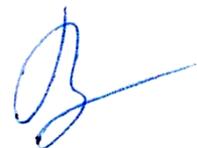


федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных технологий, механики и
оптики»

На правах рукописи



Власов Сергей Михайлович

**Адаптивное управление плоским движением надводного
роботизированного объекта**

Специальность 05.13.01 –
Системный анализ, управление и обработка информации
(в технических системах)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н, доцент

Пыркин Антон Александрович

Санкт-Петербург – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1 Обзор методов адаптивного и робастного управления по выходу. Обобщенная постановка задачи.	14
1.1 Обзор методов управления при неполной информации о параметрах и переменных состояния системы	14
1.2 Обзор методов управления в условиях возмущающих воздействий	17
1.3 Обобщенная постановка задачи	20
Глава 2 Алгоритмы робастного и адаптивного управления многомерными системами	24
2.1 Алгоритм робастного управления по выходу	24
2.1.1 Обеспечение устойчивости типа «ограниченный вход – ограниченный выход».....	25
2.1.2 Компенсация возмущающих воздействий по принципу внутренней модели.....	31
2.2 Алгоритм адаптивного управления движением роботизированного макета надводного судна	37
2.2.1 Модификация алгоритма робастного управления.....	37
2.3 Числовой пример.....	39
2.4 Выводы по главе.....	45
Глава 3 Метод адаптивного и робастного управления многомерными нелинейными системами.....	46
3.1 Метод управления некоторым классом многомерных объектов.....	46
3.1.1 Шаг 1	47

3.1.2	Шаг 2	48
3.1.3	Шаг 3	48
3.2	Алгоритм робастного управления движением надводного водоизмещающего судна	49
3.2.1	Декомпозиция математической модели	50
3.2.2	Робастный алгоритм динамического позиционирования судна	53
3.3	Распределение управляющих воздействий на примере надводного водоизмещающего судна.....	54
3.3.1	Конфигурации судов и принятые обозначения	54
3.3.2	Расчет равнодействующих сил и момента	56
3.3.3	Построение областей достижимости	59
3.3.4	Алгоритм ограничения заданных сил и момента	60
3.3.5	Синтез законов управления по заданным силам	61
3.3.6	Алгоритмы распределения управляющих воздействий	62
3.4	Выводы по главе.....	65
Глава 4 Экспериментальные исследования алгоритмов адаптивного и робастного управления многомерными системами		66
4.1	Выбор прототипа.....	67
4.2	Разработка кинематической схемы роботизированного макета судна	68
4.2.1	Макет судна	68
4.2.2	Кинематическая схема.....	68
4.3	Разработка структуры и выбор элементной базы макета	70
4.3.1	Главный двигатель и его привод	71
4.3.2	Подруливающее устройство фирмы GRAUPNER	73

4.3.3	Подруливающее устройство собственной разработки	74
4.3.4	Сервопривод с передаточным механизмом на рулевую насадку	74
4.3.5	Монтаж органов управления в корпус судна.....	75
4.4	Разработка системы беспроводной связи макета с компьютером	76
4.5	Разработка вычислительных устройств и аппаратного обеспечения	78
4.6	Разработка системы компьютерного зрения для получения навигационной информации.....	79
4.7	Результаты экспериментальных исследований	83
4.7.1	Эксперимент с ручным управлением.....	84
4.7.2	Оценивание навигационных данных с помощью технического зрения.....	85
4.7.3	Синхронизация времени в распределенной системе управления	85
4.7.4	Исследование пропорционального регулятора.	87
4.7.5	Эксперимент с алгоритмом робастного управления.....	88
4.7.6	Эксперимент с алгоритмом адаптивного управления.....	91
4.7.7	Траекторное управление	94
4.8	Выводы по главе.....	98
	Заключение.....	99
	Список литературы	101

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большую актуальность приобретают так называемые киберфизические системы, которые представляют собой сеть вычислительных и физических взаимосвязанных элементов, способных адаптироваться и реконфигурироваться к изменяющимся внешним условиям. Одним из примеров таких систем является мобильные технические системы, например, транспортные системы, обеспечивающие логистику перевозки грузов. Значительный объем грузоперевозок приходится на морские пути, что обусловлено низкой себестоимостью и высокой грузоподъемностью надводных судов. Согласно статистике за 2014–2015 года, динамика объема морских грузоперевозок в России значительно возросла. Ввиду этого класс морских транспортных технических систем представляет собой значительный интерес.

Отметим, что в настоящее время в указанном классе технических систем распространено использование ряда алгоритмов управления, требующих сложную настройку. Это приводит к необходимости привлекать высококвалифицированных специалистов и проводить дорогостоящую первоначальную настройку и перенастройку в процессе эксплуатации систем автоматического управления. Это ведет к необоснованным затратам со стороны заказчика и, как следствие, мотивирует разработчиков систем управления к проектированию «умных» и при этом простых алгоритмов, способных автоматически адаптироваться к меняющимся условиям и не требующих сложной настройки. Таким образом, в настоящее время крайне востребованы системы управления, которые будут с одной стороны качественно решать поставленную задачу, а с другой – иметь простую с инженерной точки зрения настройку и не будут требовать для этого привлечения высококвалифицированных специалистов.

Наиболее сложной системой управления для надводных транспортных объектов является система динамического позиционирования судна в точке,

решающая широкий спектр задач, включая удержание судна на заданном курсе, движение по заданному профилю (траектории), стабилизацию продольных и поперечных скоростей движения, а также стабилизацию всех координат (долгота, широта, курс) в окрестности заданных значений.

Система динамического позиционирования обеспечивает решение задач стабилизации координат или слежения за командным сигналом посредством имеющихся исполнительных приводов судна. Разработка таких весьма дорогостоящих систем является востребованной и сложной задачей.

Математические модели, описывающие поведение таких систем, могут содержать параметрические, сигнальные и структурные неопределенности. Параметры могут быть нестационарными и меняться в зависимости от условий эксплуатации, внешней среды, наличия полезного груза на борту и других факторов. Кроме того надводное судно – яркий пример объекта, на который постоянно в процессе функционирования действуют внешние возмущения, такие как течение, ветер и волновая качка.

Зачастую надводные суда имеют достаточно сложные конфигурации исполнительных приводов, что ведет к необходимости, помимо синтеза регуляторов, решать задачу *распределения упоров* (распределение сил между всеми исполнительными органами управления или приводами). В процессе движения судна динамические каналы, соответствующие тем или иным регулируемым переменным, будут оказывать влияние друг на друга. Это взаимодействие может быть рассмотрено как дополнительные внешние возмущения, которые необходимо компенсировать.

Ряд сложностей возникает также при решении задачи определения географических координат судна. Эта задача, как правило, решается с использованием спутниковых систем навигации. Точность определения, помимо прочего, будет зависеть от внешних возмущений, которым подвергается расположенная на судне антенна. Ее, как правило, для обеспечения лучшего сигнала закрепляют максимально высоко над судном. При этом влияние волновой качки на фактические измерения будет

усиливаться. Возможна ситуация, когда судно фактически находится на месте, а колебания значительной амплитуды раскачивают антенну, что приведет к ошибкам в канале измерений.

Решение задачи слежения за командным сигналом также должно быть выполнено с минимальной ошибкой, поскольку маневрирование, особенно в окрестности порта, часто бывает затруднено и сопряжено с риском повреждения корпуса судна. Отметим, ручное управление судном в таких участках маршрута требует от оператора большого опыта и знания рельефа дна. В силу этого автоматизация движения судна в сложных участках крайне важна, поскольку позволит существенно снизить риски.

В силу всех вышеописанных сложностей и вызовов разработка систем динамического позиционирования является востребованной и важной задачей, которая должна быть сформулирована на фундаментальном теоретическом уровне, а полученное решение должно иметь строгое аналитическое доказательство. Предметом теоретических исследований являются вопросы устойчивости замкнутой системы управления, обеспечение динамических и точностных показателей качества, а также наличие робастных свойств по отношению к параметрическим неопределенностям математических моделей, описывающих поведение реальной технической системы.

Особого внимания заслуживает задача апробации разработанных алгоритмов управления. Компьютерное моделирование полезно на ранних этапах разработки, но для того, чтобы синтезировать безотказную систему управления, способную функционировать в реальных условиях, необходимо убедиться в режиме экспериментального исследования на реальной технической системе. Компьютерное моделирование в силу ограниченности вычислительных возможностей не способно полноценно и идеально воссоздать реалистичную картину.

Использование настоящих надводных судов для апробации разрабатываемых систем автоматического управления может быть

затруднено по двум причинам. Проведение тестовых запусков является дорогостоящим процессом, поскольку требует, помимо использования настоящего надводного судна, привлечения большого количества людей и наличия специально отведенного места для проведения такого рода испытаний. Второй причиной являются риски, с которыми сопряжено использование несертифицированных систем динамического позиционирования. Ошибки, допущенные во время синтеза и не выявленные на этапе компьютерного моделирования, могут привести к негативным последствиям.

Для проведения экспериментальных исследований, малозатратного и безопасного тестирования алгоритмов управления разработан специальный роботизированный макет, имитирующий поведение реального надводного судна. Макет учитывает все вышеописанные сложности, связанные с функционированием систем динамического позиционирования. Математическая модель макета может рассматриваться как содержащая неизвестные параметры. Роботизированный макет имеет четыре исполнительных привода, в соответствии с конфигурацией которых необходимо получить распределитель упоров. Задача определения координат ввиду малых масштабов осуществлена с помощью системы технического (компьютерного) зрения, состоящей из камеры и алгоритма обработки видеоизображения. В канале измерений будут иметь место помехи, которые необходимо фильтровать. Установка позволяет решать задачи стабилизации заданных координат и слежения за командным сигналом путем инженерной реализации регуляторов на управляющем компьютере.

Использование этой установки позволит выявить ошибки синтеза алгоритмов управления, расчета распределителя упоров, формирования управляющих сигналов для исполнительных приводов, сократив при этом расходы и риски на проведение испытаний систем динамического позиционирования.

Цель диссертационной работы: разработка методов и алгоритмов адаптивного и робастного управления классом многомерных нелинейных систем в условиях параметрической и функциональной неопределенностей математической модели и наличия внешних возмущающих воздействий.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Разработан метод синтеза регуляторов для робастной стабилизации нелинейных многомерных систем с секторными ограничениями, параметрическими и функциональными неопределенностями, включая алгоритм компенсации мультисинусоидальных возмущающих воздействий и адаптивную версию алгоритма робастной стабилизации.
- Разработан новый универсальный метод распределения управляющих воздействий с приложением для управления движением надводных судов. Синтезированы алгоритмы робастного и адаптивного управления движением судна в задаче динамического позиционирования в точке, а также в режиме траекторного управления.
- Разработан и изготовлен оригинальный роботизированный макет надводного судна, имитирующий реальное водоизмещающее судно в масштабе 1:32. Решены задачи прямого управления исполнительными приводами по беспроводному каналу связи. Решена задача определения навигационных данных средствами компьютерного зрения. Проведены экспериментальные исследования с целью апробации синтезированных алгоритмов управления.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод адаптивного и робастного управления по выходу для нелинейных систем вида Лурье с одним входом и одним выходом с компенсацией возмущающих воздействий.
2. Метод адаптивного и робастного управления по выходу классом многомерных нелинейных систем с параметрическими и функциональными неопределенностями.
3. Система дистанционного управления роботизированным макетом

надводного судна с определением навигационных данных с помощью средств компьютерного зрения.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовался весь спектр методов современной теории автоматического управления, адаптивных и робастных методов управления, а также методы нелинейной теории управления. Для синтеза алгоритмов робастного управления использовались хорошо изученные методы пассивации систем. При доказательстве положений диссертации использовался аппарат функций Ляпунова, методы пространства состояний и операторный метод. Апробация полученных законов управления проводилась на роботизированном макете надводного судна с использованием MATLAB в качестве среды разработки и реализации управляющих программ.

Научная новизна. Предложен новый алгоритм адаптивного управления нелинейными системами с секторными ограничениями на нелинейность. Разработан оригинальный подход, при котором законы управления для исполнительных приводов синтезируются по заданным результирующим воздействиям путем поиска линейных (монотонных) зависимостей между заданными воздействиями и компонентами управляющих воздействий в некотором векторном базисе. Для системы дистанционного управления макетом надводного судна был разработан новый алгоритм получения навигационных данных с помощью средств компьютерного зрения, позволяющий в режиме реального времени иметь оценки двух линейных и одной угловой координат макета на плоскости.

Научная и практическая значимость полученных результатов заключается в том, что разработанные метод и алгоритмы управления при неполной информации о переменных состояния (т.е. без прямых измерений производных регулируемых переменных или же переменных состояния объекта) могут быть эффективно применены для широкого класса технических объектов с несколькими входными и несколькими выходными воздействиями, функционирующих в условиях параметрической и

функциональной неопределенностей в математических моделях их движения. Применение полученных алгоритмов позволит значительно ослабить требования к априорной информации о свойствах среды функционирования объекта управления; значительно снизить затраты на разработку и использование измерительной техники для получения необходимых данных при реализации систем управления; повысить надежность системы благодаря устранению дополнительных помех, вызванных использованием датчиков переменных состояния или вычислителей производных выходной регулируемой переменной. Предлагаемые алгоритмы управления движением подкреплены строгим аналитическим доказательством устойчивости замкнутой системы. Показаны робастные свойства предложенных алгоритмов управления, не требующих знания параметров математической модели за исключением геометрических координат расположения исполнительных приводов на судне.

Степень достоверности полученных результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается:

- строгостью доказательств утверждений, корректным использованием математического аппарата;
- представленными в диссертационной работе результатами экспериментальных исследований разработанных алгоритмов на основе роботизированного макета надводного судна;
- печатными работами, а также статьями в сборниках трудов международных конференций. Среди 10 научных работ 3 опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК [1–3], 4 статьи опубликованы в сборниках 3 международных конференций [4–7], входящих в систему цитирования Scopus.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на 4 международных и 2 российских конференциях:

- 9th IFAC Symposium on Advances in Control Education, Nizhny

- Novgorod, Russia, 2012. [4] (9–ый Симпозиум по продвинутым технологиям преподавания теории управления).
- 7th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management, and Control, Saint Petersburg, Russia, 2013. [5] (7–ая Конференция по моделированию, менеджменту и управлению на производстве).
 - International Conference of Young Scientists in Automation & Control, 2013. [9] (Международная конференция молодых ученых в автоматизации и управлении)
 - XLIII научная и учебно–методическая конференция Университет ИТМО, 2014. [10]
 - V Всероссийский конгресс молодых ученых. Университет ИТМО, 2015. [8]
 - 1st IFAC Conference on Modeling, Identification and Control of Nonlinear Systems, Saint Petersburg, Russia, 2015. [6, 7] (1–ая конференция по моделированию, идентификации и управлению нелинейными системами).

Работа выполнена на кафедре Систем управления и информатики Университета ИТМО, поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (проект 14.Z50.31.0031, «Робастные и адаптивные системы управления, коммуникации и вычисления») и при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074–U01 «Нелинейное и адаптивное управление сложными системами», Госзадание 2014/190 проект 2118 «Развитие методов адаптивного и робастного управления сложными нелинейными системами с применением к мехатронным и робототехническим приложениям»). Результаты работы использованы также при выполнении следующих НИОКР в рамках ФЦП «Научные и научно–педагогические кадры инновационной России»: «Разработка методов планирования и управления движением робота–манипулятора с учетом сил взаимодействия робота с объектом

манипулирования, окружающей средой, другим роботом или с человеком», «Разработка системы удаленного управления робототехническими комплексами с техническим зрением», ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно–технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы»: «Геометрические методы планирования и управления движениями механических систем с приложениями в промышленной робототехнике и реабилитации». Диссертационная работа поддержана грантами Правительства Санкт–Петербурга при выполнении проектов «Разработка аппаратного обеспечения для управления многосвязными робототехническими системами» и «Картирование и локализация мобильного робота в закрытом помещении».

Личный вклад. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Соискателем был разработан новый метод управления плоским движением объектов типа надводное судно по заданным силам и моменту. На базе этого метода разработаны робастный алгоритм динамического позиционирования судна в точке [1] и его адаптивная модификация [2]. Соискателем был самостоятельно разработан и изготовлен оригинальный роботизированный макет судна со всем необходимым аппаратным и программным обеспечением. Разработана система удаленного управления макетом по беспроводному каналу связи, а также разработан алгоритм получения навигационной информации о расположении макета на плоскости с помощью средств компьютерного зрения [3].

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 работах [1–10], включая 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК [1–3] и 4 статьи в сборниках трудов конференций, индексируемых в системе цитирования Scopus [4–7].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации – 110 страниц, включая 42 рисунка и 1 таблицу. Библиография включает 78 наименований.

ГЛАВА 1

ОБЗОР МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО И РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО ВЫХОДУ. ОБОБЩЕННАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

1.1 Обзор методов управления при неполной информации о параметрах и переменных состояния системы

В диссертационной работе разработаны методы адаптивного и робастного управления объектами, математические модели которых могут содержать неизвестные или неточно заданные параметры. Помимо решения теоретической задачи управления для практики важным аспектом является простота их реализации. Законы управления простой структуры с легко настраиваемыми параметрами являются инженерно привлекательными в различных областях, включая аэрокосмическую, робототехническую и электротехническую. В частности, методы адаптивного управления по выходу востребованы для большого количества практических задач, где законы управления с использованием переменных состояний трудно или даже невозможно реализовать.

В работе (В главе 2) представлено развитие метода управления по выходу «последовательный компенсатор» для нелинейных минимально-фазовых систем вида Лурье, который были опубликован в ряде статей [1, 2, 5-7, 9, 11-16].

Классической задачей теории управления является стабилизация нелинейных систем. Как показано в работе [17], получено значительное количество конструктивных методов и алгоритмов.

Современные исследования в основном сосредоточены на анализе и синтезе управления для систем, в которых нелинейные компоненты модели не могут быть приведены к входному сигналу [17-19], где представлены

условия существования статической обратной связи, гарантирующей замкнутой системе свойство асимптотической устойчивости.

Недостатки методов, представленных в [18, 19], таковы: для синтеза закона управления требуются прямые измерения переменных состояния, а также знание всех параметров и структуры нелинейной системы.

Одной из важнейших проблем в области нелинейных систем является стабилизация по выходной переменной (см., например, [11-16, 20-31]).

В ряде работ [13-15] были рассмотрены модели нелинейных систем, состоящие из линейной части с неизвестными параметрами и статическим нелинейным блоком с запаздывающим аргументом. Эти системы могут быть описаны в следующей форме

$$a(p)y(t) = b(p)u(t) + c(p)\varpi(y(t - \tau)) + e(p)\delta(t), \quad (1.1)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – обозначает оператор дифференцирования; выходная регулируемая переменная $y(t)$ доступна измерению в отличие от ее производных и прочих переменных состояния; $a(p) = p^n + \dots + a_1p + a_0$, $b(p) = b_m p^m + \dots + b_1p + b_0$ и произвольные полиномы $c(p)$ и $e(p)$ – взаимно простые полиномы, которые могут содержать неизвестные параметры; относительная степень модели системы $\rho = n - m$; полином $b(p)$ гурвицев и параметр $b_m > 0$ (или $b(0) > 0$); неизвестная функция $\varpi(y(t - \tau))$ такая, что

$$|\varpi(y(t - \tau))| \leq C_0 |y(t - \tau)|, \text{ для всех } y(t - \tau), \quad (1.2)$$

где $\tau \geq 0$ – неизвестное постоянное или переменное запаздывание, $y(\vartheta) = \phi(\vartheta)$ – начальные условия $\forall \vartheta \in [-\tau, 0]$ и число C_0 неизвестно; $\delta(t)$ – ограниченное возмущение.

Следует отметить, что числа m и n могут быть неизвестны, и только знание относительной степени $\rho = n - m$ является необходимым.

Временное запаздывание используется для описания процессов во многих технических системах, например, для описания временных задержек или приближенного описания систем с высокоразмерными динамическими

моделями. Наиболее полные обзоры по системам с временным запаздыванием могут быть найдены в работах [32, 33]

Запаздывание также возникает при передаче информации по каналам связи, как при передаче управляющих сигналов, так и при получении информации об измерениях текущих состояний объекта управления. Такая особенность характерна для задач телеуправления роботами [34]. Даже для систем без временных задержек запаздывание может быть введено искусственно для выполнения определенных целей. Примером могут служить активные средства виброзащиты [35], рулевые системы для траекторного управления по неустойчивым траекториям [36], и в задачах синтеза законов управления при взаимно удаленном расположении датчиков и органов управления [37].

Процесс резки металла на токарном станке может быть описан с помощью модели (1.1). Изучение подобной модели очень важно также для исследования эффекта регенеративных вибраций и дребезга [38].

Эта проблема является интересной и одновременно сложной, а поиск эффективных решений в этой области является одной из актуальных задач промышленной автоматизации. Важной работой для задач синтеза законов управления для многомерных систем с запаздыванием является [39]. Поскольку рынок достаточно велик, то любое найденное оригинальное решение будет иметь определенный интерес для производителей.

В Главе 2 рассмотрена задача управления движением надводного судна по одному из трех возможных контуров управления [40, 41]: продольная координата, поперечная координата или боковое движение, курс судна, как пример практической задачи, где могли бы эффективно быть применены методы и алгоритмы управления, предлагаемые в настоящей диссертации.

Предлагаемый в диссертационной работе метод основан на принципе пассивации (см. [11, 12, 20]). Закон управления [11] обладает простой структурой, позволяет обеспечить свойство строгой вещественной положительности для передаточной функции замкнутой системы.

В настоящей диссертации известный подход [11, 12, 15, 20] расширяется путем выбора оригинальной схемы адаптивной настройки параметров регулятора для обеспечения лучших показателей качества.

Доказана эффективность предлагаемого метода управления в условиях внешних возмущающих воздействий. Ключевым результатом является доказательство экспоненциальной устойчивости для нелинейной системы без возмущений и устойчивости типа «ограниченный вход – ограниченный выход» для случая ограниченного по амплитуде возмущающего воздействия, которое может быть неизвестно и не доступно для измерения.

1.2 Обзор методов управления в условиях возмущающих воздействий

Задача управления в условиях действия возмущения (внешнего паразитного воздействия) является классической проблемой современной теории систем. На сегодняшний день получено большое число алгоритмов управления при условии действия возмущений (см., например, обзор методов представленных в монографии [24]). Большинство известных подходов связано с косвенной параметризацией возмущений, которая в свою очередь, основана на принципе внутренней модели [24]. При этом методы, использующие принцип внутренней модели, как правило, основываются на гипотезе о возможности представления возмущения как выхода некоторой конечномерной динамической линейной системы.

В Главе 2 представлен алгоритм управления по выходу параметрически и функционально не определенным нелинейным объектом, подверженным влиянию смещенного мультисинусоидального возмущения $\delta(t) = \sigma_0 + \sum_{i=1}^q (\mu_i \sin(\omega_i t) + \nu_i \cos(\omega_i t))$. Развиваются подходы, опубликованные в [11-16]. В [42] дан алгоритм управления линейным устойчивым объектом с известными параметрами, подверженным влиянию смещенного гармонического возмущения. Был предложен закон управления

размерности $(2n+6)$. Алгоритм синтеза наблюдателя сложен в реализации и для его построения требуется много вычислений, а также знание нижней границы параметра ω . В развитие подхода [42] в [43] предлагается регулятор размерности $(n+4)$, имеющий более простую структуру (в сравнении с [42]) и не предусматривающий при своем построении знания нижней границы параметра ω . К основным недостаткам результатов, опубликованных в [42, 43] следует отнести их распространение на линейные параметрически определенные объекты. Алгоритмы компенсации гармонических возмущающих воздействий для параметрически не определенных объектов можно, например, найти в монографии [28] и статьях [44, 45]. В [46-49] решена задача для объекта управления с возмущением, действующим на выход объекта. В работах [24, 50] рассмотрены задачи стабилизации нелинейных систем с компенсацией возмущающих воздействий. В [31, 51-55] решена задача компенсации смещенного гармонического возмущения для линейных объектов с запаздыванием в канале управления, причем в [31, 51] рассмотрены неустойчивые объекты. В [24] с использованием итеративных процедур синтеза была решена задача компенсации возмущающего воздействия для параметрически не определенного минимально фазового объекта. К сожалению, подход, опубликованный в [24], предусматривает параметризацию не только возмущения, но и объекта управления, что влечет за собой увеличение размерности регулятора. Параметризации объекта удалось избежать в [56-58]. Однако регулятор, предложенный в [56], обеспечивает только сходимости к нулю выходной переменной объекта, но не асимптотическую устойчивость его нулевого положения равновесия. Последнее, в свою очередь, в ряде случаев может оказаться неприемлемым. В [57] данный недостаток был устранен. Однако подходы [24, 56, 57] ориентированы на компенсацию гармонических возмущающих воздействий для линейных объектов, и остается открытым вопрос о возможности их распространения на нелинейные объекты и мультисинусоидальные

возмущающие воздействия. Ответ на этот вопрос постараемся дать в этой диссертационной работе.

Как уже было отмечено, в настоящее время большинство исследований, посвященных разработке методов компенсации гармонических возмущений, рассматривают случай, когда амплитуды, фазы и частоты являются неизвестными постоянными параметрами (см., например, [59]). Далее начинаются вариации, связанные с допущениями относительно самого объекта, а именно: линейностью или нелинейностью динамики, параметрической определенностью или ее отсутствием, доступностью измерений всех переменных состояния или только их части и прочее.

Проблема возмущающих воздействий, присутствующих в канале измерения, часто встречается на практике. Например, такая проблема весьма актуальна для систем динамического позиционирования надводного судна в точке. Волновые возмущения являются причиной качки судна. Антенна глобальной системы позиционирования GPS, используемая для измерения географических координат судна, как правило, размещается как можно выше для лучшего приема. Из-за качки антенна может перемещаться в радиусе 2-3 метров, в то время как фактические координаты судна (долгота и широта) изменяются в пределах нескольких сантиметров. Известные подходы для решения такой задачи были получены в работах [46-49].

Наиболее сложной задачей до сих пор остается задача робастного управления по выходу многомерными системами [60-64], содержащими параметрические и функциональные неопределенности, с компенсацией возмущающих воздействий.

1.3 Обобщенная постановка задачи

Рассматривается объект управления с несколькими регулируемыми переменными и несколькими управляющими воздействиями. Математическая модель, описывающая поведение объекта, имеет вид

$$\dot{x}(t) = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i(t) + d(x)\delta(t), \quad (1.1)$$

$$y_j(t) = h_j(x), \quad (1.2)$$

где $x \in \mathbb{R}^n$ – переменные состояния, $y \in \mathbb{R}^l$ – измеряемые и регулируемые выходные переменные, $u \in \mathbb{R}^m$ – управляющие воздействия, $m \geq l$, $f(x)$, $g(x)$, $h(x)$, $d(x)$ – гладкие нелинейные функции, которые могут содержать неизвестные параметры, $\delta \in \mathbb{R}$, $\delta \in \mathcal{L}_\infty$ – неизмеряемое ограниченное возмущающее воздействие.

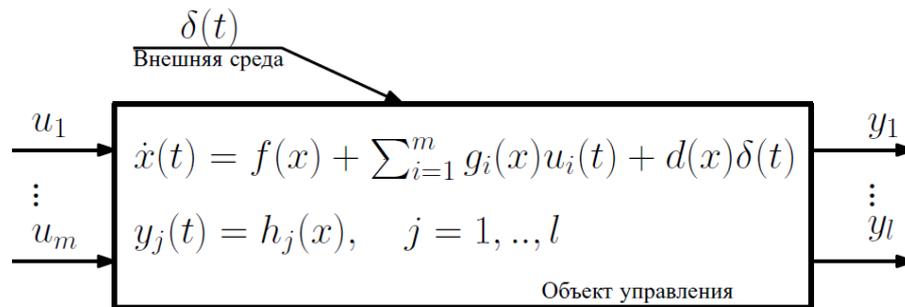


Рисунок 1.1 – Структурная схема математической модели объекта управления вида (1.1), (1.2)

Рассмотрим ряд допущений, относительно системы вида (1.1), (1.2).

Допущение 1. Пусть объект управления такой, что модель (1.1), (1.2) может быть декомпозирована на l независимых друг от друга динамических подсистем с одним входом и одним выходом.

$$y = H(Y), \quad (1.3)$$

$$Y_j(t) = F_j\{U_j(t), \delta_j(t)\},$$

$$U = G(u), \quad (1.5)$$

где $H(\cdot): \mathbb{R}^l \rightarrow \mathbb{R}^l$ и $G(\cdot): \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^l$ – гладкие сюръективные¹ отображения, не зависящие от времени, $F_j\{\cdot\}: \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}^1$, $j = 1, \dots, l$ – динамические подсистемы с одним входом и одним выходом:

$$\dot{x}_j(t) = f_j(x_j) + g_1(x_j)U_j + d_j(x)\delta_j(t), \quad (1.6)$$

$$Y_j(t) = h_j(x_j), \quad (1.7)$$

где $x \in \mathbb{R}^{n_j}$ – переменные состояния, $n_j \leq n$, $Y_j \in \mathbb{R}$ – выходные переменные скалярных подсистем, $U_j \in \mathbb{R}$ – управляющие воздействия скалярных подсистем, $f_j(x_j)$, $g_j(x_j)$, $h_j(x_j)$, $d_j(x_j)$ – гладкие нелинейные функции, которые могут содержать неизвестные параметры, $\delta_j \in \mathbb{R} \in \mathcal{L}_\infty$ – неизмеряемое ограниченное возмущающее воздействие.

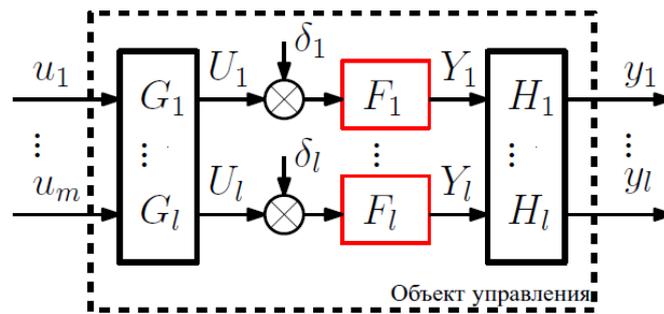


Рисунок 1.2 – Структурная схема декомпозированной математической модели объекта управления вида (1.3)-(1.7)

Допущение 2. Пусть модель скалярных подсистем (1.6), (1.7) может быть представима в виде нелинейной системы Лурье [25]:

$$a_j(p)Y_j(t) = b_{j1}(p)U_j(t) + b_{j2}(p)\varpi_j(Y_j) + b_{j3}(p)\delta_j(t), \quad (1.74)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования, полиномы $a_j(p)$, $b_{j1}(p)$, $b_{j2}(p)$, $b_{j3}(p)$ могут содержать неизвестные параметры, передаточная функция $\frac{b_{j1}(p)}{a(p)}$ имеет относительную степень ρ для всех $j = 1, \dots, l$, которая полагается

¹ Отображение множества X на множество Y ($f: X \rightarrow Y$), при котором каждый элемент множества Y соответствует хотя бы одному элементу множества X , то есть $\forall y \in Y \exists x \in X: y = f(x)$.

известной; полином $b_{j_1}(p)$ гурвицев и параметр $b_{j_1}(0) > 0$; неизвестные компоненты возмущающих воздействий $\delta_j(t)$ описывают внешние возмущения в каждом канале, нелинейная функция удовлетворяет секторному ограничению

$$|\varpi_j(Y_j)| \leq C_{j_1}|Y_j| + C_{j_2}|Y_j|^{a_j}, a_j \in \mathbb{N} \quad (1.8)$$

где числа C_{j_1} и C_{j_2} могут быть неизвестны.

Далее рассмотрим две задачи для диссертационного исследования.

Задача 1.

Пусть объект управления (1.1), (1.2) имеет одну регулируемую переменную $l = 1$ и одно управляющее воздействие $m = 1$. Тогда всегда справедливо допущение 1. Пусть дополнительно выполняется допущение 2.

Требуется синтезировать алгоритм управления u , обеспечивающий устойчивость замкнутой системы и выполнение целевых условий

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - y^*(t)| \leq \epsilon, \quad (1.9)$$

где $y^*(t)$ – желаемое значение регулируемой переменной, ϵ – максимальное значение установившейся ошибки управления, задаваемые разработчиком.

В Главе 2 представлено решение задачи 1.

Задача 2.

Пусть для объекта управления (1.1), (1.2) выполнены допущения 1 и 2 при $m \geq l \geq 1$. Дополнительно допускается, что существуют отображения \bar{H} и \bar{G} такие, что $H(\bar{H}(z)) = z$ и $G(\bar{G}(\zeta)) = \zeta$.

Требуется синтезировать алгоритмы управления u_i , $i = 1, \dots, m$, обеспечивающие устойчивость замкнутой системы и выполнение целевых условий

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_j(t) - y_j^*(t)| \leq \epsilon_j, j = 1, \dots, l \quad (1.10)$$

где $y_j^*(t)$ – желаемые значения регулируемых переменных, ϵ_j – максимальные значения установившихся ошибок управления, задаваемые

разработчиком.

В Главе 3 представлено решение задачи 2. В качестве примера рассмотрена задача управления движением надводного судна в режиме динамического позиционирования в точке. Представлен общий алгоритм поиска обратных отображений \bar{H} и \bar{G} для различных H и G .

В Главе 4 представлены результаты экспериментальных исследований разработанных методов и алгоритмов управления рассмотренным классом многомерных нелинейных систем на специально изготовленном роботизированном макете надводного водоизмещающего судна.

ГЛАВА 2

АЛГОРИТМЫ РОБАСТНОГО И АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ

В Главе представлено решение Задачи 1: разработан метод адаптивного и робастного управления по выходу нелинейными системами, математическая модель которых может содержать параметрические и функциональные неопределенности.

2.1 Алгоритм робастного управления по выходу

Рассмотрим модель объекта управления вида (1.1), (1.2) с одной регулируемой переменной $l = 1$ и одним управляющим воздействием $m = 1$. Пусть выполняется допущение 2. Тогда модель объекта управления представима в виде:

$$a(p)y(t) = b_1(p)u(t) + b_2\varpi(y(t)) + b_3(p)\delta(t), \quad (2.1)$$

где вектор $x(t)$ недоступен для измерения, параметры матриц A , B_1 , B_2 и C могут быть заранее неизвестны, но предполагается, что объект управления минимально-фазовый, вид нелинейной функции не определен, но известно, что она удовлетворяет ограничению вида

$$|\varpi(y)| \leq C_1|y| + C_2|y|^a, \quad a \in \mathbb{N}. \quad (2.2)$$

Ставится задача синтеза такого закона управления u по измерению выходной переменной y , который обеспечивает выполнение целевого условия (1.9) Запишем модель (2.1) в виде

$$y(t) = \left[\frac{b_1(p)}{a(p)} \right] u(t) + \left[\frac{b_2(p)}{a(p)} \right] \varpi(y(t)) + \left[\frac{b_3(p)}{a(p)} \right] \delta(t), \quad (2.3)$$

где дробно-рациональные передаточные функции означают дифференциально-интегральные преобразования. Согласно Допущению 2 полином $b_1(p)$ гурвицев. Будем использовать выражение (2.3), чтобы нагляднее продемонстрировать метод синтеза закона управления для стабилизации замкнутой системы на основе пассивации.

2.1.1 Обеспечение устойчивости типа «ограниченный вход – ограниченный выход»

В этом разделе рассмотрена проблема абсолютной устойчивости для систем с параметрическими и функциональными неопределенностями, которые могут быть представлены в виде соединения линейной динамической системы с неизвестными параметрами и неопределенной нелинейности в обратной связи, удовлетворяющей секторному ограничению (2.2). Будем допускать в этом разделе $C_2 = 0$ для (2.2).

Основной целью управления в этом разделе является обеспечение экспоненциальной устойчивости замкнутой системы при отсутствии возмущающего воздействия и устойчивость типа «ограниченный вход – ограниченный выход» для возмущенных систем (также используется термин L_∞ -устойчивость). Для вывода основного результата, начнем с более простого случая. Пусть система (2.3) будет такой, что передаточная функция $\frac{b_1(p)}{a(p)}$ имеет относительную степень $\rho = 1$ и полином $b_1(p)$ является гурвицевым. Выберем закон управления следующего вида:

$$u(t) = -ky(t) + v(t), \quad (2.4)$$

где $v(t)$ – дополнительный вход и параметр $k > 0$.

Л е м м а 1 [11, 12]. Существует такое положительное число k_0 , что для всех $k \geq k_0$ система $y(t) = \frac{b_1(p)}{a(p)+kb_1(p)}v(t) + \frac{b_2(p)}{a(p)+kb_1(p)}\varpi(t)$ имеет СВП (строго-вещественно-положительную) передаточную функцию

$$H(p) = \frac{b_1(p)}{a(p)+kb_1(p)}. \quad (2.5)$$

Пусть $\rho > 1$ и доступны для измерения производные выходной переменной $y(t)$. Выберем закон управления следующего вида

$$u(t) = \alpha(p)\bar{u}(t), \quad (2.6)$$

где полином $\alpha(p)$ степени $\rho - 1$ гурвицев, и $\bar{u}(t)$ – дополнительная

управляющая переменная. Перепишем модель (2.3) в виде:

$$y(t) = \frac{b_1(p)\alpha(p)}{a(p)} \bar{u}(t) + \frac{b_2(p)}{a(p)} \varpi(t) + \frac{b_3(p)}{a(p)} \delta(t), \quad (2.7)$$

где полином $b_1(p)\alpha(p)$ гурвицев и относительная степень передаточной функции $\frac{b_1(p)\alpha(p)}{a(p)}$ равна $\rho = 1$. Выберем $\bar{u}(t)$ согласно уравнению (2.4)

$$\bar{u}(t) = -ky(t) + v(t). \quad (2.8)$$

Подставляя (2.8) в уравнение (2.7), найдем модель замкнутой системы

$$y(t) = \frac{b_1(p)\alpha(p)}{a(p)+kb_1(p)\alpha(p)} v(t) + \frac{b_2(p)}{a(p)+kb_1(p)\alpha(p)} \varpi(t) + \frac{b_3(p)}{a(p)+kb_1(p)\alpha(p)} \delta(t). \quad (2.9)$$

Тогда используя *Лемму 1* и $k \geq k_0 > 0$, нетрудно увидеть, что передаточная функция

$$W(p) = \frac{b_1(p)\alpha(p)}{a(p)+kb_1(p)\alpha(p)} \quad (2.10)$$

обладает свойством СВП. Однако, закон управления вида (2.6), (2.8) не реализуем, так как производные выходной переменной $y(t)$ не доступны для измерения. Выберем закон управления в виде

$$u(t) = -\alpha(p)(k + \kappa)\hat{y}(t), \quad (2.11)$$

где число k и полином $\alpha(p)$ такие, что передаточная функция (2.10) СВП, положительный параметр κ используется для компенсации неопределенностей $\varpi(y(t))$, и функция $\hat{y}(t)$ – наблюдатель выходной переменной $y(t)$. Функция $\hat{y}(t)$ рассчитывается по следующему алгоритму

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma \xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-k_1 \xi_1 - \dots - k_{\rho-1} \xi_{\rho-1} + k_1 y), \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\hat{y} = \xi_1 \quad (2.13)$$

где число $\sigma > k + \kappa$ и параметры k_i выбираются из условия экспоненциальной устойчивости системы (2.12). В отличие от (2.6), (2.8) закон управления (2.11)-(2.13) технически реализуем, так как содержит известные и измеряемые сигналы. Подставляя (2.11) в уравнение (2.3),

получим

$$\begin{aligned}
 y(t) &= \frac{b_1(p)}{a(p)} [-\alpha(p)(k + \kappa)\hat{y}(t)] + \frac{b_2(p)}{a(p)} \varpi(t) + \frac{b_3(p)}{a(p)} \delta(t) \\
 &= \frac{b_1(p)}{a(p)} [-\alpha(p)(k + \kappa)y(t) + \alpha(p)(k + \kappa)\varepsilon(t)] \\
 &\quad + \frac{b_2(p)}{a(p)} \varpi(t) + \frac{b_3(p)}{a(p)} \delta(t)
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

где ошибка $\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t)$. После простых вычислений в (2.14) имеем

$$\begin{aligned}
 (a(p) + k\alpha(p)b_1(p))y(t) &= b_1(p)\alpha(p)[(k + \kappa)\varepsilon(t) - \kappa y(t)] \\
 &\quad + b_2(p)\varpi(t) + b_3(p)\delta(t)
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

и

$$\begin{aligned}
 y(t) &= \frac{b_1(p)\alpha(p)}{a(p) + k\alpha(p)b_1(p)} [-\kappa y(t) + (k + \kappa)\varepsilon(t)] \\
 &\quad + \frac{1}{a(p) + k\alpha(p)b_1(p)} [b_2(p)\varpi(t) + b_3(p)\delta(t)]
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

где передаточная функция $W(p) = \frac{b_1(p)\alpha(p)}{a(p) + k\alpha(p)b_1(p)}$ является СВП (см. уравнение (2.10)). Запишем модель (2.16) в форме вход-состояние-выход

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1(-\kappa y(t) + (k + \kappa)\varepsilon(t)) + B_2\varpi(t) + B_3\delta(t), \tag{2.17}$$

$$y(t) = C^T x(t), \tag{2.18}$$

где $x \in R^n$ – вектор переменных состояния системы (2.17); A , B_1 , B_2 , B_3 и C соответствующие матрицы и векторы при преобразовании модели (2.16) к виду (2.17), (2.18). Так как передаточная функция $W(p)$ СВП, тогда

$$AP + PA = -R, \quad PB_1 = C, \tag{2.19}$$

где $R = R^T$, и параметры матрицы R зависят от k и не зависят от κ .

Перепишем модель (2.12), (2.13) в форме

$$\dot{\xi}(t) = \sigma(\Gamma\xi(t) + dy(t)), \tag{2.20}$$

$$\hat{y}(t) = h^T \xi(t), \tag{2.21}$$

$$\text{где } \Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 & \dots & -k_{p-1} \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ k_1 \end{bmatrix}, \quad \text{и } h = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим вектор

$$\eta(t) = hy(t) - \xi(t), \quad (2.22)$$

тогда в силу структуры вектора h ошибка $\varepsilon(t)$ примет вид

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= y(t) - \hat{y}(t) = h^T hy(t) - h^T \xi(t) \\ &= h^T (hy(t) - \xi(t)) = h^T \eta(t). \end{aligned} \quad (2.23)$$

Для производной $\eta(t)$ найдем следующее выражение

$$\begin{aligned} \dot{\eta}(t) &= h\dot{y}(t) - \sigma(\Gamma(hy(t) - \eta(t)) + dy(t)) \\ &= h\dot{y}(t) + \sigma\Gamma\eta(t) - \sigma(d + \Gamma h)y(t). \end{aligned} \quad (2.24)$$

Так как $d = -\Gamma h$ (может быть проверено подстановкой), тогда

$$\dot{\eta}(t) = h\dot{y}(t) + \sigma\Gamma\eta(t), \quad \varepsilon(t) = h^T \eta(t), \quad (2.25)$$

где матрица Γ гурвицева благодаря выбору параметров k_i в системе (2.12) и

$$\Gamma^T N + N\Gamma = -M, \quad (2.26)$$

где $N = N^T > 0$, $M = M^T > 0$.

Т е о р е м а 1 [1] Рассмотрим нелинейную систему (2.17), (2.18), (2.25). Пусть параметр $\rho \geq 1$ и неизвестная функция $\varpi(t) = \varpi(y(t))$ такая, что

$$|\varpi(y(t))| \leq C_1 |y(t)| \text{ для всех } y(t), \quad (2.27)$$

где число C_1 неизвестно. Для всех $\kappa \geq \kappa_0 > 0$ и $\sigma \geq \sigma_0 > 0$, где κ_0 и σ_0 – некоторые константы, зависящие от параметров модели объекта управления, нелинейная система (2.17), (2.18), (2.25) является экспоненциально устойчивой в смысле нормы

$$\Omega(t) = (|x(t)|^2 + |\eta(t)|^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.28)$$

если возмущение отсутствует $\delta(t) = 0$, иначе система L_∞ -устойчива [15],

т.е., существуют положительные константы $\beta_1, \beta_2, \gamma_1$ такие, что

$$\Omega(t) \leq \beta_1 e^{-\beta_2 t} \Omega(0) + \gamma_1 \sup_{s \in [0, t]} |\delta(s)|. \quad (2.29)$$

Доказательство. Выберем функцию Ляпунова вида

$$V(t) = x^T(t)Px(t) + \eta^T(t)N\eta(t). \quad (2.30)$$

Дифференцирование (2.30) дает

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) &= x^T(t)(A^T P + PA)x(t) - 2\kappa x^T(t)PB_1 y(t) \\
&+ 2(k + \kappa)x^T(t)PB_1 h^T \eta(t) + 2x^T(t)PB_2 \varpi(t) \\
&+ 2x^T(t)PB_3 \delta(t) + \eta^T(t)\sigma(\Gamma^T N + N\Gamma)\eta(t) \\
&+ 2\eta^T(t)NhC^T Ax(t) - 2\kappa\eta^T(t)NhC^T B_1 y(t) \\
&\quad + 2(k + \kappa)\eta^T(t)NhC^T B_1 h^T \eta(t) \\
&\quad + 2\eta^T(t)NhC^T B_2 \varpi(t) + 2\eta^T(t)NhC^T B_3 \delta(t)
\end{aligned} \tag{2.31}$$

Подставляя в (2.31) уравнения (2.19), (2.26) и учитывая неравенства

$$\begin{aligned}
2x^T(t)PB_1 h^T \eta(t) &\leq \psi(x^T(t)PB_1)^2 + \psi^{-1}(\eta^T(t)h)^2, \\
2x^T(t)PB_2 \varpi(t) &\leq \psi(x^T(t)PB_2)^2 + \psi^{-1}[\varpi(t)]^2, \\
2x^T(t)PB_3 \delta(t) &\leq \psi\kappa(x^T(t)PB_3)^2 + \psi^{-1}\kappa^{-1}[\delta(t)]^2, \\
2\eta^T(t)NhC^T Ax(t) &\leq \psi^{-1}\eta^T(t)NhC^T AA^T Ch^T N\eta(t) + \psi x^T(t)x(t), \\
2\eta^T(t)NhC^T B_1 h^T \eta(t) &\leq (\eta^T(t)NhC^T B_1)^2 + (\eta^T(t)h)^2, \\
2\eta^T(t)NhC^T B_2 \varpi(t) &\leq \kappa(\eta^T(t)NhC^T B_2)^2 + \kappa^{-1}[\varpi(t)]^2, \\
2\eta^T(t)NhC^T B_3 \delta(t) &\leq \kappa(\eta^T(t)NhC^T B_3)^2 + \kappa^{-1}[\delta(t)]^2, \\
[\varpi(t)]^2 &\leq C_1^2(x^T(t)PB_1)^2
\end{aligned}$$

где из (2.2) при $C_2 = 0$ имеем $[\varpi(t)]^2 \leq C_1^2 y^2(t)$, получим

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) &\leq -x^T(t)Rx(t) - \sigma\eta^T(t)M\eta(t) \\
&- \kappa x^T(t)PB_1 B_1^T Px(t) + \psi(k + \kappa)x^T(t)PB_1 B_1^T Px(t) \\
&+ \psi^{-1}(k + \kappa)\eta^T(t)hh^T \eta(t) + \psi x^T(t)PB_2 B_2^T Px(t) \\
&+ \psi^{-1}C_1^2(x^T(t)PB_1)^2 + \psi\kappa x^T(t)PB_3 B_3^T Px(t) \\
&+ \psi^{-1}\kappa^{-1}[\delta(t)]^2 + (k + \kappa)\eta^T(t)hh^T \eta(t) \\
&+ (k + \kappa)\eta^T(t)NhC^T B_1 B_1^T Ch^T N\eta(t) \\
&+ \psi^{-1}\eta^T(t)NhC^T AA^T Ch^T N\eta^T(t) \\
&+ \psi x^T(t)x(t) + \kappa\eta^T(t)NhC^T B_2 B_2^T Ch^T N\eta(t) \\
&+ \kappa^{-1}C_1^2(x^T(t)PB_1)^2 + \kappa\eta^T(t)NhC^T B_3 B_3^T Ch^T N\eta(t) \\
&+ \kappa^{-1}[\delta(t)]^2 + \psi^{-1}\kappa\eta^T(t)NhC^T B_1 B_1^T Ch^T N\eta(t) \\
&\quad + \psi\kappa(x^T(t)PB_1)^2
\end{aligned} \tag{2.32}$$

где число $\psi > 0$. Пусть числа $0 < \psi < 0,5$ и $\kappa \geq C_1^2(\psi^{-1} + \kappa^{-1})$ будут такими, что

$$\begin{aligned} -R + \psi I + (\psi(k + 2\kappa) - \kappa + C_1^2(\psi^{-1} + \kappa^{-1}))PB_1B_1^TP \\ + \psi PB_2B_2^TP + \psi \kappa PB_3B_3^TP \leq -Q_1 < 0. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Подставляя (2.33) в неравенство (2.32), получим

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -x^T(t)Q_1x(t) - \sigma\eta^T(t)M\eta(t) \\ &\quad + \psi^{-1}(k + \kappa)\eta^T(t)hh^T\eta(t) \\ &\quad + \psi^{-1}\kappa^{-1}[\delta(t)]^2 + (k + \kappa)\eta^T(t)hh^T\eta(t) \\ &\quad + (k + \kappa)\eta^T(t)NhC^TB_1B_1^TCh^TN\eta(t) \\ &\quad + \psi^{-1}\eta(t)NhC^TAA^TCh^TN\eta^T(t) \\ &\quad + \kappa\eta^T(t)NhC^TB_2B_2^TCh^TN\eta(t) \\ &\quad + \kappa\eta^T(t)NhC^TB_3B_3^TCh^TN\eta(t) + \kappa^{-1}[\delta(t)]^2 \\ &\quad + \psi^{-1}\kappa\eta^T(t)NhC^TB_1B_1^TCh^TN\eta(t). \end{aligned} \quad (2.34)$$

Пусть число σ будет таким, что выполнено следующее соотношение

$$\begin{aligned} -\sigma M + (1 + \psi^{-1})(k + \kappa)hh^T + (k + \kappa)NhC^TB_1B_1^TCh^TN \\ + \psi^{-1}NhC^TAA^TCh^TN + \kappa NhC^TB_2B_2^TCh^TN + \kappa NhC^TB_3B_3^TCh^TN \\ + \psi^{-1}\kappa NhC^TB_1B_1^TCh^TN \leq -Q_2 < 0, \end{aligned} \quad (2.35)$$

или $\sigma \geq \sigma_0$ где $\sigma_0 > 0$ соответствует равенству в (2.35). Подставляя (2.35) в неравенство (2.34), имеем

$$\dot{V}(t) \leq -x^T(t)Q_1x(t) - \eta^T(t)Q_2\eta(t) + \kappa^{-1}C_3[\delta(t)]^2, \quad (2.36)$$

где $C_3 = (1 + \psi^{-1})$. Из выражения (2.36) следует асимптотическая устойчивость системы (2.17), (2.18), (2.25) если возмущение отсутствует [15], иначе все траектории нелинейной системы (2.17), (2.18), (2.25) ограничены и могут быть сведены в произвольно маленькую область путем увеличения κ . Далее показана экспоненциальная устойчивость замкнутой системы без возмущений и устойчивость типа «ограниченный вход – ограниченный выход» для возмущенной системы.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -\lambda_{\min}\{Q_1\}Px(t)P^2 - \lambda_{\min}\{Q_2\}P\eta(t)P^2 + \kappa^{-1}C_3[\delta(t)]^2 \\ &\leq -\gamma_2(|x(t)|^2 + |\eta(t)|^2) + \kappa^{-1}C_3[\delta(t)]^2, \end{aligned} \quad (2.37)$$

где $\gamma_2 = \min\{\lambda_{\min}\{Q_1\}; \lambda_{\min}\{Q_2\}; \kappa\} > 0$, $\lambda_{\min}\{Q_1\}$ и $\lambda_{\min}\{Q_2\}$ – минимальные собственные числа матриц Q_1 и Q_2 .

Из (2.30) имеем

$$V(t) \leq \gamma_3(|x(t)|^2 + |\eta(t)|^2), \quad (2.38)$$

где $\gamma_3 = \max\{\lambda_{\max}\{P\}; \lambda_{\max}\{N\}; \kappa\} > 0$, $\lambda_{\max}\{P\}$ и $\lambda_{\max}\{N\}$ – максимальные собственные числа матриц P и N соответственно. Подстановка (2.38) в (2.37) дает следующее условие

$$\dot{V}(t) \leq -\frac{\gamma_2}{\gamma_3}V(t) + \kappa^{-1}C_3[\delta(t)]^2. \quad (2.39)$$

Таким образом, система (2.17), (2.18), (2.25) экспоненциально устойчива при отсутствии возмущений $\delta(t) = 0$, иначе, записав решение дифференциального неравенства, нетрудно получить искомое свойство L_∞ -устойчивости.

2.1.2 Компенсация возмущающих воздействий по принципу внутренней модели

В этом разделе решена задача синтеза закона управления для класса нелинейных систем с мультисинусоидальным возмущающим воздействием. Предполагается, что линейная часть математической модели параметрически не определена, но известно, что передаточная функция линейной части является минимально-фазовой. Нелинейная часть удовлетворяет известному ограничению специального не секторного вида. Синтезируется закон управления, гарантирующий полуглобальную устойчивость и содержащий схему компенсации мультисинусоидальных воздействий. Развивая результаты, представленные в [22-25], в этом разделе решена задача управления нелинейной системой по выходу (также как и в [23, 48]), параметры линейной части неизвестны, и передаточная функция имеет произвольную относительную степень (в отличие от [23, 48]). Также предполагается, что нелинейная часть математической модели не известна точно, может не удовлетворять секторным ограничениям (в отличие от [23])

и результата, представленного в предыдущем разделе. Целью является синтез такого закона управления, который гарантирует полуглобальную устойчивость замкнутой возмущенной системы. Допускается, что частоты мультисинусоидального возмущения известны.

Д о п у щ е н и е 3. Будем допускать, что возмущающее воздействие имеет вид

$$\delta(t) = \sigma_0 + \sum_{i=1}^q (\mu_i \sin(\omega_i t) + \nu_i \cos(\omega_i t)), \quad (2.40)$$

где σ_0 , μ_i и ν_i – неизвестные постоянные константы, ω_i – неизвестная частота i -ой гармоники.

Д о п у щ е н и е 4 Частоты $\omega_i, \forall i$ и относительная степень ρ известны.

Рассмотрим нелинейную систему вида (2.3) с нелинейной частью вида (2.2), где числа C_1 , C_2 и $a > 1$ неизвестны, а возмущающее воздействие $\delta(t)$ определено в (2.40). Целью является синтез закона управления, гарантирующего полуглобальную устойчивость положения равновесия $y = 0$ в системе (2.3) с учетом следующих допущений.

Выберем закон управления $u(t)$ вида

$$u(t) = -(k + \kappa) \frac{\alpha(p)(p+1)^{2q+1}}{\gamma(p)} \hat{y}(t), \quad (2.41)$$

где $\gamma(p) = p(p^2 + \omega_1^2)(p^2 + \omega_2^2) \dots (p^2 + \omega_q^2)$, гурвицев полином $\alpha(p)$ степени $(\rho - 1)$ и постоянная $k > 0$ такие, что передаточная функция

$$H(p) = \frac{\alpha(p)b_1(p)(p+1)^{2q+1}}{a(p)\gamma(p) + k\alpha(p)b_1(p)(p+1)^{2q+1}}$$

является СВП, $\kappa > 0$ выбирается с целью компенсации неопределенной нелинейности ϖ . Функция $\hat{y}(t)$ рассчитывается по следующему алгоритму

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma \xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-k_1 \xi_1 - \dots - k_{\rho-1} \xi_{\rho-1} + k_1 y), \end{cases} \quad (2.42)$$

$$\hat{y} = \xi_1 \quad (2.43)$$

где число $\sigma > k + \kappa$, и параметры k_i выбираются из условия экспоненциальной устойчивости системы (2.42).

Закон управления (2.41)-(2.43) технически реализуем, так как содержит только известные и измеряемые сигналы. Подстановка (2.41) в уравнение (2.43), получим

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{b_1(p)}{a(p)} \left[-\frac{\alpha(p)(p+1)^{2l+1}}{\gamma(p)} (k + \kappa) \hat{y}(t) \right] + \frac{b_2(p)}{a(p)} \varpi(y, t) + \frac{b_3(p)}{a(p)} \delta(t) \\ &= -\frac{b_1(p)}{a(p)} \frac{\alpha(p)(p+1)^{2q+1}}{\gamma(p)} (k + \kappa) [y(t) - \varepsilon(t)] \\ &\quad + \frac{b_2(p)}{a(p)} \varpi(y, t) + \frac{b_3(p)}{a(p)} \delta(t) \end{aligned} \quad (2.41)$$

где ошибка $\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t)$. После простых преобразований имеем для модели (2.44)

$$\begin{aligned} (a(p)\gamma(p) + k\alpha(p)b_1(p)(p+1)^{2q+1})y(t) &= \\ b_1(p)\alpha(p)(p+1)^{2q+1}[(k + \kappa)\varepsilon(t) - \kappa y(t)] &+ \\ + b_2(p)\gamma(p)\varpi(y, t) + b_3(p)\gamma(p)\delta(t) & \end{aligned} \quad (2.45)$$

и

$$\begin{aligned} y(t) &= W(p)[- \kappa y(t) + (k + \kappa)\varepsilon(t)] \\ &+ \frac{b_2(p)\gamma(p)}{a(p)\gamma(p) + k\alpha(p)b_1(p)(p+1)^{2q+1}} \varpi(y, t) \\ &+ \frac{b_3(p)\gamma(p)}{a(p)\gamma(p) + k\alpha(p)b_1(p)(p+1)^{2q+1}} \delta(t) \end{aligned} \quad (2.46)$$

где передаточная функция $W(p) = \frac{b_1(p)\alpha(p)(p+1)^{2q+1}}{a(p)\gamma(p) + k\alpha(p)b_1(p)(p+1)^{2q+1}}$ СВП. Так как корни полинома $\gamma(p)$ соответствуют частотам $\delta(t)$ нетрудно показать, что последний член (2.46) равен нулю в силу $\gamma(p)\delta(t) = 0$. Представим модель (2.46) в форме

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1(-\kappa y(t) + (k + \kappa)\varepsilon(t)) + B_2\varpi(y, t) \quad (2.47)$$

$$y(t) = C^T x(t) \quad (2.48)$$

где $x \in \mathbb{R}^n$ – вектор переменных состояния; A , B_1 , B_2 и C соответствующие матрицы и векторы при преобразовании модели (2.46) к виду (2.47), (2.48).

Так как передаточная функция $W(p)$ СВП, то существует такая матрица $P = P^T > 0$, что выполнено два матричных условия

$$A^T P + PA = -R, \quad PB_1 = C, \quad (2.49)$$

где $R = R^T$ и параметры матрицы R зависят от k и не зависят от κ .

Перепишем модель (2.42), (2.43) в форме

$$\dot{\xi}(t) = \sigma(\Gamma\xi(t) + dy(t)), \quad (2.50)$$

$$\hat{y}(t) = h^T \xi(t), \quad (2.51)$$

где $\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 & \dots & -k_{\rho-1} \end{bmatrix}$, $d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ k_1 \end{bmatrix}$, и $h = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$.

Рассмотрим вектор

$$\eta(t) = hy(t) - \xi(t), \quad (2.52)$$

тогда для производной $\eta(t)$ получим выражение (2.25), где для матрицы Γ справедливо неравенство (2.26)

Т е о р е м а 2 Для любых $k > 0$ и $X > 0$ существуют числа $\kappa > 0$ и $\sigma > k + \kappa$ такие, что система (2.47), (2.48), (2.25) асимптотически устойчива для любых начальных условий x_0 , удовлетворяющих $|x_0| \leq X$, в смысле нормы

$$(|x(t)|^2 + |\eta(t)|^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.54)$$

Доказательство. Рассмотрим функцию Ляпунова

$$V(t) = x^T(t)Px(t) + \eta^T(t)N\eta(t). \quad (2.55)$$

Дифференцирование (2.54) дает

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= x^T(t)(A^T P + PA)x(t) - 2\kappa x^T(t)PB_1y(t) \\ &+ 2(k + \kappa)x^T(t)PB_1h^T\eta(t) + 2x^T(t)PB_2\varpi(y, t) \\ &+ \eta^T(t)\sigma(\Gamma^T N + N\Gamma)\eta(t) + 2\eta^T(t)NhC^T Ax(t) \\ &+ 2(k + \kappa)\eta^T(t)NhC^T B_1h^T\eta(t) \\ &+ 2\eta^T(t)NhC^T B_2\varpi(y, t) - 2\kappa\eta^T(t)NhC^T B_1y(t). \end{aligned} \quad (2.56)$$

Подставляя в (2.56) уравнения (2.49), (2.26) и учитывая неравенства

$$\begin{aligned}
2x^T(t)PB_1h^T\eta(t) &\leq \psi_1x^T(t)PB_1B_1^TPx(t) + \psi_1^{-1}\eta^T(t)hh^T\eta(t), \\
2x^T(t)PB_2\varpi(y,t) &\leq \psi_1x^T(t)PB_2B_2^TPx(t) + \psi_1^{-1}[\varpi(y,t)]^2, \\
2\eta^T(t)NhC^TB_1h^T\eta(t) &\leq \eta^T(t)Nhc^TB_1B_1^TCh^TN\eta(t) + \eta^T(t)hh^T\eta(t), \\
2\eta^T(t)NhC^TAx(t) &\leq \psi_1^{-1}\eta(t)NhC^TAA^Tch^TN\eta^T(t) + \psi_1x^T(t)x(t), \\
2\eta^T(t)Nhc^TB_2\varpi(y,t) &\leq \kappa\eta^T(t)NhB_2^TB_2B_2^TCh^TN\eta(t) + \kappa^{-1}[\varpi(y,t)]^2 \\
-2\kappa\eta^T(t)NhC^TB_1y(t) &\leq \psi_1^{-1}\kappa\eta^T(t)NhC^TB_1B_1^TCh^TN\eta(t) \\
&\quad + \psi_1\kappa x^T(t)PB_1B_1^TPx(t)
\end{aligned} \tag{2.57}$$

получим

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) &\leq -x^T(t)Rx(t) - \sigma\eta^T(t)M\eta(t) - 2\kappa y^2(t) \\
&\quad - \kappa x^T(t)PB_1B_1^TPx(t) + \psi_1(k + \kappa)x^T(t)PB_1B_1^TPx(t) \\
&\quad + \psi_1^{-1}(k + \kappa)\eta^T(t)hh^T\eta(t) + \psi_1x^T(t)PB_2B_2^TPx(t) \\
&\quad + \psi_1^{-1}[\varpi(y,t)]^2 + (k + \kappa)\eta^T(t)NhC^TB_1B_1^TB_2h^TN\eta(t) \\
&\quad + (k + \kappa)\eta^T(t)hh^T\eta(t) + \psi_1^{-1}\eta(t)NhC^TAA^TCh^TN\eta^T(t) \\
&\quad + \psi_1x^T(t)x(t) + \kappa\eta^T(t)NhC^TB_2B_2^TCh^TN\eta(t) \\
&\quad + \kappa^{-1}[\varpi(y,t)]^2 + \psi_1^{-1}\kappa\eta^T(t)NhC^TB_1B_1^TCh^TN\eta(t) \\
&\quad + \psi_1\kappa x^T(t)PB_1B_1^TPx(t),
\end{aligned} \tag{2.58}$$

где число $\psi_1 > 0$. Пусть число $0 < \psi_1 < 0,5$ такое, что

$$-R + \psi_1I + (\psi_1k + 2\psi_1\kappa - \kappa)PB_1B_1^TP + \psi_1PB_2B_2^TP \leq -Q_1 < 0. \tag{2.59}$$

Подставляя (2.59) в неравенство (2.58), найдем

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) &\leq -x^T(t)Q_1x(t) - \sigma\eta^T(t)M\eta(t) - 2\kappa y^2(t) \\
&\quad + \psi_1^{-1}(k + \kappa)\eta^T(t)hh^T\eta(t) \\
&\quad + \psi_1^{-1}[\varpi(y,t)]^2 + (k + \kappa)\eta^T(t)NhC^TB_1B_1^TCh^TN\eta(t) \\
&\quad + (k + \kappa)\eta^T(t)hh^T\eta(t) + \psi_1^{-1}\eta(t)NhC^TAA^TCh^TN\eta^T(t) \\
&\quad + \kappa\eta^T(t)NhC^TB_2B_2^TCh^TN\eta(t) \\
&\quad + \kappa^{-1}[\varpi(y,t)]^2 + \psi_1^{-1}\kappa\eta^T(t)NhC^TB_1B_1^TCh^TN\eta(t).
\end{aligned} \tag{2.60}$$

Пусть число σ будет таким, что будет выполнено соотношение

$$\begin{aligned}
-\sigma M + \psi_1^{-1}(k + \kappa)hh^T + (k + \kappa)NhC^TB_1B_1^TCh^TN \\
+ \kappa NhC^TB_2B_2^TCh^TN + \psi_1^{-1}\kappa NhC^TB_1B_1^TCh^TN \leq -Q_2.
\end{aligned} \tag{2.61}$$

Подстановка (2.61) в неравенство (2.60) дает

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -x^T(t)Q_1x(t) - \eta^T(t)Q_2\eta(t) - 2\kappa y^2(t) \\ &\quad + (\psi_1^{-1} + \kappa^{-1})[\varpi(y, t)]^2, \end{aligned} \quad (2.62)$$

где с учетом (2.2) и использованием неравенства Юнга имеем

$$\begin{aligned} [\varpi(y, t)]^2 &\leq C_1^2|y(t)|^2 + 2C_1C_2|y(t)||y(t)|^a + C_2^2|y(t)|^{2a} \\ &\leq (C_1^2 + C_1^2C_2^2)|y|^2 + (1 + C_2^2)|y|^{2a} \end{aligned} \quad (2.63)$$

и

$$\begin{aligned} &(\psi_1^{-1} + \kappa^{-1})(1 + C_2^2)|y||y|^{2a-1} \\ &\leq \psi_2(\psi_1^{-1} + \kappa^{-1})^2(1 + C_2^2)^2|y|^2 + \psi_2^{-1}|y|^{4a-2}. \end{aligned} \quad (2.64)$$

Следовательно, неравенство (2.62) может быть переписано в виде

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -\lambda_0 V(t) - 2\kappa y^2(t) + \psi_2^{-1}|y|^{4a-2} \\ &(\psi_1^{-1} + \kappa^{-1})[C_1^2 + C_1^2C_2^2 + \psi_2(\psi_1^{-1} + \kappa^{-1})^2(1 + C_2^2)^2]|y(t)|^2, \end{aligned} \quad (2.65)$$

где числа $\lambda_0 > 0$ и $\psi_0 > 0$. Можно показать, что существует такое число κ_0 , что для всех $\kappa \geq \kappa_0$ справедливо неравенство

$$2\kappa \geq (\psi_1^{-1} + \kappa^{-1})[C_1^2 + C_1^2C_2^2 + \psi_2(\psi_1^{-1} + \kappa^{-1})^2(1 + C_2^2)^2]. \quad (2.66)$$

Тогда имеем

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -\lambda_0 V(t) + \psi_2^{-1}y^{4s-2}(t) \\ &\leq -\lambda_0 V(t) + \psi_2^{-1}\lambda_1(x^T(t)Px(t))^{2s-1} \\ &\leq -\lambda_0 V(t) + \psi_2^{-1}\lambda_1 V^{2s-1}(t) \\ &\leq -V(t)(\lambda_0 + \psi_2^{-1}\lambda_1 V^{2s-2}(t)) \end{aligned} \quad (2.67)$$

где число $\lambda_1 > 0$ такое, что

$$\lambda_1(x^T(t)Px(t))^{2s-1} \geq (C^T x(t))^{4s-2} = y^{4s-2}(t). \quad (2.68)$$

Выбирая число $\psi_0 > \lambda_0^{-1}\lambda_1 V^{2s-2}(t_0)$ в неравенстве (2.67), получим

$$\dot{V}(t) < -\lambda_0 V(t) \left(1 - \frac{V^{2s-2}(t)}{V^{2s-2}(t_0)}\right) < 0, \quad \forall t \geq t_0. \quad (2.69)$$

В итоге из (2.69) следует асимптотическая устойчивость системы (2.47), (2.48), (2.25).

2.2 Алгоритм адаптивного управления движением роботизированного макета надводного судна

2.2.1 Модификация алгоритма робастного управления

Выберем закон управления в новой форме [2]:

$$u(t) = -\alpha(p) [k(t)\hat{y}(t)], \quad (2.70)$$

$$\dot{k}(t) = \gamma_k \hat{y}^2(t), \quad k(0) > 0, \quad (2.71)$$

где $u(t)$ – управление; $k(t)$ – настраиваемый параметр, $\gamma_k > 0$ – положительный коэффициент. Переменная $\hat{y}(t)$ – оценка функции $y(t)$, которая определяется следующим образом:

$$\hat{y}(t) = h^T \xi(t), \quad (2.72)$$

$$\dot{\xi}(t) = \Gamma_\sigma \xi(t) + d_\sigma y(t), \quad (2.73)$$

где

$$\Gamma_\sigma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -k_1 \sigma^{\rho-1} & -k_2 \sigma^{\rho-2} & \cdots & -k_{\rho-1} \sigma \end{bmatrix}, \quad d_\sigma = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_1 \sigma^{\rho-1} \end{bmatrix}, \quad h = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

где коэффициенты $k_i, i = \overline{1, (\rho-1)}$ выбраны из условия гурвицевости матрицы Γ_σ при $\sigma = 1$, алгоритм настройки для параметра σ будет определен позднее.

Замечание 1. Заметим, что характеристический полином матрицы Γ_σ при $\sigma = 1$ имеет вид:

$$D(p) = p^{\rho-1} + k_{\rho-1} p^{\rho-2} + \cdots + k_2 p + k_1, \quad (2.74)$$

что означает, что выбор коэффициентов $k_i, i = \overline{1, (\rho-1)}$ может быть произведен из условия гурвицевости полинома (2.74).

Перейдем к новому базису системы (2.72), (2.73):

$$\bar{\xi}(t) = T \xi(t), \quad (2.75)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma^{-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma^{-(\rho-2)} \end{bmatrix}. \quad (2.76)$$

Рассмотрим вектор рассогласования:

$$\eta(t) = h y(t) - \bar{\xi}(t). \quad (2.77)$$

Пусть параметр σ будет настраиваться в соответствии с алгоритмом:

$$\dot{\sigma}(t) = \gamma_\sigma \eta^T(t)\eta(t). \quad (2.78)$$

с некоторым положительным коэффициентом $\gamma_\sigma > 0$. Кроме того, $\sigma(0) \geq 1$.

Для того чтобы сформировать виртуальный сигнал управления, необходимо иметь $\rho - 1$ производных по времени от функции $k(t)\hat{y}(t)$. Из (2.72) и (2.73) видно, что в силу структуры матрицы Γ_σ для измерения доступны все производные функции $\hat{y}(t)$ вплоть до порядка $\rho - 1$. Причем переменные ξ_i соответствуют производным $\hat{y}^{(i-1)}(t)$, а производная $\hat{y}^{(\rho-1)}(t)$ тождественно равна функции $\dot{\xi}_{\rho-1}$, которая также доступна для формирования закона управления.

Продифференцировав $k(t)\hat{y}(t)$ последовательно $\rho - 1$ раз и с учетом (2.71)-(2.73) получим:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(k(t)\hat{y}(t)) &= \dot{k}(t)\hat{y}(t) + k(t)\dot{\hat{y}}(t) = \gamma_k \hat{y}^3(t) + k(t)\dot{\hat{y}}(t) = \\ &= \gamma_k \xi_1^3(t) + k(t)\xi_2(t), \end{aligned} \quad (2.79)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2}(k(t)\hat{y}(t)) &= 3\gamma_k \xi_1^2(t)\xi_2(t) + \gamma_k \xi_1^2(t)\xi_2(t) + k(t)\xi_3(t) = \\ &= 4\gamma_k \xi_1^2(t)\xi_2(t) + k(t)\xi_3(t), \end{aligned} \quad (2.80)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^3}{dt^3}(k(t)\hat{y}(t)) &= 8\gamma_k \xi_1(t)\xi_2(t) + 4\gamma_k \xi_1^2(t)\xi_3(t) + \\ &+ \gamma_k \xi_1^2(t)\xi_3(t) + k(t)\xi_4(t) = \\ &= 8\gamma_k \xi_1(t)\xi_2(t) + 5\gamma_k \xi_1^2(t)\xi_3(t) + k(t)\xi_4(t), \end{aligned} \quad (2.81)$$

и так далее вплоть до порядка $(\rho - 1)$.

Нетрудно видеть, что расчет закона управления в виде (2.70) возможен благодаря структуре (2.71)–(2.73). В общем виде формула для производной порядка $(\rho - 1)$ от функции $k(t)\hat{y}(t)$ будет представлять собой нелинейную комбинацию переменных вектора $\xi(t)$ и параметра $k(t)$.

2.3 Числовой пример

Рассмотрим модель движения надводного водоизмещающего судна, позволяющую описывать движение в продольном и поперечном направлениях или движение по курсу (модель Номото 1-го порядка) [40, 41]:

$$\dot{y}(t) = -\frac{\varpi_0}{T} \dot{y} + \frac{k_u}{T} u(t) + \delta(t), \quad (2.82)$$

где $y(t)$ – регулируемая переменная относительно начальной точки $y(0)$, управляющее воздействие u в модели (2.82) – проекция суммарного упора (результатирующей силы или момента), развиваемого исполнительными органами управления, на направление движения, определяемого координатой y , T – постоянная времени, ϖ_0 и k_0 – коэффициенты передачи от демпфирующей силы и проекции результирующего упора, развиваемого органами управления, $\delta(t)$ – обобщенное возмущающее воздействие (ветер, течение, волновое воздействие), оказывающее влияние на движение вдоль координаты y .

Относительная степень объекта $\rho = 2$. Выберем гурвицев характеристический полином матрицы Γ_σ при $\sigma = 1$:

$$D(p) = p + 1. \quad (2.832)$$

В режиме слежения алгоритм (2.11) примет вид

$$u(t) = -\alpha(p)(k + \kappa)\hat{y}(t), \quad (2.84)$$

$$\hat{y}(t) = \xi(t), \quad (2.85)$$

$$\dot{\xi}(t) = -\sigma\xi(t) + \sigma(y(t) - y^*), \quad (2.86)$$

где

$$\Gamma_\sigma = [-\sigma], \quad d_\sigma = [\sigma], \quad h^T = [1]. \quad (2.87)$$

На рисунках 2.1-2.3 представлены результаты моделирования при наличии ограничений на управляющие воздействия $|u(t)| \leq 10$.

Для компенсации возмущающих воздействий рассмотрим модификацию вида (2.41). Пусть возмущающее воздействие в модели (2.82) имеет вид $\delta(t) = \mu_0 + \mu_1 \sin(\omega t + \phi)$, тогда закон управления примет вид

$$u(t) = -\frac{(p+1)^3}{p^3+\omega p} \alpha(p)(k + \kappa)\hat{y}(t), \quad (2.88)$$

На рисунках 2.4, 2.5 представлены результаты моделирования при наличии ограничений на управляющие воздействия $|u(t)| \leq 100$.

Далее рассмотрим адаптивную версию робастного алгоритма управления. Вычислим вспомогательный базис для системы (2.72), (2.73):

$$\bar{\xi}(t) = T\xi(t) = \xi(t). \quad (2.89)$$

Вектор рассогласования может быть рассчитан следующим образом:

$$\eta(t) = hy(t) - \bar{\xi}(t) = y(t) - \xi(t). \quad (2.90)$$

Затем воспользуемся алгоритмами адаптации (2.71) и (2.78) для настройки параметров $k(t)$ и $\sigma(t)$, соответственно, учитывая условия $k(0) > 0$ и $\sigma(0) \geq 1$.

Далее необходимо сформировать закон управления. Продифференцируем функцию $k(t)\hat{y}(t)$ последовательно $\rho - 1$ раз:

$$\begin{aligned} u(t) &= -\alpha(p)[k(t)\hat{y}(t)] = -\frac{d}{dt}[k(t)\hat{y}(t)] - k(t)\hat{y}(t) = \\ &= -\gamma_k \xi^3(t) - k(t)\dot{\xi}(t) - k(t)\hat{y}(t). \end{aligned} \quad (2.91)$$

Для избежания роста функций $k(t)$ и $\sigma(t)$ при малых отклонениях от положения равновесия перепишем законы адаптации (2.71), (2.78) следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{k}(t) = \gamma_k \hat{y}^2(t), & |\hat{y}(t)| \geq \epsilon_i, \quad k(0) > 0, \\ \dot{k}(t) = 0, & |\hat{y}(t)| < \epsilon_i, \end{cases} \quad (2.92)$$

$$\begin{cases} \dot{\sigma}(t) = \gamma_\sigma (y(t) - \xi(t))^2, & |\hat{y}(t)| \geq \epsilon_i, \quad k(0) > 0, \\ \dot{\sigma}(t) = 0, & |\hat{y}(t)| < \epsilon_i, \end{cases} \quad (2.93)$$

На рисунках 2.6-2.8 представлены результаты моделирования алгоритма адаптивного управления без компенсации возмущающего воздействия.

Для компенсации возмущающих воздействий представим модификацию адаптивного алгоритма управления путем включения в контур управления внутренней модели, представленной фильтром $\frac{(p+1)^3}{p^3+\omega p}$.

$$u(t) = -\frac{(p+1)^3}{p^3 + \omega p} (\gamma_k \xi^3(t) + k(t)\dot{\xi}(t) + k(t)\hat{y}(t)). \quad (2.94)$$

На рисунке 2.9 представлен результат моделирования адаптивной версии алгоритма управления со встроенной внутренней модели.

Заключительный эксперимент, представленный на рисунке 2.10, демонстрирует работу алгоритма адаптивного управления в задаче слежения за задающим командным сигналом с заданной точностью.

Во всех экспериментах использовались параметры $T = 5$, $k_u = 0,5$, $\varpi = 1$, $\epsilon = 0,5$.

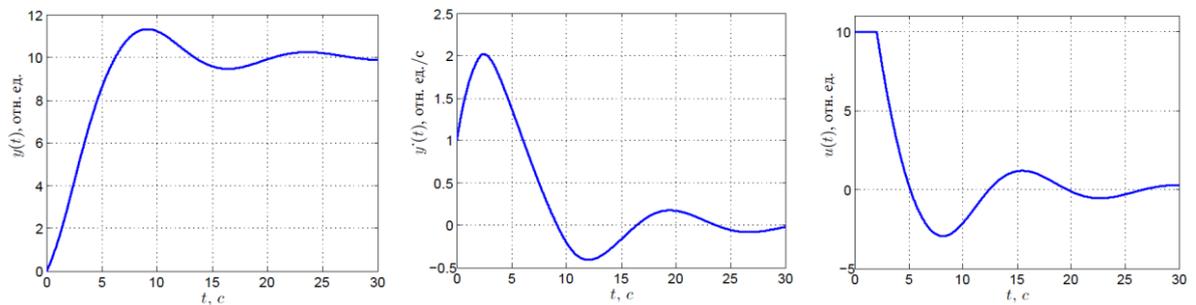


Рисунок 2.1 – Алгоритм управления (2.84)-(2.87) с параметрами

$$k + \kappa = 2, \sigma = 10, y^* = 10, \delta = 0$$

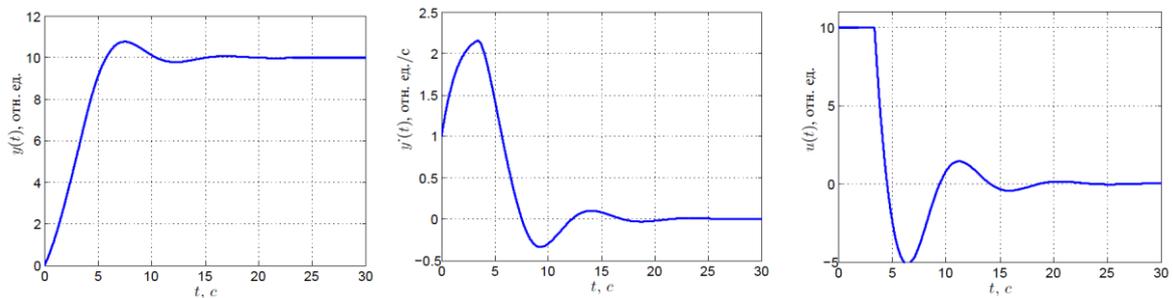


Рисунок 2.2 – Алгоритм управления (2.84)-(2.87) с параметрами

$$k + \kappa = 5, \sigma = 15, y^* = 10, \delta = 0$$

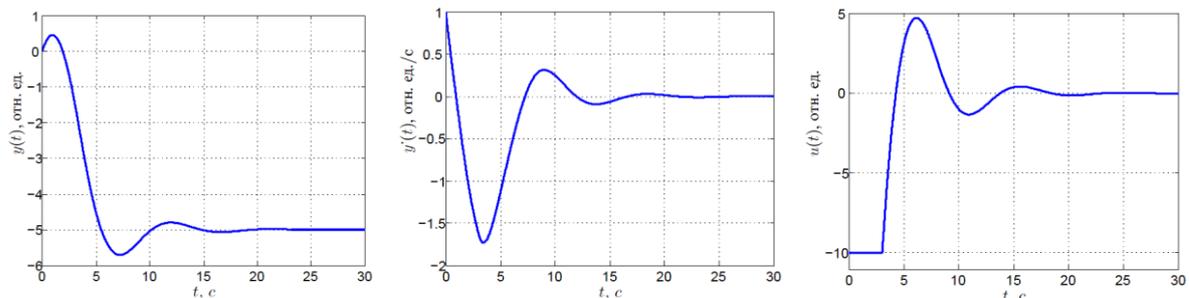


Рисунок 2.3 – Алгоритм управления (2.84)-(2.87) с параметрами

$$k + \kappa = 5, \sigma = 15, y^* = -5, \delta = 0$$

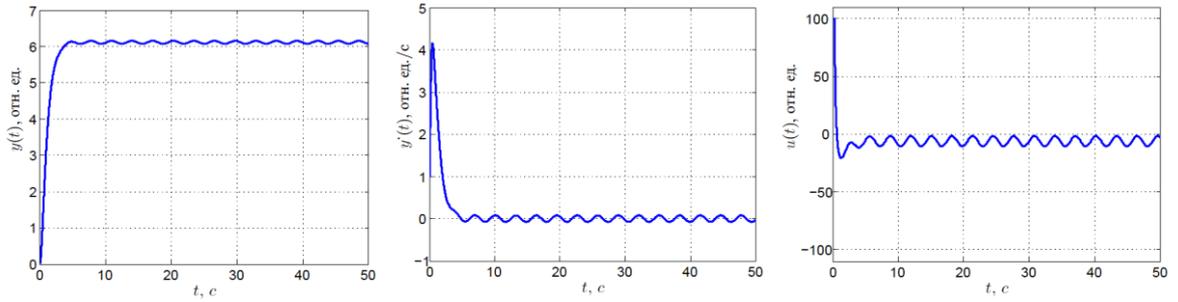


Рисунок 2.4 – Алгоритм управления (2.84)-(2.87) с параметрами

$$k + \kappa = 2, \sigma = 10, y^* = 6, \delta = 3 + 2 \sin 2t$$

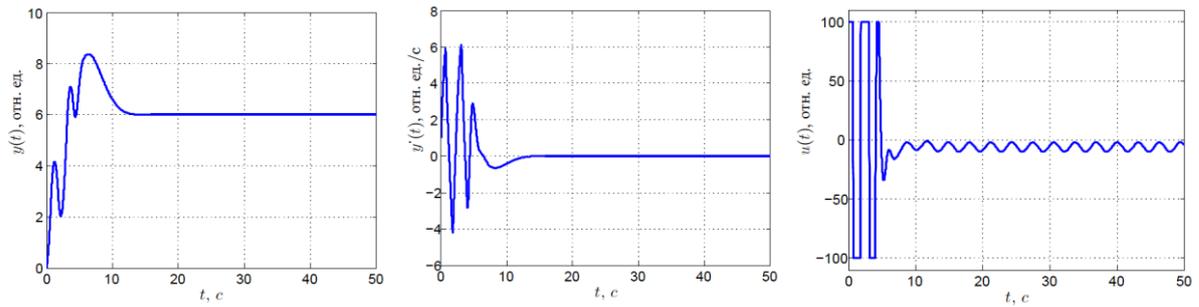


Рисунок 2.5 – Алгоритм управления (2.88), (2.85)-(2.87) с параметрами

$$k + \kappa = 2, \sigma = 10, y^* = 6, \delta = 3 + 2 \sin 2t$$

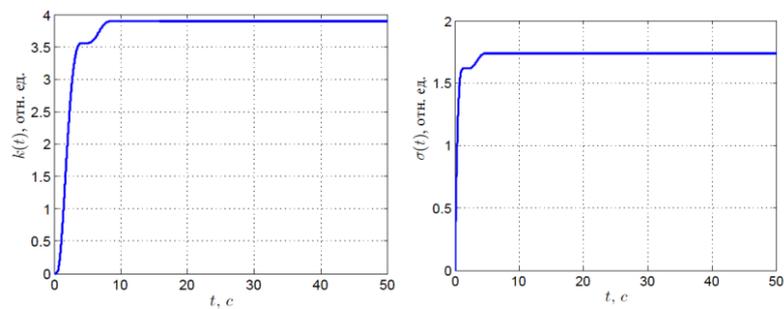
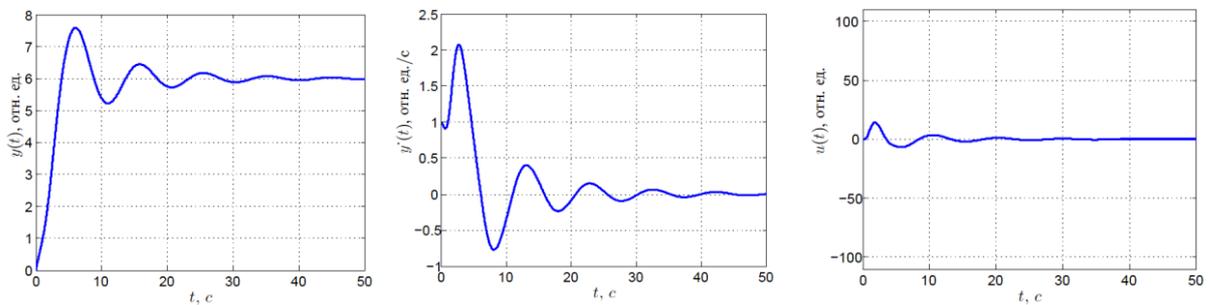


Рисунок 2.6 – Алгоритм управления (2.91), (2.85)-(2.87), (2.92), (2.93)

с параметрами $k(0) = 0, \sigma(0) = 0, \gamma_k = 0,1, \gamma_\sigma = 0,2, y^* = 6, \delta = 0$

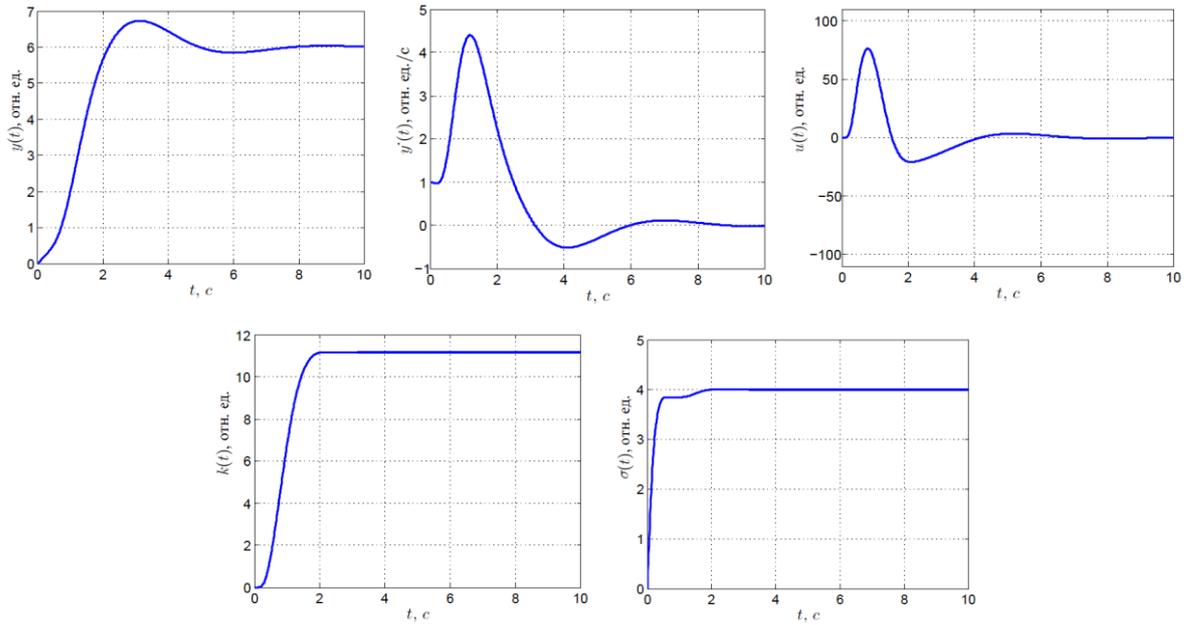


Рисунок 2.7 – Алгоритм управления (2.91), (2.85)-(2.87), (2.92), (2.93) с параметрами $k(0) = 0$, $\sigma(0) = 0$, $\gamma_k=0,5$, $\gamma_\sigma = 1$, $y^* = 6$, $\delta = 0$

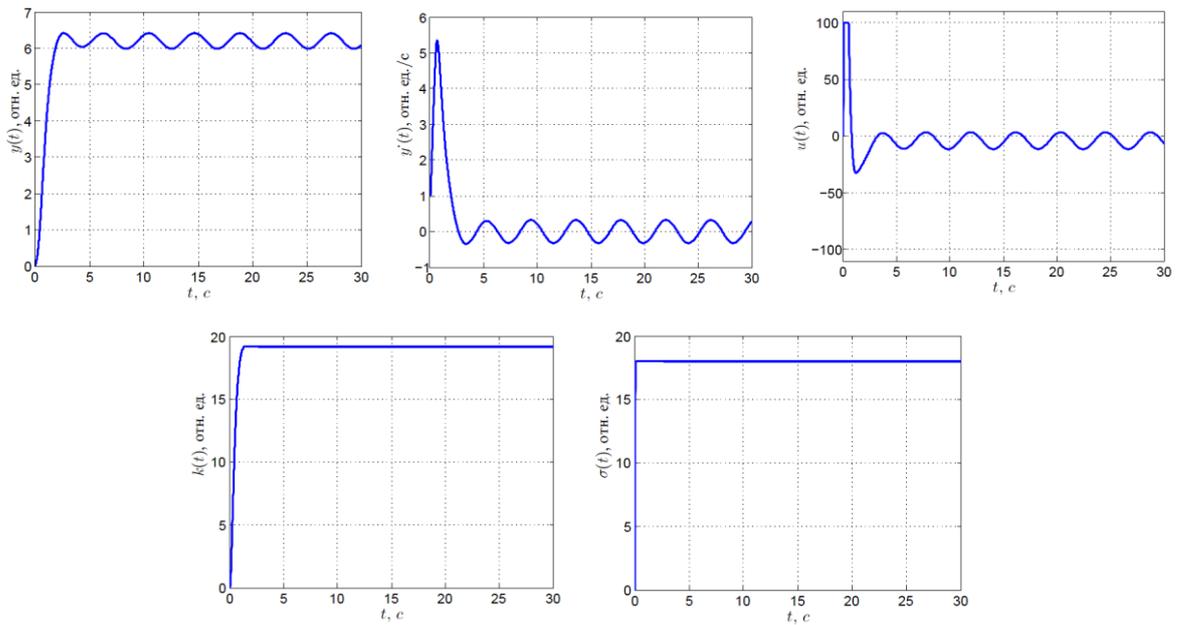


Рисунок 2.8 – Алгоритм управления (2.91), (2.85)-(2.87), (2.92), (2.93) с параметрами $k(0) = 0$, $\sigma(0) = 0$, $\gamma_k=1$, $\gamma_\sigma = 10$, $y^* = 6$, $\delta = 2 + 3 \sin 1,5t$

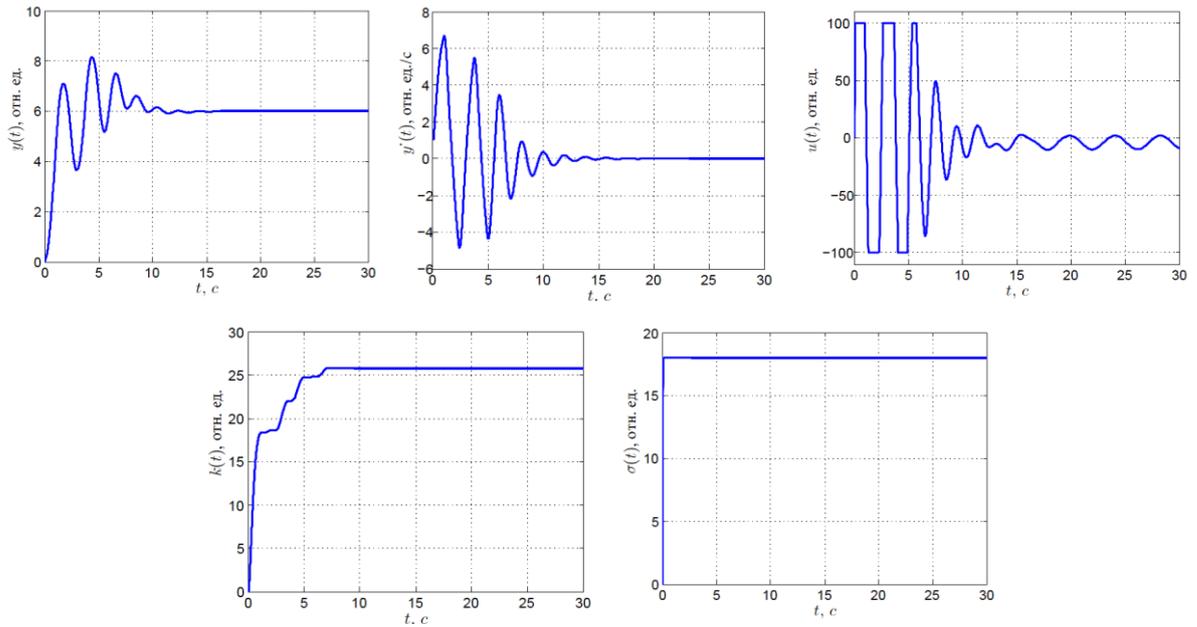


Рисунок 2.9 – Алгоритм управления (2.94), (2.85)-(2.87), (2.92), (2.93) с параметрами $k(0) = 0$, $\sigma(0) = 0$, $\gamma_k=1$, $\gamma_\sigma = 10$, $y^* = 6$, $\delta = 2 + 3 \sin 1,5t$

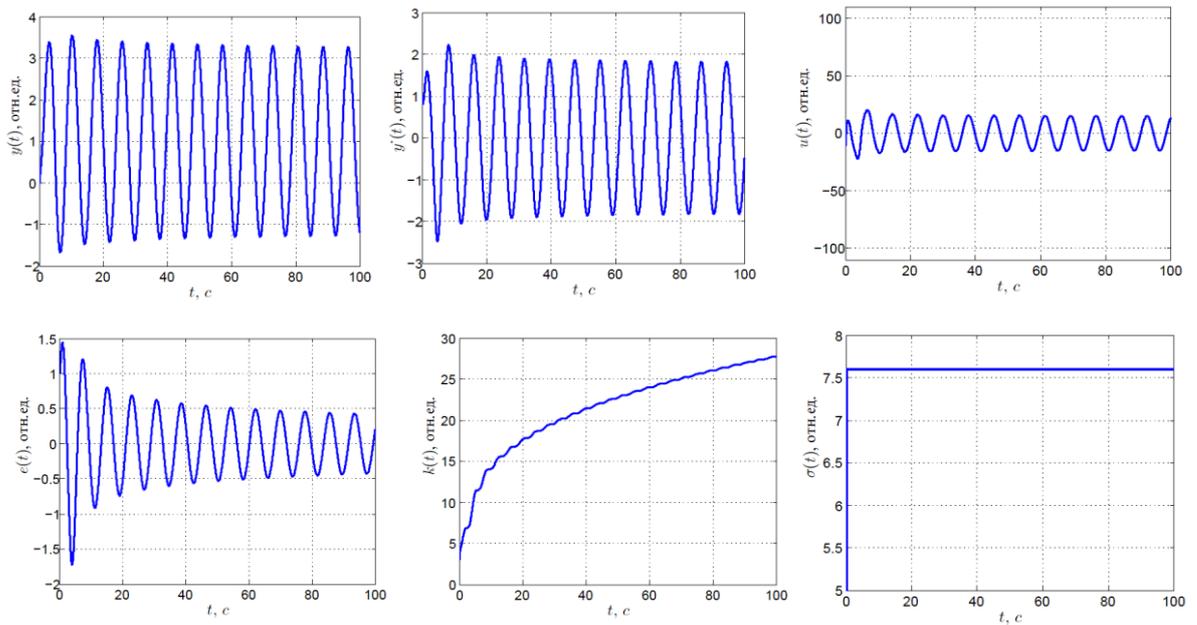


Рисунок 2.10 – Алгоритм управления (2.91), (2.85)-(2.87), (2.92), (2.93) с параметрами $k(0) = 3$, $\sigma(0) = 5$, $\gamma_k=1$, $\gamma_\sigma = 10$, $y^* = 1 + 2 \sin 0,8t$, $\delta = 0$

2.4 Выводы по главе

В Главе 2 разработан алгоритм робастной стабилизации (2.11)-(2.13) для нелинейных систем с нелинейными секторными ограничениями и параметрическими неопределенностями, а также две модификации этого алгоритма: робастный алгоритм со встроенной внутренней моделью (2.41)-(2.43) для компенсации мультисинусоидальных возмущающих воздействий и алгоритм управления с адаптивной настройкой параметров (2.70)-(2.78). Доказано две теоремы об устойчивости замкнутой системы. Показаны свойства экспоненциальной устойчивости для глобально Липшецевых нелинейных систем без возмущающих воздействий. Показано свойство устойчивости типа «ограниченный вход – ограниченный выход» при наличии ограниченных возмущающих воздействий. Для нелинейностей, ограниченных нелинейным сектором вида (2.2), показано свойство асимптотической частичной устойчивости с ограниченной областью притяжения, размер которой зависит от параметров закона управления. Представлен числовой пример моделирования разработанных алгоритмов управления в задачах управления движением надводного судна.

ГЛАВА 3

МЕТОД АДАПТИВНОГО И РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ

Глава посвящена методу адаптивного и робастного управления по выходу некоторым классом многомерных систем, позволяющему решать Задачу 2. Рассматривается такой класс многомерных систем, для которых справедливо Допущение 1. В качестве примера рассмотрена задача динамического позиционирования надводного водоизмещающего судна в точке по измерениям координат и курса судна.

3.1 Метод управления некоторым классом многомерных объектов

Рассмотрим класс многомерных систем вида (1.1), (1.2) для которых справедливо Допущение 1. Суть предлагаемого метода заключается в разделении динамических связей в математической модели объекта управления на независимые каналы с одним входом и одним выходом. Необходимо представить многомерную динамическую систему как связь нелинейных статических отображений и одномерных динамических подсистем. После декомпозиции математическая модель (3.1) примет вид

$$\begin{aligned} y_1 &= H_1(Y_1, Y_2, \dots, Y_l), Y_1 = F_1\{U_1, \delta_1\}, U_1 = G_1(u_1, u_2, \dots, u_m), \\ y_2 &= H_2(Y_1, Y_2, \dots, Y_l), Y_2 = F_2\{U_2, \delta_2\}, U_2 = G_2(u_1, u_2, \dots, u_m), \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$y_l = H_l(Y_1, Y_2, \dots, Y_l), Y_l = F_l\{U_l, \delta_l\}, U_l = G_l(u_1, u_2, \dots, u_m), \quad (3.2)$$

где F_j , $j = 1, \dots, l$ – операторы, описывающие динамические процессы в одномерных каналах, и H_j и G_j , $j = 1, \dots, l$ – многомерные статические функции. С учетом допущения 2 модель каждого динамического канала F_j может быть представлена в общем виде:

$$a_j(p)Y_j(t) = b_{j1}(p)U_j(t) + b_{j2}(p)\varpi_j(Y_j) + b_{j3}(p)\delta_j(t), \quad (3.3)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования, полиномы $a_j(p)$, $b_{j1}(p)$, $b_{j2}(p)$, $b_{j3}(p)$ могут содержать неизвестные параметры, передаточная функция $\frac{b_{j1}(p)}{a_j(p)}$ имеет относительную степень ρ , которая полагается известной для разработчика системы управления; полином $b_{j1}(p)$ гурвицев и параметр $b_{j1}(0) > 0$; неизвестные компоненты возмущающих воздействий δ_j описывают внешние возмущения в каждом канале, неизвестная нелинейная функция удовлетворяет секторному ограничению

$$|\varpi_j(y_i)| \leq C_{j1}|Y_j| + C_{j2}|Y_j|^{a_j}, a_j \in \mathbb{N} \quad (3.4)$$

для всех Y_j , где числа C_{j1} и C_{j2} могут быть неизвестны.

Синтез законов управления осуществляется в три этапа. На первом этапе формулируется цель управления вида (1.9) для выходных переменных Y_j каждой динамической подсистемы так, чтобы в результате была достигнута общая цель управления (1.10) для регулируемых переменных y_j исходной системы. На втором шаге синтезируются виртуальные законы управления U_j для одномерных подсистем по рассчитанным отклонениям виртуальных переменных Y_j . На заключительном этапе рассчитываются реальные управляющие воздействия u_i , $i = 1, \dots, m$ на основе виртуальных управлений U_j , $j = 1, \dots, l$, полученных на предыдущем шаге.

3.1.1 Шаг 1

Поскольку Допущение 1 выполнено, можем выбрать переменные Y_j , которые статически связаны с регулируемыми переменными y_j . При этом удобнее всего связать выходы динамических систем Y_j с отклонениями регулируемых переменных от желаемых значений:

$$y = H(Y) + y^*, Y^* = 0. \quad (3.5)$$

Тогда можем сформировать новую цель: необходимо синтезировать виртуальные законы управления U_j такие, что обеспечивается

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Y = 0, \quad (3.6)$$

где значение векторной переменной Y рассчитывается по формуле

$$Y = \bar{H}(y - y^*). \quad (3.7)$$

Функция \bar{H} рассчитывается так, чтобы выполнялось свойство $H(\bar{H}(z)) = z$. Подробнее см. раздел 3.2, в котором представлен конструктивный поиск отображения \bar{H} .

3.1.2 Шаг 2

Для обеспечения цели (3.6) синтезируются l регуляторов U_j для каждой новой регулируемой переменной Y_j . Для задачи робастного управления с заданной точностью можно использовать регуляторы вида (2.11)-(2.13), если наряду с допущением 1 справедливо допущение 2. Если справедливы допущения 3 и 4, то можно реализовать регуляторы вида (2.41)-(2.43), позволяющие обеспечить полную компенсацию возмущающих воздействий.

Для случая, когда параметры математической модели объекта управления не известны, целесообразно использовать адаптивные регуляторы вида (2.70)-(2.78), позволяющие обеспечивать любую заданную точность стабилизации нелинейных систем.

3.1.3 Шаг 3

Наиболее сложной и нетривиальной задачей может оказаться поиск отображения \bar{G} такого, при котором $G(\bar{G}(\zeta)) = \zeta$. Например при $m > l$ может быть бесконечное множество решений. Однако можно сформулировать требования, накладываемые на отображение \bar{G} .

1. Отображение \bar{G} должно быть гладким по отношению ко всем элементам вектора ζ .
2. Отображение \bar{G} должно обладать свойством ограниченности по входу, то есть $\bar{G}: \mathcal{L}_\infty \rightarrow \mathcal{L}_\infty$.

Алгоритм поиска отображения \bar{G} проще выполнять, разделив управляющие воздействия на компоненты в некотором векторном базисе. Тогда можно будет установить линейную или монотонную связь между виртуальными управляющими воздействиями U_j и компонентами

управляющих воздействий.

Для случая $m > l$ необходимо вводить дополнительные виртуальные ограничения, связывающие управляющие воздействия между собой, или между компонентами управляющих воздействий.

В разделе 3.2 представлен пример использования такого метода с более подробным описанием алгоритма поиска обратных отображений. Однако заметим, что такой метод может быть применен для широкого класса многомерных объектов управления. Например, для многих видов мобильных систем, поведение которых может быть описано как движение твердого тела в пространстве или в вязкой среде, такой метод может оказаться крайне эффективным.

3.2 Алгоритм робастного управления движением надводного водоизмещающего судна

Настоящий раздел посвящен синтезу закона управления для многоканального объекта типа надводное судно. При составлении уравнений движения судна обычно используют следующие упрощающие допущения:

- 1) вертикальные перемещения судна в процессе движения считают пренебрежимо малыми; предполагается, что движение судна происходит в плоскости ватерлинии;
- 2) принимают, что наклоны судна в плоскости шпангоута малы и не оказывают влияния на величину гидродинамических сил;
- 3) при вычислении инерционных сил, действующих на судно, считают, что судно симметрично не только относительно диаметральной плоскости, но и плоскости мидель–шпангоута, и что центр тяжести судна располагается в плоскости мидель–шпангоута;
- 4) влияние изменения посадки (дифферента и средней осадки) судна в процессе совершения маневра не учитывают;
- 5) определяя действующие на судно гидродинамические силы и моменты

неинерционной природы, полагают, что при неустановившемся движении в каждый момент времени они равны силам и моментам, действующим на судно, совершающем стационарное движение с теми же основными элементами (используется гипотеза стационарности) [65].

Будем рассматривать задачу динамического позиционирования судна в точке, что означает слежение за заданными географическими координатами и курсом. Регулируемыми переменными являются долгота и широта, а также курс судна. Будем использовать обозначения x , y , z для удобства восприятия, не умаляя общности используемого метода.

3.2.1 Декомпозиция математической модели

Для формирования математической модели движения судна, удобной для синтеза алгоритмов управления, помимо абсолютной системы координат, связанной с землей, введем в рассмотрение локальную систему координат, связанную с судном (см. рисунок 3.1).

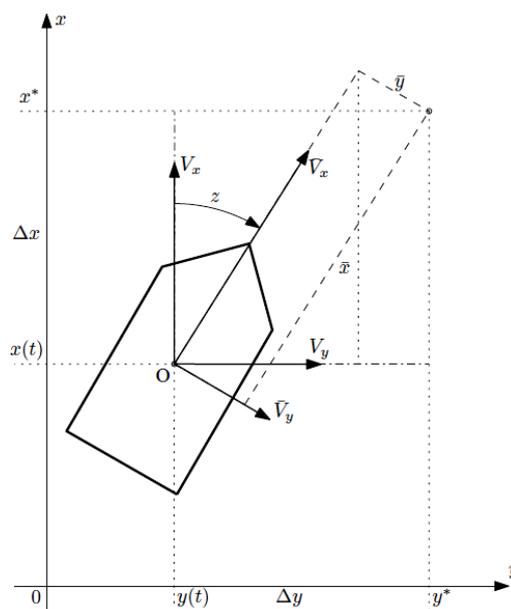


Рисунок 3.1 – Системы координат, связанные с землей и с судном

Поскольку движение судна в продольном направлении, поперечном направлении и при повороте могут рассматриваться как независимые движения, то эти движения будем рассматривать как независимые динамические каналы. Выходами этих каналов назначим отклонения текущих координат судна от желаемых в продольном направлении судна \bar{x} и поперечном \bar{y} . Курс судна как регулируемая переменная z совпадает в обеих системах координат.

Преобразование координат из одной системы в другую, с учетом их поворота и линейного смещения начал координат друг относительно друга имеет вид:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos z & -\sin z \\ \sin z & \cos z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

где x_0, y_0 – координаты начальной точки; \bar{x} и \bar{y} – смещения, соответственно, в продольном и поперечном направлениях в локальной системе координат.

Перепишем (3.8) для каждого из каналов отдельно, определив тем самым отображение \bar{H} :

$$\bar{x} = (x^* - x(t)) \cos z + (y^* - y(t)) \sin z, \quad (3.9)$$

$$\bar{y} = -(x^* - x(t)) \sin z + (y^* - y(t)) \cos z. \quad (3.10)$$

Таким образом, мы имеем уравнения, которые обеспечивают пересчет координат из абсолютной системы в локальную, жестко связанную с судном. Отметим, что в отличие от каналов X и Y для регулирования курса используется рассогласование: $\bar{z} = z^* - z(t)$. В общем виде имеем для \bar{H} :

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = - \underbrace{\begin{bmatrix} \cos z & \sin z & 0 \\ -\sin z & \cos z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\bar{H}} \begin{bmatrix} x(t) - x^* \\ y(t) - y^* \\ z(t) - z^* \end{bmatrix}.$$

Виртуальные управляющие воздействия $U_i, i = 1, \dots, m$ по отношению к объекту управления типа надводное судно имеют конкретный физический смысл: результирующие продольные и поперечные силы P_x и P_y , соответственно, и результирующий поворотный момент M_z (см. рисунок 3.2). Эти воздействия могут быть задающими воздействиями для системы

управления движением судна, а также могут быть рассчитаны дополнительными регулируемыми контурами, построенными на основе моделей динамических каналов $F_j, j = 1, \dots, l$.

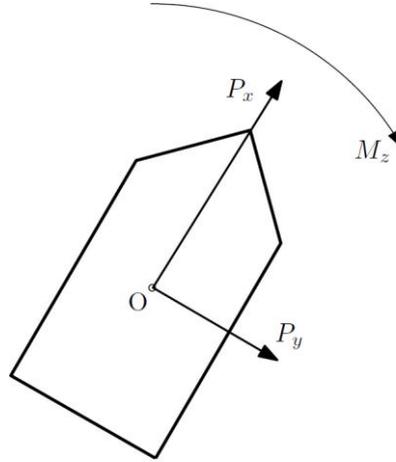


Рисунок 3.2. – Результирующие силы, действующие на судно в продольном и поперечном направлении, и поворотный момент

Модель динамических каналов согласно (3.3) в общем виде примет вид

$$a_x(p)x(t) = b_{x1}(p)P_x(t) + b_{x2}(p)\varpi_x(x) + b_{x3}(p)\delta_x, \quad (3.11)$$

$$a_y(p)y(t) = b_{y1}(p)P_y(t) + b_{y2}(p)\varpi_y(y) + b_{y3}(p)\delta_y, \quad (3.12)$$

$$a_z(p)z(t) = b_{z1}(p)M_z(t) + b_{z2}(p)\varpi_z(z) + b_{z3}(p)\delta_z, \quad (3.13)$$

где полиномы могут содержать неизвестные параметры.

Будем также рассматривать линеаризованную модель Номото первого порядка, которая описывает динамику движения надводного судна:

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{T_x}(-\dot{x}(t) + K_x P_x(t) + \delta_x),$$

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{T_y}(-\dot{y}(t) + K_y P_y(t) + \delta_y),$$

$$\ddot{z}(t) = \frac{1}{T_z}(-\dot{z}(t) + K_z M_z(t) + \delta_z),$$

где K_x, K_y и K_z – коэффициенты передачи; T_x, T_y и T_z – постоянные времени.

Возмущающие воздействия для надводных судов могут носить различное происхождение. Наиболее существенное влияние оказывают течение, ветер и волновая качка. Для таких типов возмущающих воздействий Допущения 3 и

4 достаточно адекватны.

Для синтеза виртуальных входных сигналов P_x , P_y и M_z для каждого динамического канала будем использовать метод управления, представленный в Главе 2. В зависимости от желаемой цели можно использовать один из трех предложенных алгоритмов стабилизации динамических каналов.

3.2.2 Робастный алгоритм динамического позиционирования судна

Представленный выше метод последовательного компенсатора [11-16] применим для рассматриваемой модели роботизированного надводного судна с тремя независимыми динамическими каналами [1, 2, 5, 7]. Зная относительную степень объекта $\rho = 2$, используем полученный закон управления для расчета виртуальных управляющих сигналов P_x , P_y и M_z :

$$P_x = k_x(\xi_x + \dot{\xi}_x), \quad \dot{\xi}_x = \sigma_x(-\xi_x + \bar{x}), \quad (3.14)$$

$$P_y = k_y(\xi_y + \dot{\xi}_y), \quad \dot{\xi}_y = \sigma_y(-\xi_y + \bar{y}), \quad (3.15)$$

$$M_z = k_z(\xi_z + \dot{\xi}_z), \quad \dot{\xi}_z = \sigma_z(-\xi_z + \bar{z}), \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \cos z & \sin z & 0 \\ -\sin z & \cos z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) - x^* \\ y(t) - y^* \\ z(t) - z^* \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

где k_x , k_y , k_z , σ_x , σ_y , σ_z фиксированные настроечные коэффициенты, которые могут быть выбраны независимо от параметров объекта.

Следующим этапом необходимо распределить нагрузку между исполнительными органами управления, рассчитав необходимые силы, которые должны развивать главный двигатель, подруливающие устройства и рули. Поскольку эта задача точно не является тривиальной и в каждом конкретном случае требует рассмотрения частных особенностей, для задачи управления движением судна выделим решение такой задачи в самостоятельный раздел.

3.3 Распределение управляющих воздействий на примере надводного водоизмещающего судна

В разделе представлен один из основных результатов диссертационной работы: метод распределения управляющих воздействий для объектов управления типа надводное судно. Разработанный метод позволяет решать эту задачу для широкого класса конфигураций надводных судов. Под конфигурацией подразумевается расположение органов управления относительно центра масс судна.

3.3.1 Конфигурации судов и принятые обозначения

Рассмотрим пять наиболее распространенных конфигураций расположения исполнительных органов управления. Их схематическое изображение представлено на рисунке 3.3.

Под *туннельными трастерами* подразумеваются подруливающие устройства, под *азимутальными трастерами* – поворотные винтовые колонки. Такая терминология допускается при разработке систем управления движением надводных судов.

Силы, развиваемые исполнительными органами управления, обозначены символом P с соответствующим индексом:

P_e – сила (упор), развиваемая главным двигателем или кормовым азимутальным трастером;

P_l – сила (упор), развиваемая левым двигателем или левым кормовым азимутальным трастером;

P_r – сила (упор), развиваемая правым двигателем или правым кормовым азимутальным трастером;

P_b – сила (упор), развиваемая носовым трастером;

P_s – сила (упор), развиваемая кормовым туннельным трастером.

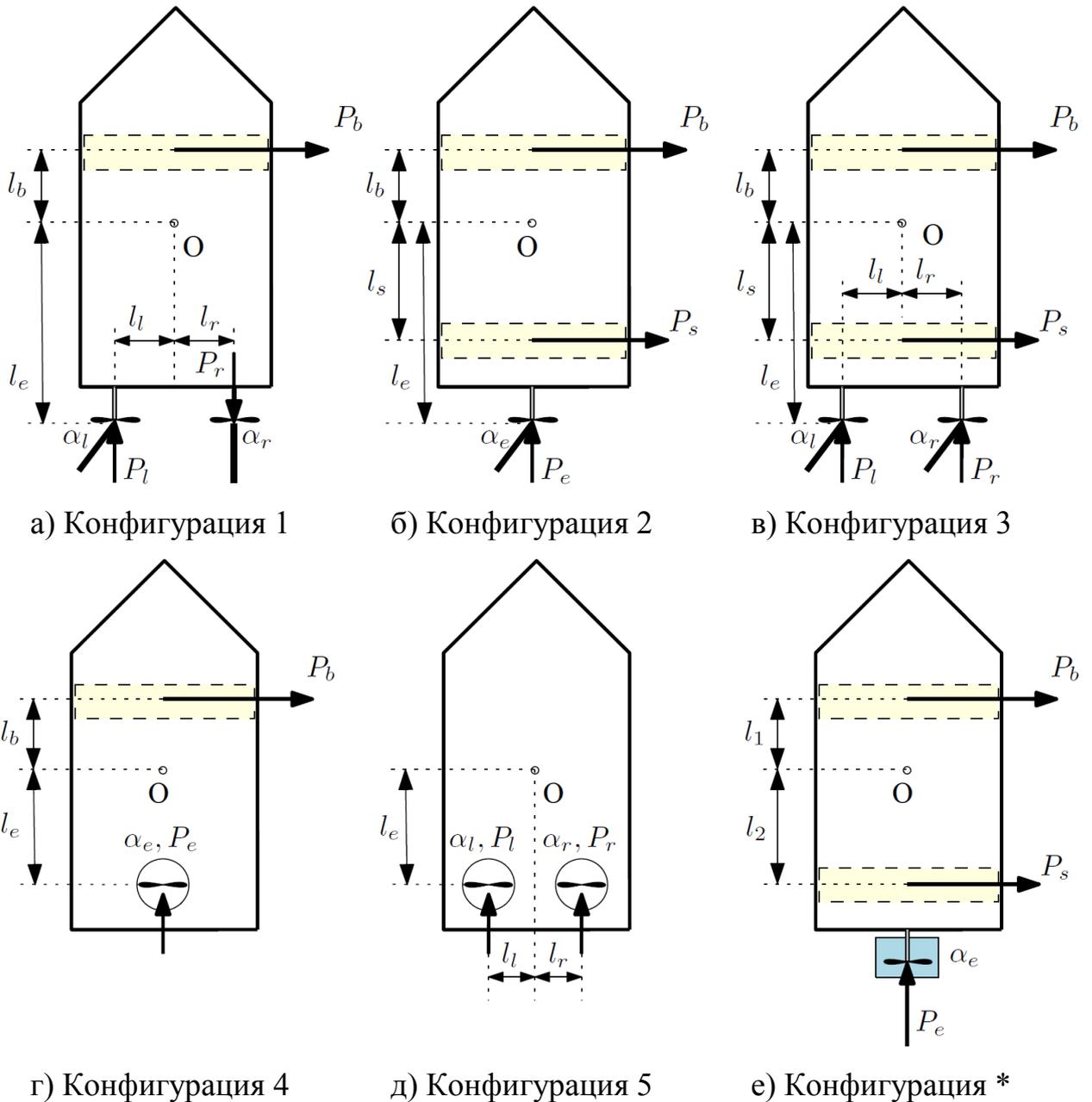


Рисунок 3.3 – Типовые конфигурации расположения исполнительных органов управления на надводных водоизмещающих судах: а) два главных двигателя, два независимых руля, носовой туннельный трастер; б) один главный двигатель, один руль, носовой и кормовой туннельные трастеры; в) два главных двигателя, два руля, носове и кормовое туннельные трастеры; г) один носовой туннельный трастер, один кормовой азимутальный трастер; д) два кормовых азимутальных трастера; е) один главный двигатель, одна поворотная насадка, носовой и кормовой туннельные трастеры

Углы перекладки рулей или углы поворота азимутальных трастеров обозначены символом α :

α_e – угол поворота руля или кормового азимутального трастера;

α_l – угол поворота левого руля или левого кормового азимутального трастера;

α_r – угол поворота правого руля или правого кормового азимутального трастера;

α_b – угол поворота носового азимутального трастера.

Геометрическое расположение органов управления характеризуется удалением их от центра масс судна O . Удобно использовать расстояния от центра масс до органов управления в продольном и поперечном направлениях. Далее указаны обозначения расстояний от центра масс судна до органов управления.

l_e – расстояние от центра масс до двигателей или азимутальных трастеров, расположенных в корме судна;

l_l – расстояние от центра масс до левого кормового органа управления в поперечном направлении;

l_r – расстояние от центра масс до правого кормового органа управления в поперечном направлении;

l_b – расстояние от центра масс до носового органа управления в продольном направлении;

l_s – расстояние от центра масс до кормового туннельного трастера.

3.3.2 Расчет равнодействующих сил и момента

Запишем выражения для равнодействующих сил P_x , P_y и момента M_z для всех рассматриваемых конфигураций.

Конфигурация 1

Это наиболее распространенная конфигурация (рисунок 3.2а)

водоизмещающих судов широкого назначения. Как правило, главные двигатели не имеют возможности работать на оборотах, близких к нулю. Зона нечувствительности такова, что при минимально возможных оборотах вращения судно достигает скорости 2–3 узла. Поэтому на таких конфигурациях два двигателя работают в противоположных направлениях. В положении равновесия (когда равнодействующие всех сил и моментов равны нулю) левый двигатель обеспечивает упор вперед, правый двигатель работает в режиме заднего хода. Возникший момент балансируется перекладкой левого руля, а возникшая боковая сила на руле компенсируется носовым подруливающим устройством. Далее записаны уравнения для равнодействующих сил и моментов.

$$\begin{cases} P_x = P_l + P_r k_1, \\ P_y = P_b - k_2 P_l \alpha_l, \\ M_z = P_l l_l - k_1 P_r l_r + k_2 P_l \alpha_l l_e + P_b l_b, \end{cases} \quad (3.18)$$

где k_1 – коэффициент эффективности главного двигателя при реверсивном вращении, k_2 – коэффициент эффективности руля при обеспечении боковой силы (в поперечном направлении).

Конфигурация 2

Такая конфигурация (рисунок 3.2б) популярна среди длинных судов, яхт и барж. Для такой конфигурации положение равновесия в швартовном режиме может быть только при нулевых силах на каждом органе управления (нулевые обороты вращения или нулевой угол винта регулируемого шага).

Равнодействующие сил и моментов имеют вид:

$$\begin{cases} P_x = P_e, \\ P_y = P_b + P_s, \\ M_z = P_b l_b - P_s l_s, \end{cases} \quad (3.19)$$

В такой конфигурации руль в швартовном режиме может не участвовать, поскольку имеется достаточное количество подруливающих устройств.

Конфигурация 3

Такая конфигурация (рисунок 3.2в) аналогична конфигурации 2, если два руля связаны между собой жесткой связью.

Равнодействующие сил и моментов имеют вид:

$$\begin{cases} P_x = P_l + P_r, \\ P_y = P_b + P_s, \\ M_z = P_b l_b - P_s l_s, \end{cases} \quad (3.20)$$

Рули могут не участвовать в распределении сил в швартовном режиме. Нетрудно видеть, что для судна с такой конфигурацией органов управления применима конфигурация 1 при отключении кормового трастера. А одновременное использование руля и кормового трастера при создании боковой силы нецелесообразно, поскольку сила, образованная на пассивном руле больше, чем на активном подруливающем устройстве.

Конфигурация 4

Конфигурация отличается наличием азимутального трастера, то есть такого двигателя, который может вращаться на угол 360° . Конфигурации с азимутальными трастерами требуют особого рассмотрения в силу своей сложности. Однако алгоритм распределения управляющих воздействий, выносимый на защиту, позволяет охватить и такой класс судов.

Равнодействующие сил и моментов имеют вид:

$$\begin{cases} P_x = P_e \cos \alpha_e, \\ P_y = P_b - P_e \sin \alpha_e, \\ M_z = P_b l_b + P_e \sin \alpha_e l_e, \end{cases} \quad (3.21)$$

Конфигурация 5

Конфигурация отличается наличием только азимутальных трастеров. Такая конфигурация характерна для буксиров, обеспечивая большую маневренность на малых ходах.

Равнодействующие сил и моментов имеют вид:

$$\begin{cases} P_x = P_l \cos \alpha_l + P_r \cos \alpha_r, \\ P_y = -P_l \sin \alpha_l - P_r \sin \alpha_r, \\ M_z = (P_l \sin \alpha_l + P_r \sin \alpha_r) l_e + P_l \cos \alpha_l l_l - P_r \cos \alpha_r l_r, \end{cases} \quad (3.22)$$

*Конфигурация **

Такая конфигурация выделена на рисунке 3.3 отдельно, поскольку она соответствует роботизированному макету, подробно описанному в Главе 4, на базе которого выполнены все экспериментальные исследования в рамках диссертационной работы. Распределение упоров выполняется согласно конфигурации 2.

3.3.3 Построение областей достижимости

Важным обстоятельством является то, что для одновременного создания продольной и боковой сил и поворотного момента могут задействоваться одни и те же органы управления. Одновременно невозможно обеспечить максимальный поворотный момент и максимальную силу в продольном или поперечном направлении, которые способны развивать органы управления. На рисунке 3.4а показан пример так называемой диаграммы достижимости, построенной относительно продольной и поперечной сил. Таким образом, целесообразно ограничивать заданные силы и момент так, чтобы их можно было распределить между всеми органами управления. Предлагается следующий алгоритм ограничения заданных сил и момента для получения рабочей области (см. рисунок 3.4б), в которой возможно равномерное распределение всех сил и момента.

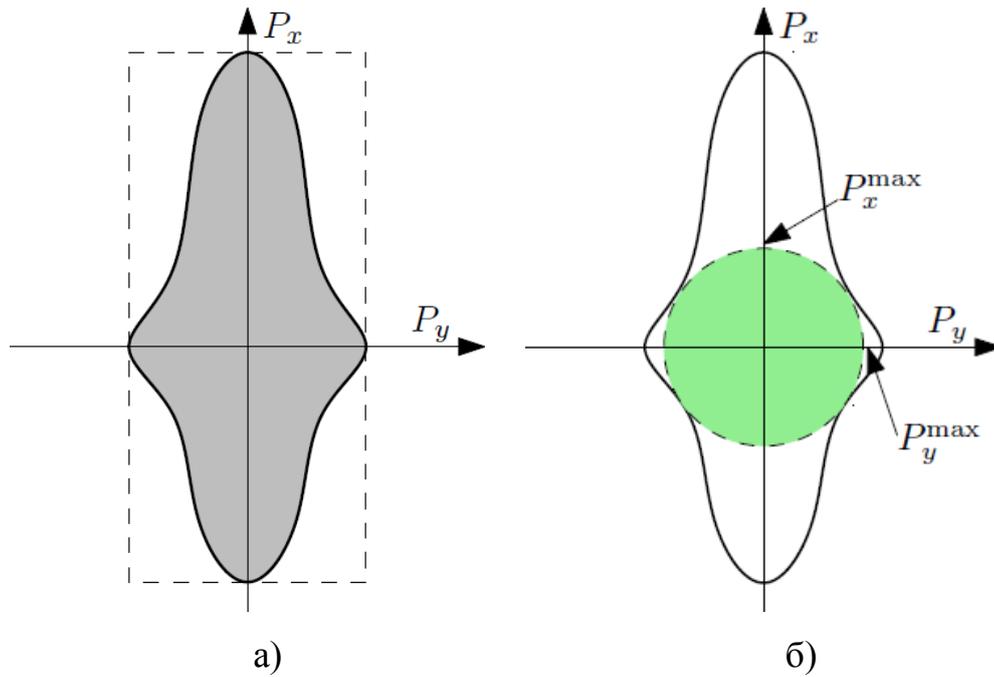


Рисунок 3.4 – Пример диаграммы достижимости судна для сил P_x и P_y :

- а) максимально возможная область для распределения сил;
 б) рабочая область, позволяющая обеспечить равномерное распределение по всем направлениям.

3.3.4 Алгоритм ограничения заданных сил и момента

1. Оцениваются максимально возможные силы и момент в швартовном режиме P_x^{\max} , P_y^{\max} и M_z^{\max} .
2. Оценивается норма заданных продольной силы и момента, как наиболее важных воздействий при маневрировании судна в швартовном режиме

$$Q = \left(\frac{P_x}{P_x^{\max}} \right)^2 + \left(\frac{M_z}{M_z^{\max}} \right)^2. \quad (3.23)$$

3. Если норма Q больше 1, то область задания продольной силы и поворотного момента ограничивается по формулам:

$$P_x^* = \frac{P_x}{\sqrt{Q}}, \quad M_z^* = \frac{M_z}{\sqrt{Q}}. \quad (3.24)$$

А заданная поперечная сила приравнивается к нулю $P_y^* = 0$.

4. Если норма Q меньше 1, то есть возможность распределения и боковой

силы. Однако если величина $Q + \left(\frac{P_y}{P_y^{\max}}\right)^2 > 1$, то заданную поперечную силу следует ограничить по формуле:

$$P_y^* = \text{sign } P_y \cdot P_y^{\max} \cdot \sqrt{1 - Q}. \quad (3.25)$$

Таким образом, после ограничения всех заданных сил и момента

$$(P_x, P_y, M_z) \rightarrow (P_x^*, P_y^*, M_z^*)$$

нормированные значения заданных сил и момента могут быть распределены между всеми органами управления.

3.3.5 Синтез законов управления по заданным силам

После того, как все заданные силы и момент нормированы, становится возможным реализовать их одновременно за счет органов управления, решив задачу распределения управляющих воздействий.

Рассматривая уравнения сил и моментов (3.18)–(3.22), необходимо синтезировать законы управления для каждого исполнительного органа управления на базе заданных сил и моментов P_x^*, P_y^*, M_z^* .

Основной идеей является распределение проекций сил каждого органа управления в продольном и поперечном направлениях. В самом деле, проекции в направлении x и направлении y можно распределять независимо друг от друга. Заметим, что с точки зрения управления движением судна, приоритетным направлением является продольное движение, затем момент вращения, и в последнюю очередь боковое движение в поперечном направлении. При получении линейных (монотонных) зависимостей между заданными силами и моментом и проекциями сил всех органов управления, гарантированно будет обеспечена гладкость преобразований при распределении управляющих воздействий. Это означает отсутствие резких скачкообразных изменений сил или углов органов управления при малых изменениях заданных сил в продольном и поперечном направлениях и поворотном моменте.

3.3.6 Алгоритмы распределения управляющих воздействий

С учетом особенностей каждой конфигурации представим алгоритмы распределения управляющих воздействий.

Конфигурация 1

1. Определяется минимальная сила P_0 , развиваемая главными двигателями.
2. Если заданная сила в продольном направлении меньше, чем величина $P_0(1 - k_1)$, то левый двигатель будет работать на минимальных оборотах, а правый обеспечивать результирующую силу P_x^* :

$$P_l = P_0, P_r = \frac{P_x^* - P_l}{k_1}, \quad (3.26)$$

иначе

$$P_r = -P_0, P_l = P_x^* - k_1 P_r. \quad (3.27)$$

3. Угол перекладки правого руля устанавливается в нулевое положение, поскольку набегающий поток воды уходит под корпус судна, и на руль не оказывает влияния. Угол перекладки левого руля и сила, развиваемая носовым туннельным трастером, однозначно определяется, исходя из (3.13):

$$P_b = \frac{M_z^* - 2P_l l_l + P_y^* l_e + P_x^* l_l}{l_b + l_e}, \alpha_l = \frac{P_b - P_y^*}{k_2 P_l}. \quad (3.28)$$

Конфигурация 2

1. Сила, развиваемая главным двигателем, определяется заданной силой в продольном направлении:

$$P_e = P_x^*, \quad (3.29)$$

Силы на туннельных трастерах определяются вторым и третьим уравнением (3.14):

$$P_b = \frac{M_z^* - P_y^* l_e}{l_b + l_e}, P_s = P_y^* - P_b. \quad (3.30)$$

Конфигурация 3

2. Силы, развиваемые главными двигателями, определяются заданной силой в продольном направлении:

$$P_l = \frac{1}{2}P_x^*, \quad P_r = \frac{1}{2}P_x^* \quad (3.31)$$

Силы на туннельных трастерах определяются вторым и третьим уравнением (3.15):

$$P_b = \frac{M_z^* - P_y^* l_e}{l_b + l_e}, \quad P_s = P_y^* - P_b. \quad (3.32)$$

Конфигурация 4

1. Исключая проекцию силы, развиваемой азимутальным трастером, на ось y из второго и третьего уравнения (3.16), нетрудно найти выражение для носового туннельного трастера:

$$P_b = \frac{P_y^* l_e + M_z^*}{l_e + l_b}. \quad (3.33)$$

2. Заданная сила P_x^* определяет проекцию силы азимутального трастера на ось x . Зная проекции сил от азимутального трастера на обе оси, нетрудно найти амплитуду силы, и угол поворота:

$$P_e = \sqrt{(P_b - P_y^*)^2 + (P_x^*)^2}, \quad \alpha_e = \begin{cases} \arccos \frac{P_x^*}{P_e}, & \text{если } P_b - P_y^* \geq 0 \\ 2\pi - \arccos \frac{P_x^*}{P_e}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (3.34)$$

Конфигурация 5

Как было уже отмечено выше, основной идеей для построения универсального распределителя упоров является распределение проекций сил.

1. Из всех трех уравнений (3.17) нетрудно найти проекции

$$[P_l \cos \alpha_l] = \frac{1}{2}P_x^* + \frac{P_y^* l_e + M_z^*}{l_l + l_r} \quad \text{и} \quad [P_r \cos \alpha_r] = \frac{1}{2}P_x^* - \frac{P_y^* l_e + M_z^*}{l_l + l_r}. \quad (3.35)$$

2. Поскольку в распределении 2 сил и одного момента участвует 4 проекции сил, то необходимо ввести в рассмотрение дополнительное уравнение связи между проекциями. Пусть модуль силы одного из трастеров будет монотонно зависеть от своей

проекции. Например,

$$P_l = \frac{1}{2} \left(P_0 + \sqrt{P_0^2 + k_3 |[P_l \cos \alpha_l]|} \right), \text{ если } P_y^* \geq 0 \quad (3.36)$$

$$P_r = \frac{1}{2} \left(P_0 + \sqrt{P_0^2 + k_3 |[P_r \cos \alpha_r]|} \right), \text{ если } P_y^* < 0 \quad (3.37)$$

где k_3 определяется из условия $P_l = P_l^{\max}$ при $P_l \cos \alpha_l = P_l^{\max}$.

3. Далее задача имеет однозначное решение. Рассмотрим случай $P_y^* \geq 0$. Имеем выражение для угла α_l :

$$\alpha_l = 2\pi - \arccos \frac{[P_l \cos \alpha_l]}{P_l}. \quad (3.38)$$

Теперь можно определить значение проекции на ось y от второго двигателя

$$[P_r \sin \alpha_r] = -P_y^* - P_l \sin \alpha_l, \quad (3.39)$$

откуда имеем

$$P_r = \sqrt{[P_r \sin \alpha_r]^2 + [P_r \cos \alpha_r]^2}, \quad (3.40)$$

$$\alpha_r = \begin{cases} \arccos \frac{[P_r \cos \alpha_r]}{P_r}, & \text{если } [P_r \sin \alpha_r] \geq 0 \\ 2\pi - \arccos \frac{[P_r \cos \alpha_r]}{P_r}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (3.41)$$

4. Если $P_y^* < 0$, то пункты 3 и 4 выполняются аналогично.

Замечание. В случае если получившиеся значения сил или углов превышают максимально возможные значения для органов управления, то соответствующий орган управления устанавливается в максимальное значение, а остальные законы управления пересчитываются снова согласно уравнениям (3.18)–(3.22). Однако к общей методике распределения это отношения не имеет, а касается исключительно каждой конфигурации в отдельности и требует отдельного рассмотрения при конечной реализации.

3.4 Выводы по главе

В Главе 3 представлен метод управления классом многомерных нелинейных систем, основанный на декомпозиции математической модели на статическую и динамическую компоненты. В качестве примера использования такого метода рассмотрена задача управления движением надводного судна в задаче динамического позиционирования в точке. Показаны способ декомпозиции математической модели и поэтапный синтез алгоритмов управления, обеспечивающих выполнение общей цели вида (1.10). Рассмотрены наиболее распространенные конфигурации расположения исполнительных органов управления по отношению к центру масс судна. Разработан новый универсальный метод распределения управляющих воздействий. Показано его применение на примере пяти различных конфигураций надводных судов, основанный на поиске линейных (монотонных) зависимостей между заданными силами и моментом и проекциями сил, развиваемых органами управления, на продольное и поперечное направления. С использованием результатов Главы 2 решена задача стабилизации динамических каналов многомерной нелинейной системы, что позволило решить общую задачу диссертационной работы.

В следующей Главе представлены результаты экспериментальных исследований разработанных методов и алгоритмов управления, а также дано подробное описание разработанного и изготовленного роботизированного макета надводного судна, на базе которого были выполнены все экспериментальные исследования.

ГЛАВА 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО И РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ

Глава посвящена экспериментальным исследованиям теоретических результатов диссертационной работы, описанных в Главах 2 и 3, на базе роботизированного макета судна, позволяющего имитировать настоящее надводное водоизмещающее судно.

Роботизированный макет спроектирован так, чтобы была возможность анализировать эффективность тех или иных алгоритмов управления движением в условиях параметрической неопределенности, запаздывании, возмущающих воздействий, ограниченном по модулю управлении [4-6, 8-10, 66-70]. В макете имеется возможность имитации возмущающих воздействий и запаздывания. Исследуемые алгоритмы управления реализуются в виде программы, которая работает в бесконечном цикле и решает поставленные задачи.

Испытание алгоритмов управления движением реальных надводных судов является сложной и дорогостоящей задачей. Тратится значительное время, подвергаются риску дорогостоящее оборудование и жизни людей. По этой причине первичную проверку разработок удобно выполнять на специализированных обучающих комплексах. Подробно описанный в Главе робототехнический комплекс предназначен для апробации таких алгоритмов управления, как компенсация внешних неизвестных возмущающих воздействий мультигармонической природы с запаздыванием в канале управления, сохранение заданного курса или траектории, стабилизация продольной и поперечной скоростей, а также динамическое позиционирование судна в точке при неизвестных параметрах объекта управления [1, 2, 5, 7].

4.1 Выбор прототипа

Выбор прототипа определяется актуальными проблемами теории автоматического управления, которые не имеют удовлетворительного решения или не решены совсем. Наиболее подходящим примером для технического объекта, функционирующего в условиях внешних возмущений и параметрической неопределенности является надводное судно. Наибольший интерес представляет такое судно, у которого параметры могут меняться в режиме работы: например осадка, центр масс и другие.

Для решения задач автоматического управления и удовлетворения всех критериев по выбору судна был выбран российский рыболовный «ТРАУЛЛЕР РОССВИК». Рыболовное судно по своему целевому назначению транспортирует большое количество грузов при значительно небольшой площади палубы, следовательно, решает задачу размещения всего необходимого. Оно так же устойчиво переносит влияние волн из-за специфической формы корпуса. Корпус траулера короткий и весьма широкий, надводная часть бортов обтекаема и почти вертикально спускается до ватерлинии, подводная часть же резко сходится к килю под одним углом, а форштевень подводной части острый и является хорошим волнорезом. Задняя часть киля резко поднимается почти до второй палубы, позволяя разместить более удобную рулевую насадку вместо простого пера руля.

Макет траулера был выполнен в масштабе 1:32. Основные размеры макета $L_{\max} = 432$ мм, $H_{\max} = 96$ мм, $H_{\text{осадка}} = 52$ мм.

Такой масштаб позволяет разместить в корпусе судна один маршевый двигатель, два подруливающих устройства, сервопривод для управления рулевой насадкой, блок аккумуляторов, необходимое количество управляющих и задающих плат и балласт, необходимый для выравнивания судна в плоскости воды.

4.2 Разработка кинематической схемы роботизированного макета судна

4.2.1 Макет судна

Макет судна должен быть небольшим, но одновременно позволять разместить внутри все исполнительные органы управления, а также все необходимое аппаратное обеспечение. Органы управления в свою очередь должны позволять перемещаться катеру свободно во всех направлениях.

Макет робототехнического комплекса на примере надводного катера должен позволять решать следующие задачи:

- компенсация внешних параметрически не определенных возмущающих воздействий мультигармонической природы в условиях запаздывания в канале управления;
- решение задачи удержания курсового угла и траектории;
- стабилизация продольной и поперечной скоростей, а также динамическое позиционирование судна в точке в условиях параметрической неопределенности, неучтенной динамики и ограниченного по модулю управления.

Комплекс должен выполнять автоматическую швартовку, осуществлять определение своих координат и положение относительно меток в пространстве при помощи компьютерного зрения, переносить давление волн и ветра удерживаясь на заданной точке без крена и деферента.

4.2.2 Кинематическая схема

На рис. 2.1. представлена кинематическая схема расположения органов управления.

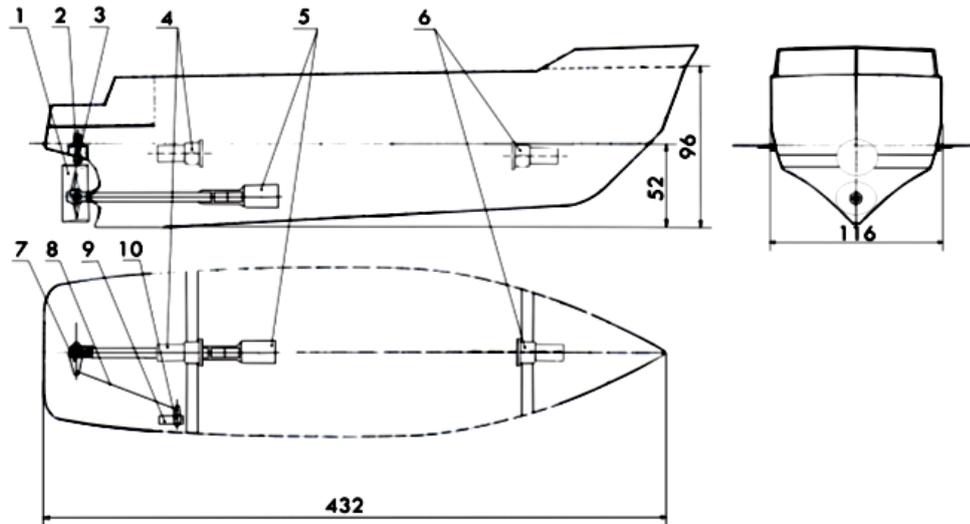


Рисунок 4.1 – Кинематическая схема разрабатываемого макета судна:

1. Рулевая насадка; 2. Баллер рулевой насадки; 3. Гребной винт;
4. Кормовое подруливающее устройство; 5. Маршевый двигатель с приводом; 6. Носовая рулевая насадка; 7. Качалка рулевой насадки; 8. Тяга;
9. Сервопривод; 10. Качалка сервопривода.

Конфигурация расположения исполнительных приводов макета судна представлена также на рисунке 3.3е. Здесь P_e – упор, создаваемый основным двигателем, где также располагается рулевая насадка, P_b и P_s – упоры, создаваемые носовым и кормовым подруливающими устройствами соответственно.

Динамика движения надводного судна такого типа может быть описана математической моделью, содержащей три динамических канала, соответствующие двум линейным и одной угловой координатам, однозначно определяющим положение и ориентацию судна в пространстве [1, 7, 9]:

$$\begin{cases} x = F_x(P_e, P_b, \alpha_e, P_s), \\ y = F_y(P_e, P_b, \alpha_e, P_s), \\ z = F_z(P_e, P_b, \alpha_e, P_s), \end{cases} \quad (4.1)$$

где x , y и z – выходные переменные; P_e , P_b и P_s – сигналы управления, отправляемые на исполнительные приводы; $F(\cdot)$, $G(\cdot)$ и $H(\cdot)$ – нелинейные дифференциальные операторы; α_e – значение поворота рулевой насадки, не

используемой в швартовном режиме, поскольку малая рабочая область не позволяет обеспечивать повороты судна с большим радиусом циркуляции, в то время как наличие кормового туннельного трастера является достаточным.

Осуществим декомпозицию нелинейной динамической модели на статическую функцию и независимые динамические каналы с одним входом и одним выходом. Каждый из них соотнесем с соответствующими регулируемым переменными x , y и z . Введем так называемые виртуальные сигналы управления (см. рисунок 3.1) P_x , P_y и M_z . Они являются обобщенными силами и моментом, действующие на судно, и представляют собой суперпозицию всех движущих сил исполнительных приводов судна P_e , P_b и P_s . Производя декомпозицию, запишем систему уравнений, связывающих обобщенные силы и момент, прилагаемых к центру масс (ЦМ) судна, и силы тяги исполнительных приводов с учетом схемы их расположения:

$$\begin{cases} P_x = P_e, \\ P_y = P_b + P_s, \\ M_z = -\alpha_e P_e l_0 + P_b l_1 - P_s l_2, \end{cases} \quad (4.6)$$

где P_x , P_y и M_z – обобщенные силы и момент, прилагаемых к центру масс судна; l_0 – расстояние от центра масс до основного двигателя; l_1 – расстояние от центра масс до носового подруливающего устройства; l_2 – расстояние от центра масс до кормового подруливающего устройства.

4.3 Разработка структуры и выбор элементной базы макета

Макет надводного судна был изменен относительно выбранного прототипа. Перо руля было заменено на рулевую насадку, что позволило поместить винт не перед рулем, а внутри рулевой насадки тем самым направив направленный поток воды в заданное направление.

Вторая палуба была поднята выше, чем она обозначена на чертеже, для удобного размещения привода рулевой насадки. В корпусе установлен всего

один комингс для усиления, а дальнейшее устранение возможного сворачивания корпуса было устранено монтажом креплений органов управления.

Корпус макета выполнен из стекловолокна, пропитанного эпоксидной смолой. Смесь стеклоткани и смолы была уложена поверх заранее заготовленной болванки корпуса, выполненной из склеенных брусков дерева. После высыхания смеси готовый корпус снимается с болванки, шпаклюется и красится в нужный цвет. К внутренним бортам корпуса модели приклеивается палуба судна с заранее продуманными отверстиями для установки элементов управления и возможности их дальнейшей эксплуатации. Палуба выполнена из стеклотекстолита толщиной 1мм. Технологические отверстия закрываются тем же стеклотекстолитом. Болты, вклеенные в основную часть палубы, позволяют прикручивать крышки отверстий. Вторая палуба выполнена из фольгированного текстолита для усиления прочности кормовой части судна и возможности припайки элементов для монтажа органов управления.

В макете судна реализованы следующие исполнительные органы управления:

- главный двигатель и его привод;
- подруливающее устройство фирмы GRAUPNER;
- подруливающее устройство (аналог подруливающего устройства собственного изготовления);
- сервопривод с передаточным механизмом на рулевую насадку.

4.3.1 Главный двигатель и его привод

В качестве главного двигателя был использован двигатель GRAUPNER SPEED 450.



Рисунок 4.2 – Двигатель GRAUPNER SPEED 450

Таблица 4.1. Технические характеристики двигателя

Параметр	Значение
Номинальное напряжение	6 В
Рабочее напряжение	2,4–7,2 В
Обороты на холостом ходу	18000 об/мин
Ток холостого хода	0,7 А
Ток при максимальном КПД	4 А
Ток при остановленном роторе	25 А
Эффективность без редуктора	70%
Длина без вала	37,8 мм
Диаметр	27,7 мм
Длина вала	13,8 мм
Диаметр вала	2,3 мм
Вес	73 г

По характеристикам двигатель подходит для придания модели нужного хода. Двигатель соединен с валом с помощью специального кардана. Кардан состоит из двух цилиндрических элементов, запрессованных соответственно на валу двигателя и на валу и имеющих крестовидные пропилы на срезах цилиндра, смотрящих друг на друга. В оба пропила вставляется общий соединительный элемент в виде ответного крестообразного элемента. Зазор между торцами цилиндров составляет 0,5 мм. Он позволяет исключить возможность заклинивания двигателя вследствие вероятности отклонения осей вылов. Дельдвуд, в котором находится вал, соединен напрямую с

двигателем специально выточенной муфтой. Она позволяет исключить вибрации, создаваемые карданом в процессе вращения, закрепить дельдвуд и двигатель на одной оси. Муфта впрессовывается в дельдвуд, а к двигателю прикручивается двумя винтами. На втором конце вала нарезается резьба M2.5 и прикручивается трехлопастной гребной винт. Муфта выполнена из цельной дюралевой болванки и обработана на токарном станке. Кардан выполнен из медного прутка диаметром 8мм. Дельдвуд выполнен из медной трубки диаметром 6 мм, а с концов запрессованы медные сальники с отверстием 2,5мм под вал. Перед установкой вала вовнутрь дельдвуда было залито масло для уменьшения трения вала и мягкости его хода. Гребной винт закреплен на оси при помощи двух контргаек, расположенных до и после винта. Охлаждение двигателя производится воздушным путем с помощью стального кольца надетого на двигатель. Кольцо выполняет функцию радиатора охлаждения.

4.3.2 Подруливающее устройство фирмы GRAUPNER

Подруливающее устройство GRAUPNER относительно недавно появилось для сводной продажи в России. До этого была необходимость делать подруливающее устройство самостоятельно.

Подруливающее устройство содержит двигатель GRAUPNER SPEED 400, запрессованную на валу двигателя лопасть, герметичную камеру для лопасти и перпендикулярную оси камеры трубку, которая передает направленный поток воды в заданное направление, влево или вправо. Трубка, камера и лопасть выполнены из пластмассы. Камера имеет на передней ее части герметичную крышку для удобной эксплуатации лопасти. Крышка закреплена тремя болтами, расположенными по окружности камеры. Двигатель закреплен к камере двумя болтами, расположенными под лопастью.

При подаче питания на двигатель он передает крутящий момент лопасти. Лопасть придает направление воде находившейся в камере и

проталкивает ее в правую или левую часть трубки. Поток воды тем самым выходит из корпуса судна и перемещает судно вправо или влево.

4.3.3 Подруливающее устройство собственной разработки

Фирма GRAUPNER в момент создания макета судна отменила поставки комплектующих в Россию. Одно подруливающее устройство было изготовлено на кафедре систем управления и информатики Университета ИМТО.

Конструкция устройства была почти полностью заимствована у фирмы GRAUPNER, так как высокая простота решения изготовления обеспечила возможность сделать его самим. Вместо мощного двигателя GRAUPNER SPEED 400 был поставлен более слабый GRAUPNER SPEED 300 меньшей мощности. Было увеличено количество лопастей из двух в четыре для придания более точного управления водным потоком. Материал самого устройства был тоже изменен. Лопасть также запрессовывалась на валу двигателя, но была уже выполнена из меди. Трубка диаметром 10мм и камера диаметром 22 мм были тоже выполнены из меди. Крышка камеры была также закреплена на три болта, но только выполнена из прозрачного стеклотекстолита толщиной 3.5 мм для наглядности проходящего внутри камеры процесса.

Монтаж элементов подруливающего устройства осуществлялся с помощью спайки их между собой галловым паяльником.

При подаче питания на двигатель он передает крутящий момент лопасти. Лопасть придает направление воде, находящейся в камере, и проталкивает ее в правую или левую часть трубки. Поток воды тем самым выходит из корпуса судна и перемещает судно вправо или влево.

4.3.4 Сервопривод с передаточным механизмом на рулевую насадку

Был выбран сервопривод Hitec HS-81MG, весьма небольшой по габаритам, но с достаточной мощностью для управления рулевой насадкой.

Сервопривод состоит из платы контролера, принимающего сигнал от плат управления и передает необходимый угол поворота двигателю, двигатель с передаточными колесами, поворотную площадку с креплением на верхнем передаточном колесе и сам корпус сервопривода.

Поворотная площадка сервопривода соединяется с направляющей оси рулевой насадки стальной тягой.

Рулевая насадка имеет форму кольца, выполненного из латуни и обработанного на токарном станке. В верхней части кольца отверстие для установки оси рулевой насадки. На верхней части оси закреплена направляющая, а между ней и насадкой находится латунный баллер, являющийся одновременно и сальником, и дельдвудом.

При подаче сигнала на сервопривод на отклонение на заданный угол она передает этот угол с помощью тяги на поворотный механизм рулевой насадки, и она отклоняется и задает угол поворота судна.

4.3.5 Монтаж органов управления в корпус судна

Монтаж органов управления заключается в удобном расположении их для возможности дальнейшей установки органов питания и управления.

Монтаж маршевого двигателя с его приводом заключался в его установке строго по продольной оси судна и максимально близко к килю. Установка по высоте заключалась в совпадении оси вала с осью рулевой насадки для обеспечения вращения гребного винта внутри насадки при ее поворотах без преград и трений. Сносность была достигнута установкой кондуктора внутри рулевой насадки с отверстием 2,5 мм для установки в него вала. Привод вместе с двигателем был установлен в нужное положение и залит эпоксидной смолой с добавлением ворса стеклоткани для придания смеси малой текучести.

Монтаж подруливающих устройств подразумевает их установку максимально близко к концам судна, но в максимально широкой части судна. Также необходимо направить двигатели подруливающих устройств

соответственно в корму и к носу для высвобождения свободного пространства внутри судна, но одновременно оставить возможность их эксплуатации. Трубки подруливающего устройства распложены ниже ватерлинии на 15 мм, как раз на изломе днища корпуса, то есть в максимально широкой его части. Оси двигателей подруливающих устройств при установке должны оставаться строго в горизонтальной плоскости для правильной работы. Продольная ось судна должна совпадать с осями двигателя, то есть они должны лежать на одной линии. Закрепление подруливающих устройств в корпусе судна осуществляется помощью эпоксидной смолы с добавлением ворса стекловолкна.

Монтаж сервопривода заключается лишь в выборе удобного места его эксплуатации и свободного места внутри судна. Установка же баллера оси рулевой насадки заключается в совпадении оси насадки и центра гребного винта для возможности его работы без трения при поворотах. После установки баллера с осью, насадкой, качалкой и сервоприводом замеряется расстояние между их осями, и изготавливаются тяги для их соединения.

Взаиморасположение всех органов управления можно увидеть на общем чертеже модели (рисунок 2.1).

4.4 Разработка системы беспроводной связи макета с компьютером

Разработка системы беспроводной связи макета с компьютером имеет несколько решений. Одним из самых распространённых способов является передача команд по радиоканалу. Такой способ позволяет передавать сигналы на очень большие расстояния, но требует дополнительных устройств для приема–передачи. Радиоканал мало защищен от помех, что губительно при передаче точных сигналов от макета компьютеру и обратно.

Второй способ более современный и весьма перспективный – передача по цифровой сети Wi-Fi. Он позволяет предавать сигналы не только на

большие расстояния, но и связываться по удаленному доступу. Такой способ требует как дополнительного оборудования в непосредственной близости к макету, так и оборудования на самом макете, габариты которого могут быть больше самого макета.

Для использования Wi-Fi требуется дорогостоящее устройство для его генерирования в отличие от дешевизны радиостанций. Решением проблемы передачи данных стала возможность передавать их по каналу Bluetooth. Такой вид связи подходит по критериям дешевизны, отсутствия дополнительного оборудования на портативном компьютере и малые габариты приемо-передатчика на макете судна. Этот вид связи охватывает своим сигналом без антенны всего 10 м. но этого достаточно в масштабах эксперимента.

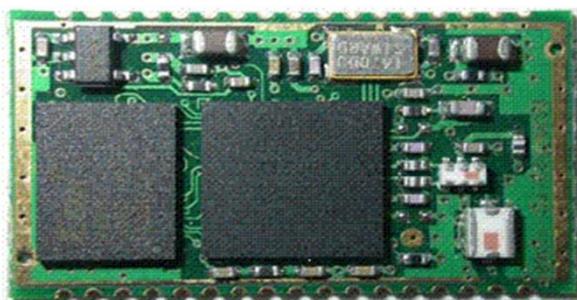


Рисунок 4.3 – Bluetooth модуль

Функциональные возможности Bluetooth модуля:

- Совместимость с версией Bluetooth 2.0
- Мощность передатчика до +4 дБмВт
- Режимы пониженного энергопотребления: Hold, Sniff, Park, Deep sleep mode
- Рабочее напряжение питания от 3.0 В до 3.6 В
- Встроенный стабилизатор +1,8 В
- Поддержка до 7 подключений типа ACL (асинхронное подключение без установления соединения) и 3 подключений типа SCO (синхронное подключение, ориентированное на соединение).
- Встроенное программное обеспечение поддерживает протоколы:

- BlueCore последовательный протокол BCSP (модуль BTM–110)
- интерфейса Хост–контроллер HCI (модуль BTM–111)
- Внешние интерфейсы: UART, USB, PCM, SPI (технологический).
- Базовая микросхема BlueCore4–ext фирмы CSR
- Малые габариты: 25.0 x 14.5 x 2.2 мм

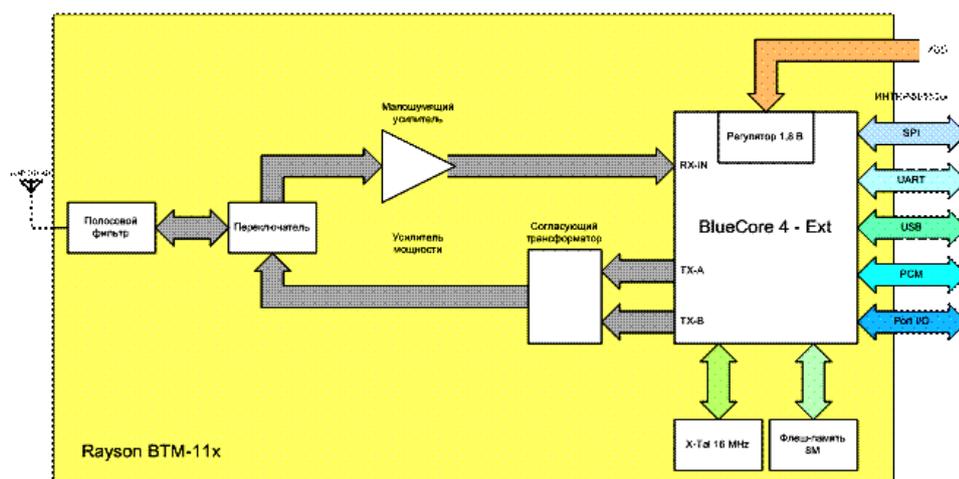


Рисунок 4.4 – Блок схема Bluetooth

Bluetooth модуль будет вмонтирован в печатную плату, находящуюся на макете судна.

4.5 Разработка вычислительных устройств и аппаратного обеспечения

Система управления макетом состоит из трех плат:

- Плата 1. Центральная плата, обеспечивающая связь всех бортовых устройств макета.
- Плата 2. Плата для приема–передачи данных, на основе Bluetooth модуля BTM–112.
- Плата 3. Драйверы для управления двигателями.

На первой плате располагаются порты ввода вывода, к которым подключаются периферийные устройства, а также главная часть – микроконтроллер ATmega32 (МК U4). Также на этой плате расположены стабилизаторы (на 5В (U1) для МК и 3,3В (U3) для BTM–112) и выпрямитель

(D1 в целях защиты) питания.

На второй плате располагается Bluetooth модуль BTM-112(U1), для беспроводной связи, и блок преобразования сигнала UART ((Q1-Q4) он нужен потому, что МК выдаёт сигнал 5В, а BTM-112 3,3В).

Третья плата полностью состоит из трех драйверов для двигателей. На эти драйвера поступает ШИМ сигнал, далее он обрабатывается микроконтроллерами (ATmega8) и далее, через блок полевых транзисторов с драйверами, подаётся напряжение на двигатели.

С помощью Bluetooth связи передаются данные от компьютера на модуль BTM-112, который в свою очередь по протоколу UART передаёт данные на обработку микроконтроллеру. Микроконтроллер, получив данные, сообщает на модуль (для передачи обратно) что он принял новые параметры, и все принятые данные корректны. После такой передачи, данные поступают на обработку, и в зависимости от параметров, посылается сигнал на какой-либо порт выхода/выхода (например, на порт управления двигателем). Управление двигателями происходит ШИМ сигналом, генерируемым микроконтроллером с помощью таймера. Этот сигнал поступает на драйвер управления двигателем, в котором обрабатывается, и в зависимости от длины импульса, двигатели вращаются с заданной скоростью.

4.6 Разработка системы компьютерного зрения для получения навигационной информации

Координаты реального надводного судна в открытом водном пространстве определяются с помощью систем глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС). Использование подобных систем в составе робототехнического комплекса невозможно в силу ряда причин [71–75]. Это связано с малыми размерами модели, в результате чего погрешность определения координат превышает разумные пределы. Кроме того, такая

навигация практически затруднена в закрытых помещениях. Составляет проблему определение ориентации исследуемой модели.

В силу представленных ограничений для определения координат модели в границах бассейна было предложено использовать видеокамеру с системой технического зрения. Камера устанавливается над поверхностью воды, а угол обзора ее объектива охватывает все рабочее пространство макета.

Принцип идентификации объекта (модели судна) основан на выделении из видеопотока, поступающего с камеры, точек, соответствующих цвету модели. Сигнал с видеокамеры поступает в формате цветовой модели RGB в виде трех матриц **R**, **G** и **B**, каждый элемент которых содержит значение световой интенсивности определенного пикселя рабочего пространства в однобайтовой без знаковой форме для красного, зеленого, синего цветов соответственно [3].

На первом этапе проводится бинаризация изображения макета судна – уменьшение количества информации, полученной от камеры. Результатом бинаризации является матрица, совпадающая по размерам с исходным изображением, элементами которой являются только «0» или «1», причем «1» должна соответствовать контуру судна (рисунок 2.5а). Первоначально выбираются желаемые значения интенсивности **I*** для цветов, которые соответствуют окраске судна, чтобы полученная бинарная матрица содержала только маску объекта управления. К примеру, для белой окраски желаемое значение интенсивности принято равным 230, с запасом в 25 единиц для устранения возможного эффекта недостаточной освещенности при работе объекта управления. Логическая формула бинаризации для определения маски модели надводного судна будет выглядеть следующим образом:

$$BW_{ij} = (R_{ij} \geq I^*) \& (G_{ij} \geq I^*) \& (B_{ij} \geq I^*),$$

где BW_{ij} – бинаризованная матрица с маской судна.

Для исключения влияния шумов применяется медианный фильтр, характерный для автоматической обработки изображений. Ширина окна фильтрации выбрана равной трем пикселям.

Координаты центра макета судна определяются на основе выделения прямоугольника, в границы которого вписывается изображение макета (рисунок 4.5в). Точка пересечения диагоналей прямоугольника служит координатой середины модели.

Определение курса макета судна осуществляется путем выделения на втором этапе специальной реперной точки, закрепленной в носовой части макета (красная метка на рисунке 4.5в) Изображение метки бинаризуется и фильтруется аналогично изображению всего макета (рисунок 4.5б). Условием выделения метки является ее цвет. Аналогично предыдущему этапу определяются координаты метки. Полученные координаты используются для определения ориентации макета (курса судна). Основные этапы обработки видеосигнала показаны на рисунке 4.5.

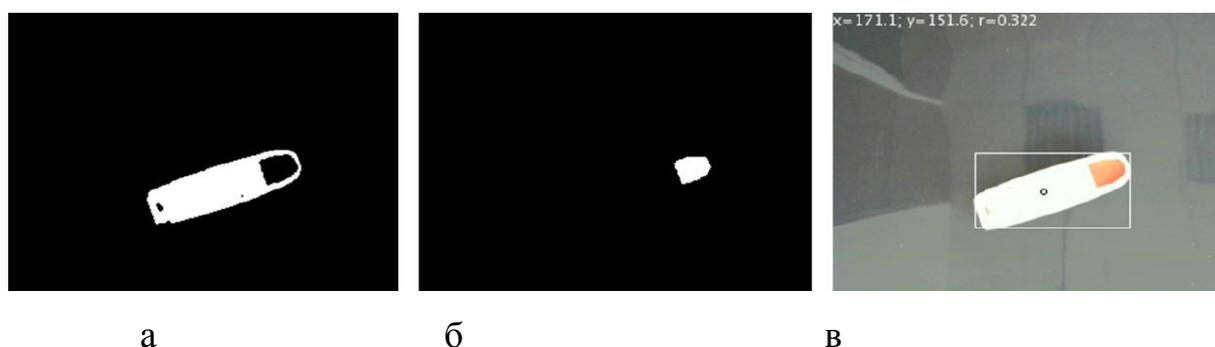


Рисунок 4.5 – Этапы обработки видеосигнала: создание маски корпуса (а); создание маски носовой метки (б); определение координат судна и курса (в)

Полученный видеосигнал обрабатывается персональным компьютером. После «привязки» полученных координат к размерам бассейна определяются координаты макета и его курс.

При отработке новых алгоритмов управления судном задания в виде управляющих сигналов передаются на двигатели модели посредством

протокола беспроводной сети Bluetooth. Выбор подобного способа беспроводной передачи данных обусловлен низкой стоимостью и распространенностью оборудования как для персональных компьютеров, так и для программируемых контроллеров [76-78].

Апробация предложенного алгоритма проводилась на макете водной акватории (в бассейне с водой объемом 150 л) в масштабе 1:32 (рисунки 4.6, 4.7). Для системы определения положения модели судна выбрана видеокамера Logitech C270. Разрешение камеры составляет 1280×720 пикселей. Камера оснащена широкоугольным объективом и позволяет снимать видеоряд с частотой 30 кадров в секунду. Выбор камеры обусловлен тем, что в данной модели отсутствует неотключаемая автоматическая фокусировка, что исключает потерю фокусировки при постоянном перемещении модели.

При длине модели до 430 мм точность определения координат составила величину до 2 мм, что вполне достаточно для исследования законов управления судном.

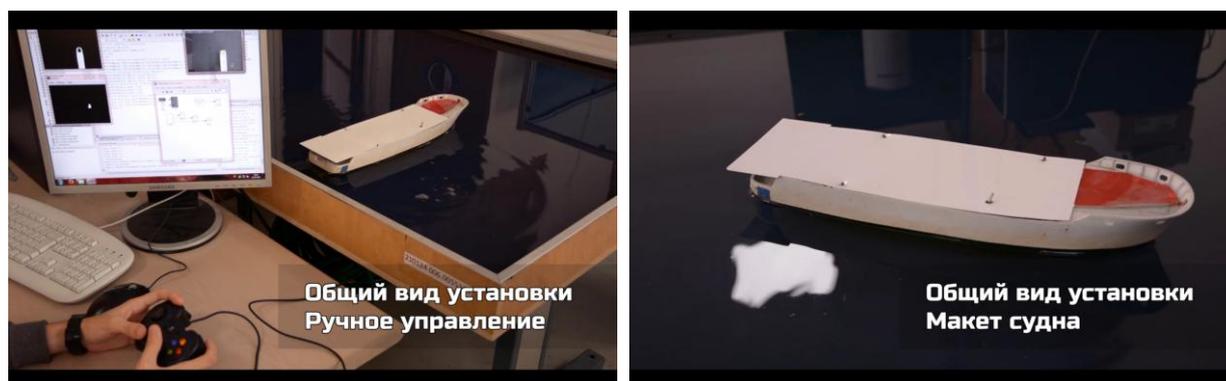


Рисунок 4.6 – Общий вид установки

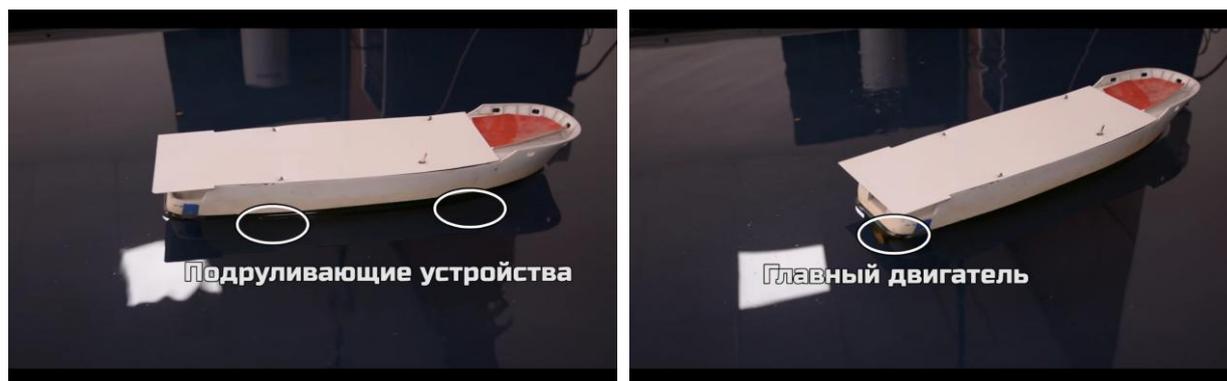


Рисунок 4.7 – Подруливающие устройства и главный двигатель судна

4.7 Результаты экспериментальных исследований

Раздел посвящен результатам экспериментальных исследований разработанных алгоритмов управления применительно к роботизированному макету надводного судна, математическая модель которого была подробно описана в разделе 3.2. Реализация закона управления состоит из ряда этапов, а именно:

- организация технического зрения робототехнической системы, обработка видеоизображения и определение текущих координат макета;
- пересчет координат по каналам X и Y из абсолютных в локальные;
- расчет желаемых результирующих продольной и поперечной сил и поворотного момента на основе отклонений по координатам;
- обеспечение реального масштаба времени;
- расчет распределителя тяги судна и ограничение управления (вычисление реальных сигналов управления);
- апробация, анализ работы, отладка.

Далее рассмотрим каждый этап более подробно.

4.7.1 Эксперимент с ручным управлением

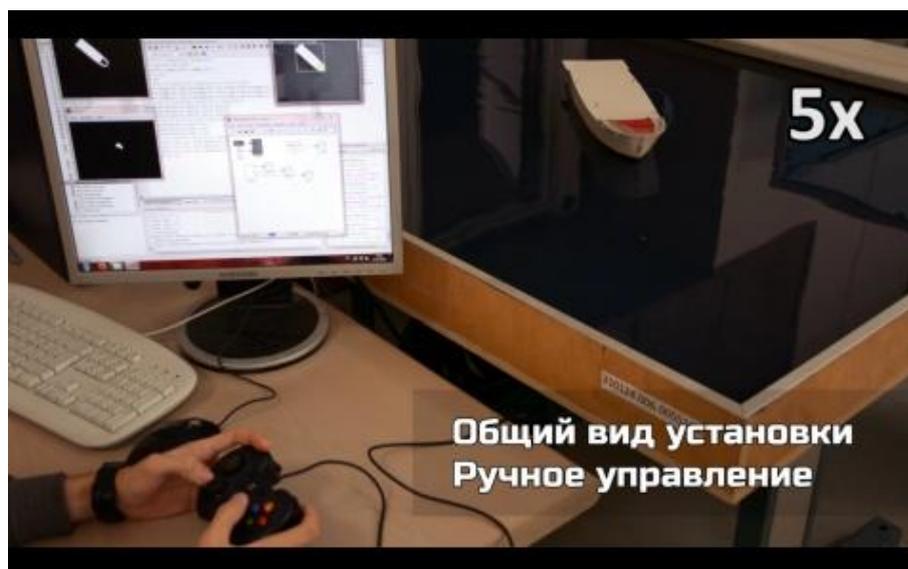
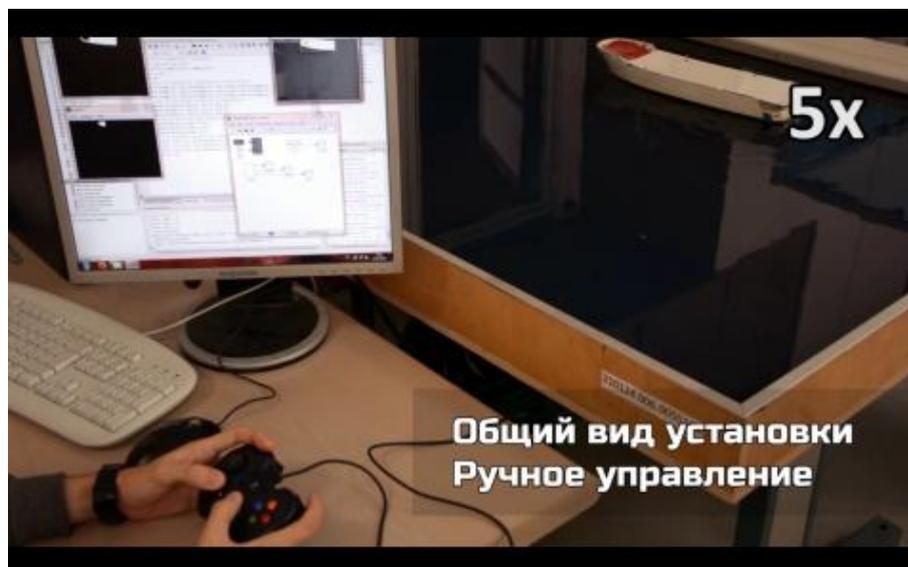
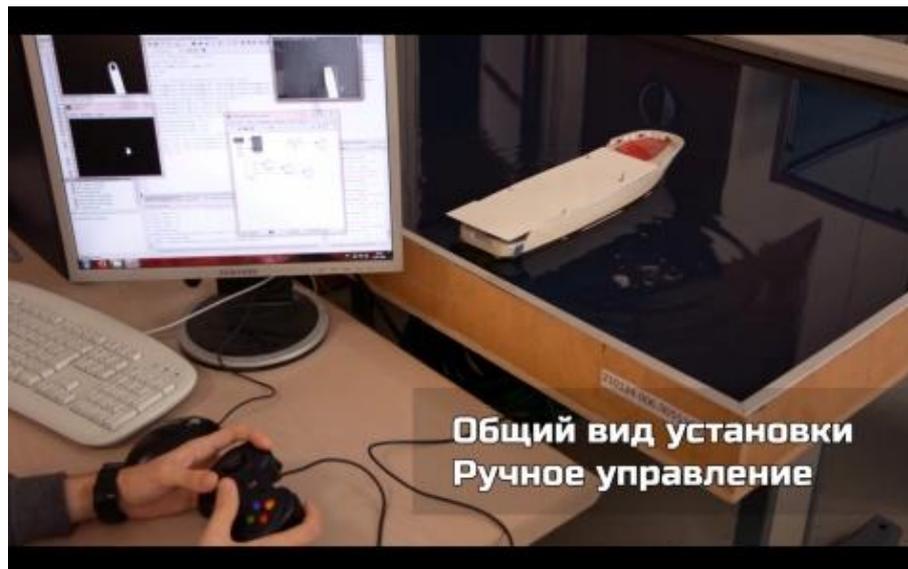


Рисунок 4.8 – Движение судна при ручном управлении

4.7.2 Оценивание навигационных данных с помощью технического зрения

Первый этап, как было сказано, заключается в организации технического зрения и соответствующей его обработке. Очевидно, что для пересчета координат по X и Y из абсолютных в локальные (см. второй этап) и вычисления ошибки регулирования по курсу судна, необходимо обеспечить получение текущих значений по всем трем координатам.

Для реализации технического зрения была выбрана цифровая камера без автофокусировки. Она установлена на штативе над бассейном. При обработке видеопотока для подавления шумов используются широко известный медианный фильтр. Алгоритм определения положения судна заключается в отыскании на темном фоне белого прямоугольника, соответствующего контуру объекта. После этого определяется центр найденного прямоугольника и, соответственно, текущие координаты по X и Y. Распознавание ориентации судна в плоскости осуществляется с помощью красной метки на носу. После этого можно получить угол между продольной осью судна и осью X. Таким образом, в результате простых подходов осуществляется определение всех трех текущих координат робототехнической системы (см. также раздел 4.6).

4.7.3 Синхронизация времени в распределенной системе управления

Поскольку в рассматриваемом робототехническом комплексе используется цифровая камера, которая подает сигналы только в дискретные моменты времени, то необходимо и всю систему строить с учетом времени квантования. Используем время дискретизации $T_s = 0,25$ с, которое определяется возможностями камеры.

Цифровая камера и система управления работают по дискретному времени. При этом время должно быть синхронизировано с реальным. Иначе сигналы управления будут поступать несвоевременно.

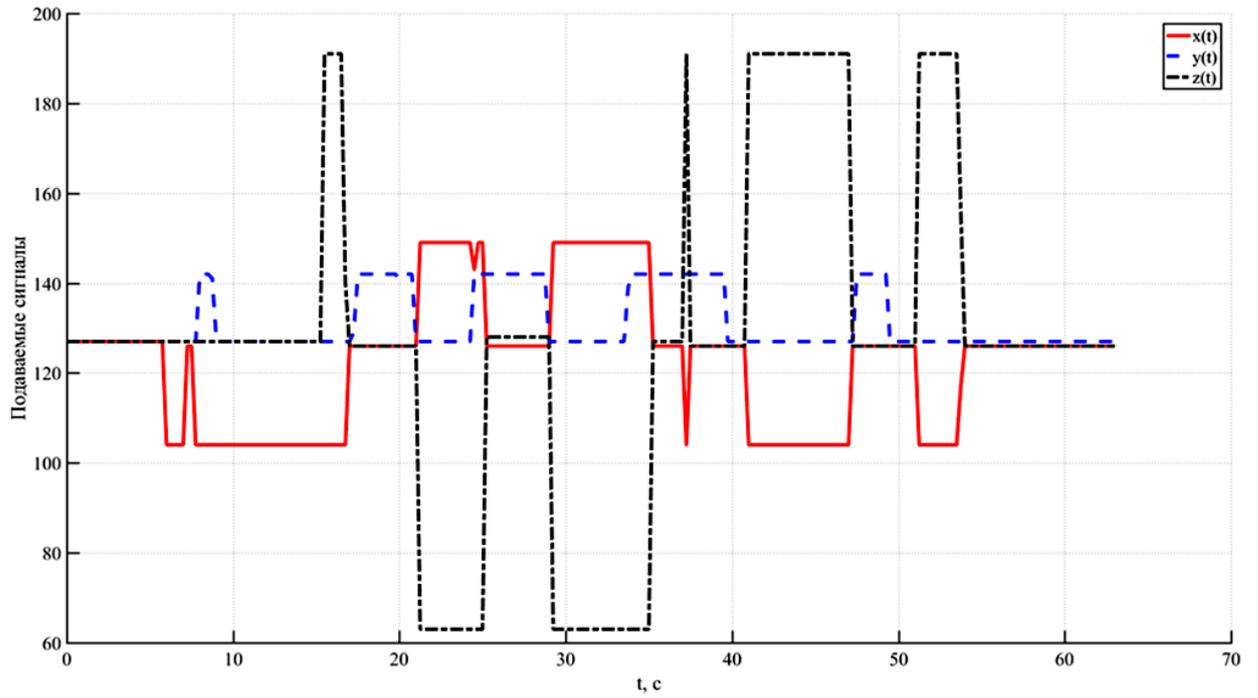


Рисунок 4.6 – Подаваемые сигналы управления на двигатели судна

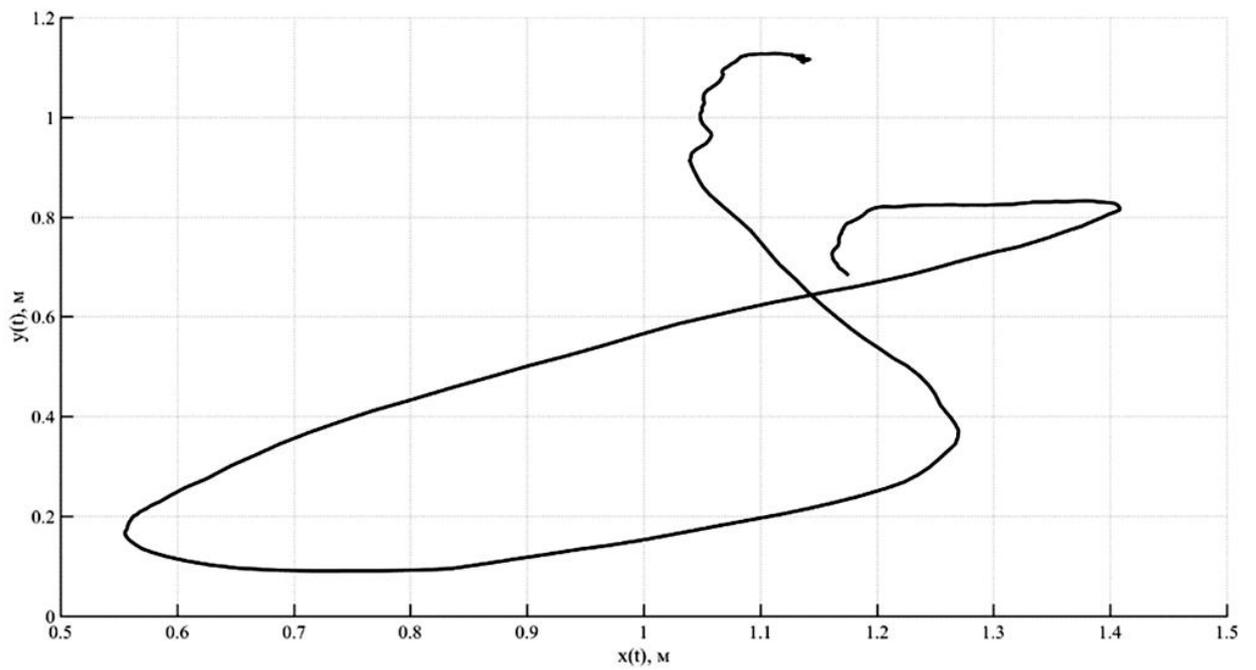


Рисунок 4.7 – Траектория движения судна при ручном управлении

4.7.4 Исследование пропорционального регулятора.

В соответствии с постановкой задачи модель объекта управления может содержать неизвестные параметры. Допускается, что известна относительная степень.

Пропорциональный регулятор имеет вид:

$$P_x = \gamma_x \bar{x}, P_y = \gamma_y \bar{y}, M_z = \gamma_z \bar{z},$$

для некоторых положительных параметров $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$.

Желаемое положение судна было задано: $x^* = 1$ м, $y^* = 0,4$ м, $z^* = 0^\circ$. Графики переходных процессов на рисунках 4.8-4.10 показывают, что при достижении заданной точки, регулятор отключается, но судно продолжает движение, и переходит заданное значение по инерции, в этот момент регулятор начинает подавать управление для движения в обратном направлении и постепенно система устанавливается и сходится к заданным координатам. Но этот процесс медленный и с большими колебаниями.

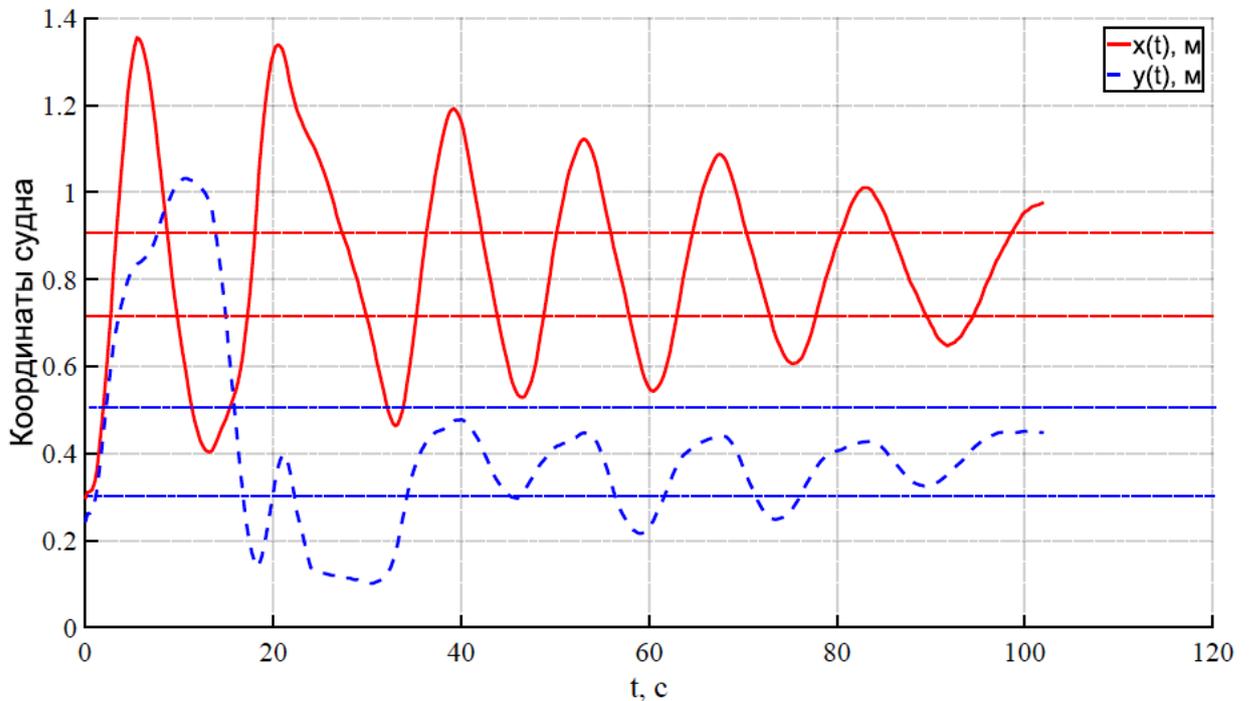


Рисунок 4.8 – Координаты судна при работе пропорционального регулятора

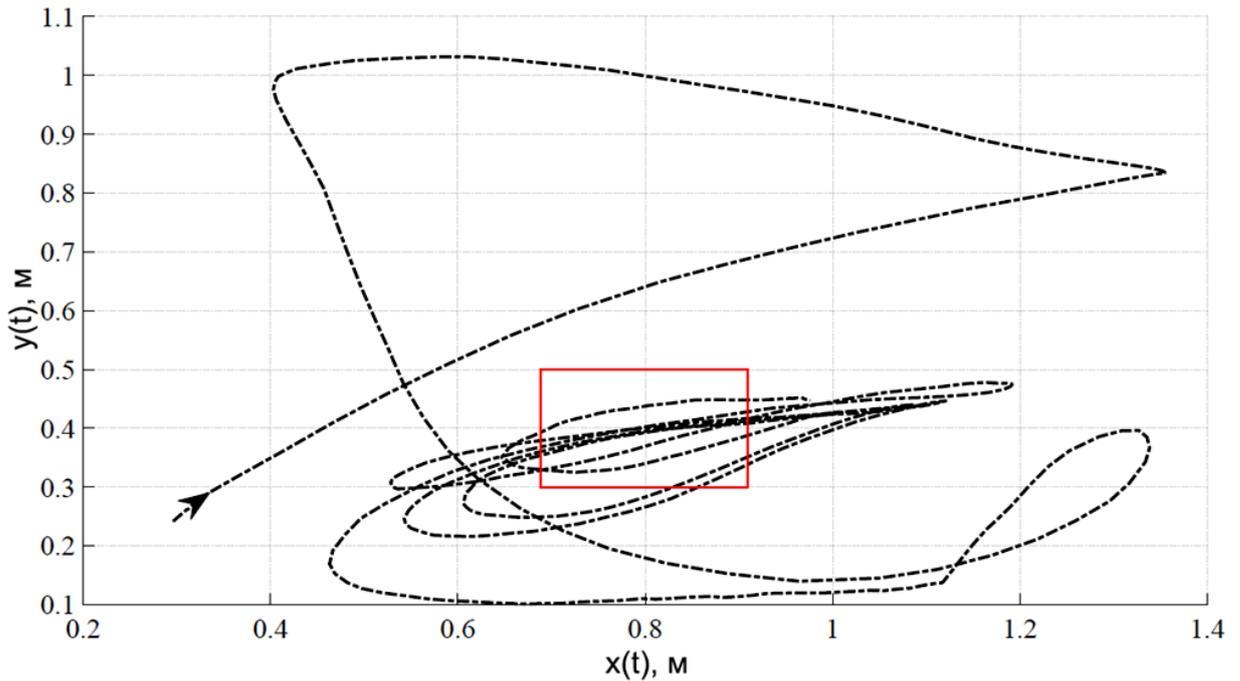


Рисунок 4.9 – Траектория движения судна при работе пропорционального регулятора



Рисунок 4.10 – Общий вид на макет судна при работе пропорционального регулятора

4.7.5 Эксперимент с алгоритмом робастного управления

Результат экспериментальных исследований робастного регулятора (3.14)–(3.17) на основе последовательного компенсатора представлен на рисунках 4.10–4.12. Параметры регуляторов были выбраны следующие: $k_x = 2$, $k_y = 3$, $k_z = 12$, $\sigma_x = 10$, $\sigma_y = 10$, $\sigma_z = 17$. Желаемое положение макета судна было задано: $x^* = 0,75$ м, $y^* = 0,57$ м, $z^* = 0^\circ$. Из графиков переходных процессов видно, что судно за 20 секунд достигло заданных координат и оставалось в окрестности заданной точки.

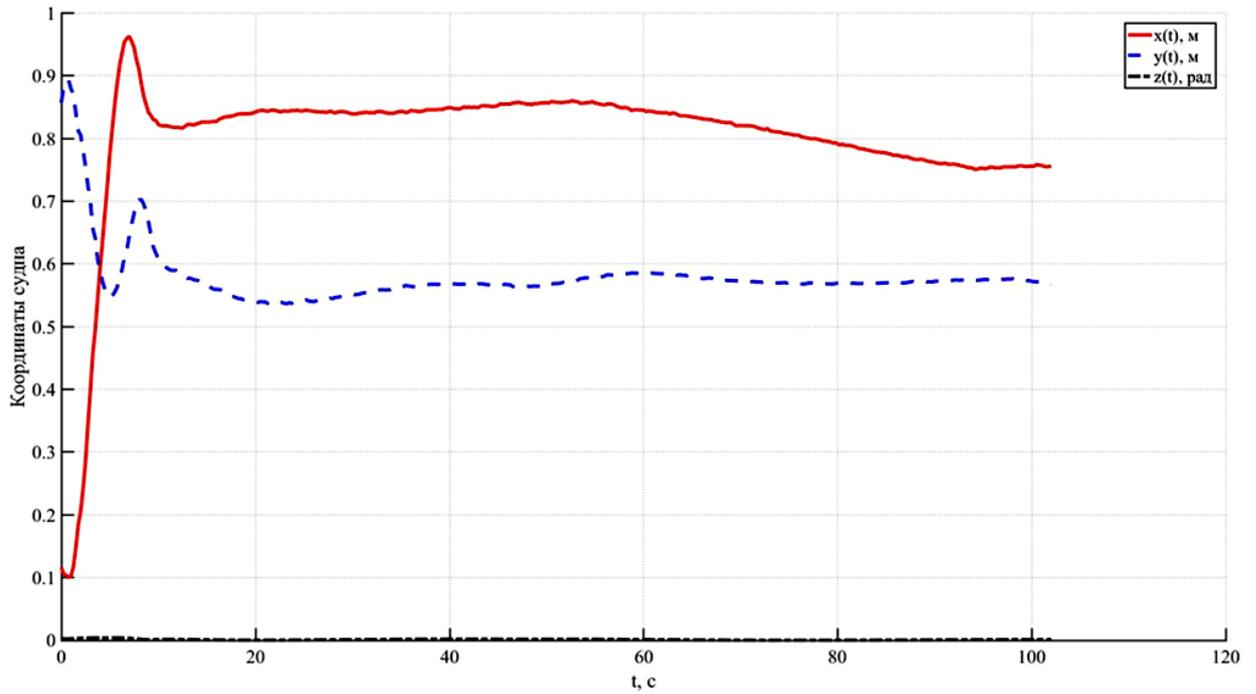


Рисунок 4.7 – Координаты судна при работе алгоритма управления (3.14)-
(3.17)

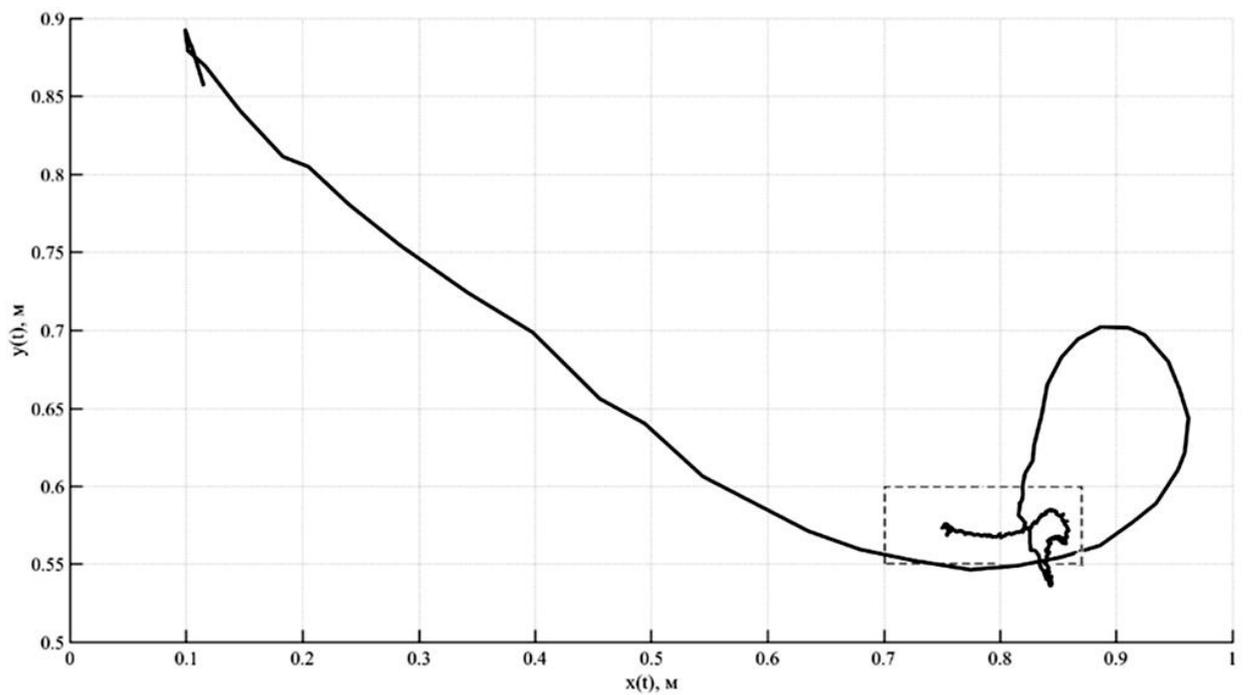


Рисунок 4.8 – Траектория движения судна при работе алгоритма управления
(3.14)-(3.17)



Рисунок 4.9 – Общий вид на макет судна при работе алгоритма управления (3.14)-(3.17)

Следующий эксперимент повторяет предыдущий, но, в уже установившемся режиме, на судно действует внешнее возмущение, отклоняющее его от заданной точки. Результаты эксперимента представлены на рисунках 4.13 и 4.14. Из графиков видно, что судно возвращается в заданную точку позиционирования.

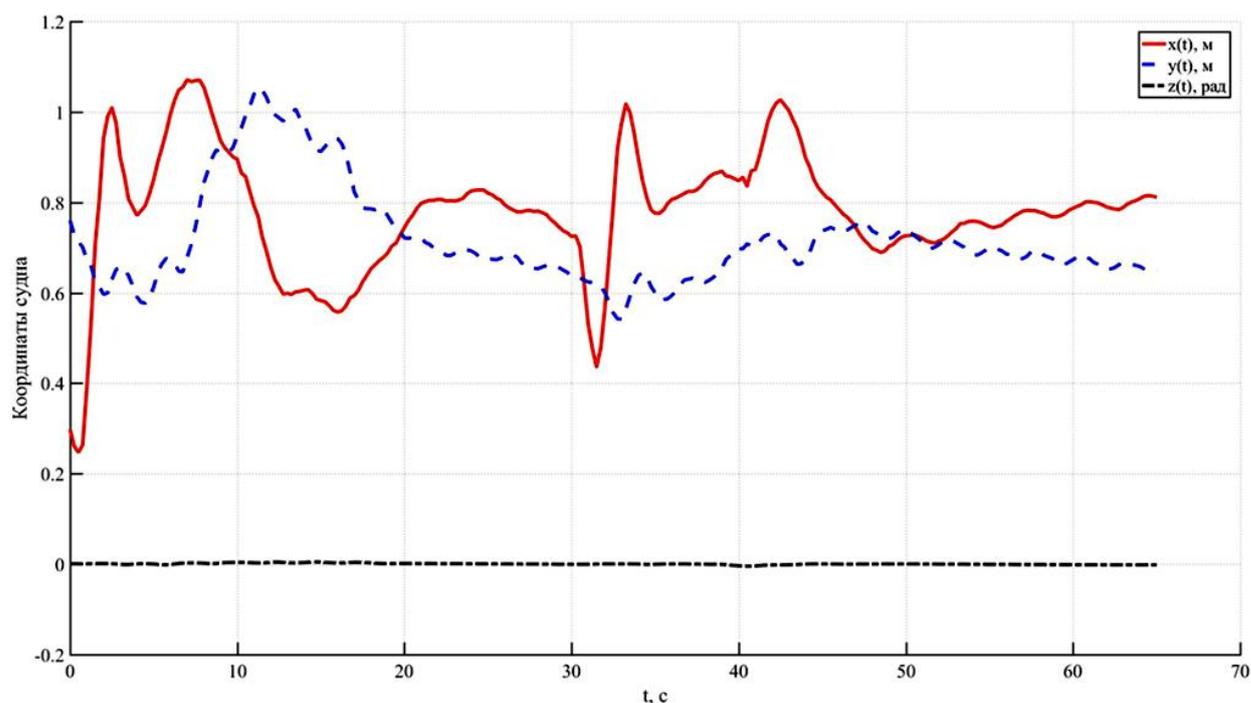


Рисунок 4.10 – Координаты судна при работе алгоритма управления (3.14)-(3.17) и внешнем возмущении



Рисунок 4.11 – Общий вид на макет судна при работе алгоритма управления (3.14)-(3.17) и внешнем возмущении

4.7.6 Эксперимент с алгоритмом адаптивного управления

Далее на рисунках 4.15–4.20 представлены результаты экспериментального исследования задачи динамического позиционирования макета судна в точке.

Желаемые положение и ориентация судна заданы такие же, как и в предыдущем эксперименте. Были выбраны следующие значения допустимых областей настройки параметров управления $\delta_x = 0,024$ м, $\delta_y = 0,024$ м, $\delta_z = 8,6^\circ$.

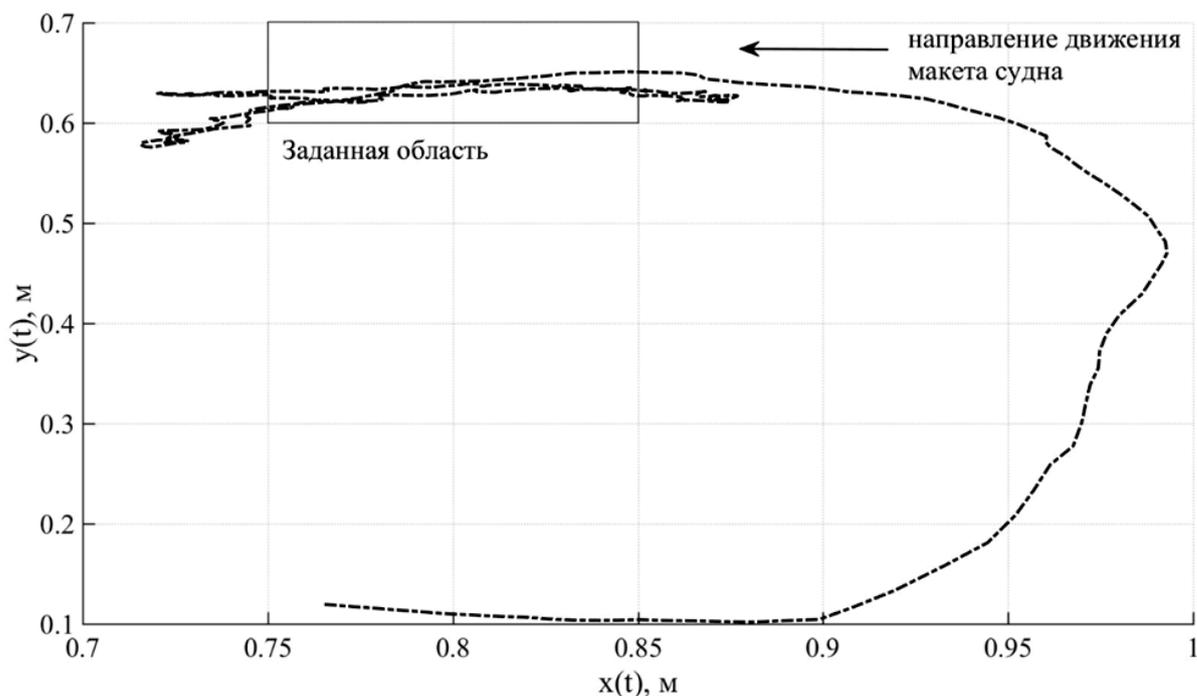


Рисунок 4.12 – Траектория движения судна при работе трех адаптивных регуляторов вида (2.70)-(2.78) для каждого контура

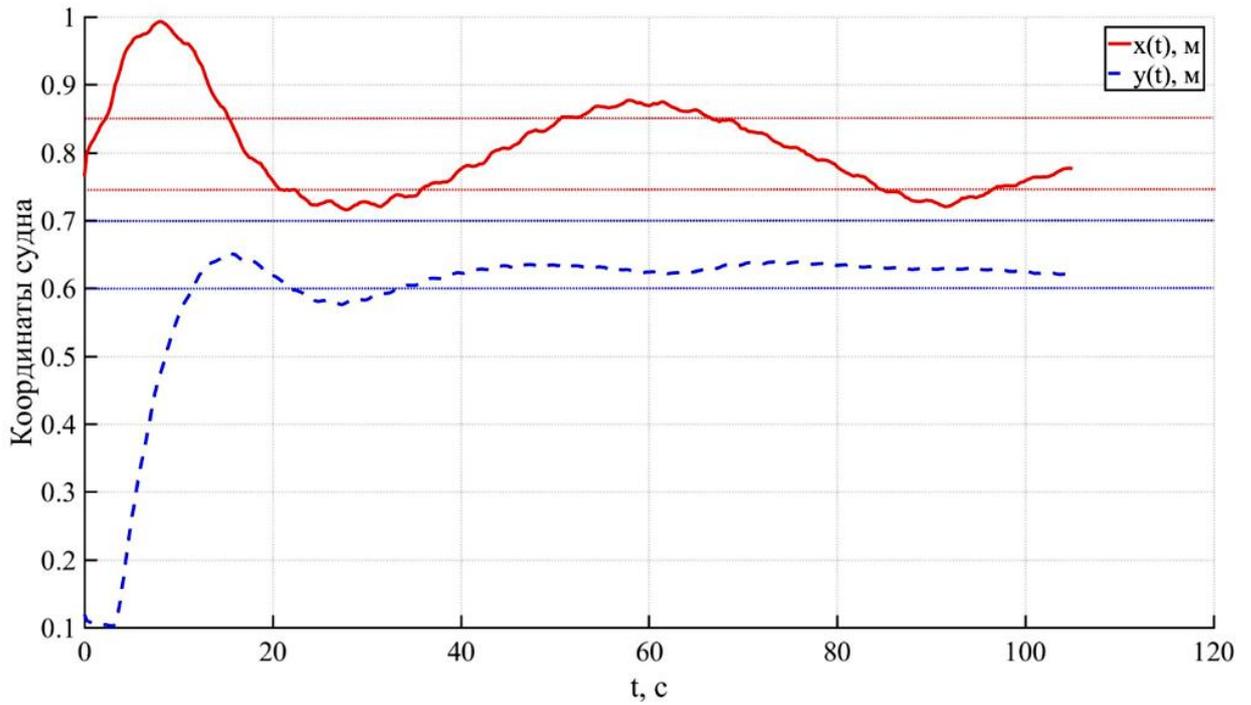


Рисунок 4.13 – Координаты судна при работе трех адаптивных регуляторов вида (2.70)-(2.78) для каждого контура

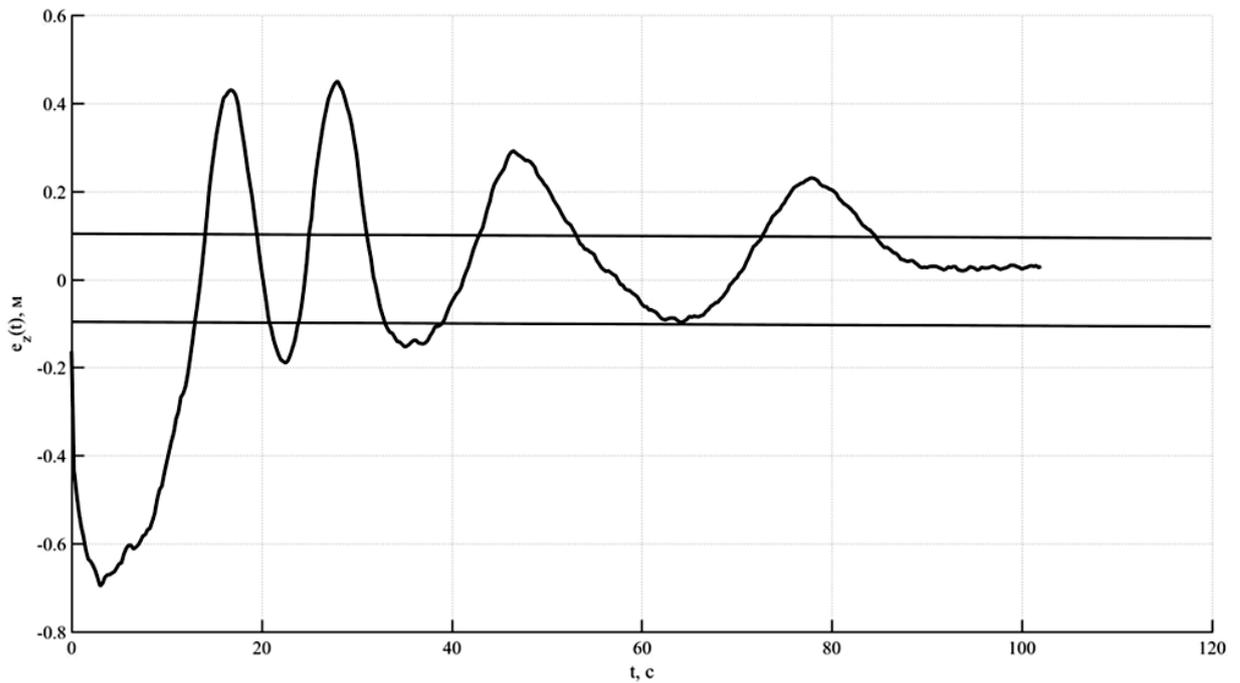


Рисунок 4.14 – График переходного процесса для ошибки по курсу при работе трех адаптивных регуляторов вида (2.70)-(2.78) для каждого контура

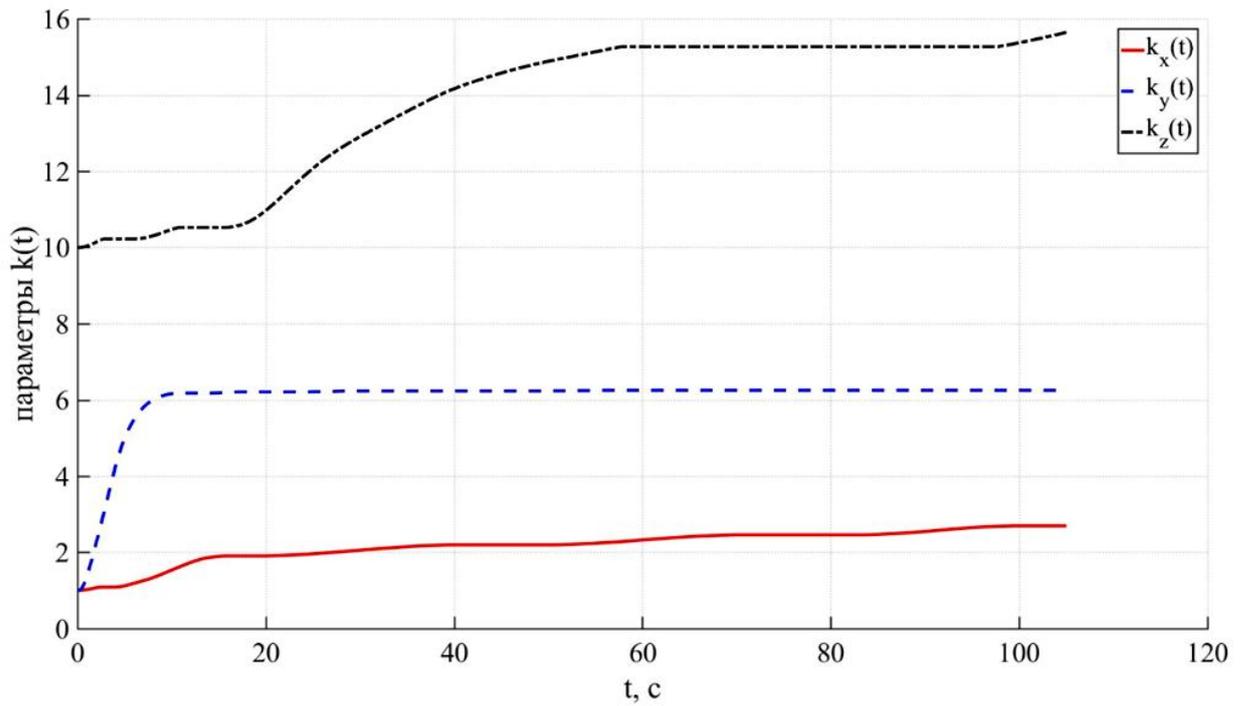


Рисунок 4.15 – Графики параметров $k_x(t)$, $k_y(t)$, $k_z(t)$ при работе трех адаптивных регуляторов вида (2.70)-(2.78) для каждого контура

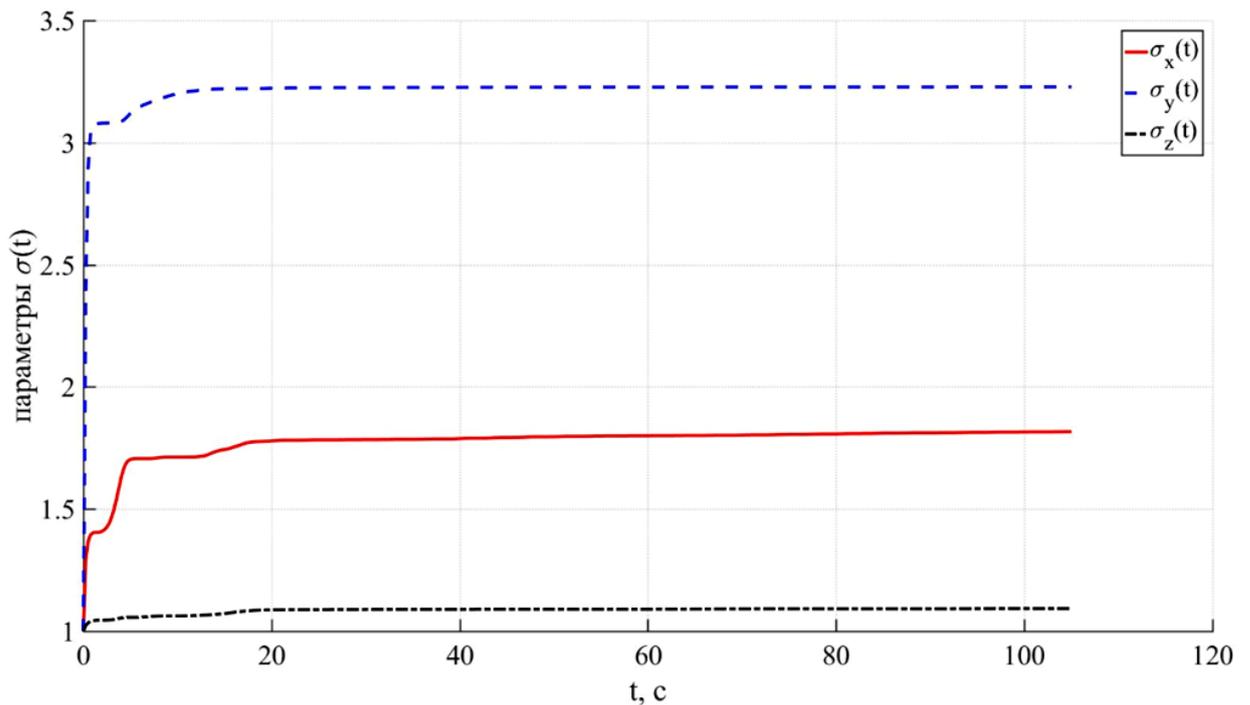


Рисунок 4.16 – Графики параметров $\sigma_x(t)$, $\sigma_y(t)$, $\sigma_z(t)$ при работе трех адаптивных регуляторов вида (2.70)-(2.78) для каждого контура

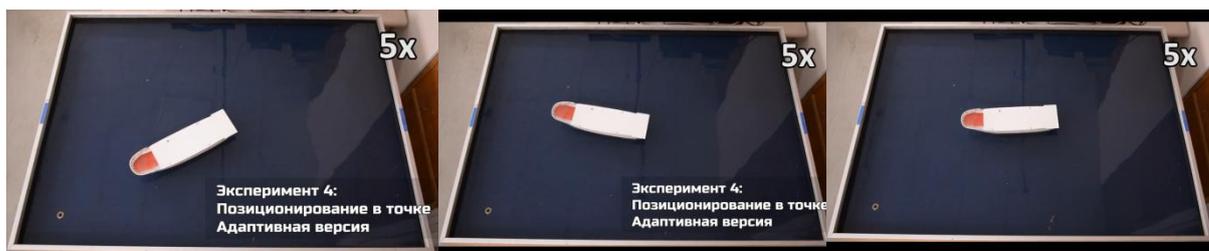


Рисунок 4.17 – Общий вид макета при работе трех адаптивных регуляторов вида (2.70)-(2.78) для каждого контура

4.7.7 Траекторное управление

С помощью алгоритма, представленного в предыдущих разделах, можно решить задачу удержания судна на заданном пути следования. Для этого необходимо синтезировать планировщик пути, который будет генерировать задающее воздействие для системы динамического позиционирования [3]. Таким образом, мы перейдем от задачи стабилизации некоторого заданного значения к слежению за командным сигналом.

Такой способ удержания траектории был успешно апробирован на специализированном комплексе моделирования движения судна. В эксперименте в течение двух минут судно совершает два прохода по окружности с удержанием курсового угла $z^* = 0^\circ$, что подтверждает эффективность и практическую пользу разработанной системы динамического позиционирования.

Далее представлены результаты экспериментального исследования движения по траектории

В первом эксперименте проводились испытания работы пропорционального регулятора, при движении судна по круговой окружности. Результаты представлены на рисунках 4.21, 4.22.

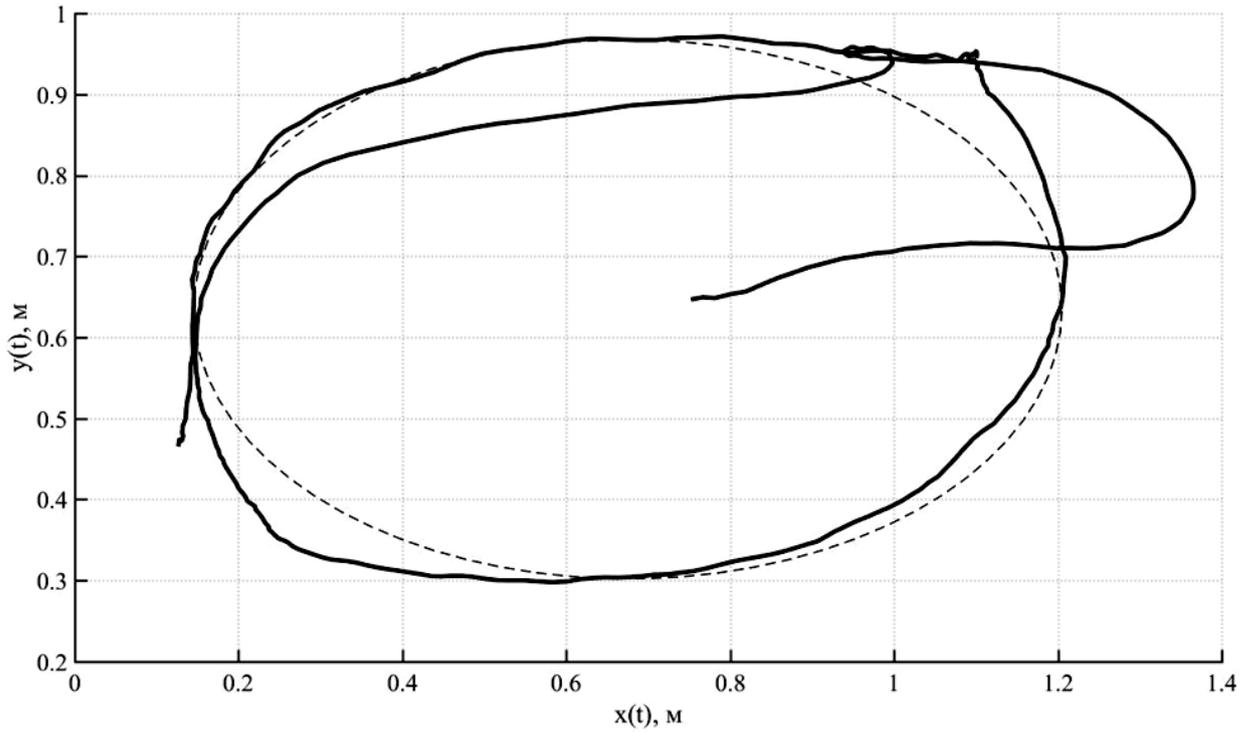


Рисунок 4.18 – Траектория движения судна при работе пропорциональных регуляторов

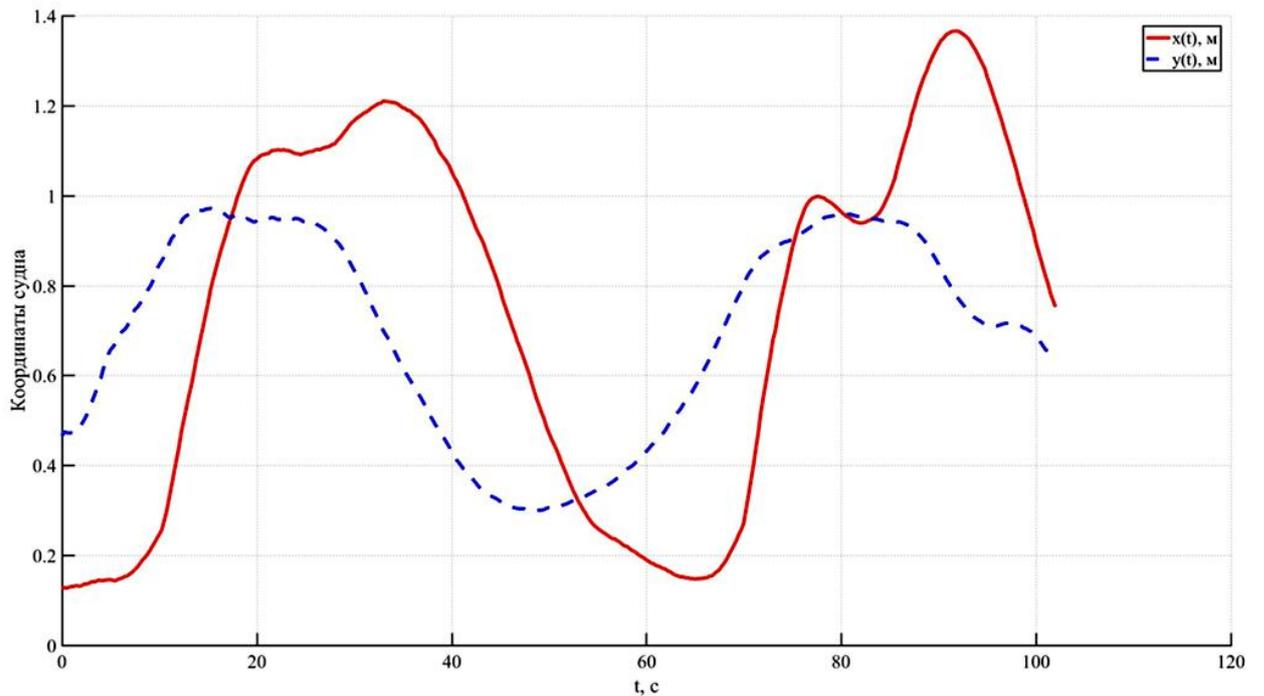


Рисунок 4.19 – Координаты судна при движении по заданной траектории при работе пропорциональных регуляторов

Следующий эксперимент был посвящен исследованию работы робастного регулятора на основе последовательного компенсатора.

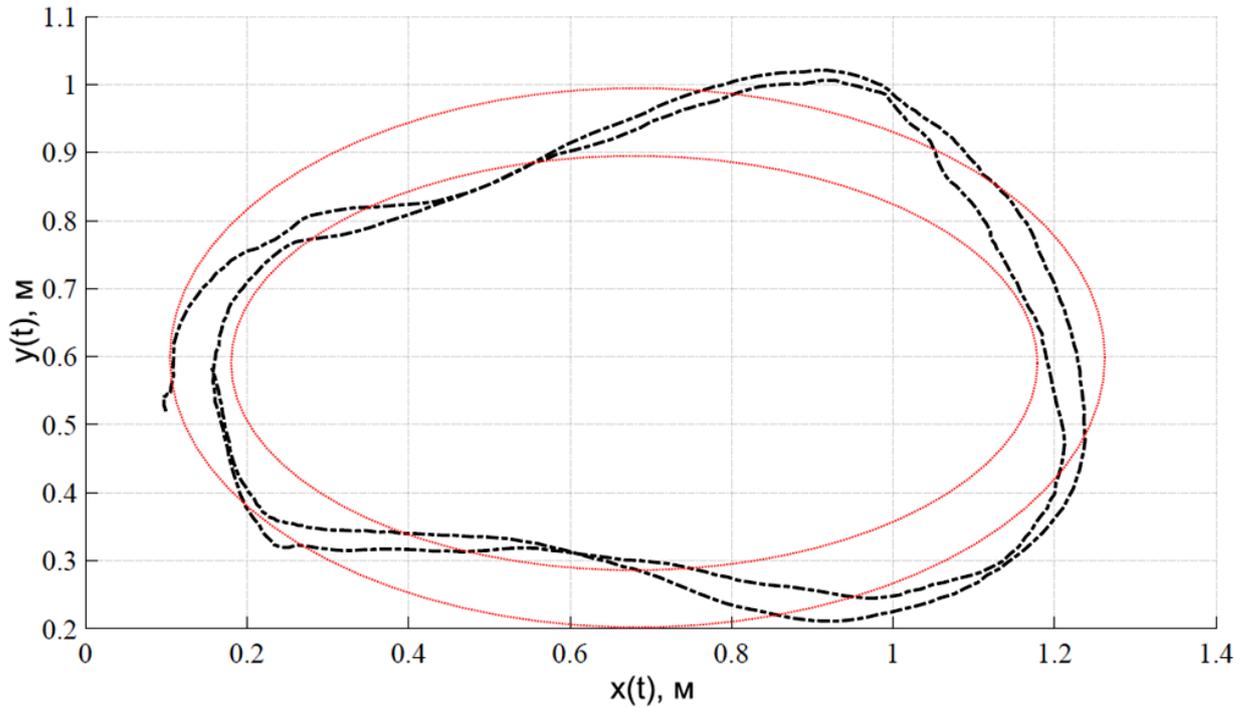


Рисунок 4.20. Траектория движения судна при работе алгоритма управления (3.14)-(3.17)

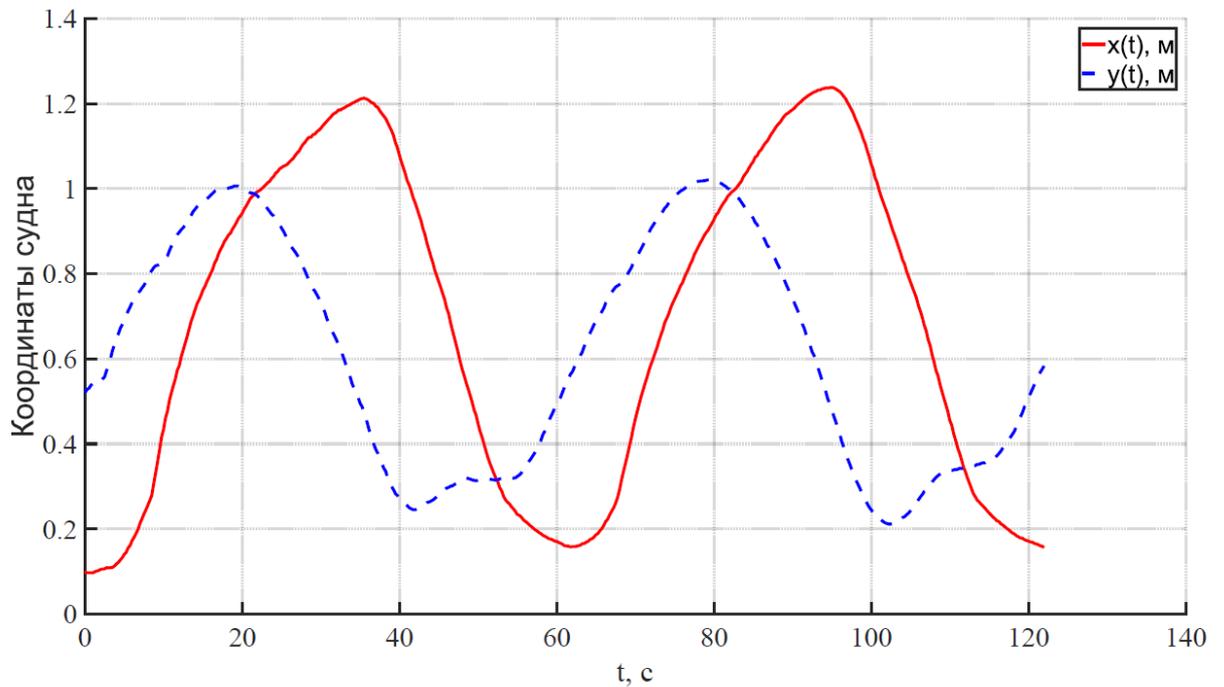


Рисунок 4.21 – Координаты судна при работе алгоритма управления (3.14)-(3.17)

Последний эксперимент был по исследованию алгоритма адаптивного управления в режиме швартовки. Для регулятора была задана траектория движения и конечная точка в которую судно должно прийти.

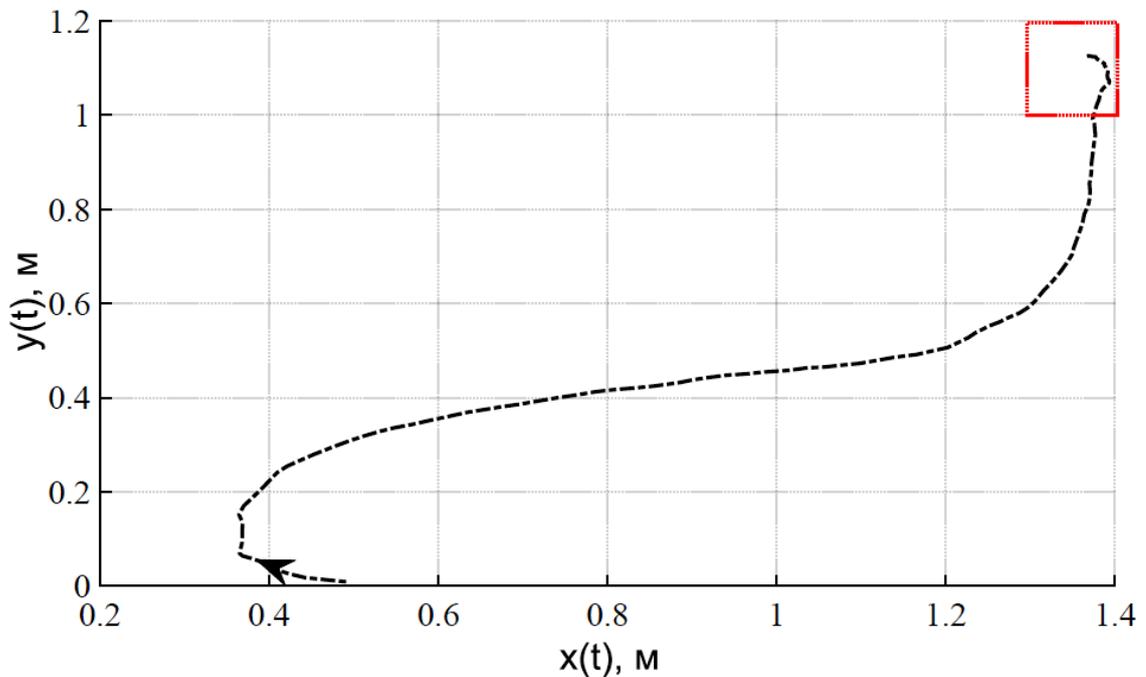


Рисунок 4.22 – Траектория движения судна в режиме швартовки при работе трех адаптивных регуляторов вида (2.70)-(2.78) для каждого контура

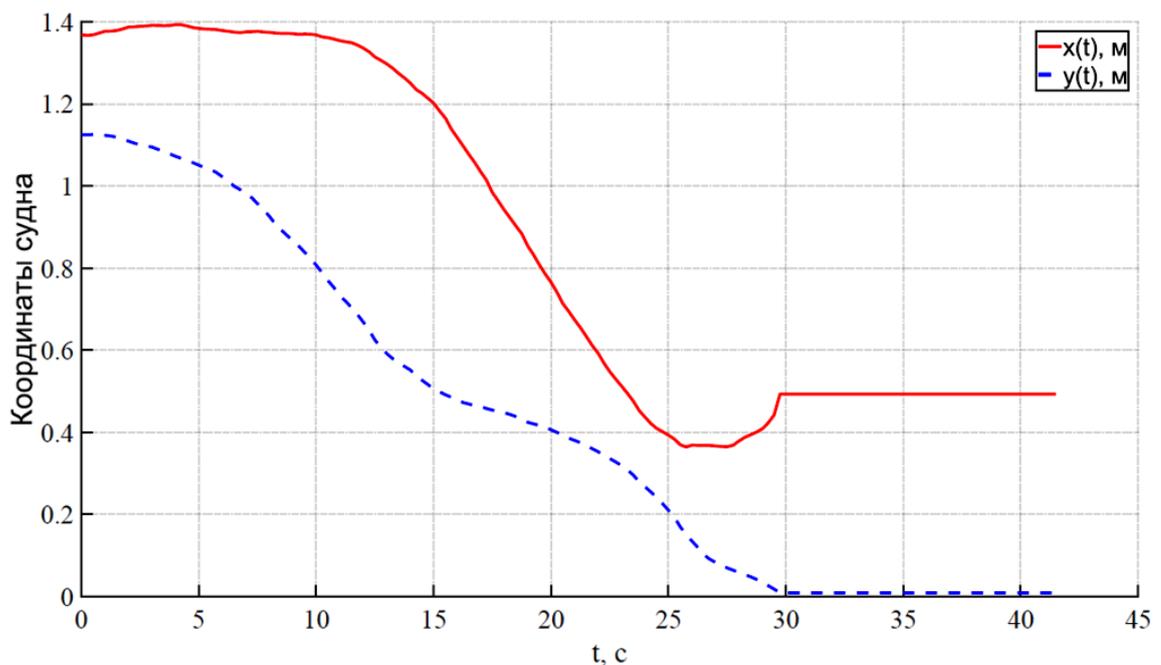


Рисунок 4.23 – Координаты движения судна в режиме швартовки при работе трех адаптивных регуляторов вида (2.70)-(2.78) для каждого контура

4.8 Выводы по главе

В Главе 4 представлены результаты экспериментальных исследований теоретических результатов диссертационной работы в целом. Для этого был разработан оригинальный роботизированный макет надводного судна, имитирующий реальное судно в масштабе 1:32. Решены задачи выбора исполнительных органов управления, включая главный двигатель, носовое и кормовое подруливающие устройства, управляемую поворотную насадку. Разработана система дистанционного управления роботизированным макетом судна. Разработан новый алгоритм определения линейных координат макета на плоскости и курсового угла на базе компьютерного зрения.

Таким образом, результаты Главы 4 подтверждают состоятельность теоретических положений диссертационной работы, демонстрируя эффективность разработанных алгоритмов робастного и адаптивного управления в реальном эксперименте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена сложная задача управления многомерными нелинейными системами с компенсацией возмущающих воздействий с приложением для надводных водоизмещающих судов. В классе задач управления по выходу в условиях параметрической и функциональной неопределенностей получены оригинальные решения по синтезу алгоритмов адаптивного и робастного управления как для одномерных, так и для многомерных систем.

Во введении отмечена актуальность рассматриваемой проблемы, обозначены ключевые цели и задачи для диссертационного исследования.

В первой главе изложены результаты аналитического обзора методов робастного управления в условиях параметрической и функциональной неопределенностей математических моделей объектов. Рассмотрены наиболее эффективные методы компенсации возмущающих воздействий для различных задач. Сформулирована обобщенная постановка задачи и подзадачи, решению которых посвящены последующие главы диссертационной работы.

Во второй главе подробно описан разработанный алгоритм робастной стабилизации нелинейных возмущенных систем с нелинейными секторными ограничениями и параметрическими неопределенностями, а также новая адаптивная версия этого алгоритма. Выполнено математическое моделирование алгоритмов робастного и адаптивного управления движением надводных судов в режиме слежения за заданным значением по одной из трех регулируемых переменных: линейные координаты на плоскости и угол поворота.

В третьей главе представлен метод управления классом многомерных нелинейных систем, основанный на декомпозиции математической модели на статическую и динамическую компоненты. В качестве примера использования такого метода рассмотрена задача управления движением

надводного судна в задаче динамического позиционирования в точке. Показаны способ декомпозиции математической модели и поэтапный синтез алгоритмов управления. Разработан новый универсальный метод распределения управляющих воздействий. Показан алгоритм его использования на примере пяти наиболее распространенных конфигураций надводных судов, основанный на поиске линейных (монотонных) зависимостей между заданными силами и моментом и проекциями сил, развиваемых органами управления, на продольное и поперечное направления. С использованием результатов второй главы решена задача стабилизации динамических каналов многомерной нелинейной системы, что позволило решить общую задачу диссертационной работы.

В четвертой главе представлен разработанный и изготовленный оригинальный роботизированный макет надводного судна, имитирующий реальное судно в масштабе 1:32. Разработана система беспроводной связи для дистанционного управления роботизированным макетом. Предложен алгоритм определения текущих координат судна на плоскости (две линейные координаты и курсовой угол) с помощью средств компьютерного зрения. С использованием теоретических результатов второй и третьей глав синтезированы алгоритмы робастного и адаптивного управления движением судна в задаче динамического позиционирования в точке, а также в режиме траекторного управления. С использованием результатов второй и третьей главы выполнены экспериментальные исследования теоретических результатов диссертационной работы в целом. Выполненные экспериментальные исследования показали высокую эффективность и надежность разработанных алгоритмов управления.

В будущем будут продолжены исследования этих задач с целью усиления достигнутых результатов. Большой интерес представляют задачи адаптивного управления многозвенными робототехническими системами в задачах компенсации неизмеряемых возмущающих воздействий с гарантированным обеспечением показателей качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Робастная система динамического позиционирования для роботизированного макета надводного судна [текст] / С.М. Власов, О.И. Борисов, В.С. Громов, А.А. Пыркин, А.А. Бобцов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение – 2015. – Т. 58. – № 9. – С. 713-719
2. Алгоритмы адаптивного и робастного управления по выходу роботизированным макетом надводного судна [текст] / С.М. Власов, О.И. Борисов, В.С. Громов, А.А. Пыркин, А.А. Бобцов // Мехатроника, автоматизация, управление -2016. - Т. 17. - № 1. - С. 18-25
3. Система технического зрения для роботизированного макета надводного судна [текст] / С.М. Власов, В.С. Громов, О.И. Борисов, А.А. Пыркин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 749–752.
4. Lego Mindstorms NXT for Students' Research Projects in Control Field [text] / S.M. Vlasov, S.A. Kolyubin, A.A. Bobtsov, A.A. Pyrkin, A. Kapitonov, S.V. Shavetov, A.V. Khovanskiy, A.Y. Krasnov, A.D. Feskov // IFAC Symposium Advances in Control Education, Nizhny Novgorod, Russia, June 19, 2012. P. 102-106.
5. Dynamic Positioning System for Nonlinear MIMO Plants and Surface Robotic Vessel [text] / S.M. Vlasov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin, M.O. Surov, A.A. Vedyakov, A.D. Feskov, A.Y. Krasnov, O.I. Borisov, V.S. Gromov // IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management, and Control, June 19-21, 2013, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia. P. 1867-1872.
6. Simple Robust and Adaptive Tracking Control for Mobile Robots [text] / S.M. Vlasov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin, M.V. Faronov, O.I. Borisov, V.S. Gromov, N.A. Nikolaev // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), MICNON 2015, Vol. 48, No. 11, pp. 143-149

7. Output Control Algorithms of Dynamic Positioning and Disturbance Rejection for Robotic Vessel [text] / S.M. Vlasov, J. Wang, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, O.I. Borisov, V.S. Gromov, S.A. Kolyubin // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), MICNON 2015, Vol. 48, No. 11, pp. 295-300
8. С.М. Власов, Проектирование и разработка многозвенной робототехнической системы [текст] / О.И. Борисов, В.С. Громов, А.Ю. Краснов, В.В. Руденко // Сборник трудов IV Всероссийского конгресса молодых ученых. Санкт-Петербург, 2015. С. 86–90.
9. MIMO positioning system for surface robotic vessel [text] / S.M. Vlasov, V.S. Gromov, O.I. Borisov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin, A.A. Vedyakov // Automation & Control: Proceedings of the International Conference of Young Scientists, 21-22 November 2013, pp. 82-86
10. Образовательный комплекс апробации систем управления судами [текст] / С.М. Власов, О.И. Борисов, В.С.Громов, А.А. Пыркин // Сборник публикаций студентов и аспирантов по итогам XLIII научной и учебно-методической конференции НИУ ИТМО - 2014.
11. Робастное управление по выходу линейной системой с неопределенными коэффициентами [текст]/ А.А. Бобцов // Автоматика и телемеханика, 2002, № 11, 108–117.
12. Синтез управления нелинейными системами с функциональными и параметрическими неопределенностями на основе теоремы Фрадкова [текст] / А.А. Бобцов, Н.А. Николаев // Автоматика и телемеханика, 2005, № 1, 118–129
13. Simple Output Stabilization Approach for Robotic Systems, [text] / A. Pyrkin, A. Bobtsov, S. Kolyubin, M. Surov, S. Shavetov, O. Borisov, V. Gromov // Manufacturing Modelling Management, and Control, 2013, vol. 7, no. 1, pp. 1873-1878.

14. Output Control for Time-Delay Nonlinear System Providing Exponential Stability [text] / A. Bobtsov, A. Pyrkin, M. Faronov // The 19th Mediterranean Conference on Control and Automation (IEEE), Corfu, Greece, 2011.
15. Output Control Approach "Consecutive Compensator" Providing Exponential and L-infinity-stability for Nonlinear Systems with Delay and Disturbance [text] / A. Pyrkin, A. Bobtsov, S. Kolyubin, M. Faronov, S. Shavetov, Y. Kapitanyuk, A. Kapitonov // Proc. IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Denver, USA, 2011.
16. Output Control for Nonlinear System with Time-Varying Delay and Stability Analysis [text] / A. Pyrkin, A. Bobtsov // 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, USA, 2011.
17. Kokotovic, P. Constructive nonlinear control: a historical perspective [Text] / P. Kokotovic, M. Arcak // Automatica. — 2001. — Vol. 37, no. 5. — P. 637–662.
18. Arcak, M. Feasibility conditions for circle criterion designs [Text] / M. Arcak, P. Kokotovic // Systems & Control Letters. — 2001. — Vol. 42, no. 5. — P. 405–412.
19. Arcak, M. Circle and Popov criteria as tools for nonlinear feedback design [Text] / M. Arcak, M. Larsen, P. Kokotovic // Automatica. — 2003. — Vol. 39, no. 4. — P. 643–650.
20. Фрадков А. Л. Синтез адаптивной системы стабилизации линейного динамического объекта // Автоматика и телемеханика. — 1974. — Т. 35. — №. 12-С. — С. 96-103.
21. Цыкунов, А.М. Адаптивное и робастное управление динамическими объектами по выходу [Текст] / А.М. Цыкунов. — [Б. м.] : М.: Физматлит, 2009. — С. 268.
22. Бобцов, А.А. Алгоритм компенсации неконтролируемого возмущения в задаче стабилизации выходной переменной линейного объекта с

- неизвестными параметрами [Текст] / А.А. Бобцов // Изв. ВУЗов. Приборостроение. — 2003. — No 1. — С. 22–27.
23. Бобцов, А.А. Синтез закона управления для стабилизации нелинейной системы по измерениям выхода с компенсацией неизвестного возмущения [Текст] / А.А. Бобцов, Н.А. Николаев // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2005. — No 5. — С. 16–22.
24. Никифоров, В.О. Нелинейная система управления с компенсацией внешних детерминированных возмущений [Текст] / В.О. Никифоров // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 1997. — No 4. — С. 69–73.
25. Nikiforov, V.O. Adaptive non-linear tracking with complete compensation of unknown disturbances [Text] / V.O. Nikiforov // European Journal of Control. — 1998. — Vol. 4, no. 2. — P. 132–139.
26. Никифоров, В.О. Наблюдатели внешних детерминированных возмущений I. Объекты с известными параметрами [Текст] / В.О. Никифоров // Автоматика и телемеханика. — 2004. — No 10. — С. 13–24.
27. Никифоров, В.О. Робастное управление линейным объектом по выходу [Текст] / В.О. Никифоров // Автоматика и телемеханика. — 1998. — No 9. — С. 87–99.
28. Никифоров, В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений [Текст] / В.О. Никифоров. — СПб.: Наука, 2003. — С. 282.
29. Marino, R. Output regulation for linear minimum phase systems with unknown order exosystem [Text] / R. Marino, P. Tomei // Automatic Control, IEEE Transactions on. — 2007. — Vol. 52, no. 10. — P. 2000–2005.
30. Krstic, M. Adaptive nonlinear output-feedback schemes with Marino-Tomei controller [Text] / M. Krstic, P.V. Kokotovic // IEEE transactions on Automatic Control. — 1996. — Vol. 41, no. 2. — P. 274–280.

31. Output control algorithm for unstable plant with input delay and cancellation of unknown biased harmonic disturbance [text] / A. Pyrkin, A. Smyshlyaev, N. Bekiaris-Liberis, M. Krstic // 9th IFAC Workshop on Time Delay System. Prague, Czech Republic, 2010.
32. Gu, K. Survey on Recent Results in the Stability and Control of Time-Delay Systems [Text] / K. Gu, S.-I. Niculescu // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2003. – Vol. 125, no. 2. – P. 158–165.
33. Krstic, M. Delay compensation for nonlinear, adaptive, and PDE systems [Text] / M. Krstic. – Birkhauser : Springer, 2009. – P. 466.
34. Anderson, R.J. Bilateral control of teleoperators with time delay [Text] / R.J. Anderson, M.W. Spong // Automatic Control, IEEE Transactions on. — 1989. — Vol. 34, no. 5. — P. 494–501.
35. Olgac, N. A novel active vibration absorption technique: delayed resonator [Text] / N. Olgac, B.T. Holm-Hansen // Journal of Sound and Vibration. — 1994. — Vol. 176, no. 1. — P. 93–104.
36. Pyragas, K. Control of chaos via extended delay feedback [Text] / K. Pyragas // Physics Letters A. — 1995. — Vol. 206, no. 5. — P. 323–330.
37. Yang, B. On time delay in noncolocated control of flexible mechanical systems, [Text] / B. Yang, C.D. Mote // Journal of dynamic systems, measurement, and control. — 1992. — Vol. 114, no. 3. — P. 409–415.
38. Stepan, G. Delay-differential equation models for machine tool chatter [Text] / G. Stepan // Dynamics and chaos in manufacturing processes. — [S. l.] : Wiley, New York, 1998. — P. 165–192.
39. Лямпе, Б.П. Характеристическое уравнение для многомерной линейной периодической системы с запаздыванием [Текст] / Б.П. Лямпе, Е.Н. Розенвассер // Доклады Академии Наук. – Т. 449. – [Б. м.: б. и.], 2013. – С. 19.

40. Fossen T. I. *Guidance and control of ocean vehicles*. – John Wiley & Sons Inc, 1994.
41. Справочник по теории судна [текст] / Я.И. Войткупский, Р.Я. Першиц, И.А. Титов // Государственное союзное издательство судостроительной промышленности – 1960. – С. 529-546.
42. Marino, R. Robust adaptive compensation of biased sinusoidal disturbances with unknown frequency [Text] / R. Marino, G.L. Santosuosso, P. Tomei // *Automatica*. — 2003. — Vol. 39, no. 10. — P. 1755–1761.
43. Бобцов А. А., Кремлев А. С. Синтез наблюдателя в задаче компенсации конечномерного квазигармонического возмущения // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2005. – №. 3. – С. 5-11.
44. Marino, R. Adaptive regulation of uncertain linear minimum phase systems with unknown exosystems [Text] / R. Marino, P. Tomei // *IEEE Conference on Decision and Control / IEEE*. — Vol. 45. — [S. l. : s. n.], 2006. — P. 1099–1104.
45. Marino, R. Adaptive regulator for uncertain linear minimum phase systems with unknown undermodeled exosystems [Text] / R. Marino, P. Tomei // *Proc. 17th World Congress of IFAC, 2008*. — P. 11293–11298.
46. Marino, R. Adaptive stabilization of linear systems with outputs affected by unknown sinusoidal disturbances [Text] / R. Marino, G.L. Santosuosso, P. Tomei // *European Control Conference 2007*. — [S. l. : s. n.], 2007. — P. 129–134.
47. Marino, R. Regulation of linear systems with unknown additive sinusoidal sensor disturbances [Text] / R. Marino, G.L. Santosuosso, P. Tomei // *Proc 17th World Congress of IFAC*. — [S. l. : s. n.], 2008. — P. 4102–4107.
48. Адаптивный наблюдатель неизвестного синусоидального выходного возмущения для линейного объекта [текст] / С.В. Арановский, А.А.

- Бобцов, А.А. Пыркин // Автоматика и телемеханика. 2009. № 11. С. 108–116.
49. Синтез наблюдателя в условиях возмущения процесса измерения выхода объекта. [текст] / С.В. Арановский, В.М. Бардов, А.А. Бобцов, А.А. Капитонов, А.А. Пыркин // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. № 11. – С. 28–32.
50. Гайдук, А.Р. Управление нелинейными объектами с компенсацией неопределенного возмущения [Текст] / А.Р. Гайдук, Е.А. Плаксиенко // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — No 1. — С. 2–8.
51. Rejection of sinusoidal disturbance of unknown frequency for linear system with input delay [text] / A. Pyrkin, A. Smyshlyaev, N. Bekiaris-Liberis, M. Krstic // American Control Conference. Baltimore, USA, 2010.
52. Rejection of unknown biased harmonic disturbance for nonlinear system with input delay [text] / A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, A.S. Kremlev // 9th IFAC Workshop on Time Delay System. Prague, Czech Republic, 2010.
53. Compensation of unknown multiharmonic disturbance for nonlinear plant with delay in control [text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Chepinski, Y.A. Kapitanuyuk // 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems. – Bologna, Italy, 2010.
54. Компенсация гармонического возмущения в условиях запаздывания по управлению [текст] / А.А. Бобцов, А.А. Пыркин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. № 4. С. 19–23.
55. Компенсация неизвестного мультигармонического возмущения для нелинейного объекта с запаздыванием по управлению [текст] / А.А. Бобцов, А.А. Пыркин, С.А. Колюбин // Автоматика и телемеханика. 2010. № 11. С. 136-148.

56. Алгоритм управления по выходу с компенсацией гармонического возмущения со смещением [текст] / А.А. Бобцов // Автоматика и телемеханика. 2008 № 8. С. 25–32.
57. Алгоритм управления по выходу с компенсацией смещенного гармонического возмущения [текст] / А.А. Бобцов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. № 1. С. 45–48.
58. Компенсация неизвестного синусоидального возмущения для линейного объекта любой относительной степени [текст] / А.А. Бобцов, А.А. Пыркин // Автоматика и Телемеханика. 2009. № 3. С. 114–122.
59. Benchmark on adaptive regulation—rejection of unknown/time-varying multiple narrow band disturbances [Text] / I.D. Landau, A.C. Silva, T.-B. Airimitoie [et al.] // European Journal of control. — 2013. — Vol. 19, no. 4. — P. 237–252.
60. Ремизова О.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л., Синтез робастных систем управления с типовыми регуляторами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 12. – С. 966-972.
61. Камкин О.Ю., Ремизова О.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л., Робастная стабилизация многомерного линейного объекта с запаздываниями по управлению // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 10 – С. 36-43.
62. Ремизова О.А., Рудакова И.В., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л., Оптимальное управление в условиях неопределенности // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2010. – № 9. – С. 82-88.
63. Бороздин П.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л., Робастное управление линейным инерционным объектом // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2008. – № 4. – С. 41-49.

64. Фокин А.Л., Метод разделения движений и синтез робастной системы регулирования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2002. – Т. 45, № 4. – С. 11.
65. Теория устойчивости на курсе и поворотливости судна [текст] / А.М. Басин // ГИТТЛ, 1949.
66. Копычев М.М., Путов А.В., Путов В.В., Игнатъев К.В., Система управления роботами на подвижном основании // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. – 2015. – Т. 5. – С. 55-60.
67. Путов В.В., Игнатъев К.В., Русяев Н.А., Путов А.В., Упрощенные адаптивные системы управления нелинейными многостепенными механическими объектами, построенные по методу вычисленного момента // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. – 2014. – № 3. – С. 54-58.
68. Putov V.V., Sheludko V.N., Putov A.V., Stotckaia A.D., Adaptive control system of transport wheels electromechanical braking // International Review of Automatic Control. – 2014. – Т. 7. – С. 492-499.
69. Игнатъев К.В., Путов А.В., Копычев М.М., Путов В.В., Русяев Н.А., Нечеткая система автономного управления движением робота с компьютерным зрением и всенаправленными колесами // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. – 2016. – Т. 1. – С. 38-41.
70. Копычев М.М., Путов В.В., Путов А.В., Игнатъев К.В., Система управления роботом с компьютерным зрением // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2015. – Т. 1, № Секции 1-3. – С. 269-272.
71. Система технического зрения в архитектуре системы удаленного управления [текст] / С.В. Шаветов, А.А. Ведяков, А.А. Бобцов // Научно-

технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 164–166.

72. Техническое зрение мобильных роботов [текст] / Б.Б. Михайлов // Механика, управление и информатика. 2011. №6. С. 191–201.
73. Resolution scaled quality adaptation for ensuring video availability in real-time systems [text] / S. Krishnapriya, B. Hariharan, S. Kumar // Proc. IEEE 14th Int. Conf. on High Performance Computing and Communication. Liverpool, UK, 2012. P. 873–878.
74. Design and implementation of versatile live multimedia streaming for IP network camera [text] / P. Van Phuoc, S.-T. Chung, H. Kang, S. Cho, K Lee, T. Seol // Proc. Int. Conf. on Advanced Technologies for Communications, ATC 2013. Ho Chi Minh, Viet Nam, 2013. P. 525–530.
75. Scalable secure MJPEG video streaming [text] / L. Chen, N. Shashidhar, Q. Liu // Proc. 26th Int. Conf. on Advanced Information Networking and Applications Workshops, WAINA 2012. Fukuoka, Japan, 2012. P. 111–115.
76. Web-based remote navigational robot for multiclass human-robot interaction [text] / K.J.M. Yeoh, H.L. Wong // IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology. 2012. Art. 6408396. P. 170–175.
77. Assessing dynamic utility specification as a means for improving surveillance-related tasks in wireless streaming video applications [text] / N. Subowo, B. Wang, J. Timberlake, S. Parajuli, B. Stuart, J. Wang, S.D. Patek // IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium SIEDS10. Charlottesville, VA, US, 2010. P. 100–105.
78. Design and implementation of network camera based on TMS320DM365 [text] / S. Zhang, X. Cui // Proc. 2nd Int. Conf. on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce, AIMSEC 2011. Zhengzhou, China, 2011. P. 3864–3867.