

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Пыркин Антон Александрович

Официальные оппоненты: **Фокин Александр Леонидович**
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический
университет), Кафедра автоматизации
процессов химической промышленности,
профессор кафедры

Путов Антон Викторович
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедра
«Систем автоматического управления»,
доцент кафедры

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт Проблем
Машиностроения Российской академии наук»

Защита состоится 22 декабря 2016 г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.227.03 при Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49., ауд. 331.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49 и на сайте http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=52&page_d=1&page_d2=145573

Автореферат разослан « ____ » _____ 201__ года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Коняхин И.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. 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, обеспечивающие перевозку 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 морские транспортные системы представляют собой значительный интерес.

Отметим, что в настоящее время в указанном классе технических систем обязательно использование систем автоматического управления, требующих сложной настройки. Это приводит к необходимости привлекать высококвалифицированных специалистов и проводить дорогостоящую первоначальную инициализацию системы и регулировку в процессе эксплуатации. Это ведет к большим 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. В настоящее время крайне востребованы системы управления, которые с одной стороны качественно решают поставленные задачи, а с другой – имеют простой с инженерной точки зрения способ настройки, без привлечения высококвалифицированных специалистов.

Наиболее сложной системой управления для надводных транспортных объектов является система динамического позиционирования 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.

Математические модели, описывающие поведение таких систем, могут содержать параметрические, сигнальные и структурные неопределенности. Параметры могут быть нестационарными и меняться в зависимости от условий эксплуатации, наличия полезного груза на борту, нестационарной внешней среды и других факторов. Надводное судно – яркий пример объекта, который в процессе функционирования подвержен внешним возмущениям, таких 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 сил между всеми исполнительными органами управления. 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. Но при этом возможна ситуация, когда судно находится в точке, а качка по крену или дифференту приводит к значительным ошибкам измерений в несколько метров.

Таким образом, разработка систем динамического позиционирования является востребованной и актуальной задачей, решение которой необходимо искать на фундаментальном теоретическом уровне со строгим аналитическим доказательством. Предметом теоретических исследований являются вопросы устойчивости замкнутой системы управления, обеспечение динамических и точностных показателей качества, а также наличие робастных свойств системы по отношению к параметрическим неопределенностям математических моделей, описывающих поведение реальных технических систем.

Особого внимания заслуживает задача апробации разработанных алгоритмов управления. Компьютерное моделирование в силу ограниченности вычислительных возможностей не способно полноценно и идеально воссоздать реалистичную картину. С другой стороны использование настоящих надводных судов для тестирования разрабатываемых систем автоматического управления может быть затруднено по двум причинам: дороговизна и риск поломки самого объекта.

Для проведения малозатратного и безопасного экспериментального исследования алгоритмов управления был разработан специальный роботизированный макет, имитирующий надводное водоизмещающее судно. Роботизированный макет имеет четыре исполнительных привода. Задача определения координат ввиду малых масштабов осуществлена с помощью системы технического (компьютерного) зрения, состоящей из камеры и алгоритма обработки видеозображения. Макет позволяет исследовать алгоритмы автоматической стабилизации заданных координат и слежения за командными задающими воздействиями в режиме реального времени. Использование такой установки позволит выявить недостатки алгоритмов управления, сократив при этом расходы и риски на проведение испытаний систем динамического позиционирования.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является 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 синтезированных алгоритмов.

Научная новизна. Предложен новый алгоритм адаптивного управления нелинейными системами вида Лурье с полиномиальными 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 линейных и угловой координат макета на плоскости.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов заключается в том, что разработанные методы и алгоритмы управления по выходу (т.е. без прямых измерений производных регулируемых переменных или же переменных состояния объекта) могут быть эффективно применены для широкого класса технических систем с несколькими входными и выходными переменными, при наличии 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 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.

Методология и 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 пакета программ MATLAB в качестве среды разработки и реализации управляющих алгоритмов.

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.

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.

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).

Личный вклад. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора. 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 дистанционного управления макетом по беспроводному каналу связи, а также разработан алгоритм получения навигационной информации о координатах 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.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в диссертационной работе, формулируются цель, задачи, а также отмечается научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

Первая глава посвящена обзору методов управления классом многомерных нелинейных систем в условиях параметрической и функциональной неопределенностей математической модели и наличия внешних возмущающих воздействий. Рассматривается объект с несколькими регулируемыми переменными и несколькими управляющими воздействиями. Математическая модель, описывающая поведение объекта, имеет вид

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

$$y_j(t) = h_j(x), \quad (2)$$

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.

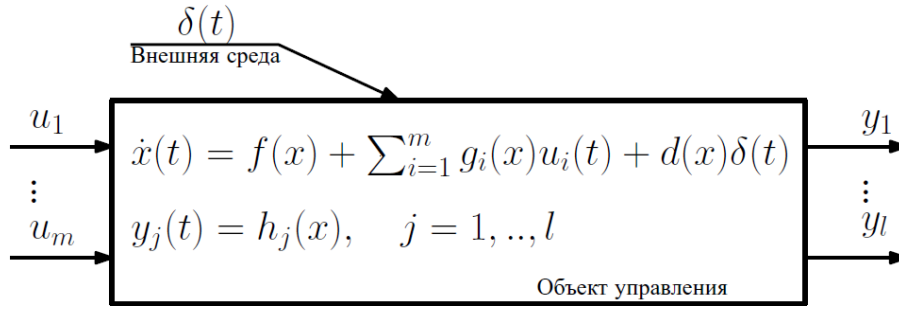


Рисунок 1 – Структурная схема математической модели объекта управления вида (1), (2)

Рассмотрим ряд допущений, относительно системы вида (1), (2).

Допущение 1. Пусть объект управления такой, что модель (1), (2) может быть декомпозирована на l независимых друг от друга динамических подсистем с одним входом и одним выходом.

$$y = H(Y), \quad (3)$$

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

$$U = G(u), \quad (4)$$

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:

$$\dot{x}_j(t) = f_j(x_j) + g_j(x_j)U_j + d_j(x)\delta_j(t), \quad (5)$$

$$Y_j(t) = h_j(x_j), \quad (6)$$

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.

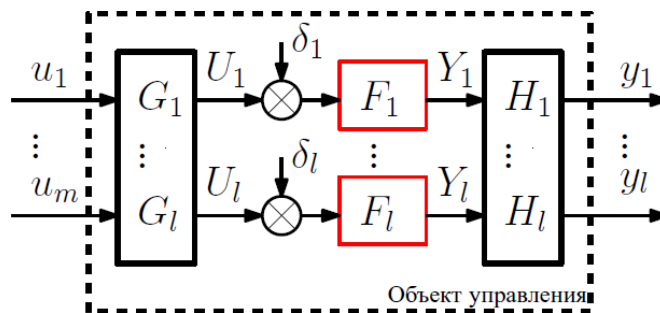


Рисунок 2 – Структурная схема декомпозированной математической модели объекта управления вида (3)-(6)

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 $\forall y \in Y \exists x \in X: y = f(x)$.

Допущение 2. Пусть модель скалярных подсистем (5), (6) может быть представлена в виде нелинейной системы вида Лурье:

$$a_j(p)Y_j(t) = b_{j1}(p)U_j(t) + b_{j2}(p)\varpi_j(Y_j) + b_{j3}(p)\delta_j(t), \quad (7)$$

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 для всех $j = 1, \dots, l$, которая полагается известной; полином $b_{j1}(p)$ гурвицев и параметр $b_{j1}(0) > 0$; неизвестные компоненты возмущающих воздействий $\delta_j(t)$ описывают внешние возмущения в каждом канале, нелинейная функция удовлетворяет секторному ограничению

$$|\varpi_j(Y_j)| \leq C_{j1}|Y_j| + C_{j2}|Y_j|^{a_j}, \quad a_j \in \mathbb{N} \quad (8)$$

где числа C_{j1} и C_{j2} могут быть неизвестны.

Далее рассмотрим две задачи для диссертационного исследования.

Задача 1. Пусть объект управления (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

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - y^*(t)| \leq \epsilon, \quad (9)$$

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

Задача 2. Пусть для объекта управления вида (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 условий

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_j(t) - y_j^*(t)| \leq \epsilon_j, \quad j = 1, \dots, l \quad (10)$$

где $y_j^*(t)$ – желаемые значения регулируемых переменных, ϵ_j – максимальные значения установившихся ошибок, заданных разработчиком.

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

Рассматривается модель объекта управления вида (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:

$$a(p)y(t) = b_1(p)u(t) + b_2\varpi(y(t)) + b_3(p)\delta(t), \quad (11)$$

где полиномы $a(p)$, $b_1(p)$, $b_2(p)$, $b_3(p)$ могут содержать неизвестные параметры, передаточная функция $\frac{b_1(p)}{a(p)}$ имеет относительную степень ρ ,

которая полагается известной; полином $b_1(p)$ гурвицев и параметр $b_1(0) > 0$, вид нелинейной функции не определен, но известно, что она удовлетворяет ограничению вида

$$|\varpi(y)| \leq C_1|y| + C_2|y|^a, \quad a \in \mathbb{N}. \quad (12)$$

Ставится задача синтеза такого закона управления u по измерению выходной переменной y , который обеспечивает выполнение целевого условия (9). Основной целью управления 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).

Запишем модель (11) в виде

$$y(t) = \left[\frac{b_1(p)}{a(p)} \right] u(t) + \left[\frac{b_2(p)}{a(p)} \right] \varpi(y(t)) + \left[\frac{b_3(p)}{a(p)} \right] \delta(t), \quad (13)$$

где дробно-рациональные передаточные функции означают дифференциально-интегральные преобразования.

Выберем закон управления в виде

$$u(t) = -\alpha(p)(k + \kappa)\hat{y}(t), \quad (14)$$

где число k и полином $\alpha(p)$ такие, что передаточная функция $\frac{b_1(p)\alpha(p)}{a(p) + kb_1(p)\alpha(p)}$ строго-вещественно-положительная, положительный параметр κ используется для компенсации нелинейности $\varpi(y(t))$, а функция $\hat{y}(t)$ – оценка выходной переменной $y(t)$, рассчитываемая по алгоритму

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma \xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-k_1 \xi_1 - \dots - k_{\rho-1} \xi_{\rho-1} + k_1 y), \end{cases} \quad (15)$$

$$\hat{y} = \xi_1 \quad (16)$$

где число $\sigma > k + \kappa$ и параметры k_i выбираются из условия экспоненциальной устойчивости системы (15). Закон управления (15), (16) технически реализуем, так как содержит измеряемые или рассчитанные сигналы.

Т е о р е м а 1 [1] Рассмотрим модель, записанную в форме вход-состояние-выход, полученной подставляя (16) в (13):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1(-\kappa y(t) + (k + \kappa)\varepsilon(t)) + B_2\varpi(t) + B_3\delta(t), \quad (17)$$

$$y(t) = C^T x(t), \quad (18)$$

$$\dot{\eta}(t) = h\dot{y}(t) + \sigma\Gamma\eta(t), \quad \varepsilon(t) = h^T\eta(t), \quad (19)$$

где матрица Γ гурвицева в силу выбора параметров k_i в системе (15) и

$$\Gamma^T N + N\Gamma = -M, \quad (20)$$

где $N = N^T > 0$, $M = M^T > 0$.

Пусть параметр $\rho \geq 1$, и неизвестная функция $\varpi(t) = \varpi(y(t))$ такая, что

$$|\varpi(y(t))| \leq C_1|y(t)| \quad \text{для всех } y(t), \quad (21)$$

где число C_1 может быть неизвестно. Для всех $\kappa \geq \kappa_0 > 0$ и $\sigma \geq \sigma_0 > 0$, где

κ_0 и σ_0 – константы, зависящие от параметров модели объекта управления, нелинейная система (17), (18), (19) экспоненциально устойчива для нормы

$$\Omega(t) = (|x(t)|^2 + |\eta(t)|^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (22)$$

при отсутствии возмущения $\delta(t) = 0$, в противном случае система L_∞ -устойчива или устойчива в смысле «ограниченный вход – ограниченный выход», т.е. существуют положительные константы $\beta_1, \beta_2, \gamma_1$ такие, что

$$\Omega(t) \leq \beta_1 e^{-\beta_2 t} \Omega(0) + \gamma_1 \sup_{s \in [0, t]} |\delta(s)|. \quad (23)$$

Допущение 3. Будем допускать, что возмущение имеет вид

$$\delta(t) = \sigma_0 + \sum_{i=1}^q (\mu_i \sin(\omega_i t) + \nu_i \cos(\omega_i t)), \quad (24)$$

где σ_0, μ_i и ν_i – неизвестные постоянные константы.

Допущение 4. Частоты $\omega_i, \forall i$ и относительная степень ρ известны.

Выберем закон управления $u(t)$ вида

$$u(t) = -(k + \kappa) \frac{\alpha(p)(p+1)^{2q+1}}{\gamma(p)} \hat{y}(t), \quad (25)$$

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 строго-вещественно-положительной, $\kappa > 0$ выбирается с целью компенсации нелинейности $\varpi(y)$. Оценка $\hat{y}(t)$ рассчитывается по алгоритму

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma \xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-k_1 \xi_1 - \dots - k_{\rho-1} \xi_{\rho-1} + k_1 y), \\ \hat{y} = \xi_1 \end{cases} \quad (26)$$

где число $\sigma > k + \kappa$, и параметры k_i выбираются из условия экспоненциальной устойчивости системы (26).

Закон управления (25)-(27) технически реализуем, так как содержит только известные и измеряемые сигналы.

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 уравнений

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1(-\kappa y(t) + (k + \kappa)\varepsilon(t)) + B_2\varpi(y, t) \quad (28)$$

$$y(t) = C^T x(t) \quad (29)$$

полученная подстановкой (25)-(27) в (13), асимптотически устойчива для любых начальных условий x_0 , удовлетворяющих $|x_0| \leq X$, для нормы

$$(|x(t)|^2 + |\eta(t)|^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (30)$$

при нелинейной функции $\varpi(y)$, удовлетворяющей ограничению вида (12).

Выберем закон управления в новой форме [2]:

$$u(t) = -\alpha(p) [k(t)\hat{y}(t)], \quad (31)$$

$$\dot{k}(t) = \gamma_k \hat{y}^2(t), \quad k(0) > 0, \quad (32)$$

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

$$\hat{y}(t) = h^T \xi(t), \quad (33)$$

$$\dot{\xi}(t) = \Gamma_\sigma \xi(t) + d_\sigma y(t), \quad (34)$$

где

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

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:

$$D(p) = p^{\rho-1} + k_{\rho-1} p^{\rho-2} + \dots + k_2 p + k_1, \quad (35)$$

что означает, что выбор коэффициентов k_i , $i = \overline{1, (\rho - 1)}$ может быть выполнен из условия гурвицевости полинома (42).

Перейдем к новому базису системы (33), (34):

$$\bar{\xi}(t) = T \xi(t), \quad (36)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & \sigma^{-(\rho-2)} \end{bmatrix}. \quad (37)$$

Рассмотрим вектор ошибки:

$$\bar{\eta}(t) = h y(t) - \bar{\xi}(t). \quad (38)$$

Параметр σ определяется следующим алгоритмом настройки:

$$\dot{\sigma}(t) = \gamma_\sigma \bar{\eta}^T(t) \bar{\eta}(t). \quad (39)$$

с некоторым коэффициентом $\gamma_\sigma > 0$.

Рассмотрим модель движения надводного водоизмещающего судна, описывающую движение в продольном и поперечном направлениях или движение по курсу (модель Номото 1-го порядка):

$$\dot{y}(t) = -\frac{\varpi_0}{T} \dot{y} + \frac{k_u}{T} u(t) + \delta(t), \quad (40)$$

где $y(t)$ – регулируемая переменная относительно начальной точки $y(0)$, управляющее воздействие $u(t)$ в модели (40) – 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, $\delta(t)$ – суммарное возмущающее воздействие (ветер, течение, волновая качка), влияющее на движение вдоль координаты y . Относительная степень объекта $\rho = 2$. Выберем гурвицев

характеристический полином матрицы Γ_σ при $\sigma = 1$:

$$D(p) = p + 1. \quad (40)$$

В режиме слежения алгоритм (21) примет вид

$$u(t) = -\alpha(p)(k + \kappa)\hat{y}(t), \quad (41)$$

$$\hat{y}(t) = \xi(t), \quad (42)$$

$$\dot{\xi}(t) = -\sigma\xi(t) + \sigma(y(t) - y^*), \quad (43)$$

$$\Gamma_\sigma = [-\sigma], \quad d_\sigma = [\sigma], \quad h^T = [1]. \quad (44)$$

Рассмотрим адаптивную версию робастного алгоритма управления.

Вычислим вспомогательный базис для системы (33), (34):

$$\bar{\xi}(t) = T\xi(t) = \xi(t). \quad (45)$$

Вектор рассогласования может быть рассчитан следующим образом:

$$\bar{\eta}(t) = hy(t) - \bar{\xi}(t) = y(t) - \xi(t). \quad (46)$$

Вспользуемся алгоритмами адаптации (32) и (39) для настройки $k(t)$ 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:

$$\begin{aligned} u(t) &= -\alpha(p)[k(t)\hat{y}(t)] = -\frac{d}{dt}[k(t)\hat{y}(t)] - k(t)\hat{y}(t) = \\ &= -\gamma_k \xi^3(t) - k(t)\dot{\xi}(t) - k(t)\hat{y}(t). \end{aligned} \quad (47)$$

Для избежания неограниченного роста функций $k(t)$ и $\sigma(t)$ при малых отклонениях от положения равновесия модифицируем законы адаптации (32), (39) следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{k}(t) = \gamma_k \hat{y}^2(t), & |\hat{y}(t)| \geq \epsilon_i, \quad k(0) > 0, \\ \dot{k}(t) = 0, & |\hat{y}(t)| < \epsilon_i, \end{cases} \quad (48)$$

$$\begin{cases} \dot{\sigma}(t) = \gamma_\sigma (y(t) - \xi(t))^2, & |\hat{y}(t)| \geq \epsilon_i, \quad k(0) > 0, \\ \dot{\sigma}(t) = 0, & |\hat{y}(t)| < \epsilon_i, \end{cases} \quad (49)$$

На рисунках 3 и 4 представлены результаты моделирования алгоритма адаптивного управления без компенсации возмущающего воздействия.

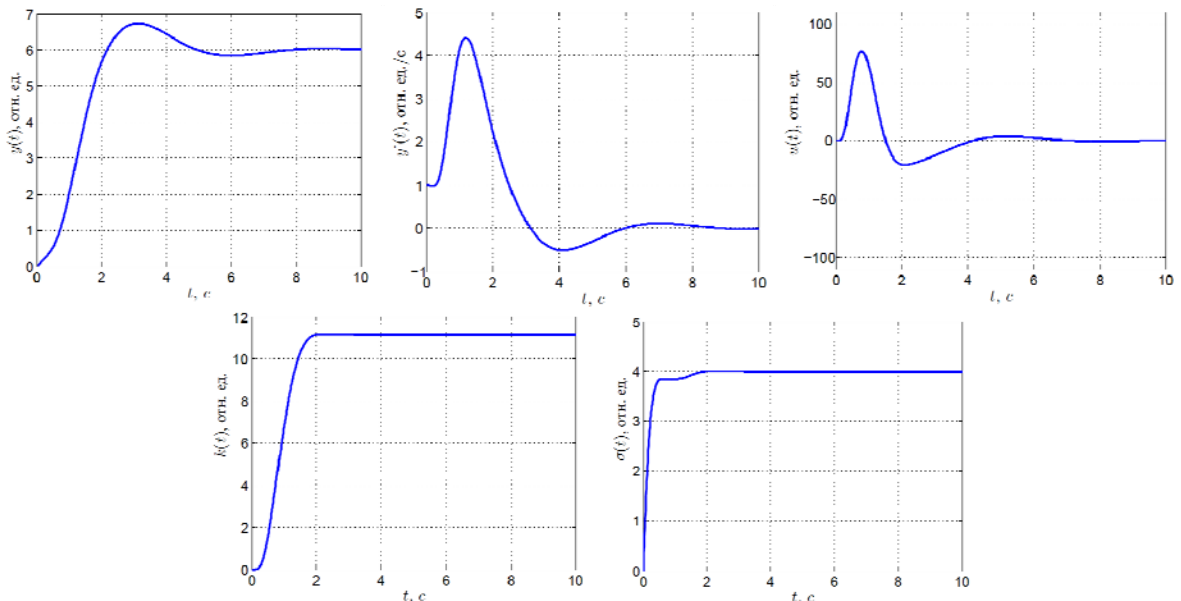


Рисунок 3 – Алгоритм управления (47), (42)-(44), (48), (49) с параметрами $k(0) = 0$, $\sigma(0) = 0$, $\gamma_k=0,5$, $\gamma_\sigma = 1$, $y^* = 6$, $\delta = 0$

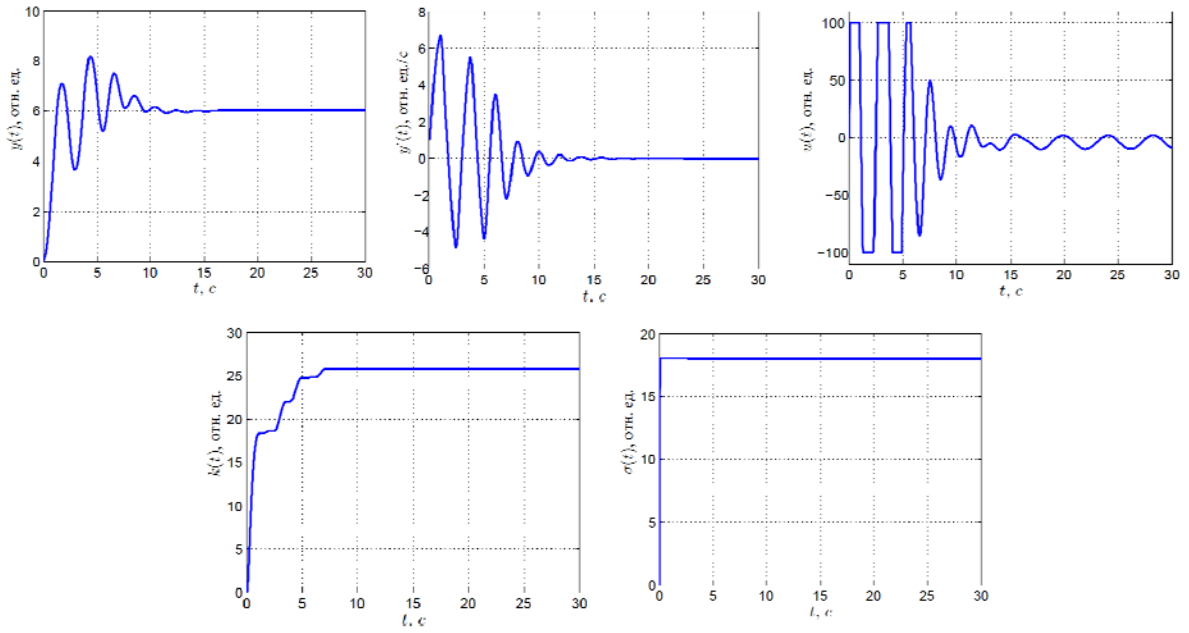


Рисунок 4 – Алгоритм управления (47), (42)-(44), (48), (49) с параметрами $k(0) = 0$, $\sigma(0) = 0$, $\gamma_k=1$, $\gamma_\sigma = 10$, $y^* = 6$, $\delta = 2 + 3 \sin 1,5t$

Третья 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 на плоскости.

Рассмотрим класс многомерных систем вида (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 (1) примет вид

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

$$y_l = H_l(Y_1, Y_2, \dots, Y_l), Y_l = F_l\{U_l, \delta_l\}, U_l = G_l(u_1, u_2, \dots, u_m), \quad (50)$$

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:

$$a_j(p)Y_j(t) = b_{j1}(p)U_j(t) + b_{j2}(p)\varpi_j(Y_j) + b_{j3}(p)\delta_j(t), \quad (51)$$

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

$$|\varpi_j(y_i)| \leq C_{j1}|Y_j| + C_{j2}|Y_j|^{a_j}, a_j \in \mathbb{N} \quad (52)$$

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 для выходных переменных Y_j каждой динамической подсистемы так, чтобы в результате была достигнута общая цель управления 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.

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:

$$y = H(Y) + y^*, H(0) = 0, Y^* = 0. \quad (53)$$

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

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Y = 0, \quad (54)$$

где значение векторной переменной Y рассчитывается по формуле

$$Y = \bar{H}(y - y^*), \bar{H}(0) = 0. \quad (55)$$

Функция \bar{H} рассчитывается так, чтобы выполнялось свойство $H(\bar{H}(z)) = z$.

Шаг 2. Для обеспечения цели (54) синтезируются l регуляторов U_j для каждой новой регулируемой переменной Y_j . Для задачи робастного управления с заданной точностью можно использовать регуляторы вида (14)-(16), если наряду с Допущением 1 справедливо Допущение 2. Если справедливы Допущения 3 и 4, то можно реализовать регуляторы вида (25)-(27), обеспечивающие полную компенсацию возмущающих воздействий.

Для случая, когда параметры математической модели объекта управления не известны, целесообразно использовать адаптивные регуляторы вида (31)-(39), обеспечивающие любую заданную точность стабилизации нелинейных систем.

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 сформировать следующие 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 u_j .

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

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.

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

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos z & -\sin z \\ \sin z & \cos z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix}, \quad (56)$$

Перепишем (56) для каждого из каналов отдельно:

$$\bar{x} = (x^* - x(t)) \cos z + (y^* - y(t)) \sin z, \quad (57)$$

$$\bar{y} = -(x^* - x(t)) \sin z + (y^* - y(t)) \cos z. \quad (58)$$

Таким образом, имеем уравнения для пересчета координат из системы координат, связанной с Землей, в локальную, связанную с судном. Отметим, что в отличие от каналов X и Y для регулирования угла поворота используется рассогласование: $\bar{z} = z^* - z(t)$.

В общем виде имеем для \bar{H} :

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

Модель динамических каналов согласно (51) в общем виде примет вид

$$a_x(p)x(t) = b_{x1}(p)P_x(t) + b_{x2}(p)\varpi_x(x) + b_{x3}(p)\delta_x, \quad (59)$$

$$a_y(p)y(t) = b_{y1}(p)P_y(t) + b_{y2}(p)\varpi_y(y) + b_{y3}(p)\delta_y, \quad (60)$$

$$a_z(p)z(t) = b_{z1}(p)M_z(t) + b_{z2}(p)\varpi_z(z) + b_{z3}(p)\delta_z, \quad (61)$$

где полиномы могут содержать неизвестные параметры.

Будем также рассматривать линеаризованную модель Номото первого порядка, которая описывает движение водоизмещающего судна:

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

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

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

где K_x , K_y и K_z – коэффициенты передачи от результирующих упоров к скорости движения в соответствующем направлении; T_x , T_y и T_z – постоянные времени для каждого направления движения.

Зная относительную степень объекта $\rho = 2$, синтезируем закон управления для расчета виртуальных управляющих сигналов P_x , P_y и M_z :

$$P_x = k_x(\xi_x + \dot{\xi}_x), \quad \dot{\xi}_x = \sigma_x(-\xi_x + \bar{x}), \quad (62)$$

$$P_y = k_y(\xi_y + \dot{\xi}_y), \quad \dot{\xi}_y = \sigma_y(-\xi_y + \bar{y}), \quad (63)$$

$$M_z = k_z(\xi_z + \dot{\xi}_z), \quad \dot{\xi}_z = \sigma_z(-\xi_z + \bar{z}), \quad (64)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \cos z & \sin z & 0 \\ -\sin z & \cos z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) - x^* \\ y(t) - y^* \\ z(t) - z^* \end{bmatrix}, \quad (65)$$

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

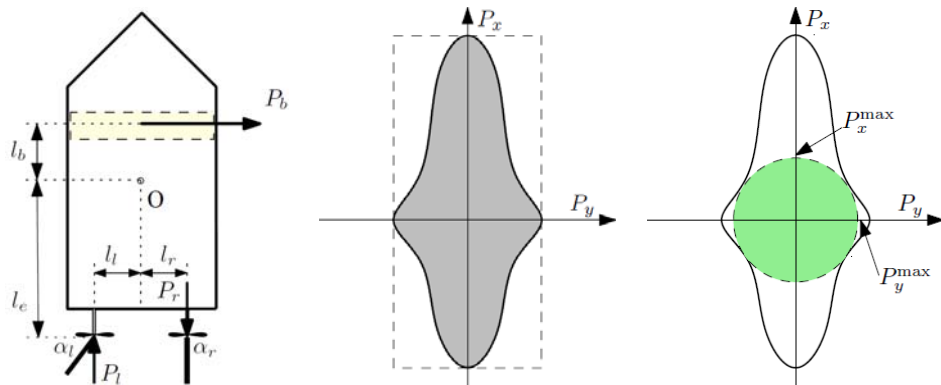


Рисунок 5 – Примеры расположения исполнительных органов управления и диаграммы достижимости судна для сил P_x и P_y : а) одна из самых распространенных конфигураций; б) максимально возможная область для распределения сил; в) рабочая область, позволяющая обеспечить равномерное распределение упоров по всем направлениям

Распределение управляющих воздействий между органами управления осуществляется в два этапа.

Алгоритм ограничения заданных сил и момента

1. Оцениваются максимально возможные силы в двух направлениях движения 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 приоритетных для исполнения воздействий при маневрировании судна в швартовном режиме

$$Q = \left(\frac{P_x}{P_x^{\max}} \right)^2 + \left(\frac{M_z}{M_z^{\max}} \right)^2. \quad (66)$$

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

$$P_x^* = \frac{P_x}{\sqrt{Q}}, \quad M_z^* = \frac{M_z}{\sqrt{Q}}. \quad (67)$$

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:

$$P_y^* = \text{sign } P_y \cdot P_y^{\max} \cdot \sqrt{1 - Q}. \quad (68)$$

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 (рисунок 5 б, в).

Алгоритм распределения управляющих воздействий рассмотрим на наиболее распространенной конфигурации расположения исполнительных органов управления на судне (рисунок 5 а).

Уравнения для равнодействующих сил и моментов.

$$\begin{cases} P_x = P_l + P_r k_1, \\ P_y = P_b - k_2 P_l \alpha_l, \\ M_z = P_l l_l - k_1 P_r l_r + k_2 P_l \alpha_l l_e + P_b l_b, \end{cases} \quad (69)$$

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

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^* :

$$P_l = P_0, \quad P_r = \frac{P_x^* - P_l}{k_1}, \quad (70)$$

иначе

$$P_r = -P_0, \quad P_l = P_x^* - k_1 P_r. \quad (71)$$

3. Угол перекадки правого руля устанавливается в нулевое положение, поскольку набегающий поток воды уходит под корпус судна, и на руль не оказывает влияния. Угол перекадки левого руля и сила, развиваемая носовым туннельным трастером, однозначно определяется из (69):

$$P_b = \frac{M_z^* - 2P_l l_l + P_y^* l_e + P_x^* l_l}{l_b + l_e}, \quad \alpha_l = \frac{P_b - P_y^*}{k_2 P_l}. \quad (72)$$

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям теоретических результатов диссертационной работы, описанных во второй и третьей главах, на базе роботизированного макета, позволяющего имитировать надводное водоизмещающее судно.

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

работает в режиме реального времени и решает поставленные задачи.

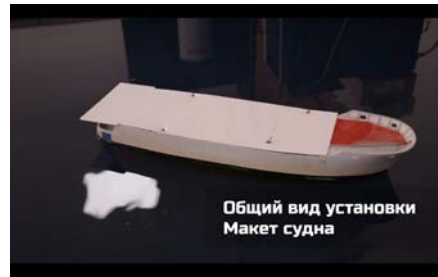


Рисунок 6 – Общий вид установки

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, положение центра масс и другие.

Макет позволяет решать следующие задачи: 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; компенсация внешних неизмеряемых возмущающих воздействий в условиях запаздывания в канале управления.

Географические координаты надводных судов в открытом водном пространстве определяются с помощью систем глобального позиционирования (ГЛОНАСС, GPS). Использование таких систем в составе робототехнического комплекса невозможно из-за малых размеров макета. Для определения координат макета 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 (макета судна) основан на выделении из видеопотока, поступающего с камеры, точек, соответствующих цвету макета [3]. Координаты центра определяются на основе выделения прямоугольника, в границы которого вписывается изображение макета (рисунок 7в). Точка пересечения диагоналей прямоугольника определяет координату середины макета. Определение курса осуществляется путем выделения на втором этапе специальной реперной точки, закрепленной в носовой части макета (красная метка на рисунке 7 в) Изображение метки бинаризуется и фильтруется аналогично изображению всего макета (рисунок 7 б). Условием выделения метки является ее цвет. Аналогично предыдущему этапу определяются координаты метки. Полученные координаты используются для определения ориентации макета (курса судна).



Рисунок 7 – Этапы обработки видеосигнала: создание маски корпуса (а); создание маски носовой метки (б); определение координат судна и курса (в)

В соответствии с постановкой задачи модель объекта управления может содержать неизвестные параметры. Допускается, что известна относительная степень. На рисунке 8 показаны результаты исследования работы пропорционального регулятора вида $P_x = \gamma_x \bar{x}$, $P_y = \gamma_y \bar{y}$, $M_z = \gamma_z \bar{z}$, для некоторых положительных параметров $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$.

Результаты экспериментальных исследований робастного регулятора (62)-(65) с параметрами $k_x = 2$, $k_y = 3$, $k_z = 12$, $\sigma_x = 10$, $\sigma_y = 10$, $\sigma_z = 17$ представлены на рисунке 9.

На рисунке 10 представлены результаты исследования адаптивных регуляторов вида (31)-(39). Были выбраны следующие значения допустимых значений для ошибки управления $\epsilon_x = 0,024$ м, $\epsilon_y = 0,024$ м, $\epsilon_z = 8,6^\circ$.

На рисунке 11 представлены результаты исследования работы алгоритма (62)-(65) в режиме движения макета вдоль заданной траектории.

На рисунке 12 показаны результаты исследования алгоритма адаптивного управления в режиме швартовки. Для регулятора вида (31)-(39) была задана траектория движения и конечная точка, в которую макет должен прийти.

В заключении приведены основные результаты, описывающие разработанный комплекс методов адаптивного и робастного управления нелинейными системами в условиях параметрических и функциональных неопределенностях математической модели и неполной информации о переменных состояния.

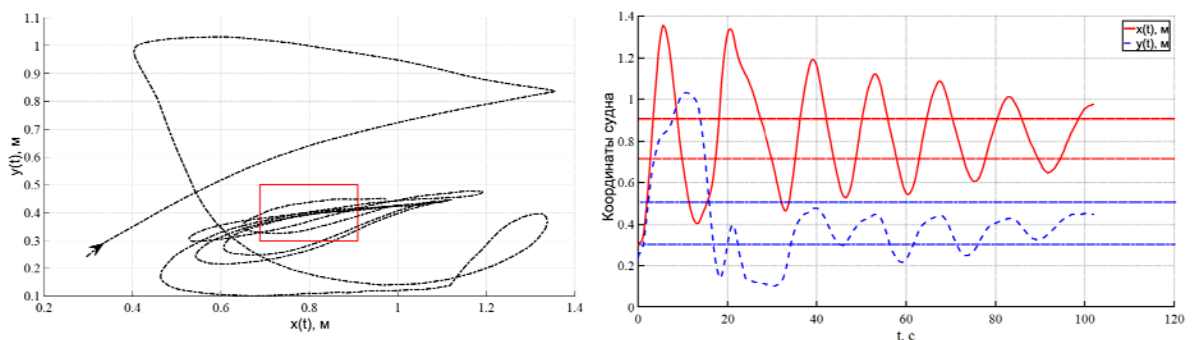


Рисунок 8 – Траектория движения судна и оординаты судна при работе пропорционального регулятора

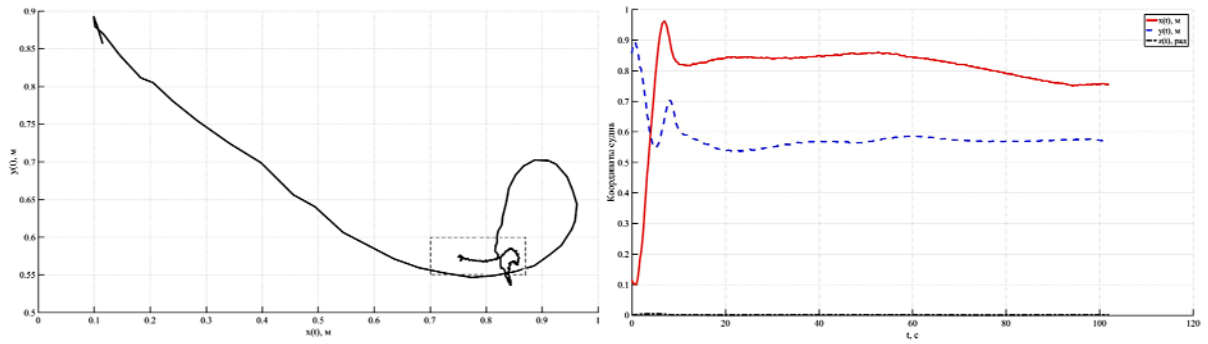


Рисунок 9 – Траектория движения и координаты судна при работе алгоритма управления (62)-(65)

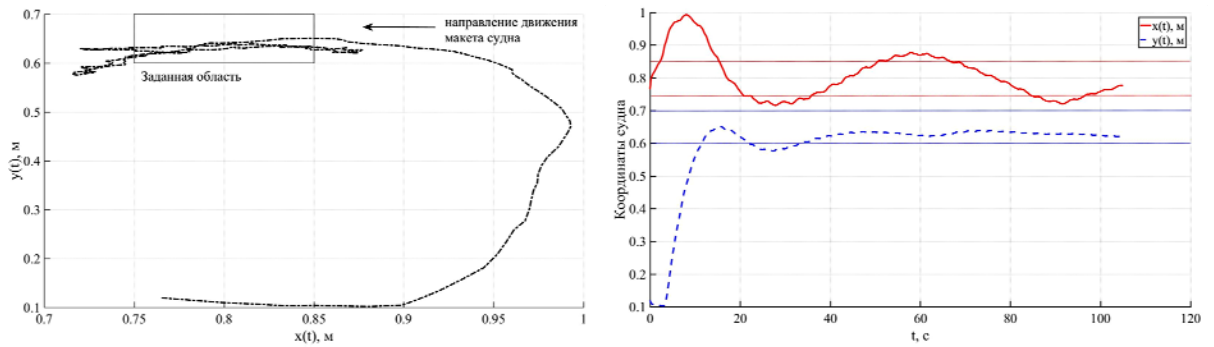


Рисунок 10 – Траектория движения и координаты судна при работе трех адаптивных регуляторов вида (31)-(39) для каждого контура

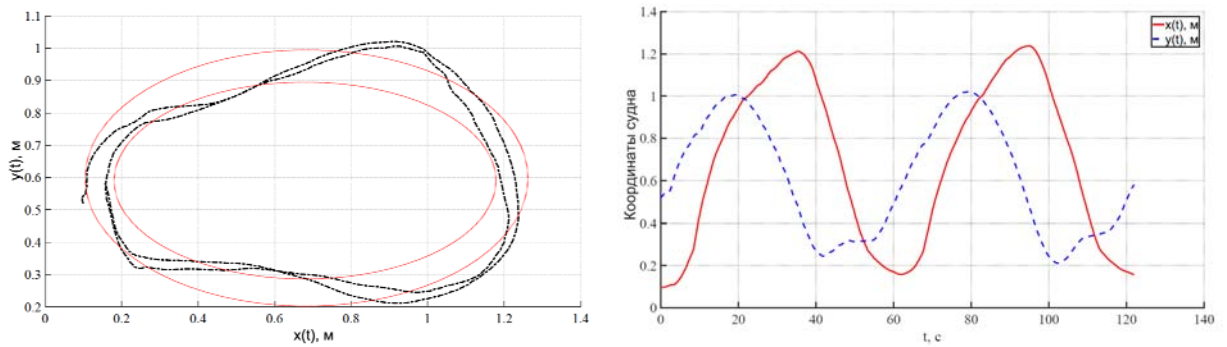


Рисунок 11 – Траектория движения и координаты судна при работе алгоритма управления (62)-(65)

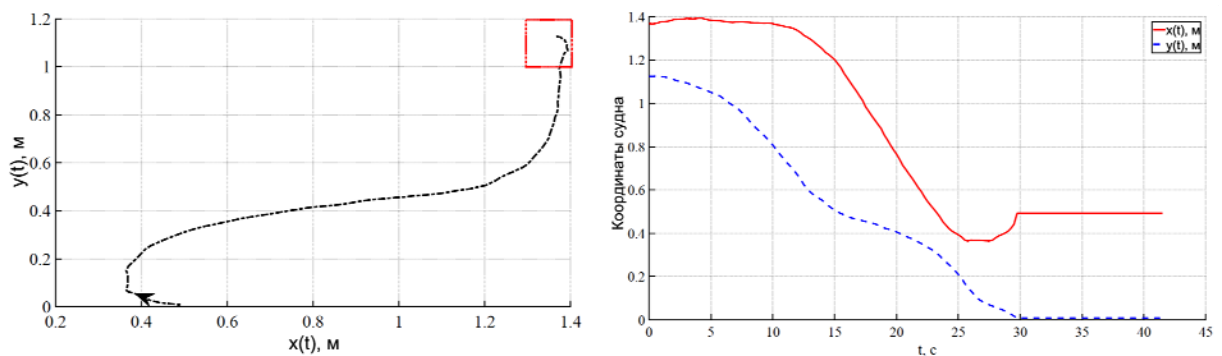


Рисунок 12 – Траектория движения и координаты судна в режиме швартовки при работе трех адаптивных регуляторов вида (31)-(39) для каждого контура

Публикации по теме диссертации

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.