

На правах рукописи

Амбросовский Виктор Михайлович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ
УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ СКОРОСТНЫХ СУДОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им.В.И.Ульянова (Ленина)

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ Лукомский
Юрий Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор
Жуков Ю.И.

доктор технических наук,
профессор
Имаев Д.Х.

доктор технических наук,
профессор
Пелевин А.Е.

Ведущая организация:

Институт проблем транспорта РАН

Защита состоится «___» _____ 2010 г. в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.07 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им.В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376 Санкт-Петербург, ул.проф.Попова, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Автореферат разослан «___» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
Совета по защите докторских и кандидатских
диссертаций Д 212.238.07

Цехановский В.В.

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время развитие судостроения в России в значительной степени связано со строительством и модернизацией малотоннажных судов и кораблей. Основными направлениями стали постройка скоростных пассажирских катеров и яхт, постройка малых кораблей и катеров для военно-морского флота и пограничной службы также имеющих высокие скорости хода. К системам автоматического управления движением (САУД) строящихся скоростных судов предъявляются, в первую очередь, такие требования, как безопасность и комфортность движения.

Сложность современных скоростных судов как объектов управления, появление на них новых средств управления движением, приводят к необходимости создания принципиально новых САУД.

Наиболее значительные результаты в области разработки функциональных и структурных схем САУД скоростных судов получены Лукомским Ю.А., Скороходовым Д.А., Диомидовым В.Б., Корчановым В.М., Небыловым А.В. и др. Однако в настоящее время не существует функциональной структуры САУД современных типов скоростных судов отвечающей требованиям безопасности и комфортности управляемого движения. Разработка такой структуры представляется актуальной.

Важным этапом разработки САУД и алгоритмов управления является разработка математических моделей движения судов для целей синтеза и анализа систем управления. Наиболее значительные результаты по разработке и исследованию математических моделей скоростных судов (судов на воздушной подушке, подводных крыльях и глиссирующих судов) представлены в работах Бенуа Ю.Ю., Дьяченко В.К., Смирнова С.А., Зильмана Г.И., Зайцева О.А., Воронина В.А., Плисова Н.Б., Рождественского К.В., Трешкова В.К., Егорова И.Т., Соколова В.Т., Афремова А.Ш., Лукашевича А.Б., Абрамовского В.А., Лукомского Ю.А., Скороходова Д.А., Чернышевой Т.С., в работах зарубежных авторов: T.I.Fosssen, A.D.Sorensen, D.Clarke, V.Ankudinov.

Математические модели движения скоростных судов, используемые в настоящее время, предназначены, как правило, для задач оценки управляемости, мореходности, ходкости, а также для синтеза и анализа законов стабилизации курса в условиях постоянной скорости хода и не учитывают возможность изменения характеристик судна в аварийных ситуациях. Такие математические модели не могут быть непосредственно использованы при анализе и синтезе систем управления, обеспечивающих безопасность движения судна, так как не учитывают ряд особенностей гидродинамических характеристик (ГДХ) скоростных судов, приводящих к аварийным ситуациям, таких как разрыв гибкого ограждения СВП, отказ нагнетателя и др.

Разработка новых САУД скоростных судов, обеспечивающих управления такими судами в сложных режимах движения, потребовала выполнить разработку математических моделей скоростных судов таким образом, чтобы позволить исследовать сложные режимы движения, включая аварийные режимы.

При построении современной САУД скоростного судна, при которой обеспечивается безопасность движения, одним из главных вопросов является задача обеспечения отказоустойчивости САУД. Применение схем, основанных на аппаратном резервировании или аналитической избыточности, не позволяют обеспечить приемлемое решение указанной задачи для САУД скоростных судов, вследствие существенных технико-экономических ограничений современных САУД и особенностей изменения измеряемых переменных состояния вследствие воздействия на судно морского волнения. Указанные недостатки существующих методов потребовали разработки нового подхода к решению указанной задачи. Наиболее существенные результаты в области обнаружения отказов получены Диомидовым В.Б., Элькиндром Л.Б., Казариновым Ю.М., Шубинским И.Б., Мозгалевским А.В., в работах зарубежных авторов: Edward Wilson, T.Tang, Tristan Perez, T.Moan, и др.

Одним из аспектов безопасности управляемого движения является комфортность движения как средство обеспечения безопасности здоровья и жизни пассажиров и экипажа. Основные результаты, полученные в этом направлении, приведены в работах Лукомского Ю.А., Мирошикова А.Н., в работах зарубежных авторов: M.J.Grimble, M.Blank, G.N.Roberts и др. Основными недостатками существующих регуляторов демпфирования качки является зависимость параметров таких регуляторов от скорости движения судна, угла встречи с волной и балльности морского волнения. Ошибки в определении этих данных могут приводить к тому, что возмущение, действующее на объект, будет не только не подавляться, но и наоборот – его действие на объект будет усиливаться. Указанные недостатки существующих методов синтеза регуляторов демпфирования качки, потребовали разработки принципиально нового подхода, обеспечивающего слабую зависимость параметров регулятора от параметров действующего возмущения в широком частотном диапазоне, и, главное, обеспечивающего гарантированное подавление волнового возмущения во всем диапазоне существенных частот возмущения.

Важной проблемой при построении современной САУД скоростного судна является требование обеспечения предотвращения аварий движения и аварийных ситуаций движения скоростных судов. Одной из особенностей задачи синтеза противоаварийного регулятора (автомата безопасности) является то, что управляемый объект является нелинейным, и, как следствие, задача синтеза такого регулятора, это принципиально нелинейная задача. Другой особенностью синтеза автомата безопасности является наличие нескольких точек установившегося движения судна и наличие нелинейных ограничений в виде областей безопасного движения. Существующие методы синтеза регуляторов, обеспечивающих предотвращение аварий движения, имеют ряд существенных недостатков, связанных с необходимостью использования нелинейных моделей, достаточно точно описывающих движение судна в широком диапазоне изменения переменных состояния.

Для решения проблемы обеспечения безаварийного движения скоростных судов необходимы новые методы определения областей

безопасного движения скоростных судов и методы синтеза, регуляторов, обеспечивающих удержание скоростных судов в областях безопасного движения. Основные результаты в области синтеза регуляторов, обеспечивающих безаварийное движение скоростных судов, получены Лукомским Ю.А., Скороходовым Д.А., Хабаровым С.П., Эткиным В.В., Стариченковым А.Л., в работах зарубежных авторов: Tristan Perez, T.Fossen и др.

Тема диссертации связана с научно-исследовательскими работами, выполненными в Санкт-Петербургском ГЭТУ «ЛЭТИ» в период с 1995 г. по 2001г. по научным направлениям «Разработка теории и систем кибернетики, управления и автоматизации» и «Автоматизация, робототехника и управление» и в рамках ОКР, выполненных в ЗАО «Навис» в период 2004-2007г. по темам «Система автоматизированного проектирования алгоритмов управления движением скоростного пассажирского катамарана», «Интегрированная система управления грузового судна на воздушной подушке», «Система управления интерцепторами скоростного катера пр.А-125», «Система управления интерцепторами скоростного пассажирского теплохода пр.А-45» и в рамках ОКР «Штурвал-ТМ», проводимой в ЗАО «Транзас» в 2009-2010 гг. по федеральной программе гражданского судостроения.

Цель работы – решение ПРОБЛЕМЫ теоретического и прикладного обоснования и исследования систем автоматического предотвращения аварий управляемого движения скоростных судов.

Объект исследования

Нелинейные динамические системы с переключениями, нелинейные системы измерения с отказами, суда с динамическими принципами поддержания, навигационные измерительные комплексы.

Предмет исследования

Методы синтеза алгоритмов управления нелинейными динамическими системами, методы обработки результатов измерения и методы исследования сложных нелинейных объектов управления.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие основные **научные задачи**:

- предложить и обосновать структуры САУД скоростных судов, учитывающих особенности аппаратных средств, средств управления движением, датчиков информации и особенности современных САУД;

- разработать математические модели, действующего на судно морского волнения, при непрерывном изменении курса, и различного уровня иерархии математические модели скоростных судов, отличительной особенностью которых являются возможность учета динамики движения этих судов в сложных режимах движения, включая аварийные режимы, позволяющие проводить разработку и исследование алгоритмов управления движением скоростных судов во всех режимах движения;

- разработать методы синтеза, регуляторов, обеспечивающих удержание скоростных судов в областях безопасного движения, а также разработать новые методы определения областей безопасного движения скоростных судов;

- разработать метод обеспечения отказоустойчивости САУД, обеспечивающий обнаружение и локализацию отказов датчиков информации и средств управления движением, а также восстановление параметров движения судна на время необходимое для снижения скорости хода и перевода судна в водоизмещающий режим;

- разработать метод синтеза регуляторов демпфирования качки, обеспечивающий слабую зависимость параметров регулятора от параметров возмущающего воздействия и удобную перестройку регулятора при изменении направления или интенсивности морского волнения.

Методы исследования. Методологическую основу работы составили следующие фундаментальные методы: методы теории судна, методы теории качки, устойчивости и управляемости судна; методы идентификации параметров динамических систем; методы математического моделирования динамических систем и случайных процессов, методы корреляционного и спектрального анализа случайных процессов, методы численного анализа, методы теории вероятностей и математической статистики; методы теории H^∞ -оптимизации и методы классической теории оптимального управления, в частности, принцип максимума Понтрягина, методы теории оптимальных линейных стохастических систем управления, методы теории фильтрации; методы теории обыкновенных дифференциальных уравнений; методы теории устойчивости Ляпунова, методы теории надежности и методы компьютерного моделирования.

Научные положения, выносимые на защиту.

- 1) Концепция формирования структур систем управления движением и измерительных навигационных комплексов скоростных судов.
- 2) Комплекс математических моделей движения скоростных судов и математические модели, действующего на судно морского волнения.
- 3) Метод обеспечения безопасности движения скоростных судов.
- 4) Метод обеспечения отказоустойчивости систем автоматического управления движением скоростных судов.
- 5) Метод синтеза регуляторов демпфирования качки скоростных судов.

Научная новизна. Научная новизна диссертации заключается в совокупности теоретических положений и прикладных решений, развивающих важное направление в области теории и проектирования автоматических систем обеспечения безопасного управляемого движения скоростных судов:

1) Новая концепция формирования структур систем управления движением и систем измерения параметров движения скоростных судов, отличающаяся тем, что позволяет учитывать все необходимые особенности аппаратных средств и датчиков информации, особенности современных законов управления и позволяет формировать структуры систем автоматического управления для решения задач безопасного управления движением скоростных судов.

2) Математические модели морского волнения и комплекс различного уровня иерархии математических моделей скоростных судов отличительной особенностью которых является возможность учета динамики движения

этих судов в сложных режимах движения, включая аварийные режимы, возможность моделирования сил и моментов морского волнения при непрерывном изменении курса, позволяющие проводить исследование алгоритмов управления движением скоростных судов во всех режимах движения этих судов.

3) Метод обеспечения отказоустойчивости САУД скоростных судов, отличающийся использованием аппаратно-аналитической избыточности, основанный на использовании фильтров Калмана, и позволяющий обеспечить обнаружение и локализацию отказов датчиков информации и средств управления движением.

4) Метод синтеза регуляторов демпфирования качки скоростных судов, основанный на H^∞ -теории оптимизации и отличающийся использованием частотно-зависимых множителей в критерии качества, учитывающим при синтезе частотные свойства приводов органов управления и частотные свойства возмущения и позволяющий существенно сократить подстройку регуляторов при изменении скорости хода судна или изменении морского волнения.

5) Метод обеспечения безопасности движения скоростных судов, основанный на удержании судна в области безопасного движения судна, отличающийся определением областей безопасного движения судна использующих оценку функций Ляпунова и позволяющий разрабатывать алгоритмы предотвращения аварий движения во всех режимах управляемого движения скоростных судов.

6) Метод проведения, обработки и анализа результатов натурных и модельных испытаний судов.

Достоверность научных результатов подтверждается: корректностью математических выкладок, обоснованностью используемых ограничений, корректностью интерпретации результатов в области разработки и исследования САУД судов, результатами моделирования и проверки методов, алгоритмов в процессе натурных испытаний судов и САУД и удовлетворительным совпадением результатов моделирования с результатами натурных испытаний.

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертационной работе, аргументировано обоснованы, а их достоверность подтверждена экспериментальными исследованиями, компьютерным моделированием, корректным использованием положений теории судна, теории дифференциальных уравнений, теории вероятностей и случайных процессов, теории H^∞ -оптимального управления и теории устойчивости Ляпунова.

Полученные автором результаты прошли положительную апробацию в научных публикациях и в докладах на всероссийских, международных и зарубежных конференциях. Результаты диссертации используются при разработке судовых тренажёров, систем автоматического управления движением скоростных судов и навигационных комплексов.

Значимость научных положений и выводов состоит в :

- обеспечении процессов формализации разработки новых структур систем автоматического управления движением скоростных судов и структур судовых навигационных комплексов;
- методе обеспечения устойчивости сложных нелинейных динамических систем с переключением в правых частях и оценке областей безопасности этих динамических систем;
- методе определения отказов измерений и восстановлении измеряемых переменных состояния на основе аппаратно-аналитической избыточности с использованием методов различения многих гипотез;
- методе синтеза регуляторов с использованием минимаксного критерия качества для линейных динамических систем подверженных действию стохастического возмущения.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что разработанные методы послужили основой (научной базой) для методик, алгоритмов и программного обеспечения проектирования широкого класса САУД скоростных судов:

- 1) Комплекс структур систем управления движением и систем измерения параметров движения скоростных судов.
- 2) Алгоритмы и пакет программ для синтеза регулятора демпфирования качки скоростного судна.
- 3) Методика формирования весовых фильтров, позволяющих проводить перестройку регулятора демпфирования качки при изменении направления и интенсивности волнения.
- 4) Требования к методике проведения бассейновых испытаний судов на воздушной подушке, позволяющей получить полную нелинейную модель трехмерного движения такого судна с учетом отказов средств управления и аварий движения.
- 5) Методика и программное обеспечение параметрической идентификации математических моделей скоростных судов, включающая специализированные маневры судна для идентификации параметров математических моделей.
- 6) Алгоритмическое и программное обеспечение для обнаружения и локализации отказов датчиков информации и средств управления движением в САУД скоростных судов.
- 7) Метод синтеза регуляторов предотвращения аварий и расчета областей безопасного движения скоростных судов.

Достоверность и значимость практических результатов подтверждается их использованием в конструкторских бюро и предприятиях судостроительной промышленности.

Разработанные математические модели ветро-волнового возмущения и математические модели движения глиссеров и полуглиссеров апробированы в навигационно-управляющих тренажерах фирмы ЗАО «Транзас» (С.-Пб) и в САПР САУД глиссирующего катамарана (построен в 2002 г., КБ-проектант – научное учреждение «Марин Технолоджи Девелопмент»).

Разработанные математические модели ветро-волнового возмущения, функциональные структуры САУД и систем измерения, алгоритмы обнаружения отказов датчиков параметров движения и средств управления движением, алгоритмы предотвращения аварий движения были использованы в техническом проекте автомобильно-пассажирского парома на воздушной подушке скегового типа пр.19800 (ЦМКБ «Алмаз»), в системах управления интерцепторами ЗАО «Навис», установленных на скоростном глиссирующем катере пр.А-125 (построен в 2004 г., КБ-проектант Дизайн-бюро «Агат») и на скоростном глиссирующем пассажирском судне пр.А-45 (построено в 2006 г., КБ-проектант Дизайн-бюро «Агат»).

Разработанные математические модели движения СВПА и функциональные структуры САУД были использованы в разработанном САПР конструктора СВПА, разработки ЗАО «Навис» (С.-Пб).

Алгоритмы обнаружения отказов датчиков и функциональные структуры систем измерения параметров движения были использованы в системе контроля и записи полетной информации экраноплана (совместная разработка ЗАО «Навис» и С.-ПбГУАП (ЛИАП), в измерительном программно-аппаратном комплексе «Кипарис» ЗАО «Навис», предназначенном для регистрации данных натурных испытаний судов и всеширотном навигационном комплексе, разрабатываемом по теме «Штурвал-ТМ» в 2009-2010 гг. в рамках федеральной программы гражданского судостроения.

С помощью методики и пакета программ для синтеза регулятора демпфирования качки для экспериментального СПВС «Стрепет» (ЦМКБ «Алмаз») был разработан регулятор демпфирования бортовой, килевой и вертикальной качки, который прошел успешные испытания в 1991/92 гг.

Часть научных результатов вошла в курсы лекций, методические и учебные пособия по дисциплинам: «Управление морскими подвижными объектами», «Системы управления техническими средствами корабля», «Корабельные системы информации и управления» читаемым на кафедре Корабельных систем управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» используемых при подготовке магистров по направлению 220200, по профилю 3 «Корабельные системы информации и управления» и специалистов по специальности 210600 «Корабельные системы управления».

Личный вклад. В диссертации подробно излагаются только те результаты, вклад автора в которые был существенным на всех этапах, включая постановку задачи, непосредственное проведение эксперимента, анализ полученных данных и разработку теоретических положений. Во всех других случаях, используемые результаты приводятся с соответствующими ссылками на их авторство и приоритетные публикации.

Апробация работы. Основное содержание работы опубликовано в статьях, докладывалось на следующих семинарах, конференциях и совещаниях: ВС по техническим средствам и методам изучения океанов и морей. Геленджик, 1985; Совет по управлению движением судов и кораблей, ИПУ РАН (Севастополь, 1989, Рыбинск, 1998); XXIV Всесоюзная конференция по

управлению судов и спецаппаратов (Адлер, 1997); НТК "Проблемы мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики" (XXXVIII Крыловские чтения, Санкт-Петербург, 1997) а также на международных конференциях: 3rd International Conference Manoeuvring and Control of Marine Craft MCMC'94 (Southampton, UK, 1994); 3rd IFAC Workshop on Control Applications in Marine Systems CAMS'95 (Trondheim, Norway, 1995); International Symposium on Maneovrability of Ships at Slow Speed MANEOVRABILITY'95 (Ilawa, Poland, 1995); Eleventh Ship Control Systems Symposium (Southampton, UK, 1997); IFAC Workshop on Control Applications in Marine Systems CAMS'98 (Japan, 1998); III International Conference on Ground-Effect Machines, The Royal Society of Marine Engineers Russia Branch (S.-Pb., Russia, 2000); International Conference on Fast Sea Transportation FAST'2005 (S.-Pb, Russia, 2005).

Публикации. Основные материалы по теме диссертации опубликованы в 32 статьях и докладах, среди которых 11 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, одной монографии и одном учебном пособии, защищены тремя авторскими свидетельствами. Доклады доложены и получили одобрение на 12 всероссийских, международных и зарубежных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 116 наименований и 6 приложений. Основная часть диссертации изложена на 318 страницах машинописного текста и содержит 113 рисунков и 8 таблиц.

2 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определены цели и основные задачи исследования, сформулированы цели и основные задачи исследования сформулированы основные положения, выносимые на защиту, кратко изложены основные результаты и показана их практическая ценность.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ рассматриваются основные задачи управления движением глиссирующих судов, судов на подводных крыльях и воздушной подушке, исследуются основные особенности движения этих судов как управляемых объектов, исследуются функциональные структуры различных систем автоматического управления движением этими судами, разрабатываются и обосновываются функциональные и структурные схемы автоматических систем предотвращения аварий движения этих судов.

Выполнен детальный анализ особенностей глиссирующих судов (ГС), судов на подводных крыльях (СПК) и судов воздушной подушке (СВП) определяющие функциональные и структурные схемы САУД. В частности, проанализированы основные особенности СВП к которым, в первую очередь, относятся:

- существенная зависимость ГДХ от угла дрейфа, скорости хода и ходового дифферента (центровки СВП), состояния ГО;

- сильное влияние угла крена и дифферента на движение судна и, в частности, к возможности возникновения подлома СВП;

- необходимость ограничения углы дифферента, крена, дрейфа, перекладки рулей направления с целью предотвращения возникновения недопустимых углов дрейфа;

В качестве основных особенностей СПК, влияющими на динамику движения СПК и функциональную структуру САУД СПК, были рассмотрены:

- существенная зависимость подъемной силы, возникающей на подводном крыле от глубины погружения крыла;

- неустойчивость движения (в вертикальной плоскости) СПК с глубокопогруженными крыльями и как следствие необходимость автоматического управления подъемной силой крыльев для обеспечения устойчивости движения СПК;

- коррелированность возмущений, действующих на носовое и кормовое крыльевые устройства, которая зависит от скорости хода, геометрических размеров СПК и интенсивности (балльности) волнения;

Основными рассмотренными особенностями ГС как управляемого объекта были:

- неустойчивость движения (в вертикальной плоскости) при больших скоростях хода и, как следствие, необходимость автоматического управления дифферентом для обеспечения устойчивости движения СПК;

- большая доля ударных взаимодействий с волной в общей силе волнового воздействия на ГС и, как следствие, необходимость умерения вертикальных перегрузок;

- существенной нелинейной зависимостью подъемной силы и дифференцирующего момента на кормовой оконечности ГС от скорости хода, длины смоченной поверхности и выдвигателя интерцепторов.

В первой главе проведен анализ существующих САУД скоростных судов. Предложена обобщенная функциональная и структурная схема САУД скоростных судов.

На основе анализа особенностей динамики движения скоростных судов и анализа требований, предъявляемых с САУД этих судов, предложены функциональные структуры систем обеспечения безопасности и предотвращения аварий движения СВП, СПК и ГС.

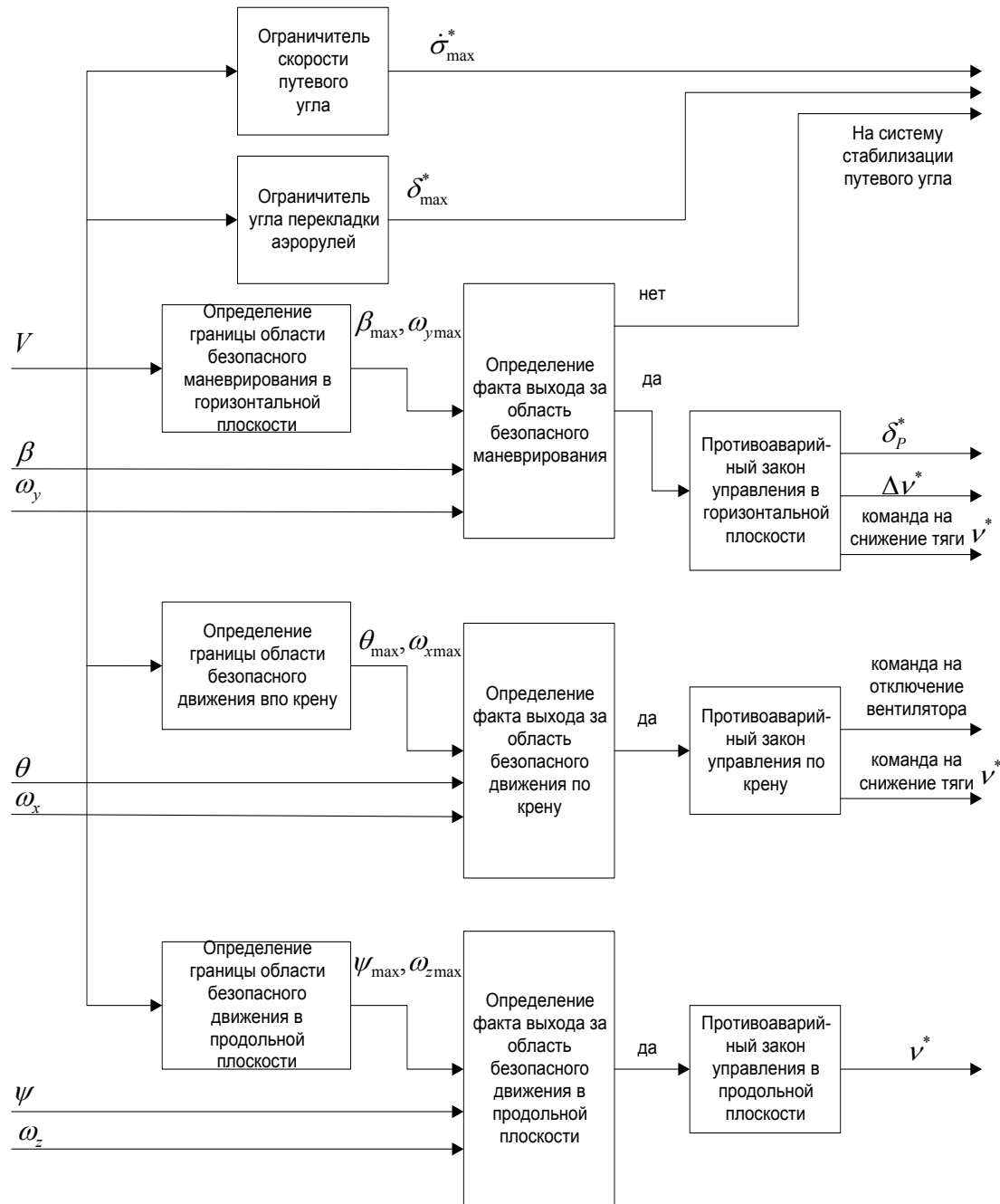


Рис.1. Функциональная схема СПАВ(АБ) амфибийного СВП

На рис.1 представлена функциональная схема четырехканального автомата безопасности амфибийного СВП.

В первой главе также проанализированы структурные схемы систем измерения параметров движения скоростных судов, обеспечивающие работу САУД этих судов.

Проведенный анализ позволил предложить ряд структурных схем, отличающихся по составу исходных датчиков информации. Одна из предложенных структурных схем интегрированной системы измерения параметров движения с использованием радиовысотомеров приведена на рис.2.

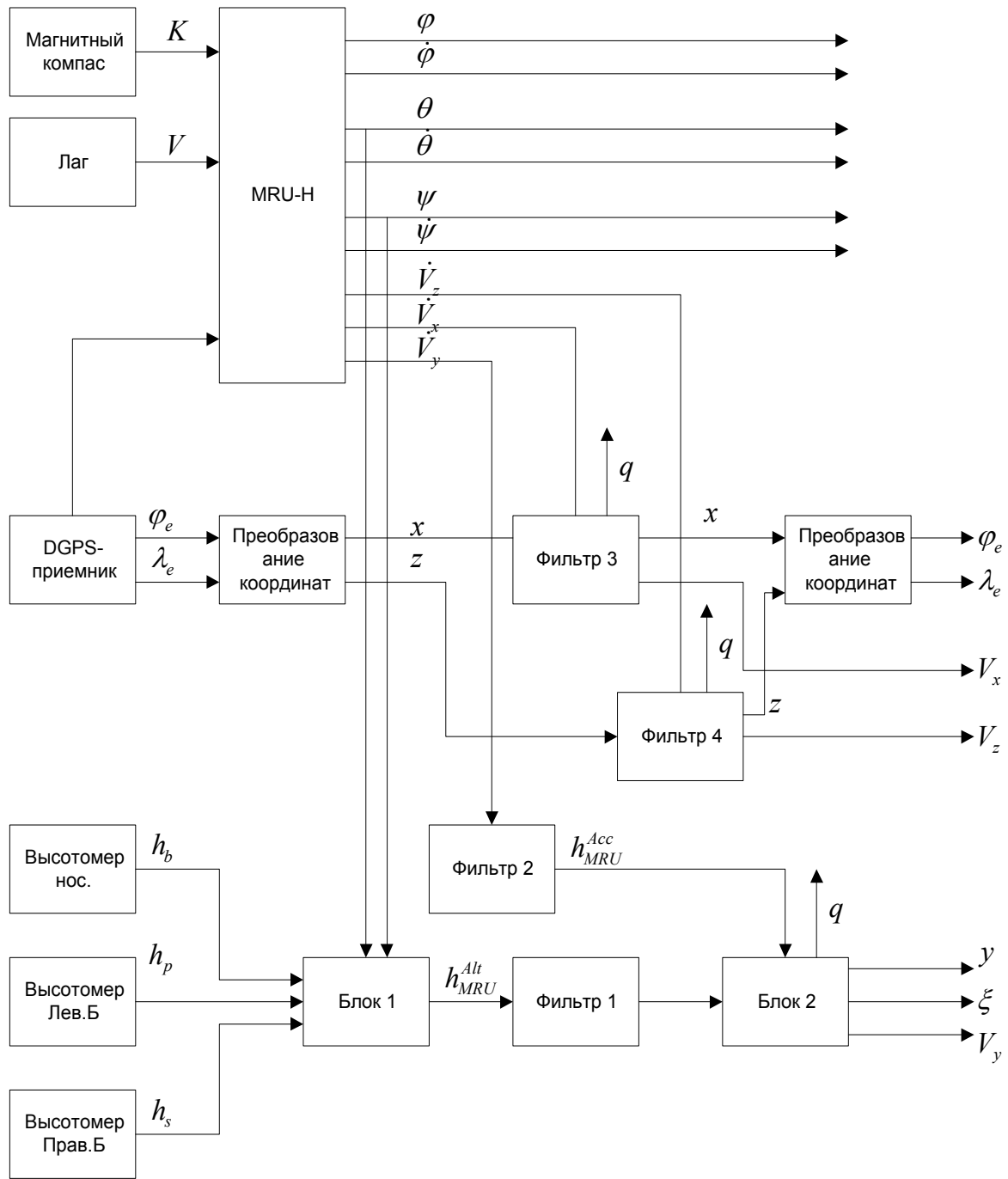


Рис.2. - Структурная схема интегрированной системы измерения параметров движения экраноплана

Во **ВТОРОЙ ГЛАВЕ** анализируются математические модели движения скоростных судов. На основе анализа предложена структура модели амфибийного СВПА (СВПА), позволяющая моделировать пространственное движение судна с учетом отказов и аварий движения. Показано, что для СВПА можно пренебречь взаимным влиянием бокового и продольного движения. Предложены модели типовых отказов и аварий движения СВПА. Ниже приведён пример, кренящего момента СВПА с учётом разрыва гибкого ограждения:

$$m_x(\beta, \theta) = m_{x0}(\beta, \theta) + K(S, x_0, y_0) \Delta m_x(\beta, \theta),$$

где S – площадь разрыва ГО, (x_0, y_0) – координаты разрыва, K – коэффициент влияния, Δm_x – добавка оцениваемая по результатам модельных испытаний.

На рис.3 показан пример учета разрыва гибкого ограждения (ГО) на изменение ГДХ кренящего момента СВПА.

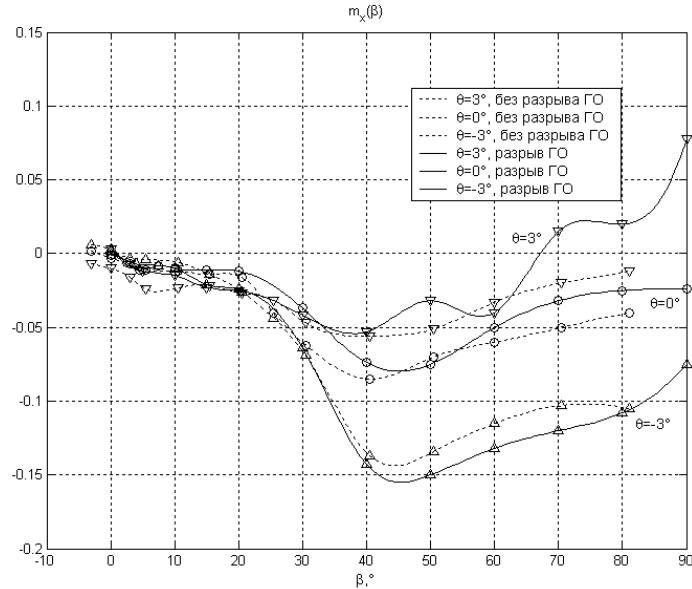


Рис.3. Изменение кренящего момента СВПА при разрыве ГО

Предложенная модель движения СВПА является нелинейной по углу дрейфа и угловой скорости рыскания и основана на использовании гидродинамических характеристик в широком диапазоне изменения угла дрейфа и угловой скорости рыскания, что позволяет находить и анализировать дополнительные устойчивые режимы движения, соответствующие большим углам дрейфа. Кроме того, она учитывает изменение гидродинамических характеристик корпуса при обрыве или подломе ГО и позволяет исследовать изменение характеристик устойчивости и управляемости при отказе нагнетательных аппаратов и отказах винтов изменяемого шага (ВИШ).

Во второй главе также предложен план модельных испытаний (испытания в аэродинамической трубе, в прямом бассейне, в циркуляционном бассейне и другие испытания) для определения характеристик скоростных судов.

Для задач синтеза систем стабилизации предложено использовать упрощенные математические модели, параметры которых определяются с помощью параметрической идентификации. Предложена методика параметрической идентификации математических моделей скоростных судов, включающая специализированные маневры судна для идентификации параметров математических моделей, основана на использовании обобщенного метода наименьших квадратов и использовании математических моделей приведенных ниже:

- модель в дискретном времени в случае отсутствия ветро-волновых возмущений (ARX-структура):

$$a(q)y(t) = b(q)u(t - nk) + e(t),$$

- модель в дискретном времени при наличии возмущений (ARMAX – структура):

$$a(q)y(t) = b(q)u(t - nk) + c(q)e(t).$$

В работе в качестве «тестового» сигнала предложено использовать «телеграфную волну». Предложена методика определения параметров «телеграфной волны» (амплитуды и минимального периода постоянства знака) для проведения натурных испытаний скоростных судов.

Результат сравнения математической модели, полученной методом идентификации, с данными натурных испытаний приведен на рис.4.

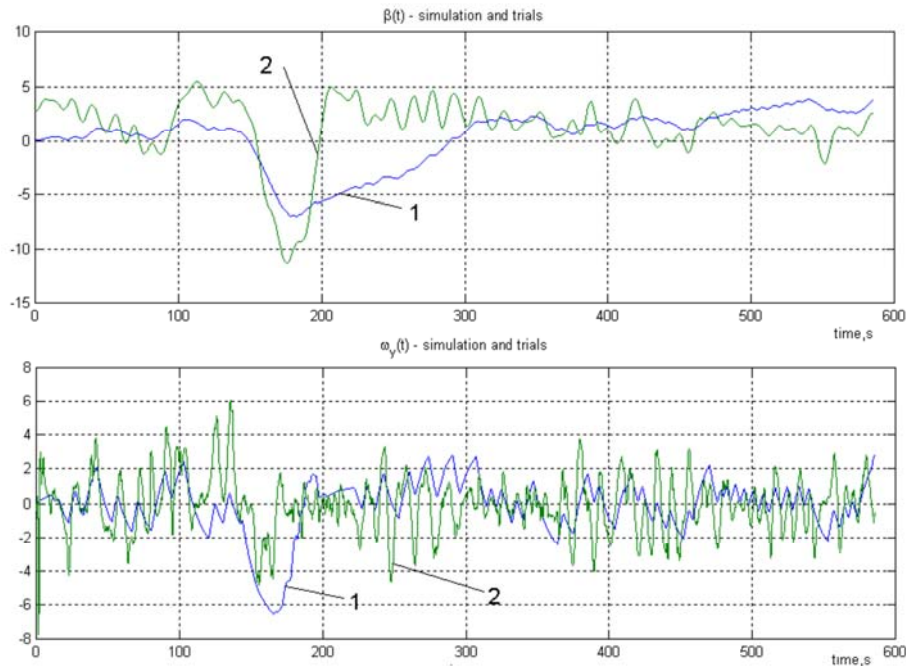


Рис.4. Результат идентификации и натурные испытания: 1 – процессы полученные с использованием идентифицированной математической модели; 2 – данные натурных испытаний

Для анализа САУД СВП и САУД бокового движения ГС при действии морского волнения в работе предложена новая стохастическая модель волнового воздействия, позволяющая моделировать силы и моменты от морского волнения действующие на судно при непрерывном изменении курса судна, например, при движении судна на циркуляции.

Предложенная математическая модель основана на анализе спектральных характеристик морского волнения, а также редуцированных коэффициентов, учитывающих влияние волны определенной длины и угла встречи на судно, при изменении курса судна. При определении параметров математической модели морского волнения вычисляются спектральные характеристики волнового воздействия (например, силы или момента). Спектр воздействия зависит от интенсивности волнения, угла встречи с волной, скорости хода судна и вычисляется с использованием спектра морского волнения. Например, спектр боковой силы, действующей на судно при волнении, имеет вид:

$$S_f(\omega) = (mg)^2 \kappa_y^2(\omega) S_\gamma(\omega) \sin^2 \xi,$$

где $S_\gamma(\omega)$ - спектр угла волнового склона (зависит от интенсивности волнения); $\kappa_y(\omega)$ - редуцированный коэффициент боковой силы (зависит от соотношений размеров судна и параметров волнения); ξ - угол встречи с волной.

Для различных значений интенсивности волнения и углов встречи с волной вычисляются (для нулевой скорости хода) спектральные плотности всех волновых воздействий, а затем полученные спектры аппроксимируются следующим образом:

$$S_{f_i}(\omega) \cong S'_{f_i}(\omega) = |W_{f_i}(j\omega)|^2,$$

где $W_{f_i}(s)$ - передаточная функция формирующего фильтра, причем так, чтобы частота максимума спектра и площадь под спектром (дисперсия) при аппроксимации сохранялись.

Таким образом, определяется таблица коэффициентов устойчивой реализуемой передаточной функции $W_{f_i}(j\omega)$ в зависимости от угла встречи с волной и интенсивности волнения (для нулевой скорости хода). Предложен алгоритм пересчета коэффициентов для ненулевой скорости хода, при котором дисперсия сохраняется, а частота максимума изменяется в соответствии со следующими соотношениями:

$$\omega_{\max} = \sigma_{\max} \left| 1 + \frac{v}{g} \sigma_{\max} \cos \xi \right|.$$

Далее воздействие f_i представляется как гауссовский «белый» шум ζ , пропущенный через формирующий фильтр $W_{f_i}(j\omega)$:
 $f_i(s) = W_{f_i}(s, h_{3\%}, \xi, V) \zeta(s)$.

Для корректного моделирования на компьютере предложено использовать преобразование полученной модели в дискретный вид:

$$f_i(z) = W^{(d)}_{f_i}(z, h_{3\%}, \xi, V) \eta(z),$$

где $\eta(z)$ - дискретный белый шум; коэффициенты $W^{(d)}_{f_i}(z, h_{3\%}, \xi, V)$ вычисляются при помощи интерполяции по заранее вычисленной таблице коэффициентов (для нулевой скорости хода) и пересчитываются на текущую скорость хода в соответствии с предложенным алгоритмом.

Предложенная модель предназначена для анализа законов управления по линейной модели и позволяет определить спектры кинематических параметров движения судна на волнении с регулятором и без при всех режимах движения скоростного судна. Однако предложенная стохастическая модель действующего на судно морского волнения не учитывает взаимную корреляцию f_i , поэтому применима в случаях, когда этой корреляцией можно пренебречь. При необходимости моделирования пространственного движения судна на волнении в случае существования нескольких точек приложения возмущающих сил в пространстве (например, при анализе движения СПК) обычно используется полигармоническая модель морского волнения. В этом случае волновое воздействие моделируется как полигармонический

квазислучайный процесс, параметры которого зависят от интенсивности волнения, скорости хода судна и угла встречи с волной, в некоторых режимах движения могут возникать параметрические колебания. Это связано с тем, что скорость хода судна и угол встречи с волной также являются случайными процессами (угол встречи с волной – вследствие изменения курса судна). В задачах, когда курс и скорость хода считаются постоянными, такой проблемы не возникает. Эти эффекты не отражают действительность и должны быть устранены.

В качестве способа устранения нежелательных параметрических колебаний предложено учитывать при моделировании волнения зависимость параметров волнового воздействия не от скорости хода и угла встречи с волной, а от их усредненных (пропущенных через фильтр низкой частоты) значений, причем свойства используемых фильтров должны быть таковы, чтобы учитывать маневрирование судна (медленное движение), но не учитывать частоты самого волнения.

Кроме того, рассмотрены методы проведения маневренных, мореходных испытаний скоростных судов, определены методы обработки этих измерений и рассмотрено методы идентификации параметров математических моделей движения скоростных судов.

Для обработки данных предложен алгоритм фильтрации в частотной области.

Пусть мы имеем измеренный сигнал $x(t)$, $t \in [0, t_{\max}]$ с постоянной дискретностью Δ .

Будем полагать, что сигнал имеет период t_{\max} . В этих предположениях, вычисляем дискретное преобразование Фурье $X(f)$ ($f \in [-1/2\Delta, 1/2\Delta]$) используя алгоритм БПФ. ($X(f)$ - функция с комплексными значениями).

1) Выбираем оконную функцию в частотной области $W(f)$ Оконная функция должна удовлетворять следующим требованиям:

- $W(f)$ должна быть нулевой при $|f| > F_{\max}$, где мы предполагаем, что диапазон существенных частот сигнала меньше, чем F_{\max} и все измерения с частотами выше $|f| > F_{\max}$ - это шумы.

- Кроме того, $W(f)$ должна быть достаточно гладкой (например, не следует выбирать прямоугольное окно). Это условие позволяет обеспечить отсутствие паразитных колебаний после возврата во временную область.

2) Вычисляем $Y(f) = X(f)W(f)$.

3) Вычисляем обратное преобразование Фурье и получаем $y(t) = \text{filtered } x(t)$.

Одна из основных проблем на этом пути в том, что $x(t)$ на самом деле не периодический процесс, а может быть частью переходного процесса (например, скорость судна) и после фильтрации $y(t)$ будет периодическим и в точках $t = 0$ и $t = t_{\max}$ будут равны:

$$y(0) = y(t_{\max}) = (x(0) + x(t_{\max}))/2.$$

Для устранения этого недостатка была предложен следующий подход.

Сигнал $x(t)$ симметризируют перед фильтрацией так, что он становится определенным на интервале $[-t_{\max}, t_{\max}]$.

Для $\tilde{x}(t)$ мы используем описанную выше процедуру частотной фильтрации. В результате мы получим фильтрованный сигнал $\tilde{y}(t)$ на интервале $[-t_{\max}, t_{\max}]$:

$$y(t) = \tilde{y}(t), \quad t \in [0, t_{\max}].$$

Рассмотренный алгоритм позволяет также определять производные обрабатываемых сигналов, что свою очередь позволяет восстанавливать, действующие на судно силы и моменты, частности от активных средств управления движением.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ рассмотрены методы синтеза регуляторов демпфирования качки скоростных судов. Для широкого класса скоростных судов, спектральные характеристики возмущающего воздействия (морского волнения) и, в частности частотная полоса, содержащая основную часть энергии возмущения, могут меняться в широких пределах в зависимости от скорости и направления движения судна. Другой особенностью рассматриваемой задачи является наличие нескольких точек приложения возмущающих сил, которые могут быть связаны (коррелированы) или независимы. В этих условиях демпфирование качки судна предполагает компенсацию возмущения с неопределенными характеристиками.

Для придания объекту демпфирующих свойств, позволяющих уменьшить влияние волнения на движение судна и тем самым уменьшить качку судна, предложен регулятор, обеспечивающий в требуемой полосе частот "провал" АЧХ замкнутой системы от возмущения к стабилизируемому выходу. Предложенный регулятор перестраивается в процессе движения судна для компенсации изменения полосы частот действующего возмущения. Для этого регулятор параметризован минимальным числом коэффициентов, которые однозначно определяются полосой частот, где следует обеспечить демпфирующие свойства замкнутой системы.

Синтез регуляторов в системах демпфирования качки судна проводится с использованием линейной математической модели, записанной в отклонениях от устойчивого установившегося состояния (балансировочного режима), которая приводится к матричному дифференциальному уравнению общего вида:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_2 u(t) + B_1 f(t), \\ z(t) &= Cx(t), \\ y(t) &= Cx(t) + w(t), \\ x \in R^n, u \in R^m, f \in R^l, \end{aligned}$$

где $z(t)$ - стабилизируемый выход объекта; $y(t)$ - измеряемый выход объекта.

Вектор возмущения $f(t)$ считается узкополосным полигармоническим или случайным стационарным процессом с переменными спектральными свойствами, компоненты которого могут быть коррелированы между собой.

В диссертации в качестве критерия качества используется следующий минимаксный критерий:

$$J^2 = \sup_{\tilde{w}(t), v(t)} \left[\frac{E[x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)]}{E[v^2(t) + w^2(t)]} \right],$$

$$Q = \tilde{C}^T \tilde{C}$$

Использование минимаксного критерия в сравнении с среднеквадратичным не требует знания спектральной плотности возмущения действия, так как подавляется целый класс возмущений.

Приводы исполнительных механизмов обычно имеют ограниченную полосу пропускания $[0, \omega_u]$ в области низких частот. Для учета их частотных свойств весовые фильтры на управляющие воздействия представим в следующем виде:

$$W_u(s) = \frac{b_{ui}(s)}{a_{ui}(s)} = \lambda_{ui} (T_{ui}s + 1)^{n_{ui}}, i = 1..m,$$

где λ_{ui} - константа (весовой множитель); $T_{ui} = 1/\omega_{ui}$ - постоянная времени весового фильтра; n_{ui} - порядок фильтра.

Для учета частотных свойств возмущающего воздействия, приведенного к выходу, выходу используем следующие весовые фильтры:

$$W_z(s) = \frac{b_{zi}(s)}{a_{zi}(s)} = \lambda_{zi} \frac{(T_{zi}s + a)^{m_{zi}}}{(T_{2zi}^2 s^2 + 2T_{2zi}\xi_i s + 1)^{n_{zi}}}, i = 1..r,$$

где λ_{zi} - весовые коэффициенты.

Используя ПФ весовых фильтров, введем преобразование вектора выхода $z(s)$ и управления $u(s)$:

$$\tilde{u}(s) = W_u(s)u(s),$$

$$\tilde{z}(s) = W_z(s)z(s).$$

Введение весовых фильтров позволяет обеспечить подавление возмущений (преимущественно) в заданной полосе частот и обеспечить такое решение, которое будет удовлетворять частотным свойствам приводов органов управления.

Расширенный (с использованием весовых фильтров) объект имеет вид:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A}\tilde{x}(t) + \tilde{B}_2\tilde{u}(t) + \tilde{B}_1v(t),$$

$$\tilde{z}(t) = \tilde{C}\tilde{x}(t),$$

$$\tilde{y}(t) = \tilde{C}\tilde{x}(t) + \tilde{w}(t),$$

$$\tilde{y}(s) = W_z(s)y(s) = W_z(s)z(s) + W_z(s)w(s) = \tilde{z}(s) + \tilde{w}(s).$$

К преобразованному объекту применяется минимаксный критерий качества, который имеет вид:

$$J = \sup_{\tilde{w}(t), v(t)} \left[\frac{E[\tilde{x}(t)^T Q \tilde{x}(t) + \tilde{u}(t)^T R \tilde{u}(t)]}{E[v^2(t) + \tilde{s}\tilde{w}^2(t)]} \right],$$

$$Q = \tilde{C}^T \tilde{C}.$$

Решением задачи минимизации минимаксного критерия является регулятор состояния для расширенного объекта вида:

$$\tilde{u} = \tilde{K}\tilde{x},$$

где оценка вектора состояния \tilde{x} определяется из наблюдателя:

$$\dot{\tilde{x}} = (\tilde{A} + \gamma^{-2}B_1B_1^T X_\gamma)\tilde{x} + \tilde{B}_2\tilde{u} + \tilde{L}(\tilde{y} - \tilde{C}\tilde{x}),$$

где $\gamma = J_{\min}$, $K(\gamma)$, $X(\gamma)$, $L(\gamma)$ - параметры H^∞ -оптимальных регулятора и наблюдателя.

Практическое значение имеет задача субоптимального управления, решение которой - регулятор, обеспечивающий не точный минимум функционала J , а выполнение условия $J < \gamma$, где γ - некоторое число: $\gamma > \gamma_{\min}$. При $\gamma \rightarrow \infty$ решением задачи будет линейно-квадратичный регулятор.

Для нахождения параметров регулятора используется итерационная процедура (с последовательным уменьшением параметра γ , в ходе которой решаются два уравнения Лурье-Риккати):

$$\tilde{A}^T X + X\tilde{A} + Q + X(\tilde{B}_1\tilde{B}_1^T \gamma^{-2} - \tilde{B}_2R^{-1}\tilde{B}_2^T)X = 0,$$

$$\tilde{A}Y + Y\tilde{A}^T + \tilde{B}_1\tilde{B}_1^T + Y(\gamma^{-2}Q - \tilde{s}^2\tilde{C}^T\tilde{C})Y = 0.$$

Матрицы обратных связей регулятора и наблюдателя определяются решениями X_γ и Y_γ :

$$\tilde{K} = -R^{-1}\tilde{B}_2^T X_\gamma,$$

$$\tilde{L} = \tilde{s}^{-1}ZY_\gamma\tilde{C}^T,$$

где $Z = (I - \gamma^{-2}Y_\gamma X_\gamma)^{-1}$.

Переход от $\tilde{W}_g(s) = \tilde{\beta}(s)/\tilde{\alpha}(s)$ к $W_g(s) = \beta(s)/\alpha(s)$ осуществляется при помощи коэффициентов весовых фильтров.

Для реализуемости ПФ осуществляется редукция $W_g(s)$.

Пример использования предложенного подхода рассмотрен применительно к демпфированию вертикальной и килевой качки скоростного катамарана на глубокопогруженных поворотных подводных крыльях. Результаты исследования регулятора на линейной модели объекта демонстрируют, что регулятор обеспечивает "провал" частотных характеристик объекта по возмущению $|W_{z/f}(j\omega)|$ в полосе существенных частот возмущения (см. рис. 5).

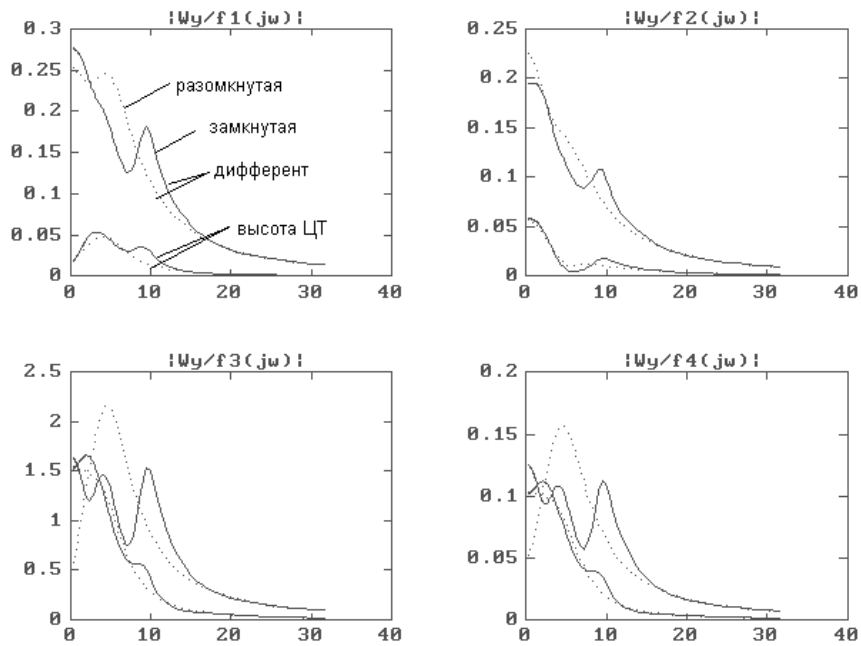


Рис.5. - АЧХ разомкнутой и замкнутой системы по возмущению

В третьей главе также рассматриваются вопросы построения оценки области комфортного движения скоростных судов. Для оценки области комфортного движения, согласно отечественным и международным стандартам, необходимо оценивать частотные свойства вертикальных перегрузок в различных точках судна (нос, корма, центр масс).

Стандарт ISO2631 (1985 год) нормирует ускорения, действующие на человека, в различных направлениях, в зависимости от частоты и длительности их действия. При рассмотрении комфортности судна рассматриваем только вертикальные ускорения. В работе для вычисления диаграммы вертикальных ускорений разработана методика основанная на использовании метода коррелограмм с использованием «оконных» функций. Для вычисления преобразования требуется иметь временную реализацию длительностью не менее 20-60 с, что позволит рассчитать оценку спектра на нескольких перекрывающихся интервалах, частота дискретизации не менее 10-50 Гц. Параметры определяются требованием частотного разрешения (в области низких частот) 0.05 Гц и максимальной частоты 5 Гц.

В **ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ** рассмотрены вопросы обеспечения отказоустойчивости САУД и судовых навигационных комплексов скоростных судов.

Проведена классификация отказов по месту отказа и по характеру отказа. Отмечено, что задача обеспечения отказоустойчивости в случае одиночного отказа включает в себя две составляющие. Первая составляющая – собственно обеспечение отказоустойчивости, которое включает задачу обнаружения отказа (определения момента времени t^* , когда произошел отказ) и замены сигнала с отказавшего датчика либо на сигнал с резервного датчика, либо на его оценку, получаемую с использованием прогнозирующих фильтров. Вторая составляющая – построение алгоритмов предотвращения аварий, обеспечивающих устойчивость движения объекта при возникновении отказа

(например, перевод судна в водоизмещающий режим). В настоящей главе рассматривается решение задач собственно отказоустойчивости.

В главе сформулированы общие требования к математическим моделям датчиков информации для решения задачи обнаружения отказов и в соответствии с этими требованиями предложена общая структура динамической модели датчика информации, состоящая из: статического звена, учитывающего место установки датчика; звена, учитывающего динамику датчика; модели шума измерений, предварительного фильтра; модели линии связи и АЦП. Предложен также способ моделирования сбоев АЦП, основанный на предположении, что поток сбоев АЦП является пуассоновским.

Для обнаружения отказов датчиков информации скоростных судов и предварительной фильтрации измерений предложено использовать схему аппаратно-аналитической избыточности на основе комплексирования датчиков с использованием методов обнаружения отказов на основе различения многих гипотез.

Предложенный метод синтеза алгоритмов обнаружения отказов и предварительной фильтрации заключается в использовании l датчиков информации, измеряющих различные параметры движения судна, связанные в силу уравнений движения судна. В этом случае измерительная система, обеспечивающая фильтрацию сигналов и обнаружения отказов датчиков, может использовать аналитическую избыточность сигналов. Эффективность таких измерительных систем тем выше, чем больше различие в динамических характеристиках измерителей, в спектрах их погрешностей.

Пусть уравнения движения объекта управления с учетом динамики измерителей (в дискретном виде) имеют вид:

$$x(k+1) = Ax(k) + B\omega(k),$$

$$y(k) = Cx(k) + Df(k), \quad x \in R^{n_1},$$

где n_1 - порядок объекта (с учетом динамики измерителей).

Отказы датчиков информации приводят к изменению параметров модели датчиков, следовательно, они могут привести к изменению матриц A , B , C , D . Задача фильтрации на основе комплексирования датчиков с использованием методов обнаружения отказов на основе различения многих гипотез может быть сформулирована как фильтрация сигналов $x(k)$ на основе измерений $y(k)$ при возможных изменениях матриц A , B , C , D . Задача обнаружения отказов сведена к задаче проверки m гипотез H_{1j} , $j=1\dots m$ на основе фильтрации l измерений, где каждая гипотеза соответствует наличию или отсутствию отказа. В главе 4 приведена линейная постановка и этот подход обобщаем на нелинейный случай.

Для проверки гипотез был предложен алгоритм, модифицированный так, что определяется степень проявления каждого отказа в отношении правдоподобия λ_j , и каждое λ_j умножается на весовой множитель σ_j , и, таким образом, с пороговым уровнем сравниваются величины $\lambda_j\sigma_j$. Величины σ_j определяются на основании математического моделирования.

Работа предложенного метода проиллюстрирована на примере обнаружения отказов датчиков радиовысотомера и вертикального акселерометра. Рассматривается задача измерения высоты центра масс СПК. Сигнал радиовысотомера, спектр шума которого включает волновую ординату, налагается на спектр полезного сигнала, скомплексирован с сигналом вертикального акселерометра, спектр шума которого лежит в относительно высокочастотной области. На основе предложенного метода, реализован алгоритм совместной фильтрации с определением отказов по методу проверки многих гипотез. Результат совместной фильтрации сигналов радиовысотомера и вертикального акселерометра для случая отказа типа «постоянное смещение величиной 0.6 м» приведен на рис.6.

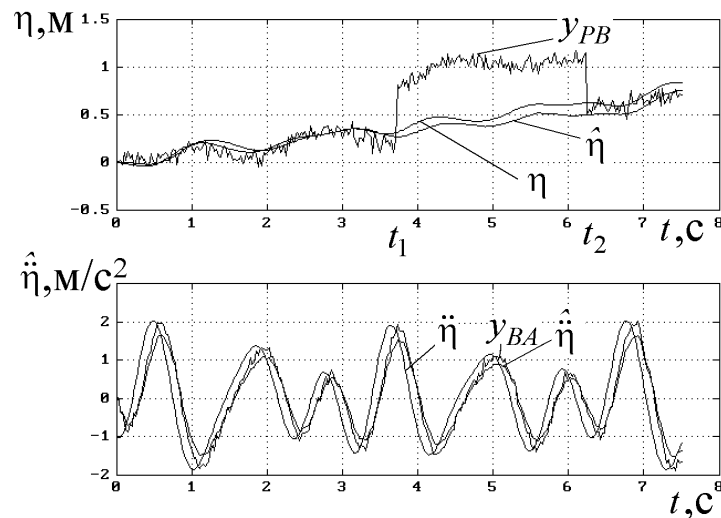


Рис.6. Совместная фильтрация сигналов радиовысотомера и вертикального акселерометра. Отказ типа «постоянное смещение» на выходе радиовысотомера

В четвертой главе предложен также алгоритм комплексирования двух датчиков: датчика кинематического параметра и его скорости изменения, например, датчика угла и датчика угловой скорости, с использованием фильтра Калмана (с переключаемыми в случае отказа матрицами ковариации) и алгоритмом определения отказа. Пример расчета по предложенному алгоритму (комплексирование сигналов датчика дифферента - горизонткомпаса ДС-83 и датчика угловой скорости килевой качки (ДУСУ-М)) в случае отказа ДС-83 типа «0 на выходе» приведены на рис.7.

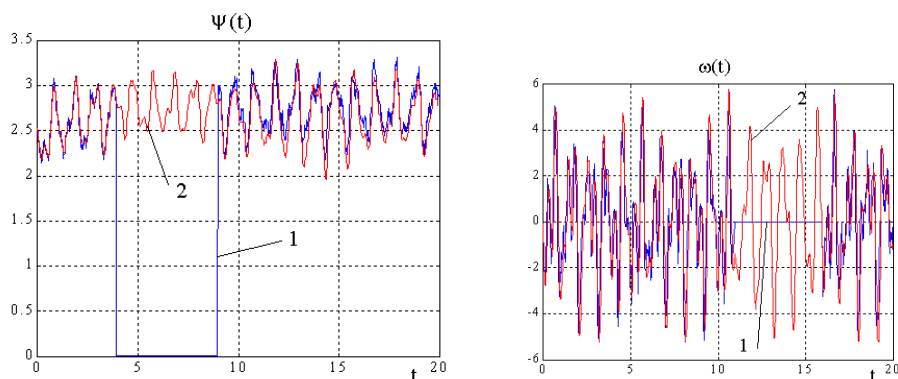


Рис.7. Совместная фильтрация сигналов горизонткомпаса ДС-83 и датчика угловой скорости рыскания ДУСУ-18М. Отказ типа ноль на выходе горизонткомпаса: датчиков дифферента : 1 – измеренный сигнал, 2– выход фильтра

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ предложены методы оценки областей безопасного движения скоростных судов и методы синтеза регуляторов, обеспечивающих удержание подвижного объекта в области безопасного движения. Особенностью задачи синтеза противоаварийного регулятора является то, что управляемый объект является нелинейным, а задача управления как следствие, это принципиально нелинейная задача с ограничениями в виде областей безопасного движения.

Предложен метод определения областей безопасности движения скоростных судов, основанный на оценке областей притяжения балансируемых режимов движения. Для оценки области притяжения использован метод функций Ляпунов, где в качестве функции Ляпунова использована полная энергия судов: $V = T + \Pi$. Для механических пассивных систем $\dot{V} \leq 0$ вследствие убывания энергии. Такая функция Ляпунова легко конструируется даже для сложных уравнений движения высокого порядка. Область асимптотической устойчивости определяется с использованием полученной функции Ляпунова, исходя из следующих условий: $V(x, a)$ скалярная функция, a - вектор параметров.

Тогда $R = \{x : V(x, a) < V_m(a)\}$, $R \subseteq D$ - область притяжения, если $0 < V(x, a)$, $x \neq 0, x \in R; V(0, a) = 0$, R - ограничена $\dot{V}(x, a) < 0$, $x \neq 0$, $x \in R$, $\dot{V}(0, a) = 0$.

Рассмотрим систему уравнений:

$$\nabla V + \lambda \nabla \dot{V} = 0, \dot{V} = 0 \quad (1)$$

для некоторого множителя Лагранжа λ .

Линия уровня функции Ляпунова, проходящая через точку (точки), являющиеся решениями уравнений (1) и соответствующих минимуму функции Ляпунова, ограничивают область гарантированной асимптотической устойчивости.

Как было показано во второй главе, уравнения движения скоростных судов часто могут быть сведены к виду $m\ddot{x} + b\dot{x} + f(x) = 0$. К такому виду сводятся уравнения бортовой качки, а также уравнения килевой качки в случае возможного пренебрежения ее связи с вертикальной. В этом случае функция Ляпунова будет иметь вид: $V(x, \dot{x}) = m\dot{x}^2 / 2 + \int f(x) dx$, а ее производная: $\dot{V} = m\ddot{x}\dot{x} + f(x)\dot{x} = -b\dot{x}^2 < 0$.

Один из примеров, рассмотренных в пятой главе - определение областей безопасного продольного движения СВПА. Уравнения движения СВПА (динамика по дифференту) сведено к виду:

$$\dot{\omega}_z + b\omega_z + f(\psi) = m_u + m(t)$$

где m_u - управляющий момент (ВИШ), $m(t)$ - возмущающий момент (волнение).

Нелинейность может быть аппроксимирована следующим образом: $f(\psi) = k_1\psi + k_2\psi^2$, следовательно, функция Ляпунова имеет вид: $V = \omega_z^2 / 2 + k_1\psi^2 / 2 + k_2\psi^3 / 3$. На рис.8 показаны линии уровня функции Ляпунова и аппроксимирующий эллипс для математической модели движения СВПА в продольной плоскости.

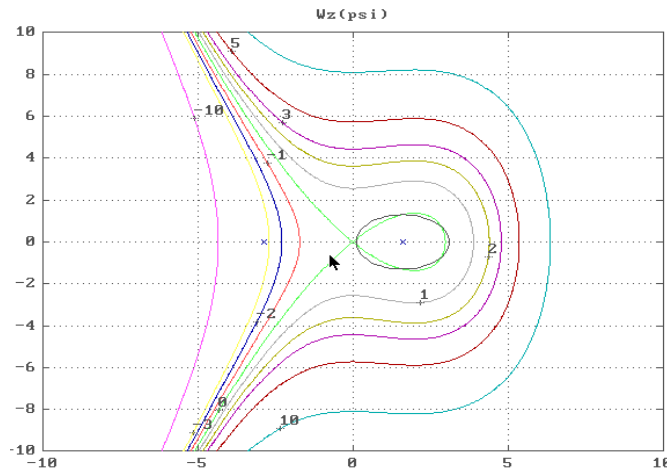


Рис.8. Линии уровня функции Ляпунова и аппроксимирующий эллипс для математической модели движения СВПА в продольной плоскости: $\psi_{\text{lim}} = \psi_0 \pm 1.5^\circ$, $\omega_{z\text{lim}} = \pm 1.3^\circ / c$

В работе предложено в качестве области безопасного движения использовать область устойчивости движения D . Основная идея синтеза регулятора обеспечения безаварийного движения заключается в том, чтобы:

1) Оценить область устойчивости D областью D_0 , так, чтобы $D \supset D_0$;

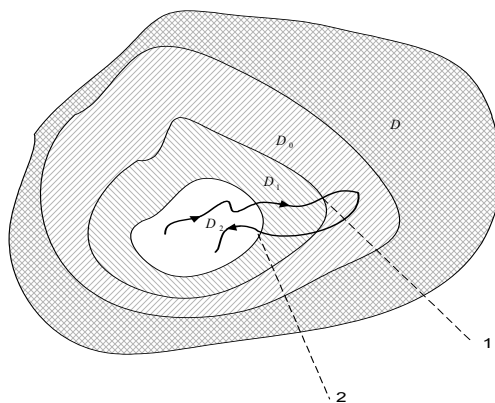
2) Задать три вложенных области: $D \supset D_0 \supset D_1 \supset D_2$, где D_2 область, при возврате в которую выключается противоаварийный регулятор, D_1 область, при выходе за которую включается противоаварийный регулятор. При задании областей необходимо опираться на особенности данного

объекта управления, так как чрезмерное их сужение может слишком сузить область допустимых маневров судна;

3) Внутри области D_0 упростить уравнения движения (в частности, линеаризовать по тем переменным, по которым допустимо). Провести синтез закона противоаварийного управления по следующему критерию: возврат изображающей точки в безопасную область D_2 (например, в геометрический центр области D_2 по критерию максимального быстродействия или среднеквадратичному критерию).

При реализации такой стратегии управления и правильном выборе областей, объект останется в области D_0 и, следовательно, авария движения будет предотвращена.

Целесообразно использовать различные D_2 и D_1 , чтобы не происходило постоянных срабатываний противоаварийного регулятора при нахождении изображающей точки вблизи границы. Области безопасного движения D_0 , включения D_1 , и выключения D_2 противоаварийного регулятора показаны на рис.9.



1 – момент включения противоаварийного регулятора; 2 - момент выключения противоаварийного регулятора

Рис.9. Области безопасного движения, включения и выключения противоаварийного регулятора:

Для синтеза регулятора можно использовать различные критерии оптимальности. Так, возможно использовать критерий максимального быстродействия:

$$J = \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (2)$$

или квадратичный критерий качества:

$$J = \int_{t_1}^{\infty} (x^T \lambda_x x + u^T \lambda_u u) dt. \quad (3)$$

Выбор критерия определяется сложностью математической модели движения используемой для синтеза. В случае, если модель объекта управления

имеет невысокий порядок, целесообразно воспользоваться критерием максимального быстродействия.

Пусть движение ОУ описывается математической моделью вида:

$$\dot{x} = F(x(t), u(t), f(t)),$$

где $x(t)$ - вектор состояния; $u(t)$ - управление; $f(t)$ - возмущение.

При синтезе закона предотвращения аварий для объекта, описываемого дифференциальными уравнениями, потребуем обеспечить минимальное значение критерия (2) при возвращении вектора состояния из любой точки $x \in R - G$ в целевое множество G . Возвращение системы в область устойчивости, выведенной аварийными воздействиями в область $R - G$, происходит под воздействием управления $u(t)$, которое из физических соображений ограничено кусочно-непрерывным управлением с ограниченными компонентами, т.е. $u(t) \in U$, где U - непустое ограничивающее множество в R . Задачей построения системы является определение $u(t)$, обеспечивающего минимальное значение критерия.

Для решения задачи оптимального по быстродействию управления $u(t)$ нелинейной автономной системой в случае подвижного правого и свободного левого конца использован принцип максимума Понтрягина, который вместе с условиями трансверсальности дает необходимые условия, которым должно удовлетворять оптимальное управление.

Вид оптимального управления:

$$u^*(t) = \text{signu} \left[\frac{\partial F}{\partial u}(x) \Big|_{u=u^*} \lambda^* \right] = u \text{ sign} D(x),$$

условие трансверсальности: $\lambda^*(t_1^*) \perp T_G$ или $\lambda^*(t_1^*) = C \frac{\partial \Gamma_G}{\partial x} \Big|_{x=x^*(t_1^*) \in \Gamma_G}$.

В том случае, если функция D по отношению к $x(t_0)$ является знакопостоянной, то можно говорить о том, что движение по экстремали системы с границы целевого множества возможно только при постоянных значениях управляющего сигнала, определяемого знаком функции D , т.е. что оптимальным является управление $u = \pm u_{\max}$ и что переключение не происходит. Таким образом, только одна последовательность управления является возможным оптимальным управлением при переводе вектора состояния из $R - G$ на границу Γ_G целевого множества. Из изложенного можно сделать вывод, что знакопостоянство функции D , определенной на Γ_G , является условием отсутствия поверхностей переключения.

В случаях, когда D является знакопеременной функцией $x(t_0)$, можно говорить о существовании некоторых подмножеств $\Gamma_{G+} \subset \Gamma_G$ и $\Gamma_{G-} \subset \Gamma_G$, движение к которым происходит по экстремалам системы, определенным соответственно положительным и отрицательным значением $u = \pm u_{\max}$ управляющего сигнала. Граничная поверхность между Γ_{G+} и Γ_{G-} соответствует точкам $x(t_0)$, в которых функция D

$$D = C \frac{\partial F}{\partial u}(x_{t_0}) | u = u^* \frac{\partial \Gamma_G}{\partial x} | x(x_{t_0}) \quad (4)$$

меняет знак. Таким образом, получаются начальные условия для построения поверхности переключения оптимальной по быстродействию системы с подвижным правым концом.

Говоря об оптимальности управления, следует также иметь в виду, что вследствие ограниченности управления $u(t) \in U$ может оказаться, что начальное состояние x_0 системы (4) расположены настолько далеко от целевого множества G , что перевести вектор состояния в G данными ограниченными управлениями не представляется возможным. В этом случае все фазовое пространство может быть разделено на два подпространства G_u и $R - G_u$ со следующими свойствами:

- если $x_0 \in G_u$, то существует хотя бы одно допустимое управление, приводящее x_0 в G за конечное время;
- если $x_0 \in R - G_u$, то не существует оптимальных управлений, переводящих x_0 в любой из элементов G_u в течение конечного времени.

По сути дела, ограниченные управления не дают достаточного «толчка» для того, чтобы перевести из $R - G_u$ в G_u и, следовательно, в целевое множество G .

В пятой главе также приведены результаты расчетов противоаварийного двухканального регулятора бокового движения для СВПА с отдельным управлением по каждому каналу.

Управление в канале крена осуществляется выключением в определенный момент одного из нагнетателей. Момент выключения нагнетателя определяется следующим условием:

$$\begin{cases} |\theta| > \theta^*, \\ \text{sign} \dot{\theta} > 0. \end{cases}$$

Управление в канале дрейфа осуществляется вертикальными аэроулами. Для эффективного управления аэроулами требуется синтезировать противоаварийный регулятор, переводящий угол дрейфа в ноль. Для синтеза такого регулятора использована модель движения СВПА в горизонтальной плоскости учитывающая динамику привода вертикальных аэроулов.

Приведены также результаты расчета противоаварийного регулятора СВПА (автомата безопасности) по дифференту. Регулятор осуществляет управление горизонтальным аэроулом, обеспечивая вывод дифферента в безопасную область, и одновременно осуществляет сброс тяги ВИШ.

Результаты моделирования (движение СВПА на 4х балльном волнении, с регулятором и без) приведены на рис.10.

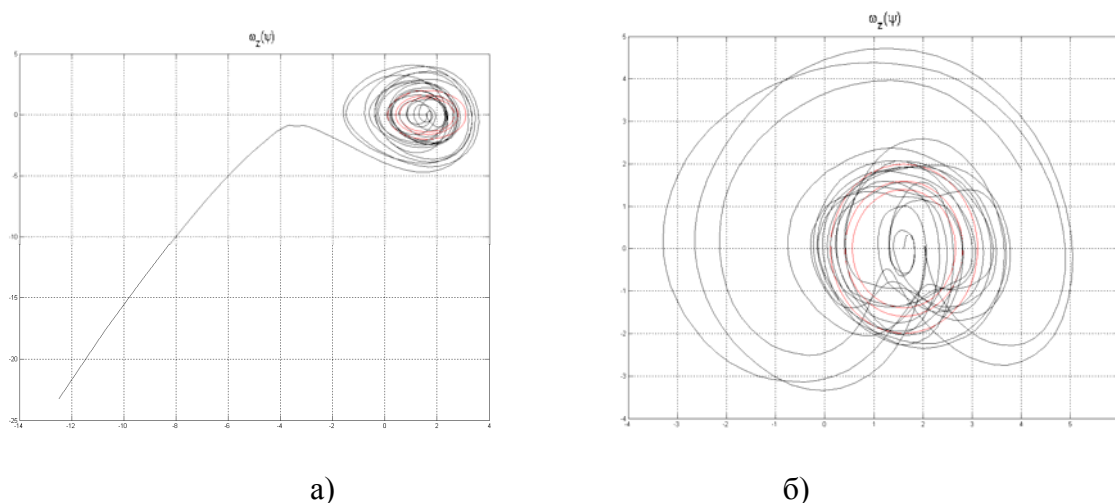


Рис.10. Движение СВПА на волнении: а) - без автомата безопасности (потеря устойчивости движения); б)- с автоматом безопасности (устойчивое движение).

В **ЗАКЛЮЧЕНИИ** приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

В **ПРИЛОЖЕНИИ** приводятся параметры современных скоростных судов, краткие описания современных САУД, а также документы, подтверждающие внедрение результатов диссертации.

3 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных автором исследований в области разработки теории и проектирования систем автоматического управления движением скоростных судов, осуществлено теоретическое обобщение методов описания, исследования и проектирования автоматических систем предотвращения аварий управляемого движения скоростных судов в условиях повышения требований к комфортности движения этих судов и учёта особенностей современных САУД.

Разработанные методы позволяют с единых позиций и во взаимосвязи описать исследование и разработку систем обеспечения безопасности движения и определяют перспективные пути повышения безопасности движения скоростных судов и развития методов исследования и синтеза систем предотвращения аварий движения, отказоустойчивых систем и систем демпфирования качки.

Полученные в диссертационной работе теоретические положения, совокупность которых создает новое перспективное научное направление в области построения систем обеспечения безопасности движения скоростных судов.

В диссертационной работе получены следующие конкретные научные и практические результаты:

- 1) Концепция построения структуры систем управления движением и систем измерения параметров движения скоростных судов, позволяющая формировать структуры САУД для решения частных задач управления скоростными судами обеспечивающая процессы формализации разработки

новых структур систем автоматического управления движением скоростных судов и структур судовых навигационных комплексов;

2) Методе обеспечения устойчивости сложных нелинейных динамических систем с переключением в правых частях и оценке областей безопасности этих динамических систем;

3) Методе определения отказов измерений и восстановлении измеряемых переменных состояния на основе аппаратно-аналитической избыточности с использованием методов различения многих гипотез;

4) Методе синтеза регуляторов с использованием минимаксного критерия качества для линейных динамических систем подверженных действию стохастического возмущения.

5) Комплекс математических моделей скоростных судов (различного уровня детализации), включая математические модели ветро-волнового возмущения, позволяющий проводить синтез и анализ САУД и систем предотвращения аварий движения скоростных судов. В частности, разработана математическая модель движения СВПА, учитывающая отказы средств управления, обрывы гибкого ограждения, отказы датчиков информации и другие отказы, предназначенная для исследования и разработки автомата безопасности движения.

6) Методика параметрической идентификации математических моделей скоростных судов, включающая специализированные маневры судна для идентификации параметров математических моделей.

7) Метод определения областей безопасного движения скоростных судов основанный на оценке областей притяжения балансировочных режимов движения с использованием метода функций Ляпунова, где в качестве функции Ляпунова используется полная механическая энергия, что позволяет разрабатывать регуляторы для автомата безопасности скоростных судов.

8) Подход к обеспечению отказоустойчивости САУД скоростных судов.

9) САПР СВПА и глиссирующего судна, позволяющий анализировать влияние изменения характеристик средств управления движением, параметров закона управления, ветро-волнового возмущения и отказов органов управления на движение этих судов.

10) Метод синтеза регулятора демпфирования качки скоростных судов, основанный на использовании субоптимального H^∞ -регулятора с частотно-зависимыми множителями, позволяющими учесть частотные свойства приводов органов управления и волнового возмущения.

11) Измерительный программно-аппаратный комплекс для проведения натурных испытаний (скоростных, маневренных и мореходных) водоизмещающих судов и скоростных судов, включая экранопланы.

12) Теоретические положения и прикладные результаты диссертации внедрены в ЗАО «Транзас», МТД, ЦМКБ «Алмаз», ЗАО «Навис», Дизайн-бюро «Агат» и МИПАТ С.-ПбГУАП (ЛИАП), что подтверждено соответствующими актами внедрения.

13) Результаты диссертации использованы в курсах лекций, методических и учебных пособиях по дисциплинам: «Управление морскими подвижными объектами», «Системы управления техническими средствами корабля», читаемых на кафедре Корабельных систем управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

4 ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях по перечню ВАК Минобрнауки РФ

1) Амбросовский, В.М. Формирование закона управления при стабилизации судна на криволинейной траектории. [Текст]/ Амбросовский В.М., Жуковский С.Г., Хабаров С.П.// Известия ЛЭТИ, вып.363, Л.:1985. - с.36-40.

2) Амбросовский, В.М. Управление движением судна с динамическими принципами поддержания в аварийных ситуациях [Текст]/ Амбросовский В.М., Лукомский Ю.А.// Известия ЛЭТИ, вып.410, Л.:1989. - с.22-25.

3) Амбросовский, В.М. Закон стабилизации судна на заданной траектории [Текст]/ Амбросовский В.М.// Известия ЭТИ, вып.421. Л.:1991, - с.29-33.

4) Амбросовский, В.М. Адаптивный регулятор путевого угла судна [Текст]/ Амбросовский В.М., Ежевская О.А., Робуш В.О. // Известия ЭТИ, вып.435. Л.:1991. - с.63-67.

5) Амбросовский, В.М. Исследование алгоритма стабилизации судна [Текст]/ Амбросовский В.М., Ежевская О.А. // Известия ЭТИ, вып.450. Л.:1992. - с.54-58.

6) Амбросовский, В.М. Моделирование движения судна в режиме динамического позиционирования [Текст]/ Амбросовский В.М., Румянцев С.Н. // Известия ЭТИ, вып.460. Л.:1993. - с.11-17.

7) Амбросовский, В.М. Расчет регулятора килевой качки судна на подводных крыльях на основе теории H^∞ -оптимизации [Текст]/ Амбросовский В.М. // Известия ЭТИ, вып.484. С.-Пб.:1995. - с.11-16

8) Амбросовский, В.М. Синтез следящих систем методом равномерно-частотной оптимизации [Текст]/ Амбросовский В.М., Барабанов А.Е., Гульчак А.М., Мирошников А.Н.// Автоматика и телемеханика, №4, 1997. - с.3-13

9) Амбросовский, В.М. Равномерно-частотная оптимизация в задачах демпфирования качки морских подвижных объектов [Текст]/ Амбросовский В.М., Лукомский Ю.А. // Техническая кибернетика, №6, 1998. - с.159-168

10) Амбросовский, В.М. Алгоритм обеспечения отказоустойчивости систем управления движением судов на подводных крыльях [Текст]/ Амбросовский В.М., Кац Е.Б., Скороходов Д.А. // Гироскопия и навигация, №2 (29), 2000. - с.11-20.

11) Амбросовский, В.М. Анализ структур приборов ввода-вывода систем управления техническими средствами судна [Текст]/ Амбросовский В.М., Слипченко А.С.// Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», вып.1, С.-Пб.:2002. - с.24-28

Монография

12) Амбросовский, В.М. Повышение безопасности движения скоростных судов [Текст]: монография / Амбросовский В.М., Зуев В.А., Лукомский Ю.А. и др. – С.-Пб.:ООО «Техномедиа»/«Элмор», 2008. – 136 с.

Учебное пособие

13) Амбросовский, В.М. Интегрированные системы управления технических средств транспорта [Текст]. Уч.изд./ Амбросовский В.М., Белый О.В., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. – С.-Пб.: «Элмор», 2001.–288с.

Статьи и доклады

14) Амбросовский, В.М. Алгоритмическое и программное обеспечение систем управления движением судна [Текст] / Амбросовский В.М., Лукомский Ю.А., Хабаров С.П. //В кн.: ВНТК "Проблемы комплексной автоматизации СТС". Л.:Судостроение, 1982. с.102-103

15) Амбросовский, В.М. Подход к построению алгоритмов функционирования навигационно-управляющего комплекса [Текст] / Амбросовский В.М., Лукомский Ю.А., Мирошников А.Н.//В кн.: ВС по техническим средствам и методам изучения океанов и морей. Геленджик, 1985. с.23-24.

16) Амбросовский, В.М. Анализ применения критерия безотказности для оценки сложности системы управления движением судна [Текст]/ Амбросовский В.М., Скороходов Д.А.//В кн.: ВС по техническим средствам и методам изучения океанов и морей. Геленджик, 1985. с.37-38.

17) Амбросовский, В.М. Исследование движения судна на волнении [Текст]/ Амбросовский В.М., Ежевская О.А.//В кн.: Сб.трудов совета по управлению движением судов и кораблей. М.:ИПУ, 1991. с.55-58.

18) Амбросовский, В.М. Алгоритмическое обеспечение системы управления движением судна [Текст] / Амбросовский В.М., Робуш В.О. //В кн.: Сб.трудов совета по управлению движением судов. Вып.16. Севастополь, 1989. с.52-53

19) Амбросовский, В.М. Моделирование морского волнения, действующего на судно [Текст] / Амбросовский В.М., Румянцев С.Н. –С.-Пб, 1993. - 38 с. Деп. в ЦНИИ "Румб" 6.10.1993, НДР3490.

20) Ambrosovsky V.M. Numerical Simulation of Non-regular Wave Disturbance in Ship Manoeuvring Motion Simulation Problems (Численное моделирование нерегулярного волнового возмущения звания в задачах моделирования движения судов)/ Ambrosovsky V.M., Rumyantzev S.N. //

Proc.3rd Int.Conf.Manoeuvring and Control of Marine Craft, Southampton, UK, 1994 pp.135-146.

21) Ambrosovsky V.M. Minimax stabilization law of SES ferry course (Минимаксный закон стабилизации курса паромы на воздушной подушке скегового типа)/ Ambrosovsky V.M., Katz E.B., Miroshnikov A.N.// Proc.3rd IFAC Workshop on Control Applications in Marine Systems, Trondheim, Norway, 1995. pp.143-149

22) Амбросовский, В.М. Исследование математической модели движения скоростного паромы на воздушной подушке в боковой плоскости [Текст]/ Амбросовский В.М., Абрамовский В.А., Кац Е.Б. - С.-Пб, 1995. - 44 с. Деп. в ЦНИИ "Румб" 07.07.95, N ДР 3572.

23) Амбросовский, В.М. Исследование упрощенной математической модели продольного движения судна на подводных крыльях [Текст]/ Амбросовский В.М., Румянцев С.Н. – С.-Пб, 1995. – 62 с. Деп. в ЦНИИ «Румб» 07.07.95, N ДР 3573.

24) Ambrosovsky V.M. Simulation of Acceleration/Deceleration Maneuvers in Navigation Trainers Problems (Моделирование режимов разгона/торможения судна в задачах навигационных тренажеров)/ Амбросовский В.М., Кац Е.Б.// Proc.Int.Symposium on Maneovrability of Ships at Slow Speed (MANEOVRABILITY'95), Pawa-Poland, 1995. pp.119-132

25) Амбросовский, В.М. Робастный закон демпфирования продольной качки судна на подводных крыльях [Текст]/ Амбросовский В.М., Румянцев С.Н. С.-Пб, 1996. - 63 с. Деп. в ЦНИИ им.акад.А.Н.Крылова 2.02.96, N ДР3592

26) Ambrosovsky V.M. Robust Stabilization of SES Heaving and Pitching (Робастная стабилизация вертикальной и килевой качки судна на воздушной подушке скегового типа)/ Abramovsky V.A., Ambrosovsky V.M., Katz E.B.// Proc.of Eleventh Ship Control Systems Symposium. Southampton, UK, 1997. vol.1, pp. 551-566

27) Амбросовский, В.М. Маневренные испытания судов, обработка результатов, анализ, использование в задачах маневрирования [Текст]/ Амбросовский В.М., Кац Е.Б., Гофман А.Д.// Научно-техническая Конференция "Проблемы мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики" (XXXVIII Крыловские чтения). С.-Пб. НТО им.А.Н.Крылова, 21-23 октября 1997 г. с.41-42.

28) Амбросовский, В.М. Обработка результатов измерений при проведении натурных испытаний судов [Текст]/ Амбросовский В.М., Кац Е.Б.// XXIV Всесоюзная конференция по управлению движением кораблей и специальных аппаратов. Адлер, 3-5 июня 1997. с.26-28.

29) Ambrosovsky V.M. High speed catamaran heaving and pitching damping (Демпфирование вертикальной и килевой качки скоростного катамарана) / Ambrosovsky V.M, Katz E.B. //Proc.of IFAC Workshop on Control Applications in Marine Systems CAMS-98, Japan, 1998 pp. 221-227.

30) Амбросовский, В.М. Алгоритмы обеспечения отказоустойчивости систем управления движением судов на подводных крыльях [Текст]/ Амбросовский В.М., Кац Е.Б., Скороходов Д.А.// Совет по управлению кораблей и судов, ИПУ РАН, Рыбинск, июнь 1998 с.34-37.

31) Ambrosovsky V.M. Fly Parameters Monitoring System for Small Wig Craft (Мониторинг параметров движения небольшого экраноплана)/ Ambrosovsky V.M., Nebylov A.V. // Proc. of III International Conference on Ground-Effect Machines, The Royal Society of Marine Engineers Russia Branch, S.-Pb., 2000, pp.15-23

32) Ambrosovsky V.M. Sea Trials of High Speed Crafts Data Processing and Identification (Обработка данных морских испытаний и идентификация моделей скоростных судов)/ Ambrosovsky V.M., Ambrosovskaya E.B.// Proc.of International Conference on Fast Sea Transportation FAST'2005. S.-Pb, june 2005. pp.1-7.

Авторские свидетельства

33) Амбросовский В.М., Антоненко В.П., Жуковский С.Ю., Скороходов Д.А. Устройство для управления движением судна на воздушной подушке. А.С. № 1424537 от 15.05.1988 г.

34) Амбросовский В.М., Антоненко В.П., Жуковский С.Ю. и др. Система управления положением судна. А.С. № 1454120 от 22.09.1988 г.

35) Амбросовский В.М., Лукомский Ю.А., Робуш В.О., Скороходов Д.А. Устройство для управления движением судна на воздушной подушке. А.С. № 1492608 от 08.03.1989 г