценки гарантированной точности захода ВС на посадку;
- Обоснование методов обработки траекторной информации, обеспечивающих возможность оптимального синтеза управления траекторным движением ВС;
- Поиск методов синтеза оптимальных или субоптимальных законов управления траекторным движением ВС, используемых как при проектировании, так и непосредственно в контуре управления;
- Обоснование методологии применения минимаксного подхода при реализации натурального или полунатурного моделирования траекторного движения ВС с включением в контур управления реальных пилотов на этапах внедрения минимак;
- Создание методологии составления алгоритмов обработки информации бортовых и встроенных систем записи информации, обеспечивающих обнаружение траекторных отклонений движения ВС от "нормы" и отклонений в работе подсистем АБСУ и НК;
- Выбор критериев и методов оценки эффективности системы управления при действии экстремальных возмущений, определены условия стабилизации параметров траекторного движения управляемого объекта;
- Оценивание и прогнозирование состояния подсистем АБСУ и НК на основе методов, обеспечивающих однозначное определение отказавших подсистем и тенденций перехода систем к предотказным состояниям.

**Научную новизну работы определяют следующие результаты, полученные лично автором и вынесенные на защиту:**

1. Методы и процедуры оценки точности управления ВС на этапе захода на посадку, учитывающие функционирование системы в неопределённых условиях при экстремальных возмущениях и информационных помехах;

2. В разработанных процедурах минимаксной фильтрации предусматривается применение схемы адаптивного построения информационных областей с учётом вариации характеристик объекта, регулятора и возмущений на основе процедуры приближенного решения задачи позиционного наблюдения;

3. Определение топологических особенностей информационной области в методе упрощения процедуры минимаксной фильтрации, исследование свойства информационной области определения экстремальных возмущений, действующих на объекты нейтральностью контура регулирования по одной из оцениваемых координат;

4. Специальный метод синтеза субоптимального управления траекторным движением ВС при заходе на посадку минимизирует меру максимальной ошибки и обеспечивает снижение требования к бортовым вычислительным машинам (БВМ) в контуре управления;

5. Повышение эффективности обнаружения отклонений в работе АБСУ и НК при траекторном движении ВС и выявление таких отказов в системе, которые не обнаруживаются системой контроля штатной АБСУ.

6. Разработка методики построения области стабилизации значений фазовых координат с однозначным определением возникающих отказов подсистем АБСУ и НК в допустимой области с диагностикой предотказных состояний контура регулирования;

7. При обосновании выбора частного и общего показателей качества функционирования АБСУ и НК в режиме захода на посадку при действии экстремальных возмущений доказано, что предложенный в диссертации расширенный критерий степени аварийности является обобщённым показателем безопасности полёта с учётом влияния "человеческого фактора" экипажа на характер траекторного управления ВС.

**Практическая значимость исследований** по решённой в диссертации проблеме заключается в следующем:

- Разработанная в диссертации методика оценки точности управления траекторным движением ВС позволяет производить инженерные расчёты по учёту условий совместного действия на управляемую систему экстремальных возмущений и информационных помех;
- Субоптимальные игровые алгоритмы фильтрации информации входа и управления траекторным движением ВС позволяют практически решать задачу оптимизации системы на инженерном уровне;
- Требования к управляющим бортовым ВМ, обоснованные в диссертации, обеспечивают практически приемлемое качество субоптимального минимаксного управления;
- Обнаружение отклонений в работе АБСУ и НК и траекторным движением ВС обеспечивается применением эффективных инженерных методик;
- Предложенные в диссертации модификации оценки критерия «степени аварийности» системы обеспечивают оценку эффективности действий экипажа, направленных на устранение влияния отказов АБСУ и НК на точность выдерживания траекторного движения ВС.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на II Всесоюзной научно-практической конференции по безопасности полётов (Ленинград, октябрь 1979 г.), на Всесоюзной научно-практической конференции «Состояние и перспективы работ по автоматизации посадки воздушных судов и повышения регулярности полётов в сложных метеословиях» (Москва, октябрь 1980 г.), на II Ленинградском симпозиуме «Теория чувствительности и её применение» (Ленинград, июнь 1979 г.), на семинаре по автоматическому управлению летательными аппаратами Ленинградской секции Научного Совета АН СССР по навигации и управлению (Ленинград, ноябрь 1980 г.), на Игровой научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава Академии ГА, посвященной 60-летию Великой Октябрьской социалистической революции (Ленинград, октябрь 1977 г.), на III Всесоюзной конференции по безопасности полётов (Ленинград, ОЛАГА, 1982 г.), на Всесоюзной научно-практической конференции «Методология изданий и опыт эксплуатации АСУ в гражданской авиации» (Рига, 1984 г.), на IV Всесоюзной конференции по безопасности полётов «Безопасность и эффективность эксплуатации воздушного транспорта» (Ленинград, ОЛАГА, 1985 г.), на VII Всесоюзном совещании «Теория инвариантности, теория чувствительности и их применение» (Москва, АН СССР, 1987 г.), на V практической конференции по безопасности полётов «Безопасность полётов и профилактика авиационных происшествий» (1988 г.), на I-й Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность полётов и государственное регулирование деятельности в ГА (С. - Петербург, АГА, 1995 г.), на научно-технической конференции ДИМЭБ-97 (С. - Петербург, 1997 г.). Основные результаты работы внедрены на предприятии п/я М-5537, в аэропорту ФГУАП "Пулково", в ФГУАП "Кавминводьявиа", а также в учебном процессе АГА и при выполнении НИР и в МІТУ ГА на кафедре БП, что подтверждается соответствующими актами о внедрении (приложение к диссертации).

Методика расчёта оценки точности управления; субоптимальные игровые алгоритмы фильтрации данных и цифровые алгоритмы управления траекторным движением ВС используются при разработке систем управления перспективных самолётов ГА на предприятии п/я М-5537.

В автореферате представлены 8 основных работ, опубликованных в последнее время, общее число публикаций по теме - 42.

**Структура** диссертации: изложение дано в виде 10 глав на 347 страницах, включая список литературы из 16- наименований и приложения.

Тематически весь материал диссертации объединён в 3-х разделах:

**Раздел 1 - Проблемы обеспечения безопасности полётов самолётов в условиях неопределённости информации о возмущениях;**

**Раздел 2 - Анализ и синтез управления по минимаксному критерию;**

**Раздел 3 - Оценка технического состояния систем траекторного управления воздушным судном по минимаксному критерию.**

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы и цель диссертационного исследования, даётся существо решаемой научной проблемы, приводятся основные положения работы, выносимые на защиту, аннотируется содержание глав.

### **Раздел I - Проблемы обеспечения безопасности полётов самолётов в условиях неопределённости информации о возмущениях**

**Глава 1. Проблемы обеспечения безопасности полётов магистральных самолётов и путей повышения точности захода на посадку в условиях неопределённости характеристик возмущений.** Первая глава посвящена проблемам обеспечения безопасности полётов и анализу методов повышения точности захода на посадку современных воздушных судов в условиях неопределённости информации. Даётся постановка задач исследований. Рассматриваются пути повышения точности захода на посадку воздушных судов в условиях экстремальных и неопределённых возмущений разного рода.

Сформулированы основные задачи и методы исследования. Установлено, что одним из основных путей повышения точности захода на посадку является применение новых принципов обработки навигационной информации и управления ВС.

В данном подразделе рассмотрена связь показателей безопасности полётов с характеристикам точности посадки. Кратко анализируются некоторые последние сообщения и обзоры о состоянии безопасности полётов в России, в странах СНГ и во всём мире, что даёт статистику распределения вкладов различных возмущающих факторов, вызывающих возникновение авиапроисшествий в ГА. Дело в том, что нормативно-правовой механизм управления безопасностью полетов достигает своего предела, как в случае "кривой" для статистик авиапроисшествий "по Боингу". Поэтому дана корректировка определений показателей безопасности полета согласно международному стандарту ISO 8402, что даёт конструктивный смысл дальнейшим исследованиям.

Определение по ISO 8402, статья 2.3.1. следующее

"Безопасность - это состояние системы, когда потери, ущерб или риск опасности имеют определенную величину, которая не превышает заданный (стандартный) уровень". В связи с этим в главе 1 проведён анализ состояния безопасности и тенденций измерения уровня безопасности полётов при совершении технических средств посадки. Выделены основные общесистемные факторы аварийности ВС. Сделан анализ общих тенденций изменения показателей БП в ГА РФ и СНГ (рис. 1).

Установлено, что уменьшилось общее количество авиационных происшествий и катастроф (в 1,4 раза), снизилось количество погибших в катастрофах (25%). Главный вывод из представленных материалов состоит в том, что "кривая Боинга" может быть взята за эталон качества систем обеспечения безопас-



ности полётов. Поскольку не бывает абсолютно безопасных или абсолютно опасных, что необходимо повышать эффективность управления, особенно при посадке самолётов. Ввиду неоправданного с позиций общества материального и морального ущерба для ГА в случае катастрофы приходится искать новые принципы управления. Это может быть принцип "минимакса". Минимаксный подход может дать новый способ выхода из создавшегося положения и использовать ещё имеющиеся резервы, т.е. уменьшить нормированное критическое число катастроф ниже известного уровня "осцилляции". Причины возникновения авиапроисшествий могут быть самые различные. Например в рейсе NZ60 (Боинг) был обнаружен ошибочный сигнал наклона глассады, это, как имело место ошибки при уходе на второй круг. Дорогая цена платится в ГА за бизнес.

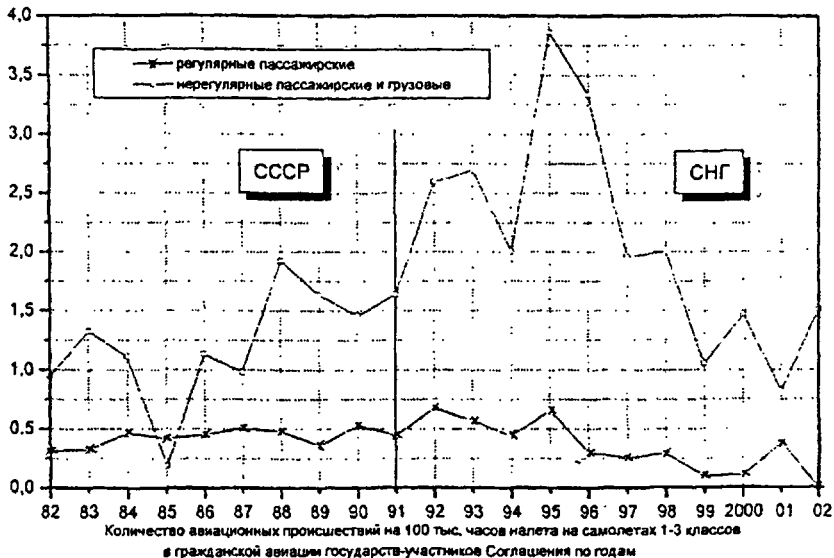


Рис. 1.

Успешность захода на посадку определяется точностью вывода самолёта в такую область пространства относительно взлётно-посадочной полосы, из которой возможно приземление ВС с высоким уровнем безопасности. Показано, что ухудшение точности следования ВС по равноточным зонам в автоматическом или директорном режимах в основном связано с действием на систему возмущающих внешних воздействий таких, как дрейфы вычислительных устройств и погрешности датчиков сигналов в законах управления. Выявлено, что в эксплуатируемых в настоящее время системах управления не обеспечивается фильтрация низкочастотных помех, поэтому к радиомаякам предъявляются весьма жёсткие требования по части искривлений равноточной зоны. Обнаружено, что существенное влияние на точностные характеристики систем

«самолёт — система автоматического управления» оказывают разброс крутизны сигналов бортовой радиотехнической системы в целом и особенно угломерных радиотехнических средств обеспечения захода на посадку и т.п.

Снижение погрешностей выдерживания глиссады может быть достигнуто за счёт совершенствования наземного оборудования, разработки новых методов управления ВС, а также при использовании для управления полётом новейших математических методов (теория оптимального управления, теория игр, метод статистических испытаний и др.).

В начале 70-х годов в теории и практике разработки бортовых систем управления выделилось направление по изысканию новых методов и средств управления при заходе на посадку и посадке. Применение бортовой цифровой техники для реализации управления приводит к необходимости решения задачи синтеза и реализации соответствующих цифровых законов управления.

Предлагается строить цифровую автоматическую систему как последовательность устройств для субоптимальной обработки информации и устройства оптимального управления. Применение фильтров Кальмана обеспечивает оценку фазовых координат объекта, которые необходимы для формирования команд наведения. Цифровые пилотажно-навигационные комплексы позволяют осуществить принципиально новые способы управления с прогнозированием терминального состояния. Попытки оценить вероятности неблагоприятных исходов при очень малой частоте их появления обычно дают неубедительные результаты. В подобных случаях целесообразно ориентироваться на самые неблагоприятные сочетания возмущений. Закон управления необходимо строить так, чтобы минимизировать величину максимальной оценки ошибки пилотирования. Процесс управления можно представить как игру, где возмущение стремится максимизировать, а управление — минимизировать выбранный критерий качества.

Поэтому применение игровых законов управления на посадке, помимо повышения безопасности, обеспечивает снижение количества уходов на второй круг и сокращение времени, затрачиваемого на выполнение посадок. Достижимый за счёт этого экономический эффект проявляется в повышении пропускной способности аэропортов и увеличении полезной нагрузки самолётов за счёт сокращения запасов топлива, предназначенного для выполнения посадок. Представляется необходимым разработка новых методов построения алгоритмов цифровой обработки траекторной информации и синтеза субоптимального управления траекторным движением ВС. В условиях захода на посадку требуется высокая точность определения координат и вектора скорости центра масс самолёта, которые необходимы для реализации требуемых законов управления.

Распространённой является ситуация, когда априорная информация о входных воздействиях является минимальной: какое-либо статистическое описание их отсутствует, а соответствующая информация ограничивается заданием лишь допустимых областей изменения неизвестных величин. Это обстоятельство приводит к задачам наблюдения в условиях неопределённости. Решение данных задач наиболее полно рассматривается в трудах и достигается путём привлечения методов минимакса и теории игр.

В связи с этим представляется необходимой разработка методов решения игровых задач, дающих хотя и неоптимальные в полном смысле результаты, но гарантирующие приемлемое качество процессов в любых допустимых условиях

Рассмотренные методы повышения точности захода на посадку ВС, особенности построения и реализации игровых алгоритмов фильтрации и управления, а также наличие человека-оператора в контуре управления ВС определяют контуры рассматриваемой проблемы и круг задач, которые подлежат решению:

- разработка методов и субоптимальных игровых алгоритмов цифровой обработки траекторной информации, необходимых для синтеза управления траекторным движением ВС;
- разработка методологических подходов для инженерных решений по синтезу законов управления траекторным движением ВС;
- оценка состояния подсистем АБСУ и НК, причин отказов и их влияния на точность траекторного движения ВС и безопасность посадки;
- экспериментальная проверка полученных результатов при полунатурном моделировании с включением реальных пилотов-операторов в контур управления и имитацией экстремальных возмущений.

Проведённый анализ показывает, что для целей управления самолётом наибольший интерес представляет теория позиционного наблюдения, которая основана на построении в фазовом пространстве некоторой информационной области, содержащей и вектор истинного состояния системы.

Предложено построить субоптимальное управление с использованием наиболее универсального и конструктивного метода решения игровых задач, а именно, метода экстремального прицеливания проработанного Н.Н. Красовским, что обозначает управление с прогнозированием.

**Основной вывод по главе 1 следующий.** Показано, что основными причинами нарушения условий безопасности полёта являются возникновение экстремальных значений некоторых возмущений, на которые не рассчитана система или к парированию которых не подготовлены экипаж КВС ВС. В настоящее время открываются новые перспективы внедрения алгоритмов "минимакса" и игровых схем управления в бортовые комплексы систем управления ВС новых поколений.

**Глава 2. Динамические модели управляемого движения воздушных судов на этапах взлёта и посадки при экстремальных возмущениях.** Во второй главе разработаны динамические модели управляемого движения самолёта. Исследованы с позиций достоверности методы оценки точности управления самолётом на этапе предпосадочного снижения в автоматическом режиме на основе принципа построения областей допустимых и возможных отклонений ВС от заданной траектории на высоте принятия решения при экстремальных возмущениях. Дана классификация управлений с учётом признаков неопределённости информации о действующих возмущениях.

В тех случаях, когда факторы возмущения являются самыми неблагоприятными из всех возможных и их выбор подчинен сознательно действующему противнику или "природе", то такая ситуация уже **не является** случайной.

При такой постановке необходимо исходить из теоремы о том, что некоторый результат, приемлемый при неблагоприятных условиях, может обеспечить удовлетворительное качество системы и при всех других возможных условиях, и это не будет хуже.

Таким образом, возникает необходимость в игровой постановки задачи управления в следующих вариантах:

- "Игровая задача № 1 - с одним игроком";
- "Игровая задача № 2 - с противоположными интересами игроков".

Поставленные качественные модели систем могут быть формализованы в классе дифференциальных игр.

В связи с отказом от стохастических моделей управляемых систем в данной главе даётся формализация определений, характеризующих свойства управляющих процессов в фазовом пространстве. При этом предварительно изучаются функциональные качества систем с учётом неопределённости информации и понятие стратегии действия.

Принято, что состояние исследуемого управляемого объекта в каждый момент времени  $t$  на отрезке  $[0, \theta]$ ,  $0 \leq t \leq \theta$ , однозначно задается  $n$ -мерным фазовым вектором (при отсутствии специальных оговорок в дальнейшем все векторы рассматриваются как векторы-столбцы)  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)'$ .

Всякую абсолютно непрерывную функцию  $x(t)$ , реализовавшуюся на отрезке  $[0, \theta]$ , предложено называть движением объекта, заданным в пространстве позиций  $\{t, x\}$ . Очевидно, управление может быть успешным лишь в том случае, когда множество  $R$  всех возможных позиций объекта, которые могут реализоваться при выбранном способе управления, вложено в множество  $N$ :

$$\forall t: 0 \leq t \leq \theta, \quad \{t, x(t)\} \in R \subset N.$$

В пространстве  $\{t, x\}$  задается также целевое (терминальное) множество  $M$ . Цель управления считается достигнутой, если выполняется также дополнительные условия:

$$\{\theta, x(\theta)\} \in G \subset M,$$

где  $G$  - область достижимости объекта к конечному моменту  $\theta$ , который либо фиксируется заранее, либо определяется как момент первого попадания вектора  $x$  на множество  $M$ . Стратегиями игроков предложено называть любые правила, сопоставляющие каждой сложившейся позиции  $\{t, x\}$  величины управлений  $u(t, x)$ ,  $v(t, x)$ , которые реализуются управляющим устройством (регулятором).

В связи с этим в дальнейшем рассматриваются объекты управления, поведение которых описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{x} = f(t, x, u, v), \quad x(0) = x, \quad 0 \leq t \leq \theta,$$

Предполагается, что вектор-функция  $f$  удовлетворяет естественным условиям, обеспечивающим существование и единственность решения  $x(t)$  на отрезке  $0 \leq t \leq \theta$  [165]. Эта функция непрерывна и ограничена при всех тех значениях аргументов, которые только могут встретиться. Предполагается также, что все возможные процессы изменения  $u(t)$  и  $v(t)$  представляют собой интегрируемые по Лебегу или кусочно-непрерывные функции.

Полное описание замкнутой системы управления будет иметь вид:

$$y = f(t, y, v), \quad y(0) = y, \quad 0 \leq t \leq \theta,$$

где  $y = (x', u')$  - расширенный  $(n + r)$ -мерный вектор состояния, а  $f$  -  $(n + r)$ -мерная вектор-функция. Поведение системы  $y(t)$  однозначно определяется реализацией  $v(t)$  и начальными условиями  $y(0)$ , заданными в фазовом пространстве.

С учётом изложенного выделяются следующие классы задач анализа и синтеза, оптимальных по заданным критериям.

**Задача А1. Проверка гарантированных условий безопасности.** Описание системы задано, множество допустимых состояний  $N$  и возможных возмущений  $Q$  известно. Требуется проверить выполнение условия: каждое движение объекта  $x(t)$ , порождаемое любым допустимым возмущением  $v(t) \in Q$ , принадлежит множеству  $N$  в течение всего времени работы системы:

$$\forall t, v: 0 \leq t \leq \theta, v(t) \in Q, \{t, x(t)\} \in N$$

**Задача А2. Построение области достижимости.** Принимаются те же условия, что и в задаче А1. Требуется построить область достижимости  $G$ , включающую все движения  $x(i)_t$ , порождаемые любым из допустимых возмущений  $v(t) \in Q$ . Решение этой задачи позволяет переформулировать введённые условия в виде  $G \subset N$ .

**Задача А3. Построение множества допустимых возмущений.** Предполагается, что уравнение системы и множество  $N$  заданы. Требуется построить множество допустимых возмущений  $Q$ , для которого  $G \subset N$ . Очевидно, решение не единственно. Наибольший практический интерес представляет объединение всех частных решений  $Q$ .

**Задача А4. Построение экстремального возмущения.** Задано уравнение системы и множество ограничений  $Q$ . Требуется найти возмущение  $v^*(t, x)$ , удовлетворяющее заданному ограничению и доставляющее максимум функционалу.

$$y^* = \max_{v(\cdot) \in Q} \gamma[v(\cdot)] = \gamma[v^*(\cdot)] = \varphi[x^*(t)].$$

Соответствующие значения оценки  $y^*$  функции  $v^*(t, x)$  будем названы

экстремальным возмущением.

**Задача С1. Синтез приемлемого закона управления.** Задано уравнение объекта, множества  $N, P$  и  $Q$ . Требуется построить закон управления  $u(t, x)$ , удовлетворяющий введённым ограничениям, при которых любая функция  $v(\cdot) \in Q$  порождает движение  $\{t, x(t)\} \in N$ . Решение, как правило, не единственно, так что возможен учет некоторых дополнительных требований технического характера.

**Задача С2. Синтез оптимального управления.** Условия те же, что в С1. Требуется построить закон управления  $u(t, x)$  обеспечивающий решение задачи С1, и, кроме того, доставляющий минимум функционалу, введённому выше при самом неблагоприятном из возможных возмущений:

$$y_0 = \min_{v(\cdot) \in P} \max_{v(\cdot) \in Q} \gamma[u(\cdot), v(\cdot)] = \max_{v(\cdot) \in Q} \gamma[u^*(\cdot), v(\cdot)].$$

**Задача С3. Параметрический синтез приемлемого закона управления.** Задача отличается от С1 тем, что задана структура закона управления в форме, включающей неизвестную вектор-функцию,  $k(t)$  при ограничениях  $k(t) \in S$ . Требуется найти любую допустимую функцию  $k^1(t)$ , обеспечивающую решение задачи С1.

**Задача С4. Построение допустимой области вариации параметров.** Условия те же, что в С3, но требуется построить множество  $K \subset S$ , такое, что любая функция  $k(t) \in K$  даёт решение задачи С3.

**Задача С5. Оптимальный параметрический синтез.** Условия те же, что в С3. Требуется отыскать функцию  $k^*(t)$ , обеспечивающую решение задачи С2. В частном случае вместо функции  $k^*(t)$ , отыскивается вектор постоянных параметров  $k^*$ . Методы решения описанных задач анализа и синтеза последовательно рассмотрены в главе 2.

Основным требованием для рассматриваемого класса систем является обеспечение условий безопасности, которые формально были определены как совокупность параметров возмущений:

$$\forall t: 0 \leq t \leq \theta, \{t, x(t)\} \in N, \{\theta, x(\theta)\} \in M$$

где  $N$  и  $M$ - ограниченные континентальные множества.

Для проверки условий безопасности при любых допустимых возмущениях необходимо построить гарантированную оценку

$$y = \max_{v(\cdot) \in Q} \gamma[v(\cdot)] = \gamma[v^*(\cdot)] = \varphi[x^*(t)]$$

Перечисленные задачи анализа сводятся к вычислению оценки в вариационной задаче максимизации функционалов. Задачи синтеза оптимального управления сводятся к отысканию минимаксной гарантированной оценки

$$\gamma = \min_{u(\cdot)} \max_{v(\cdot)} \gamma [u(\cdot), v(\cdot)] = \max_{v(\cdot)} \gamma [u^*(\cdot), v(\cdot)] = \varphi [x^*(t)]$$

и соответствующей функции  $u^*(t, x)$ .

Задачи построения какого-либо удовлетворительного закона управления занимают некоторое промежуточное положение и сводятся, как правило, к многократному вычислению оценки для различных вариантов закона  $ll(t, x)$ .

В тех случаях, когда удастся подобрать аналитическую аппроксимацию функционала, например, квадратичной формой

$$\gamma_2 = \max_x [x'(t) H(t) x(t)].$$

где  $H(t)$  - заданная матрица  $n \times n$ . При этом любое семейство поверхностей равных оценок  $\gamma_2 = C$  может быть задано с помощью функционала, в то время как обратное утверждение несправедливо.

Сформулированная задача оптимизации сводится к вариационному исчислению. Анализ поведения управляемой системы в условиях экстремальных возмущений требует решения вариационной задачи на максимум введённого выше функционала. Неклассический характер задачи, обусловлен видом функционала и ограничений.

#### **Выводы по главе 2 следующие.**

- Новый вид функционала качества управления в виде вложенных многообразий параметров, непосредственно отражающих требования к безопасности системы, позволяет получить количественную характеристику "запаса безопасности" и запаса устойчивости.
- Различные задачи анализа и синтеза систем управления могут быть сведены к двум основным типам - к вариационной задаче максимизации функционала и к игровой задаче на минимакс введённого функционала.

### **Раздел 2 - Анализ и синтез управления по минимаксному критерию**

**Глава 3. Определение областей допустимых отклонений ВС в боковой плоскости при экстремальных ветровых воздействиях на участке посадки.** В третьей главе рассматривается решение задачи позиционного наблюдения для построения игровых алгоритмов цифровой обработки навигационной информации. Разрабатывается метод и алгоритмы минимаксной фильтрации при построении информационных областей допустимых отклонений траектории ВС на плоскости. Исследуются свойства информационной области для линейных объектов, нейтральных по одной из оцениваемых координат. Даются методологические основы схемы построения геометрических областей допустимости минимаксных управлений на примере двойственной задачи терминального управления ВС в боковой плоскости на высоте принятия решения. Возможности ручного управления для исправления накопившихся отклонений весьма ограничены. В связи с этим к моменту принятия решения система должна быть выделена в некоторую допустимую область пространства состояний. В рамках

данной проблемы необходимо решить следующие две двойственные задачи терминального управления ВС в боковой плоскости.

1. Построение области  $G$  возможных терминальных состояний системы (область достижимости) на высоте принятия решения при действии экстремальных возмущений.

2. Построение области  $M$  допустимых отклонений на высоте принятия решения, из любой точки которой за оставшееся время самолёт может быть выведен на ВПП.

Наибольшие трудности вызывает устранение накопившихся к концу участка управления боковых отклонений, поэтому в дальнейшем рассматриваются только боковые движения самолёта, например ТУ-154 с системой АБСУ-154.

Предлагается универсальная модель динамики движения ВС для задач минимаксного управления на основе линейной модели ВС как объекта управления в боковой плоскости. К возмущениям, действующим на объект - ВС, относятся изменения боковой составляющей скорости ветра  $W_i$  для схемы кинематической посадки на рис. 2.

К возмущениям относятся также ошибки датчиков информации  $\Delta\psi$  и  $\Delta\xi$  боковой ветер  $W_z$ .

Воздушная скорость  $V$  определяется по известному соотношению через

Представленная модель объекта управления позволяет найти показатели точности управления при заданных экстремальных характеристиках возмущения  $W_z$ ,  $\Delta\varepsilon$  и  $\Delta\psi$  при определенной схеме оценивания возмущения и дрейфов переменных движения.

На возмущающие воздействия наложены ограничения вида:

где  $\vartheta_j(t)$  — составляющие вектора  $\vartheta$ , а  $v_j(t)$  — заданные функции времени.

Показано, что область достижимости  $G(\theta)$  для заданного объекта и ограничений всегда выпуклая. Поэтому область строится как огибающая опорных гиперплоскостей. Тогда граница области достижимости даётся в виде

$$r(l) = l'Y(\theta, 0)y^0 + \int_0^{\theta} \max_{\nu} [l'Y(\theta, \tau)C(\tau)\vartheta(\tau)] d\tau,$$

где  $r(l)$  - полярное расстояние от начала координат до гиперплоскости, опорной к множеству  $G$ , а  $Y(\theta, \tau)$  - фундаментальная матрица решений однородного уравнения  $\dot{y} = A(t)y$ , для соответствующего неоднородному уравнению.

Конфигурация области  $G$  определяется только интегральной составляющей, поэтому в дальнейшем без потери общности можно считать, что начальные условия  $y^0$  являются нулевыми.



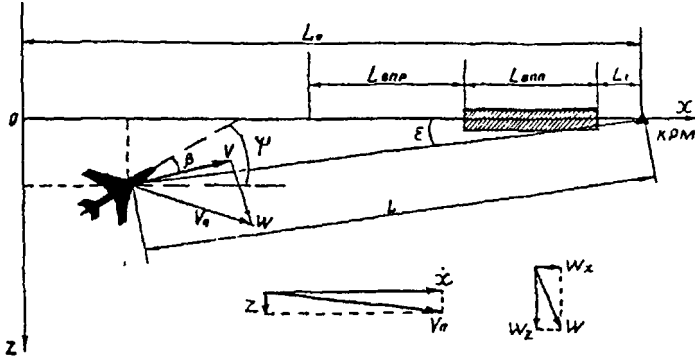


Рис. 2.

Значение вектора  $s(l, \tau) = Y'(\theta, \tau)l$ , как функцию  $\tau$ , можно получить путём решения уравнения, сопряжённого однородному в виде

$$\frac{ds}{d\tau} = -A'(\tau)s; \quad 0 \leq \tau \leq \theta;$$

с краевым условием  $s(\theta) = l; \quad \|l\| = 1$ .

Таким образом, для построения опорной гиперплоскости области  $G(\theta)$ , соответствующей направлению  $l$ , требуется решение полученного уравнения и вычислить значения векторов  $r(l)$ .

Задача может быть решена, если область решения ограничить рассмотрением случая управления траекторным движением самолёта.

При численных методах поиска вектора  $r(l)$  граница области  $G(\theta)$  строится как огибающая  $p$  опорных прямых на плоскости  $y_1, y_2$ . Наиболее экономичным по затратам времени является одновременное решение  $2n + p$  дифференциальных уравнений, которые соответствуют вычислению интеграла в представленном ранее выражении.

Алгоритм получается в виде:

$$\frac{ds^{(i)}}{d\tau} = A(\theta - \tau)s^{(i)}; \quad s_1^{(i)}(0) = 1; \quad s_i^{(i)}(0) = 0;$$

$$i = 2, 3, \dots, n;$$

$$\frac{ds^{(2)}}{d\tau} = A'(\theta - \tau)s^{(2)}; \quad s_2^{(2)}(0) = 1; \quad s_i^{(2)}(0) = 0;$$

$$i = 1, 3, 4, \dots, n;$$

$$0 \leq \tau \leq \theta.$$

Остальные  $p$  уравнений отражают в дифференциальной форме решение сопряжённой системы:

$$\frac{dr^j}{d\tau} = \sum_{i=1}^m |e_i^{(j)}(\tau)| v_i(\theta - \tau); \quad r^j(0) = 0; \quad 0 \leq \tau \leq \theta;$$

где

$$e^{(j)}(\tau) = C'(\theta - \tau)s^{(j)};$$

$$s^{(j)}(\tau) = \cos \lambda_j s^{(1)}(\tau) + \sin \lambda_j s^{(2)}(\tau);$$

$$j = 1, 2, \dots, p.$$

Машинный алгоритм и программа приведены в приложении к диссертации. При этом даётся оценка геометрических образов областей допустимых отклонений.

Представленную систему уравнений удобно интегрировать в обратном времени. Соответствующее решения этой системы неустойчивые, что не даёт возможности получить достоверные результаты. Поэтому используются ограничения на краевые условия.

На основе сделанных предположений и замечаний удаётся сформулировать методологические принципы схемы построения областей допустимости. Пример области дан на рис. 3.

При заданных функциях  $\gamma_3(t)$  и  $W_z(t)$  начальное и конечное состояние объекта управления (ВС с АБСУ) связаны в соответствии с формулой Коши соотношением:

$$x(\theta_N) = X(\theta_N, \theta_B)x(\theta_B) + \int_{\theta_B}^{\theta_N} X(\theta_N, t)[b\gamma_3(t) + cW_z(t)]dt.$$

Данное уравнение можно разрешить по отношению к вектору  $x^1(\theta_B)$ , что даёт возможность построения опорной гиперплоскости в множестве  $M$ , нормальной к вектору / в виде:

$$\rho(l) = \max_{\gamma_3} \min_{W_z, x^2(\theta_B)} l'x^1(\theta_B) = \min_{x^2(\theta_B)} \left[ -q'X_{12}x^2(\theta_B) \right] + \\ + \max_{\gamma_3} \min_{W_z} \left[ - \int_{\theta_B}^{\theta_N} q'X_{11}(\theta_N, t)[b\gamma_3(t) + cW_z(t)]dt \right].$$

Перебор различных векторов / даёт возможность построить многоугольник, описанный вокруг множества /. Вместо вычисления интеграла удобно решать соответствующее дифференциальное уравнение. Граница множества Л/ без учёта бокового ветра в форме фазовых портретов может иметь вид (рис. 3).

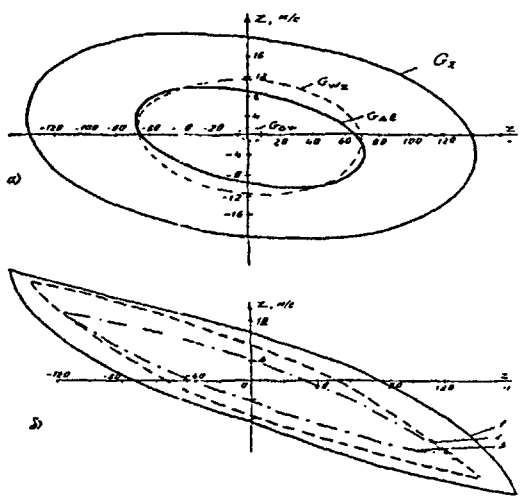


Рис. 3.

Сравнение областей возможных  $G$  и допустимых  $M$  отклонений ВС опорных траекторий показывает, что необходимая точность гарантируется при действии только одной из составляющих экстремального возмущения. Совместное влияние искривлений курсовой линии и переменного бокового ветра может вызвать недопустимо большие отклонения и привести к необходимости ухода на второй круг.

Таким образом доказана возможность разработки метода и алгоритмов построения областей возможных и допустимых отклонений самолёта от заданной траектории на ВПП при экстремальных возмущениях. Это требует интегрирования  $2n + p$  дифференциальных уравнений. При действии экстремальных ветровых возмущений на участке полёта от высоты принятия решения до точки начала выравнивания область допустимых отклонений заметно сужается на 30-40% по сравнению с нормами РЛЭ. Ввиду того, что система АБСУ не всегда обеспечивает необходимую для завершения посадки точность управления ВС, то целесообразно развивать методы минимаксного управления.

**Глава 4 Теоретические основы применения метода минимаксной фильтрации при оптимизации управляемых авиационных систем.** В четвертой главе рассмотрены вопросы минимаксной фильтрации при обосновании теоретических положений построения алгоритмов управления. Оценены требования к вычислительным средствам при пошаговой реализации алгоритмов.

Рассматриваются основные задачи теории наблюдения процессов в авиационных комплексах. Принимаются известные положения для линейных объектов, как и выше, в форме.

$$\dot{x} = A(t)x + B(t)u + C(t)\vartheta; \quad 0 \leq t \leq \theta,$$

где  $x$  —  $n$ -мерный вектор состояния,  $u$  —  $r$ -мерный вектор управления,  $\vartheta$  —  $m$ -мерный вектор возмущения,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  — матрицы соответствующих размерностей. Управляющее воздействие  $u(t)$  считается априорно известным и ограниченным  $u(t) \leq P(t)$ .

В теории наблюдения при решении минимаксных задач начальные условия и возмущения априорно не известны, и отсутствуют сведения об их статистических свойствах. Поэтому принимается, что возмущение  $\vartheta(t)$  и начальные условия  $x(0) = x^0$  в конкретных моделях объектов предполагается неизвестными. Информация о возможных реализациях  $\vartheta(t)$  и  $x^0$  ограничивается заданием только допустимых областей их изменения в виде условий:

$$\vartheta(t) \in Q(t); \quad x^0 \in X^0.,$$

где  $P$ ,  $Q$ ,  $X^0$  - заданные выпуклые компактные множества. Далее принимается, что измерению доступна лишь функция  $y(t)$ , формируемая из косвенных измерений известным математическим оператором наблюдения в виде:

$$y(t) = G(t)x + F(t)\xi,$$

где  $y$  - результат наблюдения в виде  $K$ -мерного вектора наблюдения,  $\xi$  - это  $l$ -мерный вектор помехи;  $G(t)$ ,  $F(t)$  — матрицы соответствующих размерностей. Информация о реализациях  $\xi(t)$  ограничивается заданием допустимых областей их измерения в виде условия:  $\xi(t) \in R(t)$ , где  $R$  - заданное выпуклое компактное множество допустимых значений.

Цель задачи фильтрации заключается в том, чтобы оценить неизвестные величины координат  $x(t)$  по фактическим результатам наблюдения значений измеренной реализации  $y(t)$ . Таким образом, требуется построить такую операцию  $\Psi$ , которая будучи применима к сигналу  $y(\tau)$ , измеренному на промежутке времени  $0 \leq \tau \leq t$ , обеспечивает процедуру  $\Psi(y(\tau)) = x^*(t)$  - наилучшую в некотором смысле оценку неизвестного истинного значения фазового вектора  $x(t)$ . Далее, в главе 4 решается вторая задача - задача апостериорного наблюдения, что является главным для авиационных систем.

Операцию наблюдения предполагается конструировать с учётом того фактора, что реализация  $y^*(\tau)$  уже известна. В известных источниках было дока-

зано, что некоторое информационное множество  $X(t)$  — ограниченное выпуклое замкнутое множество и, следовательно, может быть описано мажорирующей опорной функцией в виде:

$$\rho(l|X(t)) = \max \{l^T x | x \in X(t)\}, \quad l \in R^n,$$

где  $l^T x$  — скалярное произведение, а  $l$  —  $n$ -мерный вектор.

Уравнение фильтрации в этом случае оказываются близкими по форме к соотношениям для линейно-квадратичных гауссовых фильтров Р. Калмана и Р. Бьюси. В данном случае совместимые области  $X(t)$  представляют собой невырожденные эллипсоиды, центры которых, принимаемые за оценку истинного состояния системы, удовлетворяют дифференциальным уравнениям определённого вида.

Можно считать, что в задачах управления траекторным движением ВС координаты системы изменяется предсказуемо точно. Тогда можно рассматривать только случаи, когда оценке подлежат две координаты вектора состояния  $X$ . Геометрическая интерпретация процедур дана на рис 4.

Для осуществления минимизации по компонентам векторов предлагается следующая процедура. Сначала фиксируется какое-либо направление с помощью единичного вектора  $l^{(1)}$ , заданного зависимостью  $l^T = k l^{(1)}$ , где  $k$  — вещественное число. Далее, путем вариации числа  $k$  для фиксированного  $l^{(1)}$ , находится минимум заданной функции  $\rho(l^{(1)})$  на данном направлении. После этого необходимо изменить число  $i$  и повторить всю процедуру сначала. Таким образом, перебираются все возможные значения вектора  $l^T$ .

Для реализации рассмотренных алгоритмов минимаксной фильтрации необходимо на каждом шаге фильтрации интегрировать  $p$  исходных систем и  $2n + p$  дополнительных дифференциальных уравнений. При этом решается задача линейного программирования и выполняются операции инфинимальной конволюции. При этом возможно применить способы упрощения вычислительной процедуры минимаксной фильтрации на основе алгоритмов аппроксимирующей процедуры фильтрации.

Дальнейшее упрощение возможно в том случае, если известен и вид множества  $Z^k$ , если управляемая система вполне управляема. Самолёт, как объект управления, обладает этим свойством, что связано с его нейтральностью по боковому отклонению.

**Некоторые выводы по главе 4 следующие.** Обеспечивается возможность реализации метода упрощения алгоритмов минимаксной фильтрации путём построения информационных областей на плоскости. Игровые алгоритмы цифровой обработки навигационной информации пригодны для случаев произвольного вида информационных множеств, для множеств, имеющих конфигурации прямоугольника или полосы. Быстродействие бортовых компьютеров

необходимых для реализации предложенных и субоптимальных алгоритмов может быть средним.

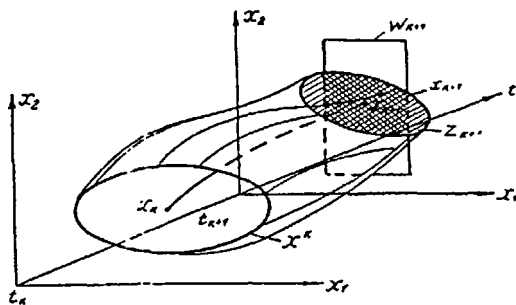


Рис. 4.

*Глава 5.* Принципы минимаксного управление боковым движением самолёта на заключительном этапе захода на посадку в условиях неопределённости информации о возмущениях. Пятая глава посвящена синтезу закона управления траекторным движением ВС на посадке по методу прицеливания путём периодического решения игровой задачи. Разработанный подход и алгоритмы управления основаны на методологии экстремального прицеливания с построением областей достижимости на плоскости при совместном использовании процедур управления и наблюдения. Производится методология упрощения игровых алгоритмов, формулируются требования по быстродействию бортовых ВМ в контуре управления ВС для их реализации в реальном масштабе времени.

Рассматривается ряд принципиальных вопросов теории минимакса. Выбирается критерий минимаксного обеспечения безопасной посадки. При выборе алгоритмов управления ВС на участке снижения  $[0, \theta]$  необходимо считаться с возможностью действия на объект порывов бокового ветра в самые неблагоприятные моменты времени. К началу этого этапа могут накопиться сравнительно большие отклонения самолёта от заданной траектории движения, в то время как допустимые отклонения  $x(\theta) \in M(\theta)$  в момент  $\theta$  весьма малы. Обеспечить жесткие требования к качеству управления можно применением алгоритмов, оптимальных в смысле игровых задач. Движение управляемого объекта описывается линейным уравнением. Начальное условие  $x(0) = x^0$  считается неизвестным, удовлетворяющим ограничению. Области достижимости могут быть построены как огибающие опорных гиперплоскостей

$$l'x^{(1)} = r_1; \quad l'x^{(2)} = r_2.$$

Вектор  $[X(\theta, \tau)]' = S(l, \tau)$  как функцию  $\tau$  можно получить путём решения сопряжённого уравнения к уравнению для  $x$ . В регулярном случае оценка  $J^*$  при оптимальном управлении не может ухудшаться в ходе процесса. Вследствие этого функция  $u^*(t)$  аппроксимируется ступенчатой, некоторое ухудшение может наблюдаться, но уменьшением периода квантования его всегда можно сделать как угодно малым.

Однако, значительно чаще встречаются нерегулярные случаи, когда зависимость  $\varphi(l, t)$  имеет несколько максимумов, причём перемещаются точки экстремального прицеливания. Именно такой случай имеет место в задачах конфликтного управления самолётом.

При двух (или более) возможных точках прицеливания строго оптимальное управление возможно только в случае информационной дискриминации первого игрока, то есть при известном значении  $\mathcal{G}(t)$  на текущем интервале  $\Delta t$ , или при изменении возмущений. Но такой возможности обычно нет, так что при переходе от одной точки прицеливания к другой возможно ухудшение оценки  $J^*$ .

Если же ввести информационную дискриминацию второго игрока (преследователя), то ухудшение происходит обязательно.

С учетом этого целесообразно применять оптимальное управление и в данном случае "поглощения", чтобы максимизировать «запас поглощения».

В нерегулярной игровой задаче целесообразно выбрать возмущение с учётом информационной дискриминации игрока-союзника,

Для осуществления рассматриваемого способа управления требуется высокое быстродействие бортовых ВМ. Действительно, на каждом цикле её работы требуется не только построение информационной области  $X(t)$ , но и выбор управляющего воздействия  $u^*(t)$ . Основные затраты машинного времени при выборе управляющего воздействия  $u^*(t)$  идут на вычисление полярных расстояний путём интегрирования системы  $2n + p_1$  дифференциальных уравнений, определяющих решение задачи линейного программирования.

Так, требуемое быстродействие может составить  $N = N_u + N_F = 9,8 \cdot 10^6 + 1,6 \cdot 10^6 = 11,4 \cdot 10^6$  операций в секунду.

Выводы по главе 5 состоят в следующем:

- Периодическое решение игровой задачи на борту ВС в процессе позволяет обеспечить точность посадки при неизвестном ветровом воздействии.
- Использование субоптимальных алгоритмов управления траекторным движением ВС позволяет учитывать форму области допустимых отклонений на момент приземления, что может быть использовано для повышения уровня безопасности полетов.

**Глава 6. Оценка на основе вычислительного эксперимента робастности алгоритмов минимаксного управления самолётом.** В шестой главе оценивается робастность алгоритмов минимаксного управления. Осуществлена разработка методологии и построение игрового алгоритма управления ВС с помощью бортовой ВМ в реальном масштабе времени на заключительном этапе захода на посадку.

В данной главе даётся теоретическое обоснование возможностей обеспечения робастности управления при упрощении минимаксных алгоритмов управления самолётом. Необходимость в обеспечении робастности разработанных алгоритмов с преобразованием вычислительных процедур в цифровые алгоритмы объясняется тем, что исходные соотношения минимаксного управления являются нелинейными. В большей своей части эти процедуры представляются неявными параметрическими соотношениями. При построении машинных алгоритмов должны быть чётко выделены шаговые и циклические процедуры, поэтому приходится расщеплять интегральные и дифференциальные соотношения на микроциклы и применять метод последовательных приближений при решении задачи о минимаксе.

Робастность понимается здесь как нечувствительность упрощённых алгоритмов вычислительных процедур к разбросу параметров или зашумленным координат. Далее, в минимаксных задачах важным вопросом является оценка возможности замены гладких функций на кусочно-линейные зависимости.

Критерий робастности  $\rho$  предложено определять через функции чувствительности  $\Phi(x, \hat{x} | \Sigma)$ , находимые при вычислительном эксперименте путём/справления невязки  $\Delta x = \hat{x} - x$  с нормой допустимых отклонений по параметру  $x \in X, \hat{x} \in \hat{X}$ . Это требует разработки соответствующей методики упрощения вычислительных процедур для минимаксного управления посадкой самолета.

С этой целью было проведено моделирование процессов управления самолётом на заключительном этапе захода на посадку с шагом выбора управляющего воздействия  $\Delta_u t = 0,3$  с и шагом построения информационных областей  $\Delta t_r = 0,3$  с. Результаты моделирования показали, что при изменении дискретности  $\Delta \lambda$  полярного угла в упомянутых выше диапазонах от  $5^\circ$  до  $22,5^\circ$  точность управления практически не меняется. Увеличение  $\Delta \lambda$  до  $30^\circ$  и далее не имеет смысла, так как условие безопасности не соблюдается.

Для оценки быстродействия бортовой ВМ был проведён расчёт числа операций типа сложения в секунду  $N_F$ , необходимых для реализации алгоритмов минимаксной фильтрации в реальном масштабе времени. Это позволило построить машинный алгоритм управления самолётом.



Для получения оценок точности управления самолётом при игровом законе управления было проведено моделирование процессов управления боковым движением самолёта Ту-154 на заключительном этапе захода на посадку от высоты принятия решения ( $H=60$  м) до точки начала выравнивания в условиях совместного действия экстремальных условий и информационных помех и при отсутствии датчика бокового отклонения.

Терминальное множество  $M[\theta]$  было построено для момента пролёта торца ВПП с учётом условия безопасности движения на этапе выравнивания и при послепосадочном пробеге в случае действия экстремального возмущения с переменной составляющей скорости бокового ветра на ВПП  $|W_{\perp}| \leq 5$  м/с.

Рассмотренная игровая задача управления соответствует существенно нерегулярному случаю игры преследования-уклонения, когда размеры области  $G^{(1)}$  уменьшаются во времени значительно быстрее, чем  $G^{(2)}$  и функция  $\varphi(l)$  имеет более одного максимума.

Обнаруженное различие в оценках качества достигается за счёт увеличения амплитуды информационной помехи, которая ведёт к возрастанию ошибок фильтрации.

**Выводы по главе 6** следующие: при дискретной аппроксимации оптимальной в игровом смысле стратегии управления вполне допустимо некоторое увеличение периода дискретности управляющих воздействий. Требования по безопасности не нарушаются. Применение робастных алгоритмов для минимаксного управления траекторным движением ВС на этапе посадки по методу прицеливания оправдано.

### **Раздел 3. Оценка технического состояния систем траекторного управления по минимаксному критерию**

**Глава 7. Оценка параметров систем управления по неполному наблюдению координат ВС при неопределённости значений возмущений.** В главе семь оцениваются параметры систем управления и эффективность минимаксного управления при неполном наблюдении. Решаются прямая и обратная задачи. Рассматриваются критерии оценки технического состояния подсистем АБСУ и НК

Обнаружение и прогнозирование опасных изменений параметров системы и траекторных отклонений необходимо для того, чтобы предупредить возможные отказы в АБСУ и НК. Поэтому возникает задача оценки степени опасности отказов, неисправностей и изменения параметров элементов АБСУ и НК. Для этого необходимо, кроме того, оценивать степень близости значения вектора параметров их состояния к границам области допустимых значений.

Наиболее полно уровень безопасности полётов характеризуется статистическими показателями — числом авиационных происшествий на определённое число полётов (посадки, километров, перевезённых пассажиров и т.п.). Очевид-

но, знание  $m$ -мерных распределений условных  $P(a/h)$  безусловных и  $P(h)$  вероятностей состояния АБСУ и НК может дать полное описание статистических свойств авиационных происшествий и границ изменения параметров состояния. Однако, применительно к АБСУ и НК самолёта вероятностный подход оказывается непригодным. Поэтому развивается подход, основанный на гарантированных оценках безопасности в задачах управления методами теории позиционных дифференциальных игр. Рассматривается прямая и обратная задачи оценки технического состояния системы с учётом эксплуатационных ограничений на параметры системы следующие.

Определяются границы допустимых изменений параметров АБСУ и НК на основе бифуркаций параметров  $h$  по отношению к «идеально» отрегулированной системе. При этом для допустимых внешних возмущений из заданного множества  $Q$ ,  $\vartheta(t) \in Q$  и вектора  $h^o$  определяется множество состояний  $X^o$ , такое, что  $x(t) \in X^o$ . Если вектор параметров  $h$  не выходит за пределы допусков  $\Delta h$ , т.е. имеется некоторая область возможных состояний параметров системы управления  $H$ ,  $h^o + \Delta h \in H$ , то множество состояний  $X^*$  может быть в принципе найдено для любого вектора в виде объединения  $x$  всех множеств  $X^o$ :  $x = \cup X^o$ .

В то же время, можно сформулировать обратную задачу: по известной области работоспособности определить область возможных состояний параметров системы управления  $H$ . При этом предполагается, что номинальные значения  $h^o$  параметров системы управления известны, т.е. может быть определена область  $X^o$ . Далее, может быть задана некоторая область  $Y \supset X^o$ , где еще гарантируются условия безопасности и определяется такая область  $H$ ,  $h \in Y$ , что выполняется условие  $x(t) \in Y$  при любых значениях  $\vartheta(t) \in Q$  на всём интервале функционирования системы. Решение сформулированных задач при некотором произволе в задании конфигурации областей  $X^o$ ,  $X^*$ ,  $x$ ,  $Y$  и  $H$ . даётся в рамках метода линейного программирования.

Область достижимости линейной системы при выпуклой  $Q$  также выпукла. Поэтому границу области  $G$  можно строить в виде огибающей опорных гиперплоскостей:

где  $l$  - направляющий вектор;  $r$  - полярное расстояние гиперплоскости от начала координат. Представляется оценивать качество системы управления по размерам области в пространстве фазовых координат, в которой система управления обеспечивает стабилизацию вектора отклонений переменных состояния системы от программных значений.

Для решения задачи определения области стабилизации параметров движения самолёта предлагается использовать метод гарантированных оценок.

Здесь принято, что система «самолёт — система управления» описывается линейным векторным уравнением. Поэтому область  $Q$  может быть ограничена выпуклым многогранником в пространстве координат  $\mathcal{D}$ , при этом  $q$  граней задаются в виде опорных гиперплоскостей известного вида из глав 2, 3.

В качестве критерия эффективности системы управления можно использовать значения  $r_j$ , расстояний от начала координат до гиперплоскостей опорных к области достижимости  $G(t^*)$ , нормальных «опасным» направлениям в пространстве фазовых переменных на основе численной процедуры проверки выполнения условия стабилизации в допустимой области возможных значений параметров.

Предлагаемый метод построения границ сечения  $W$  даёт уравнения всех граней многогранника, ограничивающего сечение  $W$ , что значительно сокращает вычислительные затраты.

Предлагается еще один способ проверки условий вложения для экономической вычислительной процедуры. При этом условия стабилизации проверяются без вычисления элементов матрицы  $X^{k+1}$  без решения исходной системы дифференциальных уравнений,

Данный алгоритм рекомендуется в том случае, когда не требуется построение сечения области возможных состояний объекта при выполнении вложения  $W \subset X$ . К преимуществам данного алгоритма можно отнести также то, что при задании некоторого параметра, характеризующего «размер» области можно получить систему ограничений на этот параметр, при которой выполняется включение  $W \subset X$ .

Далее в главе 7 решается задача определения ограничений на размеры области стабилизации параметров для системы второго порядка, с учётом возможности реализации управления ВС при экстремальных возмущениях. При этом ограничения на область стабилизации параметров целесообразно искать в виде симметричного многоугольника в пространстве фазовых координат.

#### **Основные выводы по главы 7:**

1. Метод гарантированного подхода при оценке работоспособности АБСУ и НК позволяет найти приемлемые характеристики контура управления в условиях ограниченности и информации о возмущающих воздействиях.

2. Методы, алгоритмы и программы, проверенные на примере системы стабилизации вектора параметров траекторного движения управляемого объекта, показали эффективность работы на основе критерия минимакса. При этом удаётся прогнозировать предотказные состояния системы и принимать соответствующие решения о дальнейшей эксплуатации системы траекторного управления.

**Глава 8. Определение допустимых отклонений параметров и технического состояния подсистем АБСУ и навигационного комплекса.** В восьмой главе даётся анализ возможностей выявления системой встроенного контроля отклонений в работе АБСУ и НК. Рассматриваются методы использования для этих целей информации, фиксируемой бортовыми средствами регистрации по-

лётной информации. Разрабатывается методика и алгоритмы моделирования работы подсистем АБСУ и НК, повышающие эффективность обнаружения отклонений в их функционировании и траекторном движении ВС. Предложен критерий оценки эффективности системы управления при действии экстремальных возмущений, разработан метод, алгоритм и программа проверки выполнения условия стабилизации параметров траекторного движения управляемого объекта.

Принимается, что исследуемый объект с системой управления в виде АБСУ и НК описывается исходным векторным дифференциальным уравнением из главы 2. Однако, теперь  $A$ ,  $C$  — матрицы коэффициентов,  $a_{ij}$  и  $c_{ij}$  зависят от параметров системы управления, т.е. от АБСУ и НК так, что

$$a_{ij} = a_{ij}(q); \quad c_{ij} = c_{ij}(q), \quad q = (q_1, \dots, q_m) \text{ — вектор параметров.}$$

Предполагается, что вектор  $q$  может отличаться от идеального вектора  $q^\circ$ .

$q = q^\circ + \Delta q$ . При этом вводятся относительное отклонение  $\delta q_i$  координат вектора параметров системы управления от номинальных значений,

$$\delta q_i = \left| \frac{\Delta q_i}{q_i^\circ} \right|.$$

Далее, задаются известные из главы 2 частные показатели качества управления в форме функционалов  $J_1, \dots, J_n$ :

Оценка качества системы управления даётся в виде предельно допустимых отклонений параметров  $J_j = J_j(Q)$ , (относительных значений  $Q_i$ ),

где  $Q = (Q_1, \dots, Q_m)$  — вектор ограничений на допустимые относительные изменения параметров системы управления. Принимается предположение о линейном характере зависимости координаты вектора качества от параметров в виде:

$$g_{ji} = \frac{\partial (J_j / J_j^\circ)}{\partial Q_i}, \quad \equiv \quad g_{ji} = \frac{\partial I_j}{\partial Q_i}, \quad \text{где } I_j = \left| \frac{J_j}{J_j^\circ - 1} \right| \text{ — относительный}$$

показатель качества.

Оценка коэффициентов  $g_{ji}$  позволяет обоснованно выбрать допуски на отклонение отдельных параметров системы управления. На основе изложенной методики даётся описание объекта и системы управления с АБСУ и НК для ВС в режиме автоматического захода на посадку в условиях экстремальных возмущений. Используется форма Коши для описания полной системы уравнений. При этом разрабатывается вычислительная процедура для оценки функционалов качества линейных систем с ограничениями на возмущение. Далее, находится семейство сечений решения данного уравнения, что даёт значения общих показателей качества / для каждой координаты вектора  $Q$ . Оценивание мини-

максных показателей качества сделано на примере бокового движения ВС ТУ-154 с АБСУ.

Обнаружено, что показатели качества имеют неодинаковую чувствительность к изменениям различных параметров бокового сигнала системы траекторного управления. Наибольшее влияние на показатели качества управления оказывает «уход» таких параметров, как  $K_{\gamma}$ ,  $K_{\gamma_1}$ ,  $i_{\epsilon}$ ,  $i_{\epsilon}$ ,  $i_{\psi}$ , и  $i_{\psi}$ . Соответственно, и наиболее жесткие ограничения на величину допуска получены для этих параметров:  $\Delta K_{\gamma} = 0,7\%$ ,  $\Delta K_{\gamma_1} = 2\%$ ,  $\Delta i_{\epsilon} = 2,6\%$ ,  $\Delta i_{\epsilon} = 2\%$ ,  $\Delta i_{\psi} = 3,8\%$ . Наибольшее допустимое значение разброса до 64 % имеет параметр  $T_1$ . Из этого, например, следует, что при проведении регламентных работ, наибольшее внимание должно уделяться проверке параметров, имеющих наименьшее значение допусков.

В выводах по главе 8 отмечено, что предложенный метод определения допустимых отклонений параметров подсистем системы траекторного управления гарантирует выполнение условия стабилизации основных базовых координат вектора состояния самолёта в заданных пределах. При этом границы допустимых отклонений основных базовых координат вектора состояния самолета определяются теоретически и практически достоверно в рамках критерия минимакса.

*Глава 9. Разработка метода получения гарантированных оценок технического состояния систем на основе результатов бортовых регистраторов (Задачи идентификации).* В девятой главе получены ограничения на размеры области стабилизации, определяющие область допустимых значений фазовых координат, выход за которые определяет отказ подсистем АБСУ-154 и НК, а приближение к границам области даёт возможность сделать вывод о предотказном состоянии подсистем. Определены значения частного и общего показателей качества функционирования системы управления в режиме захода на посадку при действии экстремальных возмущений. Предложен расширенный критерий степени аварийности, являющийся обобщенным показателем безопасности полёта, учитывающим влияние членов экипажа на траекторное управление ВС. Даётся обоснование метода гарантированной оценки технического состояния по регистрируемым параметрам. Предложен критерий работоспособности подсистем автоматической системы управления при воздействии на объект управления нерегистрируемых внешних возмущений. Далее, на основе предложенного критерия, получены значения допусков на основные параметры бокового канала системы траекторного управления АБСУ-154.

В случае достаточно простой системы при регистрации всех необходимых входных и выходных переменных возможна полная идентификация её состояния по регистрируемым параметрам. При этом идентификация состояния системы управления может быть произведена без снятия исследуемой системы с самолёта лишь по данным бортовых регистраторов, полученных в процессе эксплуатации системы.

Способ выявления неисправностей, основанный на оценке некоторых обобщенных показателей состояния, применяется в настоящее время в систе-

мах встроенного контроля АБСУ. Используется метод сравнения поведения подсистемы и её математической модели.

Показатель качества / при этом представляет собой функционал, зависящий от разности выходных величин исследуемой системы и её математической модели  $y_w(t)$ :  $I = I(y(t) - y_w(t))$ , в форме мини-макса.

Для принятия гарантированного решения о неработоспособности подсистемы, величина порога сравнения  $\delta_m$  должна быть такой, чтобы исключить возможность принятия решения о неисправности работоспособной системы.

Гарантированный подход к решению задачи предполагает использование модели экстремальных, возмущений с заданными ограничениями. Далее, проводилось моделирование системы с номинальными параметрами управления и с «наихудшим» допустимым набором параметров. При этом показано, что при действии экстремальных возмущений, значение заданного крена для системы с «наихудшими» допустимыми параметрами канала крена, достигает своего максимально допустимого значения, например,  $20^\circ$  за время  $\approx 3$  с. Это означает, что в условиях действия экстремальных возмущений можно ограничиться небольшим интервалом времени для получения достоверных результатов (рис. 5).

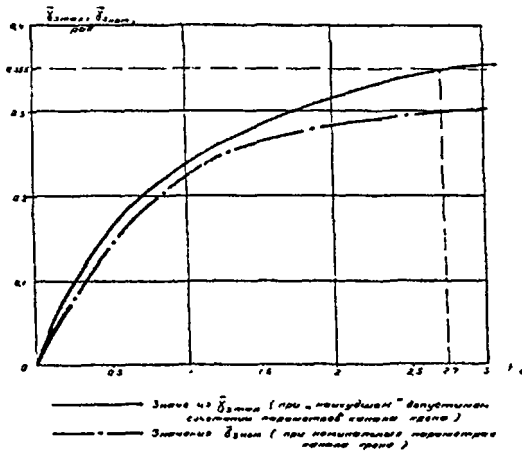


Рис. 5.

Оценку работоспособности канала крена АБСУ и НК можно произвести с использованием данных бортовых регистраторов с учётом реально действовавших на систему возмущений. При этом предлагаются комплексные программы оценки технического состояния подсистем АБСУ-154 с учётом параметров экстремальных возмущений. В связи с этим произведено исследование и оценка безопасности процессов полуавтоматического управления траекторным движением ВС с учётом участие экипажа в процессе управления даже при использовании режимов автоматического управления. Основной задачей моде-

лирования ситуаций, возникающих при отказах отдельных подсистем или элементов, является определение количественных характеристик безопасности в таких ситуациях. Оценка значений вероятностей путём статистического моделирования требует проведения непомерно большого количества опытов ( $\approx 10^7 - 10^8$ ). Поэтому для сравнительной оценки последствий различных отказов при разных способах обеспечения безопасности целесообразно использовать критерий «степени аварийности» определяемый по способу "maximin":

$s = \max_i [\Delta y_{i \max} / \Delta y_{i \text{дон}}]$ . где  $y_i$  — параметры, определяющие безопасность полёта. По условиям безопасности их отклонения от установившихся значений  $\Delta y_i = y_i - y_i^0$  не должны превышать допустимых  $\Delta y_{i \text{дон}}$ .

В данной задаче внешние воздействия  $\mathcal{V}(t) = (v_1(t), \dots, v_S(t))$  даются как сумма двух составляющих  $\mathcal{V}(t) = \tilde{v}(t) + \bar{v}(t)$ , одна из которых  $\tilde{v}(t)$  представляет собой «обычные» постоянно действующие ограниченные возмущения,  $\tilde{v}(t) \in \tilde{Q}$ . Вторая составляющая,  $\bar{v}(t)$  — это «экстраординарные», т.е. значительно более мощные, но редко встречающиеся воздействия. Для простоты анализа можно принять, что  $\bar{v}(t)$  — один из типовых (стандартных) входных сигналов, принятых в теории систем автоматического управления (например, ступенчатая, импульсная или линейно возрастающая функция времени).

Таким образом, задача моделирования может быть сведена к определению показателя «степени аварийности»  $S$  в различных ситуациях.

Была произведена опытная проверка алгоритмов и программ оценки технического состояния АБСУ-154.

#### **Основные результаты главы 9:**

- Проведенное моделирование показало, что разработанные методы дают возможность определять влияние изменения параметров системы управления как экстремальных возмущений.
- Удаётся найти границы допустимых отклонений основных базовых координат вектора состояния самолёта при заходе на посадку в условиях действия экстремальных возмущений и номинальных параметрах системы траекторного управления АБСУ-154.
- Показано, что гарантированная оценка работоспособности подсистем системы траекторного управления методом имитационного моделирования может проводится при обработке полётной информации в современных системах расшифровки данных, например на основе комплексов программ Гос. НИИ ГА. Условиями обработки является синхронная регистрации входных и выходных сигналов соответствующих подсистем.

**Глава 10. Разработка критериев и методов оценки отклонений в работе АБСУ и НК и их влияния на траекторные параметры ВС.** В главе десять представлены результаты экспериментальной проверки выдвинутых в диссертации теоретических положений. Проведён сравнительный анализ отклонений

траекторных параметров ВС от программных мини-максных на основе результатов регистрации этих параметров с помощью бортовых самописцев ("чёрных ящиков"). Необходимые оценки получены путем полунатурного моделирования процесса посадки ВС с АБСУ-154 и при участии пилота-оператора.

В данной главе произведён анализ бортовых встроенных систем оценки отклонений в работе АБСУ и НК. На основе новых методов и критериев оценки технического состояния подсистем АБСУ по данным бортовых регистраторов и их влияния на траекторные параметры ВС.

Известно, что диагностика осуществляется в статическом и динамическом режимах. Статический режим характерен тем, что управляющее воздействие на диагностируемую систему не изменяются во времени. В статическом режиме чаще всего проверяют отдельные блоки систем. В основном методы технической диагностики систем управления к настоящему времени представлены только методами контроля работоспособности и поиска неисправностей. Однако при контроле работоспособности с помощью моделей сравнивается работа контролируемой системы с работой моделей исправной системы управления. В связи с этим производится оценка средств регистрации полетной информации для целей технической диагностики АБСУ и НК.

Предложено эту задачу решать по методу полунатурного моделирования директорной системы управления самолётом ту-154 в режиме по минимаксному критерию точности захода на посадку. Принцип построения полунатурной динамической модели управляемого движения ВС на КТС-154 — известный.

Рассматривался случай директорной системы управления ВС ТУ-154. При моделировании процессов управления самолётом в режиме посадки имитировалось лишь боковое движение, с помощью уравнений объекта, и уравнения штатной подсистемы, предназначенной для повышения устойчивости и управляемости самолета в режиме штурвального управления.

Экстремальные неопределенные, согласно постановке задачи программные возмущения из класса ограниченных по модулю задавались в виде последовательности прямоугольных импульсов установленной амплитуды в заданные моменты переключения  $t_1, t_2, t_3, t_4$  и с заданной амплитудой сигналов, задаваемых с общего пульта управления компьютерным комплексом.

Для устранения эффекта подстройки пилота под внешние возмущения, возмущающее воздействие типа ветра  $W_z(t)$  формировалось также в функции текущей позиции объекта  $W_z(t, x)$ , т.е. с учетом аргумента  $x \in X$ . Возмущения из класса случайных функций с заданными статистическими характеристиками воспроизводятся с помощью генератора белого шума. Генератор вырабатывал случайные сигналы с Гауссовским распределением по амплитуде и равномерной спектральной плотностью в диапазоне частот от 0 до 35 Гц.

При проведении экспериментов боковое движение самолёта Ту-154 моделировалось в соответствии с уравнениями из главы 3. При этом были приняты принципы построения игровых алгоритмов управления и возмущений из глав 6, 7.



В этом случае задача сводится к построению поверхностей переключений в  $(\kappa + 1)$ -мерном пространстве.

Закон управляющего воздействия  $u_i^*(t, x)$  по существу однозначно зависит от прогнозируемого терминального состояния объекта  $y(\theta, t)$ .

При моделировании поверхности переключения  $\mathcal{G}^{(1)}$  и  $\mathcal{G}^{(2)}$  для экстремальных управляющего и возмущающего воздействий  $\gamma_3^*(t)$  и  $W_2^*(t)$  строились для случая процессов управления самолётом на заключительном этапе захода на посадку по игровым алгоритмам.

Был проведён синтез субоптимального управления  $\gamma_3^*(t)$  при следующем приближенном описании поверхности переключения внутри области  $Y(t)$ : в каждый момент времени  $t \in [0, \theta]$  сечение поверхности  $\mathcal{G}^{(1)}$  задавалось двумя прямыми.

Для поверхности переключения  $\mathcal{G}^{(2)}$  было принято следующее описание:

$$G(t)[y^{(1)} - \kappa(t)y^{(2)}] = 0,$$

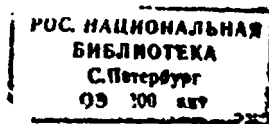
где для  $G(t)$  было принято соотношение:

$$G(t) = \begin{cases} 1 & \text{нпу } 0 \leq t \leq 1c, \\ -1 & \text{нпу } 1c \leq t \leq 9c, \\ 1 & \text{нпу } 9c \leq t \leq 15c \end{cases}.$$

На основе результатов моделирования была подтверждена эффективность построения алгоритмов выбора игрового управления  $\gamma_3^*(t)$  в смысле точности управления самолётом при заходе на посадку. Для исследования влияния квантования сигналов по уровню нелинейностей, связанных с реализацией игровых алгоритмов на малоразрядной бортовой ВМ, было проведено моделирование процессов управления ВС в автоматическом режиме.

Серии проведённых пусков (по 10 пусков в серии) показали, что диапазоны измерения критерия качества для  $W_2 = 0$  и  $W_2 = 10 \text{ м/с}$  составляют: [0,07; 0,17] и [0,17; 0,35] соответственно. Таким образом, оценка качества слабо зависит от нелинейных эффектов, связанных с реализацией игровых алгоритмов управления на малоразрядной бортовой ВМ. Для проверки работы игрового алгоритма управления ВС на всём участке предпосадочного снижения было проведено моделирование процессов управления самолётом на участке от дальнего приводного радиомаяка до точки начала выравнивания ( $\theta = 60 \text{ с}$ ).

Как показывают результаты моделирования, диапазон измерения оценки качества при возмущениях  $W_2 = 0$ ,  $W_2 = 10 \text{ м/с}$  и  $W_2^*$  при пилотировании пи-



лотами 1 и 2 класса составляет:  $0,1 \leq I \leq 0,5$ . Причём в ряде пусков величина / для  $W_{\dot{z}} = 0$  превышает оценку точности  $W_{\dot{y}}^*(t)$ . Это парадоксальное, на первый взгляд, событие объясняется как ошибками пилотирования, так и многочисленными упрощениями, принятыми при формировании  $\gamma_z^*(t)$  и  $W_{\dot{z}}^*(t)$ . Корректирующий манёвр при больших отклонениях ВС от оси ВПП на заключительном этапе захода на посадку, является S-образным манёвром, который обычно выполняется при визуальном полёте. Характеристики системы хорошо согласуются с возможностями пилота, поэтому управление можно осуществлять как в автоматическом, так и в директорном режиме.

Выводы по главе 10. На примере преобразованных уравнений бокового движения самолёта Ту-154 доказана практическая возможность синтеза субоптимального управления ВС на поверхности переключения в пространстве координат вектора состояния объекта, входящих в основной обобщённый функционал качества. Реализация управления на основе субоптимального игрового алгоритма управления траекторным движением самолёта на малоразрядной бортовой ВМ близка по характеру к процессам "скольжения", изучаемым в классе релейных управлений. Нелинейные эффекты, связанные с реализацией игровых алгоритмов управления на бортовой ВМ, незначительно влияют на качество полёта.

Игровые алгоритмы управления, найденные путём минимизации критерия качества полёта в автоматическом режиме, хорошо согласуются с возможностями пилота как звена в контуре управления.

В приложении представлены: акт о внедрении основных результатов диссертационной работы; численные значения масштабных коэффициентов переменных, входящих в уравнения бокового движения самолёта Ту-154 при заходе на посадку, даны оценки вклада переменных системы в общую оценку точности, что позволяет определить структуру субоптимального игрового закона управления ВС, реализуемого с помощью бортовых компьютеров.

#### Заключение

В диссертации получен и обоснован ряд новых результатов, относящихся к разработке метода и алгоритмов оценки гарантированной точности управления ВС в системе "самолёт — АБСУ". Использование векторных линейных дифференциальных уравнений позволило получить оценки точности автоматического управления самолётом в условиях атмосферных возмущений и информационных помех, что позволило оценить особенности влияния минимаксных алгоритмов на ошибки управления при заходе на посадку.

Использование метода решения задачи в рамках теории позиционного наблюдения позволило разработать субоптимальные игровые алгоритмы цифровой обработки траекторией информации в задаче управления ВС на посадке и определить требования к бортовым вычислительным комплексам для их реализации.

Показано, что границы информационных областей для линейных объектов, нейтральных по одной из оцениваемых координат, имеют характерные угловые

точки. При этом существуют достаточные условия сохранения найденных закономерностей на всем интервале наблюдения работы системы. Разработан метод упрощения процедуры минимаксной фильтрации.

На основе методологии экстремального прицеливания разработан метод формирования субоптимального цифрового закона управления траекторным движением ВС при заходе на посадку с обеспечением минимума меры максимальной ошибки. Введённые упрощения обеспечивают возможность реализации управления на существующих бортовых ВМ, что вполне обеспечивает приемлемое качество управления.

Разработанный методологический подход к исследованию процессов цифровой обработки траекторной информации и субоптимального управления боковым движением самолёта на заключительном этапе захода на посадку позволяет получить оценки точности управления.

Экспериментальные исследования процессов управления боковым движением самолёта при заходе на посадку с включением реальных пилотов и бортовой ВМ в контур управления показали, что нелинейные эффекты, связанные с реализацией субоптимальных игровых алгоритмов управления на бортовой ВМ, незначительно влияют на качество полёта.

Показано, что для подсистем с достаточным объёмом регистрируемой в полёте информации могут надёжно выявляться отклонения параметров, влияющих на траекторное движение и не обнаруживаемых системой встроенного контроля и известными методами обработки полётной информации.

Предложенные критерии оценки эффективности системы управления применимы к системам с учётом действия экстремальных возмущений. Разработанные метод, алгоритм и программа проверки выполнения условия стабилизации параметров траекторного движения управляемого объекта обеспечивают качество управления в заданной области пространства фазовых координат. Найденные соотношения для определения ограничений на размеры области стабилизации определяют область тех допустимых значений фазовых координат, выход за которые однозначно определяет отказ АБСУ и НК. Анализ тенденции приближения обобщённых функционалов к границам областей даёт возможность сделать вывод о предотказном состоянии системы и необходимости принятия профилактических мер в системе по парированию возможных отказов.

Границы допустимых отклонений фазовых координат вектора состояния самолёта при заходе на посадку обеспечивают необходимую точность в условиях экстремальных возмущений и номинальных параметрах АБСУ и НК самолёта Ту-154. Значения частотного и общего показателей качества функционирования системы отражают специфику режима захода на посадку при действии экстремальных возмущений.

Предложенный расширенный критерий степени аварийности является обобщённым показателем безопасности полёта и учитывает влияние характеристик членов экипажа, как звена в контуре управления на траекторное управление ВС совместно с системами АБСУ и НК.

### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Смуров М.Ю. Проверка робастности минимаксной системы при экстремальных возмущениях. - Научный Вестник МГТУ ГА, № 78, - Серия "Аэромеханика, прочность, поддержание лётной годности"- МГТУ ГА, М.: 2004:с. 110-117.
2. Смуров М.Ю. Управление самолетом на посадке в условиях неопределенности информации о действующих возмущениях. - Научный Вестник МГТУ ГА, № 72, - Серия "Аэромеханика, прочность, поддержание лётной годности", М.: 2004: с. 21-25.
3. Смуров М.Ю. Принцип управления ВС на посадке по методу прицеливания на торец ВПП. - Научный Вестник МГТУ ГА, № 78, - Серия " Аэромеханика, прочность, поддержание лётной годности ", М.: 2004: с. 43 - 51.
4. Смуров М.Ю. Игровые методы компенсации неопределённости информации о возмущениях, действующих на воздушные суда для обеспечения заданного уровня безопасности полётов. Полетам.: 2004. № 4.
5. Смуров М.Ю. Цифровая реализация игрового алгоритма управления самолётом на посадке при экстремальных возмущениях. (В книге Кейн В.М. Теория минимакса. - Машиностроение, М: 1986 - Глава 7: с. 283 - 321).
6. Смуров М.Ю., Кейн В.М., Парикова А.Н. Об одном способе оптимального управления по методу экстремального прицеливания. Прикладная математика и механика, 1980, № 44 - вып. 3: 7 стр.
7. Смуров М.Ю., Фёдоров СМ., Сухих Н.Н. Об использовании игрового подхода к построению квазиоптимальных систем управления. Тезисы докладов VII Всесоюзного совещания "Теория инвариантности, теория чувствительности и их применения". М.: ДАН СССР, 1987. 1 стр.
8. Смуров М.Ю., Фёдоров СМ., Сухих Н.Н. Исследование процессов полуавтоматического управления самолетом при использовании временной избыточности в бортовых цифровых вычислителях систем траекторного управления. Изв. ВУЗов "Приборостроение", том XXVII, № 8, - 1984: 5 стр.
9. Смуров М.Ю. Об одном методе идентификации и оценки технического состояния системы управления и обработки информации. Тезисы доклада научно-технической конф. ДИМЭБ-97, СПб., 1997: 1 стр.
10. Смуров М.Ю. Управление самолетом на посадке в условиях неопределенности информации о возмущениях. Труды 3-го международного симпозиума "Интеллектуальные системы." - Россия, Псков, 1998:3 стр.
11. Смуров М.Ю. Об одном алгоритме цифровой обработки навигационной информации. - АСУ и ОИ, - Межвузовский тематик, сборник научных трудов СПб., 1999:5 стр.
12. Смуров М.Ю., Кейн В.М. Об одном способе оценки технического состояния подсистемы АБСУ по данным бортовых регистраторов. Тезисы докладов Всесоюзной научно-практической конференции "Методология издания и опыт эксплуатации АСУ в гражданской авиации" РИГА, 1984: 0,5 стр.
13. Смуров М.Ю. Построение алгоритмов управления самолетом на посадке с прогнозированием в условиях силовых и информационных помех. Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Состояние и перспективы работ по автоматизации посадки.: Гос. НИИГА, 1980: 0,5 стр.

ки воздушных судов и повышению регулярности полетов в сложных метеоусловиях". М.: Гос. НИИГЛ, 1980: 0,5 стр.

14. Смуров М.Ю., Кейн В.М., Париков А.Н. О реализации метода экстремально-го прицеливания в задаче управления самолетом на посадке. Изв. вузов "Авиатехника" 1981 - № 2: 3 стр.

15. Смуров М.Ю. Об игровом алгоритме терминального управления самолетом в директорном режиме. "Навигация и УВД", Межвуз. сб. трудов. Л. ОЛАГА, 1979: 2 стр.

16. Смуров М.Ю., Фёдоров С.М., Михайлов О.И. Авторское свидетельство "Устройство для контроля работы курсовой системы в режиме гиropолукомпаса", № 1001760, 1982..

17. Смуров М.Ю., Сухих Н.Н., Рукавишников В.Л. Авторское свидетельство "Устройство для определения высоты полета воздушного судна", № 1083732, 1983.

18. Смуров М.Ю., Кейн В.М. Об одном алгоритме терминального управления. Труды ОЛАГА, вып. 70 - Л., ОЛАГА, 1977:3 стр.

19. Смуров М.Ю. Об одном методе построения области допустимых отклонений. "Автоматизированные системы УВД в гражданской авиации". Межвуз. сб. трудов - Л., ОЛАГА, 1978: 3 стр.

20. Смуров М.Ю. О реализации игровых законов управления на вычислительных устройствах. "Автоматизированные системы УВД в гражданской авиации". Межвуз. сб. трудов - Л., ОЛАГА, 1978:2 стр.

21. Смуров М.Ю. Об одном методе синтеза игрового управления самолетом. "Навигация и УВД", Межвуз. сб. трудов - Л., ОЛАГА, 1979: 3 стр.

22. Смуров М.Ю. Об одном методе повышения уровня безопасности при заходе на посадку в автоматическом режиме. Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по безопасности полетов - Л. ОЛАГА, 1979: 1 стр.

23. Смуров М.Ю. Оценка возможности реализации цифровых законов управления полетом по критерию быстрогодействия. "Бортовые информационно-управляющие системы". Межвузовский тематический сборник научных трудов. СПб. - АГА, 1995: 4 стр.

24. Смуров М.Ю., Фёдоров С.М. и др. "Системы управления и обработки информации". Методические указания к выполнению лабораторных работ, (печ.) - Л. ОЛАГА, 1984: 0,5 пл.

25. Смуров М.Ю. Об одном алгоритме цифровой обработки пилотажно-навигационной информации в условиях неопределенности. Тезисы докл. IV Всесоюзной конф. по безопасности полетов "Безопасность и эффективность эксплуатации воздушного транспорта" - Л., ОЛАГА, 1985: 1 стр.

26. Смуров М.Ю. О моделировании игровых законов управления на аналого-цифровом комплексе. Тезисы докладов V практической конференции по безопасности полетов "Безопасность полетов и профилактика авиационных происшествий" - Л. ОЛАГА, 1988: 1 стр.

27. Смуров М.Ю., Кейн В.М. Управление самолетом на посадке в условиях неопределенности. "Методы и средства навигации и УВД". Межвуз. сб. трудов. - Л. ОЛАГА, 1980: 4 стр.

28. Смуров М.Ю., Фёдоров С.М. Об одном алгоритме терминального управления с учетом чувствительности систем в изменении параметров объекта. Тезисы докладов II Ленинградского симпозиума "Теория чувствительности и ее применения" - Л. ЛЭТИ. 1980: 1 стр.

29. Смуров М.Ю., Кейн В.М. Об одном алгоритме минимаксной фильтрации в задаче управления самолетом на посадке. В кн. "Проблемы оптимизации методов средств навигации а УВД". Межвуз. сб. трудов, ОЛАГА, 1981: 3 стр.
30. Смуров М.Ю. Об алгоритмах оценки технического состояния АБСУ в условиях неопределенности. Тез. докладов III Всесоюзной конференции по безопасности полетов. -Л., ОЛАГА, 1982: 1 стр.
31. Смуров М.Ю., Сухих Н.Н. О выборе периода дискретности цифровой системы самолетовождения. Вопросы повышения эффективности методов и средств навигации и управления воздушным движением. Межвуз. сб. трудов. - Л., ОЛАГА, 1982: 3 стр.
32. Smurov M.J., Lufthansa Consulting, Germany. International project «Te-chnical Assistance and Training for the Russian Airline Sector». Progress Report. Part II. St. Petersburg, Cologne, Germany, CEC, File number TNRUS 9505. 1999: p. 140.
33. Smurov M.J., ADB (Belgium). International project "Personal training of Russian Transport Inspection". St. Petersburg, Brussels CEC. File number TRU- 0257. 1995: p. 21.
34. Smurov M.J., Lufthansa Consulting, Germany. International project "Technical Assistance and Training for the Russian Airline Sector". Technical and Financial Proposals. St. Petersburg, Cologne, Germany, CEC, File number TNRUS 9505.1997: p. 230.
35. Smurov M.J., Amsterdam Airport Schiphol, The Netherlands International project "Support for the Reorganization of Russian Airports". Final Report, Volumes I, II. Brussels CEC. File number TNRUS-9407. 1998.p. 450.
36. Smurov M.J., Lufthansa Consulting, Germany. International project "Te-chnical Assistance and Training for the Russian Airline Sector". Progress Report. Part I. St. Petersburg, Cologne, Germany, CEC, File number TNRUS 9505. 1998: p. 150.
37. Smurov M.J., International A/radio Pic, The UK. International project "ATC State System - Personnel training for International Flight Servicing". St. Petersburg, Brussels CEC File number TRU-0108.1992: p. 20.
38. Smurov M.J., Amsterdam Airport Schiphol, The Netherlands. International project "Managerial personal training for natioal airport sistem of Russia. Part 1: Airport Management coorse". SLPetersburg, Brussels CEC File number TRU-0113. 1992: p. 50.
39. Smurov M.J., Amsterdam Airport Schiphol, The Netherlands. International project "Pulkovo International Airport Master Plan Study. Technical and Financial proposals.. St. Petersburg, Amsterdam 1992: p. 250.
40. Smurov M.J., Lufthansa Consulting GmbH, Germany. International project 'Top Management Training for Airlines and Civil Aviation Organizations. SLPetersburg, Brussels CEC File number TRU-01813.1993: p. 40.
41. Смуров М.Ю., Ивин В.П. Методика оценки гарантированной точности управления в условиях информационных помех. - Л. ОЛАГА. 1980: 41 стр.
42. Смуров М.Ю., Федоров СМ., Сухих Н.Н. Теория и система автоматического управления и обработка информации. Применение вычислительной техники при автоматизации процессов в гражданской авиации. Учебно-методическое пособие. - Л., ОЛАГА, 1985: 3,0 п.л.

---

Подписано в печать 11.03.04 г.

Печать офсетная  
2,09 усл.печ.л.

Формат 60x84/16  
Заказ № 1169/1795

2,25 уч.-изд. л.  
Тираж 100 экз.

---

*Московский государственный технический университет ГА*  
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20  
*Редакционно-издательский отдел*  
125493 Москва, ул. Пулковская, д.6а

© Московский государственный  
технический университет ГА, 2004

