

На правах рукописи



Борисов Олег Игоревич

**АДАПТИВНЫЕ И РОБАСТНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ПО ВЫХОДУ МНОГОКАНАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Пыркин Антон Александрович

Официальные оппоненты: **Щербаков Павел Сергеевич**,
доктор физико-математических наук,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Лаборатория №7 «Адаптивных и робастных систем им. Я.З. Цыпкина», главный научный сотрудник

Сыроквашин Владислав Викторович,
кандидат технических наук,
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), кафедра автоматизации процессов химической промышленности, доцент

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Защита состоится 30 ноября 2017 г. в 16 часов 00 минут 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. 359.

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=148589

Автореферат разослан «16» октября 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Дударенко Наталия Александровна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Класс многоканальных систем является достаточно широким подклассом технических систем в целом. К ним, например, относятся беспилотные летательные аппараты, надводные водоизмещающие суда, манипуляционные и мобильные роботы. В настоящее время область применения робототехнических систем интенсивно расширяется. Если некоторое время назад они использовались только для решения простых промышленных задач, то сейчас роботы, уже утвердив себя в качестве неотъемлемой части технологического процесса, активно используются в космических исследованиях (при проведении точных работ в открытом космосе), медицине (при выполнении робот-ассистированных операций), спасательных операциях (мониторинг местности с помощью беспилотных летательных аппаратов и перемещение мобильных роботов по развалам или недоступным для человека участкам), быту (роботы-пылесосы, роботы для мойки окон) и прочее. Следовательно, совершенствование методов управления такими системами является актуальной и важной задачей.

Проблеме синтеза адаптивных и робастных регуляторов нелинейными системами с неопределенностями посвящено большое число работ российских и зарубежных авторов (Бобцов А.А., Никофоров В.О., Фрадков А.Л., Андриевский Б.Р., Щербаков П.С., Поляк Б.Т., Исидори А., Ортега Р., Серрани А., Маркони Л., и др.) Регуляторы со сложной структурой зачастую могут быть неприменимы в прикладных задачах в силу необходимости обеспечения значительных вычислительных мощностей и наличия дополнительных датчиков.

В диссертации развиваются методы адаптивного управления по выходу, основанные на принципе сильной обратной связи, такие как, например, последовательный компенсатор. Наибольшее внимание уделено синтезу алгоритмов управления по выходу с простой инженерной реализацией. Решены задачи управления многоканальным объектом, характеризующимся насыщением по входу и наличием неизмеряемых возмущающих воздействий.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов адаптивного и робастного управления по выходу классом многоканальных систем в условиях параметрической неопределенности, влияния внешних возмущающих воздействий и наличия насыщения по входу.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработан алгоритм синтеза робастных регуляторов по выходу на основе принципа сильной обратной связи с обеспечением заданного быстродействия. С использованием метода внутренней модели синтезирован алгоритм компенсации внешних возмущений, проведен анализ устойчивости замкнутой системы и сходимости ошибки регулирования к нулю.
2. Разработан алгоритм робастного управления по выходу с антивиндап-коррекцией для объектов с насыщением по входу и подверженных влиянию внешних возмущающих воздействий. Проведены экспериментальные исследования разработанного регулятора в задаче стабилизации беспилотного летательного аппарата типа «квадрокоптер».
3. Разработан алгоритм адаптивного управления по выходу многоканальными системами с динамически настраиваемой внутренней моделью. Проведены экспериментальные исследования разработанного регулятора в задаче динамического позиционирования макета надводного водоизмещающего судна.

Научная новизна. В диссертационной работе был разработан новый алгоритм синтеза робастных регуляторов по выходу в пространстве состояний на основе принципа сильной обратной связи. Предложен алгоритм обеспечения заданного быстродействия при известных номинальных параметрах объекта с использованием инструментария линейных матричных неравенств и алгоритма поиска взаимнообратных матриц. Предложен алгоритм компенсации внешних возмущающих воздействий для параметрически неопределенных объектов с насыщением по входу. С использованием метода декомпозиции разработанный регулятор был использован в задаче стабилизации беспилотного летательного аппарата типа «квадрокоптер» с компенсацией интегрального насыщения и внешних возмущений, обусловленных влиянием воздушного потока. Разработан новый алгоритм адаптивного управления по выходу многоканальными системами с динамически настраиваемой внутренней моделью внешнего возмущения, который был использован в задаче динамического позиционирования макета надводного судна.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, имеют как теоретическую ценность в области современной теории управления, так и являются востребованными во многих инженерных задачах. Алгоритм синтеза робастных регуляторов по выходу на основе принципа сильной обратной связи позволяет в явном виде проводить анализ модели замкнутой системы в пространстве состояний, модифицировать структуру регулятора для различных задач (например, для обеспечения заданного быстродействия, компенсации внешних возмущающих воздействий), что представляет ценность с научной точки зрения для синтеза новых алгоритмов управления. Проведенные экспериментальные исследования стабилизации многоканальных систем, таких как беспилотный летательный аппарат типа «квадрокоптер», макет надводного водоизмещающего судна, подтверждают высокую практическую ценность полученных результатов в инженерии при программировании реальных технических систем.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовался спектр методов современной теории автоматического управления, включающих в том числе принципы синтеза адаптивных и робастных алгоритмов управления и исследования нелинейных систем, в частности в форме Лурье с нелинейностью типа «насыщение». Для описания динамических систем использовались методы пространства состояний, операторный метод, преобразование Лапласа. Для разработки алгоритмов управления использовались метод пассивации систем, инструментарий линейных матричных неравенств, алгоритм поиска взаимнообратных матриц, принцип внутренней модели, метод обратного счета компенсации интегрального перенасыщения, геометрические подходы. Для доказательства устойчивости замкнутых систем с разработанными алгоритмами управления использовались корневой метод, критерий Попова, второй (прямой) метод Ляпунова. Апробация разработанных алгоритмов управления проводилась с помощью численного моделирования в среде MATLAB, а также при проведении экспериментальных исследований на базе лабораторного стенда «КОМЕКС-1» кафедры управления сложными системами Университета ИТМО и установки «CyberShip Arctic Drillship» департамента морских технологий Норвежского университета естественных и технических наук (NTNU).

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм синтеза робастных регуляторов по выходу в пространстве состояний на основе принципа сильной обратной связи.
2. Алгоритм робастного управления по выходу с антивиндап-коррекцией для объектов с насыщением по входу.

3. Алгоритм адаптивного и робастного управления по выходу многоканальными системами в условиях внешних параметрически неопределенных возмущающих воздействий.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается:

- строгостью доказательств теорем и утверждений, корректным использованием математического аппарата;
- представленными в диссертационной работе результатами численного моделирования в программной среде MATLAB;
- представленными в диссертационной работе результатами двух экспериментальных исследований разработанных алгоритмов на базе лабораторного стенда «КОМЕКС-1» кафедры управления сложными системами Университета ИТМО и установки «CyberShip Arctic Drillship» департамента морских технологий Норвежского университета естественных и технических наук (NTNU);
- печатными работами, а также статьями в сборниках трудов международных конференций. Среди 38 научных работ восемь опубликованы в российских журналах, рекомендованных ВАК [1–8], 25 — в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science [9–33], одно учебное пособие [34], четыре свидетельства о регистрации программ для ЭВМ [35–38].

Основные результаты работы докладывались на 16 международных конференциях:

- 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (7-ая конференция по промышленному моделированию, менеджменту и управлению, 19–21 июня 2013, Санкт-Петербург, Россия) [32, 33];
- 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (11-ая международный семинар по адаптации и обучению в управлении и обработке сигналов, 3–5 июля 2013, Кан, Франция) [31];
- 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (22-ая средиземноморская конференция по управлению и автоматизации, 16–19 июня 2014, Палермо, Италия) [26];
- 19th IFAC World Congress (19-ый всемирный конгресс международной федерации автоматического управления, 24–29 августа 2014, Кейптан, ЮАР) [27, 28];
- 2014 IEEE Multi-Conference on Systems and Control (Мультиконференция по системам и управлению 2014, 8–10 октября 2014, Антиб, Франция) [29, 30];
- 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (1-ая конференция по моделированию, идентификации и управлению нелинейными системами, 24–26 июня 2015, Санкт-Петербург, Россия) [24, 25];
- 34th Chinese Control Conference (34-ая китайская конференция по управлению, 28–30 июля 2015, Ханчжоу, Китай) [23];
- 11th IFAC Symposium on Advances in Control Education (11-ый симпозиум по достижениям в области преподавания управления, 1–3 июня, Братислава, Словакия) [17, 19, 20];
- 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (24-ая средиземноморская конференция по управлению и автоматизации, 21–24 июня 2016, Афины, Греция) [16];

- 12th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (12-ый международный семинар по адаптации и обучению в управлении и обработке сигналов, 29 июня – 1 июля 2016, Эйндховен, Нидерланды) [18, 21];
- 11th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences (11-ый международная конференция по математическим проблемам в инженерии, авиапромышленности и естественных науках, 5–8 июля, Ла-Рошель, Франция) [13];
- 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (21-ый международная конференция по методам и моделям в автоматизации и робототехнике, 29 августа – 1 сентября 2016, Мендзыздрое, Польша) [15];
- 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (42-ая ежегодная конференция сообщества промышленной электроники, 24–27 октября 2016, Флоренция, Италия) [14];
- 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (25-ая средиземноморская конференция по управлению и автоматизации, 3–6 июля, Валетта, Мальта) [12];
- 20th IFAC World Congress (20-ый всемирный конгресс международной федерации автоматического управления, 9–14 июля 2017, Тулуза, Франция) [10, 11];
- IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (15-ая международная конференция промышленной информатики, 24–26 июля 2017, Эмден, Германия) [9].

Результаты диссертационного исследования были использованы в следующих НИР:

- «Развитие методов адаптивного и робастного управления сложными нелинейными системами с применением к мехатронным и робототехническим приложениям» (Государственное задание № 2014/190 (проект 2118));
- «Методы адаптивного управления нелинейными системами с запаздыванием и неопределенностями» (Государственное задание №2.8878.2017/8.9);
- «Робастные и адаптивные системы управления, коммуникации и вычисления» (проект 14.Z50.31.0031);
- «Нелинейное и адаптивное управление сложными системами» (субсидия 074-U01);
- «Исследование адаптивного и робастного управления по выходу робототехническими системами» (грант Правительства Санкт-Петербурга, диплом ПСП № 14056, распоряжение от 05.12.2014 № 161);
- «Система динамического позиционирования на основе адаптивной модификации последовательного компенсатора» (грант Правительства Санкт-Петербурга, диплом ПСП № 15336, распоряжение КНВШ от 27.11.2015 № 134);
- «Управление многоканальными робототехническими системами с неопределенными параметрами и насыщением по входу» (грант Правительства Санкт-Петербурга, диплом ПСП № 16238, распоряжение КНВШ от 28.11.2016 № 148).

Личный вклад. Содержание диссертационной работы и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы [1–38]. Соискатель принимал непосредственное участие на всех этапах диссертационного исследования, включая разработку алгоритмов адаптивного и робастного управления, анализ устойчивости замкнутых систем, проведение численного моделирования и экспериментальных исследований.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 38 печатных изданиях, восемь из которых опубликованы в российских журналах, рекомендованных ВАК [1–8], 25 — в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science [9–33], одно учебное пособие [34], четыре свидетельства о регистрации программ для ЭВМ [35–38].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 162 страниц с 19 рисунками. Список литературы содержит 149 наименований.

Содержание работы

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

В Главе 1 представлен обзор методов адаптивного и робастного управления по принципу сильной обратной связи, компенсации внешних возмущающих воздействий применительно к объектам с насыщением по входу, а также обратимыми многоканальными системами. Сформулирована обобщенная постановка задачи, решению которой посвящены последующие главы диссертации.

Рассматривается многоканальная система

$$\dot{x} = Ax + Bu + Rw, \quad (1)$$

$$y = Cx + Qw \quad (2)$$

где $x \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния, $u \in \mathbb{R}^m$ — вектор управляющих сигналов, $y \in \mathbb{R}^p$ — вектор выходных переменных, $w \in \mathbb{R}^{n_w}$ — вектор возмущающих воздействий, A, B, R, C, Q — матрицы соответствующих размерностей, в общем случае зависящие от вектора неизвестных параметров μ .

Вектор возмущающих воздействий w рассматривается как состояние линейной системы вида

$$\dot{w} = S(\varrho)w, \quad (3)$$

где ϱ — вектор неизвестных параметров, S — матрица соответствующей размерности.

Управляющий сигнал u удовлетворяет условию насыщения

$$u = \text{sat}(v) = \begin{cases} u_{max} & \text{при } v \geq u_{max}, \\ u & \text{при } u_{min} < v < u_{max}, \\ u_{min} & \text{при } v \leq u_{min}, \end{cases} \quad (4)$$

u_{min} и u_{max} — пределы насыщения по входу, v — управляющий сигнал, генерируемый номинальным линейным регулятором.

Допущение 1. Объект (1), (2) минимально-фазовый (нуль-динамика устойчива).

Допущение 2. Векторная относительная степень объекта (1), (2) известна $\{\rho_1, \rho_2 \dots \rho_p\}$.

Допущение 3. Пределы насыщения по входу u_{min} и u_{max} равны по модулю, но имеют противоположные знаки

$$\begin{aligned} |u_{min}| &= |u_{max}|, \\ u_{min} + u_{max} &= 0. \end{aligned}$$

Допущение 4. Возмущающее воздействие ограничено $w \in \mathcal{L}_\infty$, причем номинальный управляющий сигнал u_0 , необходимый для компенсации такого возмущения в установившемся режиме удовлетворяет неравенству

$$u_{min} \leq |u_0| \leq u_{max}.$$

Допущение 5. Доступен измерению вектор дополнительных переменных $y' \in \mathbb{R}^q$

$$y' = C'x + Q'w, \quad (5)$$

где C', Q' — матрицы соответствующих размерностей.

В диссертационной работе ставится задача синтеза закона управления u с использованием измерений вектора выходных переменных y и вектора дополнительных измеряемых переменных y' , который обеспечивает выполнение целевого условия вида

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0. \quad (6)$$

При ненулевом задающем воздействии y^* должно быть выполнено целевое условие для ошибки регулирования эквивалентное (6)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - y^*(t)| = 0. \quad (7)$$

Задача 1

Рассматривается частный случай объекта управления (1), (2) с допущением, что $m = p = 1$, вектор ρ генератора возмущений (3) известен. Принимаются Допущения 1, 2. Задача заключается в разработке такого закона управления u с использованием измерений только выходной переменной y , который обеспечивает выполнение целевого условия (6).

При условии известных номинальных значений параметров объекта дополнительно ставится задача обеспечения времени переходного процесса не более заданного

$$\tau \leq \tau^*. \quad (8)$$

Решение Задачи 1 представлено в Главе 2 и проиллюстрировано численным моделированием.

Задача 2

Рассматривается объект управления (1), (2) с допущением, что, объект декомпозируемый, вектор ρ генератора возмущений (3) известен. Принимаются Допущения 1–4. Задача заключается в разработке такого закона управления u с использованием измерений только вектора выходных переменных y , который обеспечивает выполнение целевого условия (7).

Ставится задача проведения экспериментальных исследований по стабилизации летательного аппарата типа квадрокоптер.

Решение Задачи 2 представлено в Главе 3 и проиллюстрировано экспериментальными исследованиями на базе лабораторного стенда «КОМЕКС-1» кафедры управления сложными системами Университета ИТМО.

Задача 3

Рассматривается объект управления (1), (2). Принимаются Допущения 1–5. Задача заключается в разработке такого закона управления u с использованием измерений вектора выходных переменных y и вектора дополнительных измеряемых переменных y' , который обеспечивает выполнение целевого условия (7).

Ставится задача проведения экспериментальных исследований по стабилизации надводного водоизмещающего судна.

Решение Задачи 3 представлено в Главе 4 и проиллюстрировано экспериментальными исследованиями на базе установки «CyberShip Arctic Drillship» департамента морских технологий Норвежского университета естественных и технических наук (NTNU).

В Главе 2 представлено решение Задачи 1. Рассматривается модель объекта в пространстве состояний

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} w, \quad (9)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & c_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где матрица A_{11} гурвицева в силу Допущения 1, $b_2^T = [0 \ \dots \ 0 \ b_0]$, $c_2^T = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$.

При $w = 0$ формируется закон управления

$$u = -\kappa(c_k^T \xi + y), \quad (11)$$

$$\dot{\xi} = A_q \xi + b_q y, \quad (12)$$

где $\kappa > 0$, A_q , b_q , c_k определены как

$$A_q = \begin{bmatrix} -q_\rho \sigma & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -q_{\rho-1} \sigma^2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \\ -q_2 \sigma^{\rho-1} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -q_1 \sigma^\rho & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad b_q = \begin{bmatrix} q_\rho \sigma \\ q_{\rho-1} \sigma^2 \\ \vdots \\ q_2 \sigma^{\rho-1} \\ q_1 \sigma^\rho \end{bmatrix}, \quad c_k = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_{\rho-1} \\ k_\rho \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где $\sigma > 0$ и q_i ($i = \overline{1, \rho}$) выбираются из условия гурвицевости (12), k_i ($i = \overline{1, \rho}$) – коэффициенты произвольного гурвицева полинома $k(s) = k_\rho s^{\rho-1} + \dots + k_2 s + k_1$.

После объединения объекта (9), (10) при $w = 0$ с законом управления (11), (12) анализируется устойчивость замкнутой системы

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{\chi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} - \kappa b_2 (c_k^T + c_2^T) & \kappa b_2 c_k^T \\ A_{21} & A_{22} - I_0 - \kappa b_2 (c_k^T + c_2^T) & A_q + \kappa b_2 c_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \chi \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где $\chi = z_2 - \xi$, $I_0 = A_q + b_q c_2^T$ – постоянная матрица, состоящая из нулей и единиц.

Можно показать, что существуют достаточно большие числа κ^* и σ^* такие, что $\forall \kappa \geq \kappa^*$ и $\forall \sigma \geq \sigma^*$ матрица состояния замкнутой системы (14) гурвицева.

Для обеспечения заданного быстродействия (8) модель (14) рассматривается как

$$\dot{x} = (A_0 + \Delta A)x, \quad (15)$$

где A_0 – матрица состояния с известными номинальными параметрами, ΔA – ограниченная параметрическая неопределенность.

Выполняется параметризация матрицы A_0 модели (15)

$$A_0 = \bar{A} + \bar{b} c_k^T \bar{c}^T, \quad (16)$$

где $\bar{\mathbf{A}}$, $\bar{\mathbf{b}}$, $\bar{\mathbf{c}}^T$ — известные параметры замкнутой системы, c_k^T — вектор рассчитываемых коэффициентов регулятора.

При $\Delta \mathbf{A} = 0$ для стабилизации объекта со степенью устойчивости не менее заданной α^* достаточно существование матрицы $P = P^T > 0$, удовлетворяющей

$$(\bar{\mathbf{A}} + \bar{\mathbf{b}}c_k^T\bar{\mathbf{c}}^T)^T P + P(\bar{\mathbf{A}} + \bar{\mathbf{b}}c_k^T\bar{\mathbf{c}}^T) + 2\alpha^*P < 0. \quad (17)$$

В работе приводятся условия разрешимости линейного матричного неравенства (17), а также выполняется анализ робастности предлагаемого алгоритма управления при $\Delta \mathbf{A} \neq 0$.

При наличии возмущений ($w \neq 0$) формируется закон управления вида

$$u = -\kappa(c_k^T\xi + y) - \gamma^T\eta, \quad (18)$$

$$\dot{\xi} = A_q\xi + b_qy, \quad (19)$$

$$\dot{\eta} = \Phi\eta + g(\kappa(c_k^T\xi + y) + \gamma^T\eta), \quad (20)$$

где $\kappa > 0$ матрица A_q и векторы b_q , c_k определены в (13), матрица Φ — произвольная гурвицева матрица во фробениусовой форме размерности $n_w \times n_w$, векторы $g^T = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]$ и γ удовлетворяют $\lambda\{\Phi + g\gamma^T\} = \lambda\{S\}$.

После объединения объекта (9), (10) с законом управления (18)-(20) анализируется устойчивость замкнутой системы

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{\zeta} \\ \dot{z}_2 \\ \dot{\chi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{12} & 0 \\ g\bar{b}_2^T A_{21} & \Phi & g\bar{b}_2^T A_{22} - \Phi g\bar{b}_2^T & 0 \\ A_{21} & -b_2\gamma^T & A_{22} - \kappa b_2(c_k^T + c_2^T) + b_2\gamma^T g\bar{b}_2^T & \kappa b_2 c_k^T \\ A_{21} & -b_2\gamma^T & A_{22} - I_0 - \kappa b_2(c_k^T + c_2^T) + b_2\gamma^T g\bar{b}_2^T & A_q + \kappa b_2 c_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ \zeta \\ z_2 \\ \chi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 \\ g\bar{b}_2^T R_2 \\ R_2 \\ R_2 \end{bmatrix} w, \quad (21)$$

где $\chi = z_2 - \xi$ и $\zeta = g(b_2^T b_2)^{-1} b_2^T z_2 + \eta$.

Можно показать, что существуют параметры γ , κ , σ такие, что матрицы состояния замкнутой системы (21) гурвицева. Кроме того, в работе приводится анализ сходимости ошибки регулирования к нулю в установившемся режиме. Для подтверждения работоспособности предложенных алгоритмов было выполнено численное моделирование.

В Главе 3 представлено решение Задачи 2. Рассматривается модель объекта в пространстве состояний вида (9), (10).

Для компенсации статических возмущений формируется закон управления

$$v = -\kappa(c_k^T\xi + y) - \gamma\eta, \quad (22)$$

$$\dot{\xi} = A_q\xi + b_qy, \quad (23)$$

$$\dot{\eta} = \kappa(c_k^T\xi + y) + \nu\kappa(v), \quad (24)$$

$$\kappa(v) = v - \text{sat}(v), \quad (25)$$

где $\kappa(v)$ — нелинейный сигнал антивиндап-коррекции, $\kappa > 0$, $\gamma > 0$, $\nu > 0$, матрица A_q и векторы b_q , c_k определены в (13).

После объединения объекта (9), (10) с законом управления (22)-(25) анализируется устойчивость замкнутой системы

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{\zeta} \\ \dot{z}_2 \\ \dot{\chi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{12} & 0 \\ \bar{b}_2^T A_{21} & -\gamma & \bar{b}_2^T (A_{22} + \gamma I) & 0 \\ A_{21} & -b_2\gamma & A_{22} - \kappa b_2(c_k^T + c_2^T) + \gamma b_2 \bar{b}_2^T & \kappa b_2 c_k^T \\ A_{21} & -b_2\gamma & A_{22} - I_0 - \kappa b_2(c_k^T + c_2^T) + \gamma b_2 \bar{b}_2^T & A_q + \kappa b_2 c_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ \zeta \\ z_2 \\ \chi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (\nu - 1) \\ -b_2 \\ -b_2 \end{bmatrix} \kappa + \begin{bmatrix} R_1 \\ \bar{b}_2^T R_2 \\ R_2 \\ R_2 \end{bmatrix} w, \quad (26)$$

где $\chi = z_2 - \xi$ и $\zeta = (b_2^T b_2)^{-1} b_2^T z_2 + \eta$.

Можно показать, что существуют параметры γ , κ , σ такие, что матрицы состояния замкнутой системы (26) гурвицева.

При $w = 0$ рассматривается замкнутая система (26) в компактном виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}\varkappa(v), \quad (27)$$

$$v = \mathbf{c}^T \mathbf{x}. \quad (28)$$

С использованием критерия Попова доказывается абсолютная устойчивость соединения системы (27)–(28) и функции без памяти $\varkappa(v)$. При $w \neq 0$ и $\varkappa(v) = v - \text{sat}(v) = 0$ в работе приводится анализ сходимости ошибки регулирования к нулю в установившемся режиме.

Для компенсации полигармонических возмущений формируется закон управления вида

$$v = -\kappa(c_k^T \xi + y) - \gamma^T \eta, \quad (29)$$

$$\dot{\xi} = A_q \xi + b_q y, \quad (30)$$

$$\dot{\eta} = \Phi \eta + g(\kappa(c_k^T \xi + y) + \gamma^T \eta + v \varkappa(v)), \quad (31)$$

$$\varkappa(v) = v - \text{sat}(v), \quad (32)$$

где $\varkappa(v)$ — нелинейный сигнал антивиндап-коррекции, $\nu > 0$, $\kappa > 0$ матрица A_q и вектора b_q , c_k определены в (13), матрица Φ — произвольная гурвицева матрица во фробениусовой форме размерности $n_w \times n_w$, векторы $g^T = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]$ и γ удовлетворяют $\lambda\{\Phi + g\gamma^T\} = \lambda\{S\}$.

После объединения объекта (9), (10) с законом управления (29)–(32) анализируется устойчивость замкнутой системы аналогично (21).

При $w = 0$ рассматривается замкнутая система в компактном виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}\varkappa(v), \quad (33)$$

$$v = \mathbf{c}^T \mathbf{x}. \quad (34)$$

С использованием критерия Попова доказывается абсолютная устойчивость соединения системы (33)–(34) и функции без памяти $\varkappa(v)$. При $w \neq 0$ и $\varkappa(v) = v - \text{sat}(v) = 0$ в работе приводится анализ сходимости ошибки регулирования к нулю в установившемся режиме. Для подтверждения работоспособности предложенных алгоритмов было выполнено численное моделирование.

Рассматривается математическая модель квадрокоптера

$$m\ddot{x} = (u_1 + u_2 + u_3 + u_4)(c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi), \quad J_\theta \ddot{\theta} = \ell(-u_1 - u_2 + u_3 + u_4), \quad (35)$$

$$m\ddot{y} = (u_1 + u_2 + u_3 + u_4)(s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi), \quad J_\psi \ddot{\psi} = \ell(-u_1 + u_2 + u_3 - u_4), \quad (36)$$

$$m\ddot{z} = (u_1 + u_2 + u_3 + u_4)(c_\theta c_\psi) - mg, \quad J_\phi \ddot{\phi} = C(u_1 - u_2 + u_3 - u_4), \quad (37)$$

где $x, y, z, \theta, \psi, \phi$ — линейные и угловые координаты, $u_i, i = \overline{1, 4}$ — управляющие сигналы, $m, g, \ell, J_\theta, J_\psi, J_\phi, C$ — физические параметры, $s_\phi \equiv \sin \phi$, $c_\phi \equiv \cos \phi$.

После декомпозиции и линеаризации объекта (35)–(37) получается упрощенная модель квадрокоптера

$$m\ddot{x} = -U_5, \quad J_\theta \ddot{\theta} = \ell U_2, \quad (38)$$

$$m\ddot{y} = -U_6, \quad J_\psi \ddot{\psi} = \ell U_3, \quad (39)$$

$$m\ddot{z} = U_1 - mg, \quad J_\phi \ddot{\phi} = C U_4, \quad (40)$$

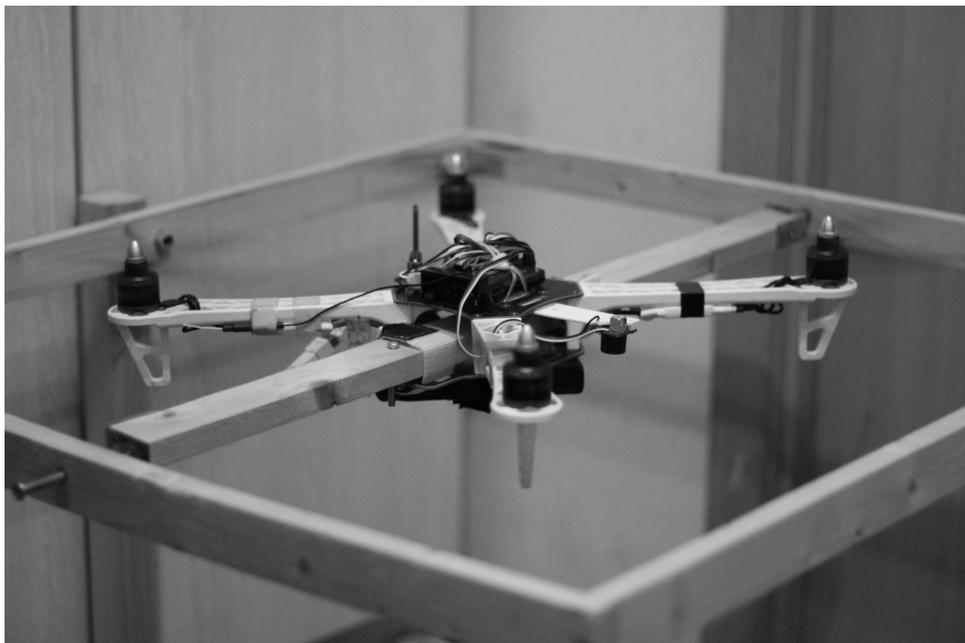


Рисунок 1 – Лабораторный стенд «КОМЕКС-1».

где квазиуправляющие сигналы $U_i, i = \{1, 2, 3, 4\}$, определяемые как

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}, \quad (41)$$

удовлетворяют условию насыщения (4).

Для стабилизации всех подсистем (38)–(40) формируется закон управления вида (22)–(25). Для распределения полученных квазиуправляющих сигналов между исполнительными приводами летательного аппарата выполняется преобразование, обратное (41),

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = 0,25 \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}.$$

Для подтверждения работоспособности предлагаемого алгоритма была проведена экспериментальная апробация на базе лабораторного стенда «КОМЕКС-1» кафедры управления сложными системами Университета ИТМО (см. Рис. 1). Испытания представляют собой стабилизацию углов тангажа и крена при наличии внешних возмущений, обусловленных отражением от пола потока воздуха, наводимого винтами летательного аппарата, а также насыщения по входу. Результаты экспериментальной апробации приведены на Рис. 2. Как видно из графиков, несмотря на влияние внешних возмущающих воздействий и насыщение по входу, поведение системы сохраняет устойчивость, а ошибка регулирования сходится к нулю.

В Главе 4 представлено решение Задачи 3.

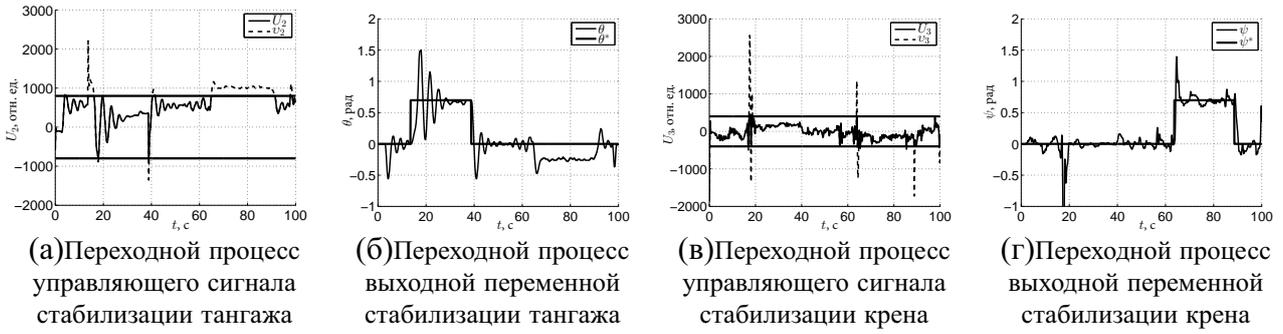


Рисунок 2 – Результаты экспериментальной апробации предлагаемого алгоритма управления.

При $w = 0$ рассматривается модель объекта в пространстве состояний

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{00} + B_{02}\Phi_2 & \bar{A}_{01} & \bar{A}_{02} \\ 0 & A_{11} & A_{12} \\ A_{20} & A_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B}_{01} & 0 \\ 0 & 0 \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}, \quad (42)$$

$$y = H_1 z_1 + H_2 z_2, \quad (43)$$

$$y' = H'_0 z + H'_1 z_1 + \bar{H}'_2 z_2. \quad (44)$$

Для стабилизации нуль-динамики объекта входной сигнал U_1 системы (42)–(44) выбирается как

$$\dot{\zeta} = A_s \zeta + B_s y', \quad (45)$$

$$U_1 = C_s \zeta + D_s y'. \quad (46)$$

где A_s, B_s, C_s, D_s такие, что объединение систем (45), (46) и

$$\dot{z} = (A_{00} + B_{02}\Phi_2)z + \bar{B}_{01}u_0, \quad (47)$$

$$y'_0 = H'_0 z \quad (48)$$

устойчиво для любого значения неопределенного параметра μ .

В работе показана интеграция внутренней модели вида

$$\dot{\eta} = (\Phi + G\Gamma_\varrho)\eta + Gy, \quad (49)$$

где $\Phi = \text{diag}(\Phi_0, \Phi_0, \dots, \Phi_0)$, $G = \text{diag}(G_0, G_0, \dots, G_0)$, $\Gamma_\varrho = \text{diag}(\Gamma_0(\varrho), \Gamma_0(\varrho), \dots, \Gamma_0(\varrho))$ и матрица Φ гурвицева.

После объединения объекта (42)–(44) с внутренней моделью (49) анализируется робастная минимальная фазовость расширенной системы

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{z}_1 \\ \dot{\eta} \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{00} + B_{02}\Phi_2 & \bar{A}_{01} & -\bar{A}_{02}\Gamma_\varrho & \bar{A}_{02} \\ 0 & A_{11} & -A_{12}\Gamma_\varrho & A_{12} \\ 0 & 0 & \Phi & G \\ A_{20} & A_{21} & -\bar{A}_{22}\Gamma_\varrho + \Gamma_\varrho\Phi & \bar{A}_{22} + \Gamma_\varrho G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ z_1 \\ \eta \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B}_{01} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}, \quad (50)$$

$$y' = H'_0 z + H'_1 z_1 - \bar{H}'_2 \Gamma_\varrho \eta + \bar{H}'_2 z_2, \quad (51)$$

где $\bar{z}_2 = \Gamma_\varrho \eta + T_2 x = \Gamma_\varrho \eta + z_2$.

Можно показать, что, если система (42)–(44) робастно минимально фазовая, то таковой является и расширенная система (50), (51).

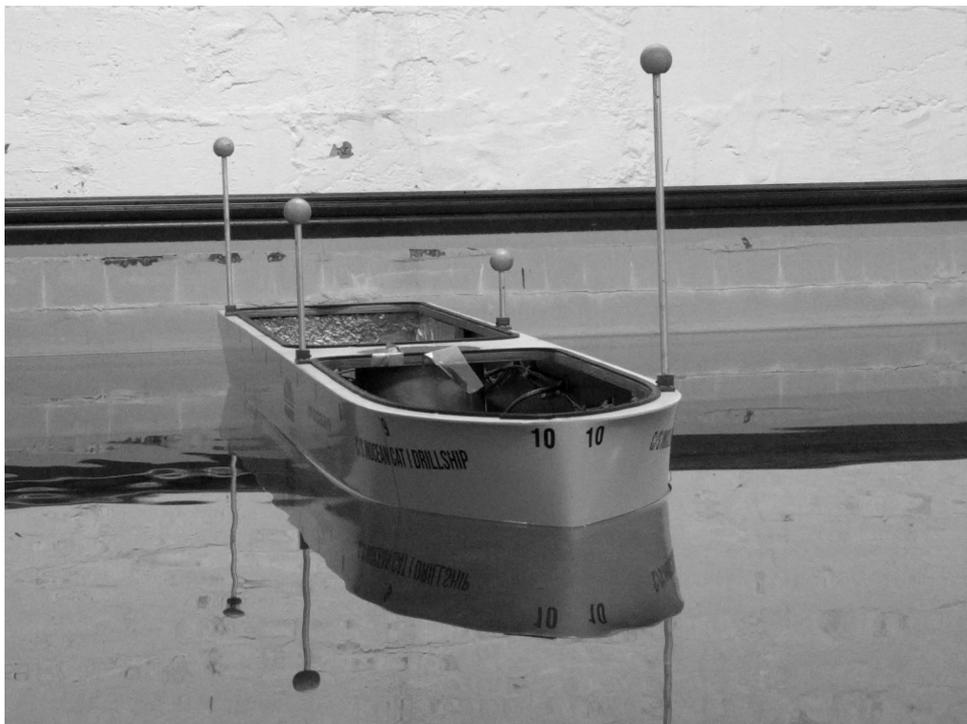


Рисунок 3 – Макет надводного водоизмещающего судна установки «CyberShip Arctic Drillship».

Для объекта (1), (2), (5) формируется закон управления вида

$$u = \Upsilon_1(C_s \zeta + D_s y') + \Upsilon_2(-\kappa_2(\hat{\Gamma}\eta + y)), \quad (52)$$

$$\dot{\zeta} = A_s \zeta + B_s y', \quad (53)$$

$$\dot{\eta} = \Phi \eta + G(\hat{\Gamma}\eta + y), \quad (54)$$

$$\dot{\hat{\Gamma}}_0 = K [\eta_1 \ \eta_2 \ \dots \ \eta_p] z_2, \quad (55)$$

где $\hat{\Gamma} = \text{diag}(\hat{\Gamma}_0, \hat{\Gamma}_0, \dots, \hat{\Gamma}_0)$, Υ_1 и Υ_2 – постоянные матрицы соответствующей размерности.

После объединения объекта (1), (2), (5) с законом управления (52)–(55) анализируется устойчивость замкнутой системы

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\zeta} \\ \dot{\eta} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{00} + B_{02}\Phi_2 + \bar{B}_{01}D_s H'_0 & \bar{B}_{01}C_s & 0 & \bar{A}_{02} + \bar{B}_{01}D_s \bar{H}'_2 \\ B_s H'_0 & A_s & 0 & B_s \bar{H}'_2 \\ 0 & 0 & \Phi + G\Gamma_\rho & G \\ A_{20} + B_{21}D_s H'_0 & B_{21}C_s & -\kappa_2 B_{22}\Gamma_\rho & \bar{A}_{22} + B_{21}D_s \bar{H}'_2 - \kappa_2 B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \zeta \\ \eta \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -G \\ \kappa_2 B_{22} \end{bmatrix} \tilde{\Gamma}\eta + \begin{bmatrix} R_0 \\ R_2 \\ 0 \\ R_{y'} \end{bmatrix} w.$$

Можно показать, что при $\tilde{\Gamma} = \hat{\Gamma} - \Gamma_\rho = 0$ существуют достаточно большое число κ_2 и A_s, B_s, C_s, D_s такие, что система при $w = 0$ устойчива. При $w \neq 0$ в работе приводится анализ сходимости ошибки регулирования к нулю в установившемся режиме. При $\tilde{\Gamma} \neq 0$ в работе приводится анализ устойчивости с использованием прямого метода Ляпунова. Для подтверждения работоспособности предложенных алгоритмов было выполнено численное моделирование системы стабилизации скорости движения надводного судна.

В работе приводится расширение алгоритма на случай произвольной относительной степени объекта с помощью наблюдателя, построенного на основе принципа сильной обратной связи, а также на случай компенсации интегрального насыщения в условиях ограниченности входных воздействий объекта с помощью антивиндап-коррекции.

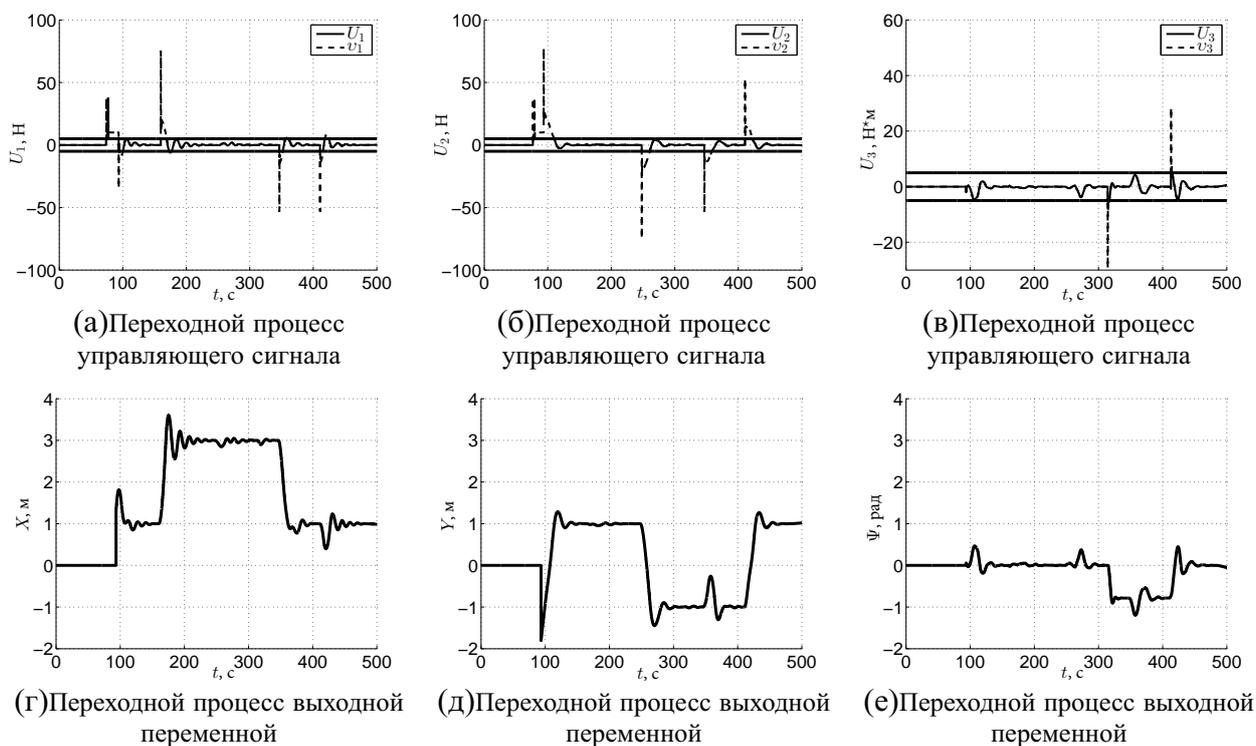


Рисунок 4 – Результаты экспериментальной апробации предлагаемого алгоритма управления.

Для подтверждения работоспособности предлагаемого алгоритма была проведена экспериментальная апробация на базе установки «CyberShip Arctic Drillship» департамента морских технологий Норвежского университета естественных и технических наук (NTNU) (см. Рис. 3). Испытания представляют собой классический тест системы динамического позиционирования («DP 4 corner test»), который заключается в последовательном обходе четырех углов квадрата со сменой курсового угла. Результаты эксперимента представлены на Рис. 4. Как видно из графиков, система устойчива по всем выходным переменным многоканальной системы при наличии ограничений по управлению.

В **заключении** приведены основные результаты, описывающие предложенный комплекс алгоритмов робастного управления по принципу сильной обратной связи, синтезированных в пространстве состояний, для стабилизации многоканальных систем с насыщением по входу и подверженных влиянию внешних возмущающих воздействий.

Публикации по теме диссертации

1. Робототехническая следящая система с быстрой адаптацией к неизвестной траектории движения [Текст] / О.И. Борисов, В.С. Громов, А.А. Ведяков, С.В. Шаветов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2017. — Т. 60, № 9. — С. 832–839. — 0,5/0,278 п.л.
2. Быстрое оценивание параметров генератора хаотического сигнала [Текст] / О.И. Борисов, А.А. Бобцов, В.С. Громов, А.А. Пыркин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2017. — Т. 60, № 6. — С. 487–494. — 0,5/0,305 п.л.
3. Борисов, О.И. Новый метод синтеза алгоритмов робастного управления по выходу [Текст] / О.И. Борисов, А.А. Пыркин // Научно-технический вестник

- информационных технологий, механики и оптики. — 2017. — Т. 17, № 3. — С. 564–567. — 0,25/0,173 п.л.
4. Система технического зрения для роботизированного макета надводного судна [Текст] / О.И. Борисов, В.С. Громов, С.М. Власов, А.А. Пыркин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2016. — Т. 16, № 4. — С. 749–752. — 0,25/0,174 п.л.
 5. Алгоритмы адаптивного и робастного управления по выходу роботизированным макетом надводного судна [Текст] / О.И. Борисов, С.М. Власов, В.С. Громов [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2016. — Т. 17, № 1. — С. 18–25. — 0,5/0,278 п.л.
 6. Управление квадрокоптером с компенсацией ветровых возмущений [Текст] / О.И. Борисов, И.В. Петраневский, В.С. Громов, А.А. Пыркин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2015. — Т. 15, № 6. — С. 1045–1053. — 0,563/0,391 п.л.
 7. Робастная система динамического позиционирования для роботизированного макета надводного судна [Текст] / О.И. Борисов, С.М. Власов, В.С. Громов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2015. — Т. 58, № 9. — С. 713–719. — 0,438/0,303 п.л.
 8. Компенсация полигармонического возмущения, действующего на состояние и выход линейного объекта с запаздыванием в канале управления [Текст] / О.И. Борисов, А.А. Пыркин, А.А. Бобцов [и др.] // Автоматика и телемеханика. — 2015. — Т. 12. — С. 43–64. — 1,375/0,822 п.л.
 9. Borisov, O.I. Design of the High-Payload Grasping Device for Assistive Manipulation [Text] / O.I. Borisov, I.I. Borisov, S.A. Kolyubin // IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). — 2017. — P. 977–981. — 0,313/0,204 п.л.
 10. Adaptive Tracking of a Multi-Sinusoidal Signal with DREM-Based Parameters Estimation [Text] / O.I. Borisov, V.S. Gromov, A.A. Vedyakov [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2017. — P. 4366–4371. — 0,375/0,199 п.л.
 11. The DREM Approach for Chaotic Oscillators Parameter Estimation with Improved Performance [Text] / O.I. Borisov, V.S. Gromov, A.A. Pyrkin [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2017. — P. 7288–7292. — 0,313/0,183 п.л.
 12. Experimental Study on Robust Output Control for Quadcopters [Text] / O.I. Borisov, S.I. Tomashevich, V.S. Gromov [et al.] // 25th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2017. — 2017. — P. 1029–1034. — 0,375/0,257 п.л.
 13. Simple adaptive control for quadcopters with saturated actuators [Text] / O.I. Borisov, A.A. Bobtsov, A.A. Pyrkin, V.S. Gromov // AIP Conference Proceedings. — 2017. — Vol. 1798. — 0,625/0,412 п.л.
 14. Human-free robotic automation of industrial operations [Text] / O.I. Borisov, V.S. Gromov, S.A. Kolyubin [et al.] // IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). — 2016. — P. 6867–6872. — 0,375/0,26 п.л.
 15. Output robust control with anti-windup compensation for robotic boat [Text] / O.I. Borisov, V.S. Gromov, A.A. Pyrkin [et al.] // 2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2016. — 2016. — P. 13–18. — 0,375/0,237 п.л.
 16. Stabilization of linear plants with unknown delay and sinusoidal disturbance compensation [Text] / O.I. Borisov, V.S. Gromov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov // 24th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2016. — 2016. — P. 426–430. — 0,313/0,159 п.л.
 17. Advanced educational tool for remote control study [Text] / O.I. Borisov, S.V. Shavetov, A.A. Vedyakov [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49, no. 6. — P. 303–308. — 0,375/0,248 п.л.

18. Output Robust Control with Anti-Windup Compensation for Quadcopters [Text] / O.I. Borisov, V.S. Gromov, A.A. Pyrkin [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49, no. 13. — P. 287–292. — 0,375/0,258 п.л.
19. Robotic Boat Setup for Control Research and Education [Text] / O.I. Borisov, V.S. Gromov, A.A. Pyrkin [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49, no. 6. — P. 256–261. — 0,375/0,239 п.л.
20. Manipulation Tasks in Robotics Education [Text] / O.I. Borisov, V.S. Gromov, A.A. Pyrkin [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49, no. 6. — P. 22–27. — 0,375/0,245 п.л.
21. Adaptive Multisinusoidal Signal Tracking System with Input Delay [Text] / O.I. Borisov, V.S. Gromov, A.A. Vedyakov [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2016. — Vol. 49, no. 13. — P. 105–110. — 0,375/0,244 п.л.
22. Compensation of polyharmonic disturbance of state and output of a linear plant with delay in the control channel [Text] / O.I. Borisov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // Automation and Remote Control. — 2015. — Vol. 76, no. 12. — P. 2124–2142. — 1,188/0,688 п.л.
23. Adaptive controller implementation for surface robotic vessel [Text] / O. Borisov, J. Wang, V. Gromov [et al.] // Chinese Control Conference, CCC. — 2015. — Vol. 2015-September. — P. 3230–3235. — 0,375/0,237 п.л.
24. Output Control Algorithms of Dynamic Positioning and Disturbance Rejection for Robotic Vessel [Text] / O.I. Borisov, J. Wang, A.A. Pyrkin [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2015. — Vol. 48, no. 11. — P. 295–300. — 0,375/0,201 п.л.
25. Simple Robust and Adaptive Tracking Control for Mobile Robots [Text] / O.I. Borisov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // IFAC-PapersOnLine. — 2015. — Vol. 48, no. 11. — P. 143–149. — 0,438/0,281 п.л.
26. Output controller for quadcopters based on mathematical model decomposition [Text] / O.I. Borisov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // 2014 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2014. — 2014. — P. 1281–1286. — 0,375/0,19 п.л.
27. Output control approach for delayed linear systems with adaptive rejection of multiharmonic disturbance [Text] / O.I. Borisov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). — 2014. — Vol. 19. — P. 12110–12115. — 0,375/0,209 п.л.
28. Stabilization of nonlinear system with input delay and biased sinusoidal disturbance [Text] / O.I. Borisov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). — 2014. — Vol. 19. — P. 12104–12109. — 0,375/0,191 п.л.
29. Output controller for quadcopters with wind disturbance cancellation [Text] / O.I. Borisov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // 2014 IEEE Conference on Control Applications, CCA 2014. — 2014. — P. 166–170. — 0,313/0,163 п.л.
30. Output adaptive controller for linear system with input delay and multisinusoidal disturbance [Text] / O.I. Borisov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // 2014 IEEE Conference on Control Applications, CCA 2014. — 2014. — P. 1777–1782. — 0,375/0,246 п.л.
31. Fast compensation of unknown multiharmonic disturbance for nonlinear plant with input delay [Text] / O.I. Borisov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). — 2013. — Vol. 11, no. PART. — P. 546–551. — 0,375/0,24 п.л.
32. Simple output stabilization approach for robotic systems [Text] / O.I. Borisov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). — 2013. — P. 1873–1878. — 0,375/0,212 п.л.

33. Dynamic positioning system for nonlinear MIMO plants and surface robotic vessel [Text] / O.I. Borisov, A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov [et al.] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). — 2013. — P. 1867–1872. — 0,375/0,259 п.л.
34. Борисов, О.И. Методы управления робототехническими приложениями. Учебное пособие [Текст] / О.И. Борисов, В.С. Громов, А.А. Пыркин. — СПб. : Университет ИТМО, 2016. — С. 108. — 3,375/2,194 п.л.
35. Программа для управления роботизированным макетом надводного судна [Текст] / О.И. Борисов, В.С. Громов, А.А. Пыркин [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2014661674. — 11.11.2014 — 0,063/0,041 п.л.
36. Программа для управления робототехнической системой в условиях мультигармонических возмущений [Текст] / О.И. Борисов, А.А. Ведяков, В.С. Громов [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2015615898. — 27.05.2015 — 0,063/0,039 п.л.
37. Программа для управления робототехнической системой посредством силомоментного датчика [Текст] / О.И. Борисов, А.О. Ключин, И.В. Петраневский [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2016619315. — 17.08.2016 — 0,063/0,036 п.л.
38. Программа для поиска и определения координат объекта манипулирования робототехнической системы [Текст] / О.И. Борисов, С.О. Глаголев, И.В. Петраневский [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2016619488. — 22.08.2016 — 0,063/0,034 п.л.