

На правах рукописи



Пыркин Антон Александрович

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ЗАПАЗДЫВАНИЯ,
НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ПАРАМЕТРАХ И ПЕРЕМЕННЫХ
СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2015

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

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Бобцов Алексей Алексеевич

Официальные оппоненты: **Розенвассер Ефим Натанович**,
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет, кафедра Автоматизиро-
ванные корабельные комплексы и информационно-
управляющие системы, заведующий кафедрой

Курдюков Александр Петрович,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Лаборатория №1,
заведующий лабораторией

Жабко Алексей Петрович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный универси-
тет, кафедра Теории управления, заведующий ка-
федрой

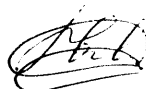
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное обра-
зовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет име-
ни М.В. Ломоносова»

Защита состоится 12 ноября 2015 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. 285.

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 rpo.ifmo.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дударенко Наталия Александровна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. В теории автоматического управления особое место занимают системы с запаздыванием, задача управления которыми всегда привлекала внимание многих исследователей (Цыпкин Я.З., Красовский Н.Н., Смит О., Манитиус А., Ольброт А.В., Резван В., Цыкунов А.М., Ичикава К., Ортега Р., Аннасвами А.М., Никулеску С., Крстич М., Ришар Ж.П., Розенвассер Е.Н., Жабко А.П., Харитонов В.Л. и многие другие). Выделение объектов с запаздыванием в отдельный класс вызвано, прежде всего, сложностью их исследования. Запаздывание реакции управляющей системы на возникшее отклонение регулируемой переменной приводит, как правило, к возникновению автоколебаний и потере устойчивости в замкнутой системе.

Запаздывания — широко распространенное явление в современных технических системах. Особенно ярко оно проявляется при автоматическом управлении высокоскоростными самолетами, ракетами и сложными системами при наличии больших расстояний. При удаленном управлении динамическими объектами запаздывание оказывает существенное влияние на показатели качества замкнутой системы. Транспортное запаздывание может возникать и в силу конструктивных особенностей. Например, при автоматическом управлении впрыском топлива в инжекторном двигателе внутреннего сгорания анализатор выхлопного газа проблематично поместить непосредственно в камеру сгорания. При синтезе законов управления сложными химическими реакторами запаздывание имеет место в силу особенностей протекания химических реакций. Также запаздывание можно встретить, работая с экологическими, эволюционными, организационными, транспортными и другими системами.

В настоящее время имеется большое количество работ по исследованию систем с запаздыванием. Важное значение имели работы, где для анализа устойчивости было предложено рассматривать вместо функций Ляпунова функционалы Ляпунова-Красовского, обладающие аналогичными свойствами. Уникальным подходом была идея Отто Смита. Она заключалась в построении системы управления, в которой запаздывание не влияет на устойчивость и качество переходных процессов. Недостатками такого подхода является то, что он рассчитан только на асимптотически устойчивые объекты управления, а также необходимость точного знания всех параметров системы. В последующие годы учеными со всего мира исследовались и были решены более сложные постановки задач управления в условиях запаздывания: для неустойчивых объектов управления (Манитиус А., Ольброт А.В.), для параметрически не определенных моделей (Цыкунов А.М., Ичикава К., Ортега Р., Аннасвами А.М., Никулеску С.), нелинейных (Крстич М.) и дискретных систем (Цыпкин Я.З.).

В настоящее время нет удовлетворительных решений, связанных с синтезом регуляторов в условиях временного запаздывания и возмущающих воздействий. Особый интерес представляют задачи управления в условиях параметрической неопределенности и неполной информации о состоянии системы.

Наглядный пример сложной технической системы, функционирующей в условиях нестационарной внешней среды, — надводное судно. В открытом море судно подвергается возмущениям, имеющим различную природу и происхождение. Более сложными техническими объектами в смысле управления являются летательные аппараты, обладающие сравнительно высокими скоростями полета и подверженные различным внешним воздействиям: ветер, зоны турбулентности, грозовые тучи, и многое другое, характерное для данного типа объектов.

Для нормального функционирования высокоточных оптических систем требуется относительно спокойная и неподвижная внешняя среда, и наличие возмущающих воздействий может крайне негативно сказываться на работе. В прецизионном электроприводе необходимо минимизировать ошибки слежения с помощью компенсации возмущающих воздействий.

Безусловно, активная компенсация возмущающих воздействий, как одна из классических фундаментальных задач, является актуальной для широкого класса технических объектов управления. На сегодняшний день получено большое число алгоритмов управления в условиях внешних воздействий учеными со всего мира (Уонем М., Марино Р., Томей П., Бодсон М., Ландо И.Д., Томизука М., Карими А., Фиделе Д., Ортега Р., Никифоров В.О., Бобцов А.А.). Как правило, подходы к управлению при наличии возмущения предполагают использование интегральных регуляторов, повышение у системы порядка астатизма или же встраивание известной модели возмущающего воздействия. Применение указанных методов ограничивается классом измеряемых, ограниченных возмущений или же возмущений с известной динамической моделью. С развитием адаптивного управления удалось найти более конструктивные решения в классе параметрически и сигнально не определенных детерминированных возмущений.

При огромном количестве работ, посвященных методам синтеза регуляторов в условиях запаздывания зачастую не рассматривается наличие внешних возмущений, при этом не ясно, является ли тот или иной предложенный метод пригодным к использованию в реальном техническом объекте. Существует не меньшее количество результатов, где получены адаптивные и робастные схемы компенсации параметрически не определенных возмущающих воздействий. Однако при наличии временного запаздывания в контуре управления практически все эти методы становятся неэффективными.

В диссертации предложены оригинальные методы компенсации детерминированного мультисинусоидального возмущения, действующего на неустойчивые нелинейные объекты с запаздыванием в канале управления. Наибольшее внимание уделено управлению по выходу. Исследованы более сложные классы задач, когда измерение регулируемой переменной подвержено возмущающим воздействиям, либо значение выходной переменной недоступно для системы управления, и требуется синтез наблюдателей, работающих в адаптивном режиме.

Диссертационная работа открывает перспективное научное направление, а именно разработка методов адаптивной компенсации детерминированных неизвестных возмущающих воздействий для динамических систем с запаздыванием по состоянию и управлению.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является разработка нового единого подхода к синтезу методов и алгоритмов адаптивного управления нелинейными системами с временным запаздыванием в условиях мультисинусоидальных возмущающих воздействий, параметрических и функциональных неопределенностей математической модели и неполной информации о переменных состояния.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработан метод адаптивного управления нелинейными минимально-фазовыми параметрически не определенными системами с секторной нелинейностью, запаздыванием по состоянию, параметрической неопределенностью, гарантирующий экспоненциальную и L_∞ -устойчивость замкнутой системы, соответственно, без возмущающих воздействий и при их наличии. Для нелинейных минимально-фазовых систем с полиномиальным ограничением на нелинейность, неизвестными параметрами и мультисинусоидальным возмущающим воздействием с известными частотами, получен алго-

ритм управления, гарантирующий полуглобальную устойчивость замкнутой системы.

2. Для нелинейной строго минимально-фазовой системы с неизвестными параметрами и секторной нелинейностью синтезирован адаптивный алгоритм управления, обеспечивающий асимптотическую устойчивость замкнутой системы и компенсацию мультисинусоидального возмущающего воздействия. Для линейного минимально-фазового параметрически не определенного объекта управления получен гибридный алгоритм управления, стабилизирующий замкнутую систему и компенсирующий мультисинусоидальное возмущение.
3. Разработан метод декомпозиции математической модели, позволяющий в два этапа синтезировать адаптивные законы управления для класса многомерных нелинейных систем с параметрическими неопределенностями. Проведено экспериментальное исследование разработанного метода управления для многомерных нелинейных систем на макете роботизированного надводного судна с тремя исполнительными органами управления в задаче динамического позиционирования.
4. Разработан метод адаптивного оценивания параметров и мгновенных значений мультисинусоидальных сигналов, гарантирующий экспоненциальную сходимость оценок к истинным значениям.
5. Предложены способы повышения динамических и точностных показателей качества адаптивного оценивателя при наличии высокочастотных нерегулярных компонент в измерениях.
6. Синтезирован алгоритм адаптивного управления устойчивыми системами с входным запаздыванием в задаче компенсации неизмеряемого мультисинусоидального возмущения. Проведено экспериментальное исследование алгоритма компенсации неизмеряемого возмущающего воздействия на базе мехатронной маятниковой установки на подвижном основании.
7. Разработан метод стабилизации неустойчивых нелинейных систем с запаздыванием в управлении и мультисинусоидальными возмущающими воздействиями.
8. Разработан метод адаптивного управления по выходу линейными системами с входным запаздыванием в задачах компенсации неизмеряемых мультисинусоидальных возмущающих воздействий, действующих на состояние и выходные измеряемые переменные.
9. Синтезирован алгоритм адаптивного управления в задаче слежения за мультисинусоидальным задающим воздействием. Проведено экспериментальное исследование алгоритма адаптивной следящей системы на базе роботоманипулятора и средств технического зрения.
10. Разработан метод управления синхронным двигателем с постоянными магнитами при отсутствии прямых измерений механических переменных состояния и переменном мультисинусоидальном моменте нагрузки. Проведено экспериментальное исследование адаптивного наблюдателя угла поворота и угловой скорости ротора синхронного двигателя на основе измерений напряжения и силы тока в обмотках статора.

Научная новизна. Сформулировано новое научное направление, а именно разработка методов адаптивной компенсации детерминированных заранее неизвестных возмущающих воздействий для нелинейных систем с запаздыванием по состоянию и управлению. Рассматриваемая комплексная задача управления нелинейными системами и компенсации неизвестного мультигармонического возмущения, действующего на состояние и канал измерения, в условиях запаздывания и неполной информации о параметрах и переменных состояния

системы решается впервые. Предложен новый метод оценивания всех параметров мультисинусоидального воздействия с гарантированной экспоненциальной сходимостью оценок к истинным значениям. Разработан новый подход, не имеющий прямых аналогов, к решению задачи компенсации мультигармонических возмущающих воздействий для случая, когда канал управления характеризуется запаздыванием. Решена задача стабилизации неустойчивого объекта с запаздывающим управлением, мультисинусоидальным возмущающим воздействием, оказывающим влияние на состояние и измеряемые регулируемые переменные. Разработан принципиально новый метод оценивания неизмеряемых выходных переменных нелинейных систем, на базе которого синтезирован адаптивный наблюдатель угла и угловой скорости вращения ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами, использующий только измерения напряжений и силы тока в обмотках статора.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что данные методы управления при неполной информации о переменных состояния могут быть эффективно применены для широкого класса технических объектов, функционирующих в условиях параметрической неопределенности, возмущающих воздействий, запаздывания в каналах управления и измерения. Применение полученных методов позволит существенно ослабить требования к объему априорной информации о свойствах среды функционирования объекта управления; значительно снизить затраты на разработку и использование сенсорной техники для измерения всех переменных состояния системы или производных выходной переменной; расширить класс технических объектов, для которых могут быть успешно решены задачи высокоточного управления. Предлагаемые методы и алгоритмы управления подкреплены строгими аналитическими доказательствами экспоненциальной или асимптотической устойчивости замкнутой системы. Показаны способы повышения динамических и точностных показателей качества систем регулирования. Основные теоретические результаты успешно апробированы на мехатронных и робототехнических системах. Получен акт о внедрении результатов диссертационной работы в промышленные изделия серийного производства компании АО «Навис», предназначенные для управления движением надводных водоизмещающих судов в задачах швартовки и динамического позиционирования в точке.

Методология и методы исследования. При получении теоретических результатов использовались метод функций Ляпунова, метод «последовательный компенсатор», принцип внутренней модели, амплитудно-фазовые частотные характеристики линейных динамических звеньев, метод «backstepping», а также новые оригинальные методы, разработанные в диссертации. В работе использованы общие методы теории автоматического управления и автоматизации технологических процессов, алгебры многочленов и теории матриц, теории дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом.

Для широкого класса технических систем, функционирующих в условиях запаздывания и возмущающих воздействий, разработан единый подход к синтезу законов адаптивного управления на основе предикторов нового типа для мультисинусоидальных сигналов, стабилизирующих обратных связей, наблюдателей и упредителей неизмеряемых переменных состояния, включая особый случай, когда измерению не доступны регулируемые переменные.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод адаптивного управления по выходу нелинейными системами с запаздыванием по состоянию и мультисинусоидальными возмущающими воздействиями, основанный на принципе пассивации, принципе внутренней модели и его адаптивной и гибридной версиях.

2. Метод декомпозиции для адаптивного управления многомерными нелинейными системами с параметрическими и функциональными неопределенностями, являющийся способом представления математической модели объекта в виде независимых одномерных динамических каналов, выходами которых являются регулируемые переменные, а входы связаны с управляющими воздействиями посредством нелинейной статической функции.
3. Метод адаптивного оценивания параметров и мгновенных значений мультисинусоидального воздействия в текущий и упреждающий моменты времени, позволяющий регулировать быстродействие и точность для обеспечения заданных показателей качества и обладающий свойством робастности по отношению к аддитивной нерегулярной составляющей.
4. Метод адаптивного управления по состоянию нелинейными динамическими системами с входным запаздыванием и параметрически не определенными детерминированными возмущениями, гарантирующий компенсацию мультисинусоидальных воздействий на основе предикторов нового типа.
5. Метод адаптивного управления по выходу линейными стационарными объектами с входным запаздыванием в задачах компенсации неизмеряемых мультисинусоидальных возмущений, оказывающих влияние на состояние и измерение регулируемых переменных, позволяющий также синтезировать адаптивные системы слежения за детерминированными заранее неизвестными задающими воздействиями.
6. Метод адаптивного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в условиях мультисинусоидального момента нагрузки и отсутствии прямых измерений угла и угловой скорости ротора, содержащий наблюдатель механических переменных состояния, синтезируемый с использованием данных только о напряжении и силе тока в обмотках статора.

Степень достоверности и апробация 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 экспериментальных исследований полученных алгоритмов на основе мехатронного мятникового комплекса Mechatronics Control Kit, оригинальной робототехнической установке моделирования движения надводного судна, роботеманипуляторе KUKA youBot и установке с промышленным сервоусилителем DM2020 для двух синхронных серводвигателей FAST1M6030.
- печатными работами, а также статьями в сборниках трудов международных конференций. Среди 105 научных работ 44 напечатаны в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК [1–44], 61 статья опубликована в реферируемых изданиях трудов 26 международных конференций [45–105], 72 работы входят в международные системы цитирования Scopus и Web of Science.

Основные результаты диссертации докладывались на 26 международных конференциях:

- 9th IFAC Workshop Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, Saint-Petersburg, Russia, 2007. [45] (9-ая международная конференция по адаптации и обучению в управлении и обработке сигналов).
- 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference ENOC, Saint-Petersburg, Russia, 2008. [46, 47] (6-ая международная конференция по нелинейной динамике).

- 17th IFAC World Congress, Seoul, Republic Korea, 2008. [48, 49] (17-ый Всемирный конгресс по автоматическому управлению).
- IEEE International Conference on Control Applications (CCA 2009), Saint Petersburg, Russia, 2009. [50, 51] (Международная конференция по прикладным системам управления).
- 4th International Conference ‘Physics and Control’ (Physcon 2009), Catania, Italy, 2009. [52] (4-ая международная конференция ‘Физика и Управление’).
- 9th IFAC Workshop on Time Delay System, Prague, Czech Republic, 2010. [54–56] (9-ая международная конференция по системам с временным запаздыванием).
- IEEE American Control Conference, Baltimore, USA, 2010. [53] (Американская конференция по управлению).
- 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, Bologna, Italy, 2010. [57, 58] (8-ой международный симпозиум по нелинейным системам управления).
- 19th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Corfu, Greece, 2011. [59, 60] (19-ая Средиземноморская конференция по управлению и автоматизации).
- 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, 2011. [61–65] (18-й Всемирный конгресс по автоматическому управлению).
- IEEE International Conference on Control Applications, Denver, USA, 2011. [66, 67] (Международная конференция по прикладным системам управления).
- 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, USA. [68, 69] (50-ая Конференция по принятию решений и управлению и Европейская конференция по управлению).
- 9th IFAC Symposium on Advances in Control Education, Nizhny Novgorod, Russia, 2012. [70–72] (9-ый Симпозиум по передовым технологиям преподавания теории управления).
- IEEE International Conference on Control Applications, Dubrovnik, Croatia, 2012. [73–75] (Международная конференция по прикладным системам управления).
- 51st IEEE Conference on Decision and Control, Maui, USA, 2012. [76] (51-ая Конференция по принятию решений и управлению).
- 7th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management, and Control, Saint Petersburg, Russia, 2013. [77–80] (7-ая Конференция по моделированию, менеджменту и управлению на производстве).
- 21st IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Plataniass-Chania, Greece, 2013. [81, 82] (21-ая Средиземноморская конференция по управлению и автоматизации).
- 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, Caen, France, 2013. [83, 84] (11-ая международная конференция по адаптации и обучению в управлении и обработке сигналов).
- 18th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Miedzyzdroje, Poland, 2013. [85] (18-ая Международная конференция по методам и моделям в автоматизации и робототехнике).
- 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Firenze, Italy, 2013. [86] (52-ая Конференция по принятию решений и управлению).
- 22nd IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Palermo, Italy, 2014. [87, 88] (22-ая Средиземноморская конференция по управлению и автоматизации).
- 19th IFAC World Congress of the International Federation of Automatic Control, Cape Town, South Africa, 2014. [89–93] (19-й Всемирный конгресс по автоматическому управлению).

- IEEE International Conference on Control Applications, Antibes, France, 2014. [94–96] (Международная конференция по прикладным системам управления)
- 6th IEEE International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems, Saint Petersburg, Russia, 2014. [97, 98] (6-ой Международный конгресс по ультрасовременным системам телекоммуникаций и управления).
- International Conference on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace, Narvik, Norway, 2014. [99] (Международная конференция по нелинейным проблемам в авиации и космосе).
- 1st IFAC Conference on Modeling, Identification and Control of Nonlinear Systems, Saint Petersburg, Russia, 2015. [100–105] (1-ая конференция по моделированию, идентификации и управлению нелинейными системами).

Личный вклад. В 2009 году в течение месяца соискатель проходил научную стажировку в Университете Калифорнии Сан-Диего (США) у профессора М. Крстича, занимаясь исследованием задачи управления неустойчивым линейным стационарным объектом в условиях запаздывания в канале управления и внешнего возмущающего воздействия. В 2010 году соискатель в течение 2 недель проходил стажировку в Университете Бордо, решая задачу повышения показателей качества адаптивных наблюдателей при наличии шумов в измерениях. В 2012-2013 годах проходил длительную стажировку в Норвежском технологическом университете, исследуя проблемы управления промышленными роботами-манипуляторами. С 2013 года соискатель работает в международной лаборатории “Лаборатория нелинейных и адаптивных систем управления”, созданной на базе кафедры Систем управления и информатики и возглавляемой профессором Р. Ортега.

Соискатель был руководителем двух проектов в рамках ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009-2013 годы, “Создание макета механотронного исследовательского комплекса для анализа интеллектуальных методов управления сложными динамическими объектами”, “Разработка системы удаленного управления робототехническими комплексами с техническим зрением” и одного проекта в рамках Госзадания Министерства Образования и науки Российской Федерации на 2014-2016 годы, “Развитие методов адаптивного и робастного управления сложными нелинейными системами с применением к мехатронным и робототехническим приложениям” (Госзадание 2014/190, проект 2118), а также соисполнителем более чем в десяти научно-исследовательских и опытно конструкторских работах, поддержанных РФФИ, ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013”, ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы”, АВЦП “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)”.

Работа выполнена на кафедре Систем управления и информатики при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) и поддержана Правительством Российской Федерации (проект 14.Z50.31.0031).

Под научным руководством соискателя было защищено две диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Суровым М.О. в 2013 году и Ведяковым А.А. в 2015 году. В 2014 году соискателю было присвоено учёное звание доцента.

Разработанные алгоритмы управления были исследованы на мехатронном маятниковом комплексе “The Mechatronics Control Kit” (Mechatronic Systems, Incorporated), оригинальной робототехнической установке моделирования дви-

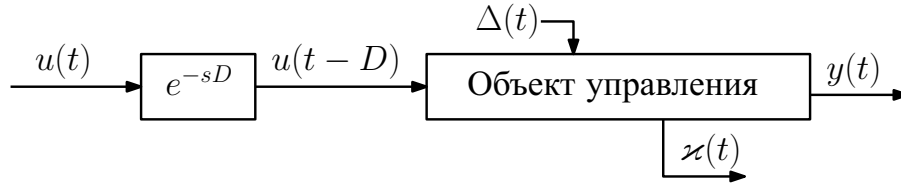


Рисунок 1 – Объект управления с запаздыванием и возмущением.

жения надводного судна, роботe-манипуляторе KUKA youBot, а также на экспериментальной установке с промышленным сервоусилителем DM2020 для двух синхронных серводвигателей FAST1M6030.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 119 печатных работах: 44 журнальные статьи на русском языке [1–44]; 61 статья в сборниках крупнейших международных конференций [45–105], среди которых 12 статей на трех Всемирных конгрессах по автоматическому управлению; диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук [106]; три учебных пособия [107–109]; один патент на полезную модель [110] и девять свидетельств о регистрации компьютерных программ для ЭВМ [111–119].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 347 страниц с 70 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 272 наименования.

Содержание работы

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

Первая глава посвящена обзору методов управления в условиях запаздывания, внешних возмущающих воздействий, неполной информации о параметрах и переменных состояния системы. Сформулирована обобщенная постановка задачи. Рассматривается многомерный нелинейный объект с запаздыванием по управлению и состоянию, подверженный воздействию внешних возмущений:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), \theta, u(t - D), \varpi(y(t - \tau)), \Delta(t)), \quad (1)$$

$$y(t) = h(x(t)), \quad (2)$$

$$\varkappa(t) = q(x(t), \Delta(t)) \quad (3)$$

где $x \in \mathbb{R}^n$, $y \in \mathbb{R}^r$, $\varkappa \in \mathbb{R}^r$ — соответственно, векторы переменных состояния, регулируемых и измеряемых переменных, $f(\cdot)$, $h(\cdot)$, $q(\cdot)$ — известные нелинейные векторные функции, θ — вектор постоянных параметров, $u \in \mathbb{R}^g$ — вектор управляющих воздействий, $\varpi(\cdot)$ — функция, удовлетворяющая ограничению

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

D , τ — соответственно, запаздывание по управлению и по состоянию, $\Delta \in \mathbb{R}^n$ — векторная функция возмущающего воздействия

$$\Delta(t) = E + \sum_{i=1}^l (G_i \sin(\omega_i t) + H_i \cos(\omega_i t)) + \varsigma_0, \quad (4)$$

где E , G_i и H_i — неизвестные постоянные n -мерные вектор-столбцы, ω_i — неизвестная частота i -ой гармоники. Здесь и далее символ i означает номер гармоники $i = \overline{1, l}$, l — количество гармоник, ς_0 — аддитивная нерегулярная составляющая. В диссертационной работе ставится задача синтеза закона управления

$u(t)$, гарантирующего выполнения целевого условия вида

$$|y(t)| \leq \rho_y e^{-\beta_y t} + \epsilon_y, \quad (5)$$

где ρ_y и β_y — положительные константы, а ϵ_y — константа, определяющая ошибку стабилизации в установившемся режиме. При условии $\varsigma_0 = 0$ должно быть выполнено более строгое условие

$$|y(t)| \leq \rho_y e^{-\beta_y t}. \quad (6)$$

При ненулевом задающем воздействии y^* должно быть выполнено целевое условие для ошибки слежения $e = y^* - y$:

$$|e(t)| \leq \rho_e e^{-\beta_e t} + \epsilon_e, \quad (7)$$

где ρ_e и β_e — положительные константы, а ϵ_e — константа, определяющая ошибку слежения в установившемся режиме.

Задача 1. Пусть объект управления (1)–(3) представлен в виде:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 u(t) + B_2 \varpi(y(t - \tau)) + \Delta(t), \quad (8)$$

$$y(t) = Cx(t), \quad (9)$$

$$\varkappa(t) = Cx(t), \quad (10)$$

где вектор $x(t)$ недоступен для измерения, параметры матриц A , B_1 , B_2 и C не известны, но предполагается, что объект управления минимально-фазовый, вид нелинейной функции не определен, но известно, что

$$|\varpi(y)| \leq C_1 |y| + C_2 |y|^a, \quad a \in \mathbb{N}. \quad (11)$$

Ставится задача синтеза такого закона управления $u(t)$ по измерениям выходных переменных $y(t)$, что обеспечивается одно из целевых условий (5)–(7).

Задача 2. Пусть объект управления (1)–(3) представлен в виде:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - D) + B\varpi(y(t - \tau)) + \Delta(t), \quad (12)$$

$$y(t) = Cx(t), \quad (13)$$

$$\varkappa(t) = q(x(t), \Delta(t)), \quad (14)$$

где вектор $x(t)$ может быть недоступен для измерения, параметры матриц A , B и C частично известны, но допускается, что объект управления может быть неминимально-фазовым, нелинейная функция известна, а запаздывание τ больше входного запаздывания D . Ставится задача синтеза закона управления $u(t)$, обеспечивающего выполнение одного из целевых условий (5)–(7).

Во второй главе представлено решение задачи 1 для объекта управления со скалярными входом и выходом. На первом шаге предложен алгоритм управления по выходу, обеспечивающий экспоненциальную устойчивость положения равновесия без возмущения и L_∞ -устойчивость для возмущенных систем при допущении $C_2 = 0$ для (11).

Замечание 1. В общем случае векторное возмущение $\Delta(t)$ вида (4) может быть представлено следующим образом: $\Delta(t) = \sum_{i=1}^n \bar{B}_i \delta_i$, где $\delta_i(t)$ скалярные мультисинусоидальные функции времени. Для более простой записи аналитических выражений будем допускать, что возмущение имеет вид $\Delta(t) = B_3 \delta(t)$, где B_3 — n -мерный столбец, $\delta(t)$ скалярная функция времени

$$\delta(t) = \sigma_0 + \sum_{i=1}^l (\mu_i \sin(\omega_i t) + \nu_i \cos(\omega_i t)) + \varsigma_0, \quad (15)$$

где σ_0 , μ_i и ν_i — неизвестные постоянные константы, ω_i — неизвестная частота i -ой гармоника, ς_0 — аддитивная нерегулярная составляющая.

Для удобства синтеза модель (8), (9) записывается в виде вход-выход

$$a(p)y(t) = b_1(p)u(t) + b_2(p)\varpi(y(t - \tau)) + b_3(p)\delta(t), \quad (16)$$

где $p = d/dt$ — оператор дифференцирования, дробно-рациональные передаточные функции означают дифференциально-интегральные преобразования. Допускается, что объект управления минимально-фазовый: полином $b_1(p)$ гурвицев.

Допущение 1. Непрерывно-дифференцируемая функция $\tau(t)$ удовлетворяет условиям $\dot{\tau}(t) < 1$ и $\pi = 1 - \sup_{t \geq 0} \dot{\tau}(t) > 0$ (см. [68]).

Закон управления формируется в виде

$$u(t) = -\alpha(p)(k + \kappa)\hat{y}(t), \quad (17)$$

где число k и полином $\alpha(p)$ такие, что передаточная функция $\frac{b_1(p)\alpha(p)}{a(p) + kb_1(p)\alpha(p)}$ является строго вещественно-положительной (СВП), положительный параметр κ используется для компенсации неопределенностей $\varpi(y(t - \tau))$, и функция $\hat{y}(t)$ рассчитывается по следующему алгоритму

$$\hat{y} = \xi_1, \quad \begin{cases} \dot{\xi}_i = \sigma \xi_{i+1}, & i = 1..(\rho - 2), \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-k_1 \xi_1 - \dots - k_{\rho-1} \xi_{\rho-1} + k_1 y), \end{cases} \quad (18)$$

где число $\sigma > k + \kappa$, и параметры k_i выбираются из условия экспоненциальной устойчивости системы (18).

Теорема 1. Рассматривается нелинейная система (16) и закон управления (17)–(18). Для всех $\kappa \geq \kappa_0 > 0$ и $\sigma \geq \sigma_0 > 0$, где κ_0 и σ_0 — некоторые константы, зависящие от параметров модели объекта управления, замкнутая система является экспоненциально устойчивой, если возмущение отсутствует: $\delta(t) = 0$, иначе система L_∞ -устойчива.

Возможный способ адаптивной настройки коэффициентов κ , k и σ состоит в их увеличении до тех пор, пока не будет достигнута следующая цель

$$|y(t)| < \epsilon_y, \quad \forall t \geq t_1, \quad (19)$$

где число ϵ_y выбирается разработчиком системы управления. Такой подход реализуется с использованием следующего алгоритма настройки

$$\tilde{k}(t) = \int_{t_0}^t \lambda(\theta) d\theta, \quad \lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0, & \text{для } |y(t)| > \epsilon_y, \\ 0, & \text{для } |y(t)| \leq \epsilon_y, \end{cases} \quad (20)$$

где $\tilde{k}(t) = \kappa + k$ и $\lambda_0 > 0$, а коэффициент $\sigma(t)$ рассчитывается по правилу

$$\sigma(t) = \sigma(0)\tilde{k}^2(t), \quad \sigma(0) > 0. \quad (21)$$

Замечание 2. Предложенный адаптивный алгоритм обеспечивает аттрактивность положения равновесия $y = 0$ или его окрестности (19), но не гарантирует устойчивости замкнутой системы.

Для иллюстрации работоспособности такого подхода представлен пример численного моделирования алгоритма адаптивного управления двухэтапным химическим реактором. В следующих разделах второй главы представлены алгоритмы адаптивного управления с компенсацией возмущающего воздействия.

Рассматривается система (16) с нелинейной частью (11), где числа C_1 , C_2 и $a > 1$ не известны, а возмущающее воздействие $\Delta(t)$ определено в замечании 1. Чтобы нагляднее продемонстрировать схему компенсации, будем считать, что нерегулярной составляющей в возмущении нет, т.е. $\zeta_0 = 0$. Целью является синтез закона управления, гарантирующего полуглобальную устойчивость положения равновесия $y = 0$ в системе (16) с учетом следующих допущений.

Допущение 2. Полином $b_1(p)$ гурвицев и параметр $b_0 > 0$.

Допущение 3. Частоты $\omega_i, \forall i$ и относительная степень ρ известны.

Закон управления $u(t)$ формируется с использованием принципа внутренней модели:

$$u(t) = -(k + \kappa) \frac{\alpha(p)(p+1)^{2l+1}}{\gamma(p)} \hat{y}(t), \quad (22)$$

где $\gamma(p) = p(p^2 + \omega_1^2)(p^2 + \omega_2^2) \cdot \dots \cdot (p^2 + \omega_l^2)$, гурвицев полином $\alpha(p)$ степени $(\rho - 1)$ и постоянная $k > 0$ такие, что передаточная функция $H(p) = \frac{\alpha(p)b_1(p)(p+1)^{2l+1}}{a(p)\gamma(p)+k\alpha(p)b_1(p)(p+1)^{2l+1}}$ является СВП, $\kappa > 0$ выбирается с целью компенсации неопределенной нелинейности ϖ . Функция $\hat{y}(t)$ рассчитывается по алгоритму (18). В качестве иллюстративного примера рассмотрена задача управления сокращением сердечной мышцы.

В случае когда частоты возмущающего воздействия не известны, формируется алгоритм управления с использованием адаптивной версии принципа внутренней модели. Рассматривается строго минимально-фазовая система (16) с нелинейной частью

$$(\varpi(y))^2 \leq C_1 y \psi(y), \quad (23)$$

где функция $\psi(y)$ задана, число C_1 не известно, а возмущающее воздействие $\delta(t)$ определено в (15). Будем считать, что нерегулярной составляющей в возмущении нет, т.е. $\zeta_0 = 0$. Ставится задача синтеза алгоритма управления $u(t)$, обеспечивающего при любых начальных условиях выполнение целевого предельного равенства

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0. \quad (24)$$

Закон управления формируется в виде

$$u(t) = \gamma_0(p)\xi(t) - \hat{\Theta}^T \Omega(t) - \gamma_1(t)\psi(y) - \gamma_2(t)y(t), \quad (25)$$

где функции $\hat{\Theta}(t)$, $\gamma_1(t)$ и $\gamma_2(t)$ настраиваются следующим образом:

$$\dot{\gamma}_1(t) = \gamma_{10}y(t)\psi(y), \quad \dot{\gamma}_2(t) = \gamma_{20}y^2(t), \quad \dot{\hat{\Theta}}(t) = K_a \Omega(t)y(t), \quad (26)$$

параметры $\gamma_{10} > 0$, $\gamma_{20} > 0$ и $K_a = K_a^T > 0$, регрессор $\Omega^T(t) = [\xi^{(2l-1)}(t) \dots \xi^{(3)}(t) \xi^{(1)}(t)]$ состоит из функций $\xi^{(j)}(t)$, являющихся производными выходной переменной фильтра

$$\xi(t) = \frac{1}{(p+1)^{2l+1}} u(t). \quad (27)$$

Обобщая результат второй главы, рассматривается задача стабилизации и компенсации мультисинусоидального возмущающего воздействия с неизвестными частотами для объектов управления с произвольной относительной степенью модели. Допускается, что объект управления линейный.

Для случая мультисинусоидального возмущения модификация предложенного алгоритма управления выполняется следующим образом:

$$u(t) = -k \frac{\alpha(p)(p+1)^2}{\bar{\gamma}(p)} y(t), \quad (28)$$

где полином $\bar{\gamma}(p)$ имеет вид $\bar{\gamma}(p) = \hat{\theta}_1 p^{2l-1} + \dots + \hat{\theta}_l p$, постоянные коэффициенты которого $\hat{\Theta}^T = [\hat{\theta}_1 \dots \hat{\theta}_{l-1} \hat{\theta}_l]$ определяются итеративной процедурой подстановки с предварительной настройкой по алгоритму [92]:

$$\hat{\Theta} = \Upsilon(t) + K\Omega(t)\varsigma^{(2k)}(t), \quad (29)$$

$$\dot{\Upsilon}(t) = -K\Omega(t)\Omega^\top(t)\hat{\Theta}(t) - K\dot{\Omega}(t)\varsigma^{(2k)}(t), \quad (30)$$

с использованием регрессора $\Omega^T(t) = [\varsigma^{(2l-1)}(t) \dots \varsigma^{(3)}(t) \varsigma^{(1)}(t)]$, полученного с помощью линейного фильтра вида $\varsigma(t) = \frac{\lambda_0^{2l}}{(p+\lambda_0)^{2l}}y(t)$, $\lambda_0 > 0$.

В третьей главе рассматривается задача управления многомерным объектом управления вида

$$y_i(t) = G_i(u_1, u_2, \dots, u_g, \delta_i), \quad (31)$$

где $i = 1..l$, $y_i(t)$ — выходные переменные, u_1, \dots, u_g — сигналы управления, G_i — нелинейные дифференциальные операторы, и δ_i — возмущающие воздействия.

Синтез закона управления состоит из двух этапов. Выполняется декомпозиция математической модели на две смысловые части: статическую многомерную функцию и независимые одномерные динамические каналы. Допускается, что такое преобразование динамической модели возможно. Каждый канал ориентирован на одну из выходных регулируемых переменных $y_i, i = 1..r$. Для каждого канала вводятся в рассмотрение виртуальные сигналы управления $U_i, i = 1..g$, являющиеся суперпозицией всех управляющих воздействий в направлении, соответствующем регулируемой переменной.

После декомпозиции математическая модель (31) примет вид

$$y_i(t) = \bar{G}_1(U_i, \delta_i), \quad U_i = \tilde{G}_i(u_1, u_2, \dots, u_g), \quad (32)$$

где $\bar{G}_i, i = 1..r$ — дифференциальные операторы, описывающие динамику в одномерных каналах, и $\tilde{G}_i, i = 1..r$ — многомерные статические функции.

На первом шаге синтезируются виртуальные законы управления $U_i, i = 1..r$ для каждого одномерного канала с помощью алгоритмов, предложенных во второй главе, а на втором шаге рассчитываются реальные сигналы управления $u_j, j = 1..g$ на основе виртуальных управлений $U_i, i = 1..r$ и обратного преобразования статической нелинейной части.

В качестве иллюстрации синтезирован алгоритм управления объектом типа квадрокоптер. Решена задача стабилизации в точке с желаемыми координатами и ориентацией. Представлен алгоритм управления объектом типа водоизмещающее надводное судно для задач динамического позиционирования в точке и движении вдоль заданной траектории. Представлены результаты экспериментальных исследований с использованием макета надводного судна, показанного на Рис. 2а. На Рис. 2б представлен путь следования судна до желаемой области (отмечено пунктиром). На Рис. 2в показаны графики изменения координат многоканальной робототехнической системы.

Четвертая глава посвящена методу оцениванию параметров и построению адаптивных наблюдателей для мультисинусоидальных воздействий, позволяющих получать текущую и упреждающую оценки мгновенного значения сигнала. Предложена схема компенсации мультисинусоидальных возмущающих воздействий для задачи 2, когда матрица A гурвицева, $\tau = 0$, $\varkappa = Cx$.

Рассматривается измеряемый сигнал вида

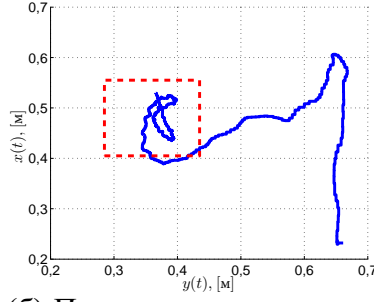
$$y(t) = \sigma_0 + \sum_{i=1}^l \sigma_i \sin(\omega_i t + \phi_i), \quad (33)$$

являющийся суммой l гармоник (с частотами ω_i , амплитудами σ_i и начальными фазами ϕ_i) и постоянного смещения σ_0 . Константы $\sigma_0, \omega_i, \sigma_i$ и ϕ_i являются неизвестными. Здесь и далее символ i означает номер гармоники.

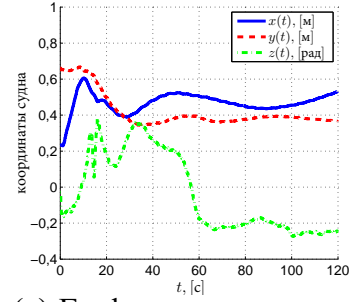
Допущение 4. Количество гармоник l известно.



(а) Внешний вид макета роботизированного судна



(б) Путь следования судна к заданной области



(в) Графики изменения координат судна

Рисунок 2 – Макет надводного судна и результаты эксперимента.

Допущение 5. Все ненулевые частоты гармоник сигнала $y(t)$ не меньше некоторого известного числа ω_0 , т.е. $\omega_i \geq \omega_0$, $i = \overline{1, l}$.

Допущение 6. Расстояние между соседними частотами сигнала $y(t)$ не меньше некоторого известного числа δ_0 , т.е. $|\omega_i - \omega_j| \geq \delta_0$, $\forall i \neq j$, $i, j = \overline{1, l}$.

Ставится задача синтеза устройства оценки, обеспечивающего для любых σ_0 , ϕ_i , σ_i и $\omega_i > 0$ выполнения условий

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega_i - \hat{\omega}_i(t)| = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} |\sigma_0 - \hat{\sigma}_0(t)| = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} |\sigma_i - \hat{\sigma}_i(t)| = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} |\phi_i - \hat{\phi}_i(t)| = 0, \quad (34)$$

где $\hat{\omega}_i(t)$ — оценка частоты ω_i , $\hat{\sigma}(t)$ — оценка смещения σ , $\hat{\sigma}_i(t)$ — оценка амплитуды σ_i , $\hat{\phi}_i(t)$ — оценка фазового сдвига ϕ_i .

Введем в рассмотрение фильтр

$$\xi(s) = \frac{\lambda_0^{2l}}{\gamma(s)} y(s), \quad (35)$$

где $\lambda_0 > 0$, $\gamma(s) = s^{2l} + \gamma_{2l-1}s^{2l-1} + \dots + \gamma_1s + \gamma_0$ — гурвицев полином степени $2l$, где $\gamma_0 = \lambda_0^{2l}$, а корни полинома $\gamma(s)$ прямо пропорциональны параметру λ_0 .

Лемма 1. Для фильтра (35) и входного сигнала (33) будет выполнено соотношение

$$\xi^{(2l+1)}(t) = \Omega^T(t) \bar{\Theta} + \varepsilon(t), \quad (36)$$

где $\Omega^T(t) = [\xi^{(2l-1)}(t) \dots \xi^{(3)}(t) \xi^{(1)}(t)]$ — регрессор, составленный из функций $\xi^{(j)}(t)$, являющихся производными выходной переменной фильтра (35)

$$\xi^{(j)}(s) = \frac{\lambda_0^{2l} s^j}{\gamma(s)} y(s),$$

и $\bar{\Theta}^T = [\bar{\theta}_1 \dots \bar{\theta}_{l-1} \bar{\theta}_l]$ — вектор параметров, зависящий от частот

$$\begin{cases} \bar{\theta}_1 = \theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_l, \\ \bar{\theta}_2 = -\theta_1\theta_2 - \theta_1\theta_3 - \dots - \theta_{l-1}\theta_l, \\ \vdots \\ \bar{\theta}_l = (-1)^{l+1}\theta_1\theta_2 \dots \theta_l, \end{cases} \quad (37)$$

где $\theta_i = -\omega_i^2$, функция $|\varepsilon(t)| \leq \rho_0 e^{-\lambda t}$ и ее производные ограничены и экспоненциально стремятся к нулю, $\rho_0 > 0$, $\lambda > 0$.

Теорема 2. Алгоритм настройки

$$\hat{\omega}_i = \begin{cases} \sqrt{|\hat{\theta}_i|} & \text{для } |\hat{\theta}_i(t)| \geq \omega_0^2, \\ \omega_0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (38)$$

где ω_0 — известная нижняя граница частот ω_i , оценки $\hat{\theta}_i$ рассчитаны на основе $\hat{\theta}_i$ с учетом (37), являющихся элементами вектора $\hat{\Theta}$:

$$\hat{\Theta} = \Upsilon(t) + K\Omega(t)\xi^{(2l)}(t), \quad (39)$$

$$\dot{\Upsilon}(t) = -K\Omega(t)\Omega^\top(t)\hat{\Theta}(t) - K\dot{\Omega}(t)\xi^{(2l)}(t), \quad (40)$$

где $K = \text{diag}\{k_i > 0, i = \overline{1, l}\}$, $\Omega^\top(t) = [\xi^{(2l-1)}(t) \ \dots \ \xi^{(3)}(t) \ \xi^{(1)}(t)]$ — регрессор, полученный с помощью линейного фильтра (35), обеспечивает экспоненциальную сходимость ошибок $\tilde{\omega}_i = \omega_i - \hat{\omega}_i$ к нулю:

$$|\tilde{\omega}_i(t)| \leq \rho_1 e^{-\beta_1 t}, \quad \rho_1 > 0, \quad \beta_1 > 0, \quad \forall t \geq 0. \quad (41)$$

Реализуемый алгоритм оценки переменных $\xi_i(t)$ и $\dot{\xi}_i(t)$ примет вид

$$\begin{bmatrix} \hat{\xi}_1 \\ \vdots \\ \hat{\xi}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1 & \dots & \hat{\theta}_l \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\theta}_1^l & \dots & \hat{\theta}_l^l \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi^{(2)} \\ \vdots \\ \xi^{(2l)} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \hat{\dot{\xi}}_1 \\ \vdots \\ \hat{\dot{\xi}}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\theta}_1^{l-1} & \dots & \hat{\theta}_l^{l-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi^{(1)} \\ \vdots \\ \xi^{(2l-1)} \end{bmatrix}. \quad (42)$$

Замечание 3. При вычислении обратных матриц

$$\hat{\Phi}_1 = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1 & \dots & \hat{\theta}_l \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\theta}_1^l & \dots & \hat{\theta}_l^l \end{bmatrix}, \quad \hat{\Phi}_2 = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\theta}_1^{l-1} & \dots & \hat{\theta}_l^{l-1} \end{bmatrix} \quad (43)$$

возможно потенциальное деление на ноль, так как в знаменателе явно присутствует определитель соответствующих матриц. В силу допущений 5 и 6 определено, что минимальная частота и расстояние между соседними частотами отделены от нуля соответствующими константами. В установившемся режиме, когда переменные $\hat{\theta}_i$ асимптотически стремятся к истинным значениям θ_i , определители матриц $\det\{\hat{\Phi}_1\}$ и $\det\{\hat{\Phi}_2\}$ отличны от нуля, а модули этих величин больше, чем некоторые константы $C_1(\omega_0, \delta_0)$ и $C_2(\omega_0, \delta_0)$. Следовательно, для расчета обратных матриц $\hat{\Phi}_1^{-1}$ и $\hat{\Phi}_2^{-1}$ вместо деления на определитель соответствующей матрицы целесообразно использовать переменные:

$$\Delta_{1,2} = \begin{cases} \det\{\Phi_{1,2}\} & \text{для } |\det\{\Phi_{1,2}\}| \geq C_{1,2}, \\ C_{1,2} \text{sign}(\det\{\Phi_{1,2}\}) & \text{иначе.} \end{cases} \quad (44)$$

Наблюдатель общего смещения строится следующим образом:

$$\hat{\sigma}_0 = \xi(t) - \sum_{i=1}^l \hat{\xi}_i(t). \quad (45)$$

Располагая оценками компонент выходной переменной фильтра (35) $\xi_i(t)$ и их производными $\dot{\xi}_i(t)$, нетрудно оценить амплитуды σ_i и фазы ϕ_i сигнала $y(t)$.

Теорема 3. Алгоритм оценивания амплитуд σ_i и фаз ϕ_i

$$\hat{\sigma}_i = \frac{\hat{\sigma}_{\xi i}}{\hat{L}_{\xi i}}, \quad \hat{\phi}_i(t) = \left(-\hat{\varphi}_{\xi i} + \hat{\phi}_{\xi i}\right) \bmod 2\pi, \quad (46)$$

$$\hat{\sigma}_{\xi i} = \sqrt{\hat{\xi}_i^2 + \left(\frac{\hat{\xi}_i}{\hat{\omega}_i}\right)^2}, \quad \hat{\phi}_{\xi i} = \left(\text{sign}\left(\hat{\xi}_i\right) \arccos\left(\frac{\hat{\xi}_i}{\hat{\sigma}_{\xi i} \hat{\omega}_i}\right) - \hat{\omega}_i(t)t\right) \bmod 2\pi, \quad (47)$$

$$\hat{L}_{\xi i} = \frac{\lambda_0^{2l}}{\sqrt{a(\hat{\omega}_i)^2 + b(\hat{\omega}_i)^2}}, \quad \hat{\varphi}_{\xi i} = -\text{sign}(b(\hat{\omega}_i)) \arccos\left(\frac{a(\hat{\omega}_i)}{\sqrt{a(\hat{\omega}_i)^2 + b(\hat{\omega}_i)^2}}\right), \quad (48)$$

где полиномиальные функции $a(\omega_i)$ и $b(\omega_i)$ соответствуют вещественной и мнимой частям полинома $\gamma(j\omega_i)$, обеспечивает ограниченность и экспоненциальную сходимость к нулю ошибок $\tilde{\sigma}_i = \sigma_i - \hat{\sigma}_i$ и $\tilde{\phi}_i = \phi_i - \hat{\phi}_i$.

Далее представлены способы улучшения точностных и динамических показателей качества оценивания. Ограничившись для простоты изложения случаем одной гармоники, рассматривается проблема оценивания частоты ω сигнала (33) по измерению $\hat{y}(t)$, отличающегося наличием ограниченной аддитивной составляющей $\varsigma_0(t)$ с ограниченными производными

$$y(t) = \sigma_0 + \sigma \sin(\omega t + \phi) + \varsigma(t). \quad (49)$$

Допущение 7. Функция $\varsigma_0(t)$ удовлетворяет следующим ограничениям

$$\left|\int_0^\infty \dot{\varsigma}_0(\tau) d\tau\right| < \infty, \quad \left|\int_0^\infty \cos(\omega\tau) \dot{\varsigma}_0(\tau) d\tau\right| < \infty. \quad (50)$$

Исследуем робастные свойства алгоритма оценивания (35), (38)–(40). Схема оценивания в случае одной гармоники в сигнале (33) примет вид

$$\hat{\omega}(t) = \sqrt{|\hat{\theta}(t)|}, \quad (51)$$

$$\hat{\theta}(t) = \chi(t) + k\dot{\xi}(t)\ddot{\xi}(t), \quad (52)$$

$$\dot{\chi}(t) = -k\dot{\xi}^2(t)\hat{\theta}(t) - k\ddot{\xi}^2(t). \quad (53)$$

Утверждение 1. Для сигнала (49) и схемы оценивания (51)–(53) настройка параметра $k(t)$ согласно правилу

$$\dot{k}(t) = -\nu_0 k^2(t), \quad k(0) = k_0, \quad (54)$$

где $k_0 > 0$, $\nu_0 = \frac{\alpha-1}{k_0 T} > 0$, позволяет увеличить быстродействие схемы оценивания и качество получаемой оценки $\hat{\omega}(t)$, сохраняя экспоненциальный характер сходимости.

Для мультисинусоидального сигнала с несколькими гармониками увеличение коэффициентов $k_i > 0$ менее эффективно для повышения быстродействия, чем для скалярного случая. Решение этой проблемы может быть найдено с использованием гибридной схемы настройки параметров, базирующейся на методе каскадной редукции, изложенной в следующем утверждении.

Утверждение 2. Для сигнала

$$y(t) = \sigma_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) + \sigma_2 \sin(\omega_2 t + \phi_2), \quad (55)$$

где $\sigma_1, \omega_1, \phi_1, \sigma_2, \omega_2, \phi_2$ — неизвестные постоянные параметры, алгоритм идентификации

$$\hat{\omega}_1 = \sqrt{|\hat{\theta}_1|}, \quad \dot{\hat{\theta}}_1(t) = -k_1 \left(\xi^{(2)}(t) \right)^2 \hat{\theta}_1(t) + k_1 \xi^{(2)}(t) z_{11}(t), \quad (56)$$

$$\hat{\omega}_2 = \sqrt{|\hat{\theta}_2|}, \quad \dot{\hat{\theta}}_2(t) = -k_2 z_{22}^2(t) \hat{\theta}_2(t) + k_2 z_{22}(t) z_{21}(t), \quad (57)$$

обеспечивает экспоненциальную сходимость к нулю ошибок оценивания

$$|\omega_i - \hat{\omega}_i(t)| \leq \rho_2 e^{-\beta_2 t}, \quad \rho_2, \beta_2 > 0, \quad \forall t \geq 0,$$

где $k_i > 0, \hat{\theta}_i = \arg\{q^4 + \hat{\theta}_1 q^2 + \hat{\theta}_2 = 0\}, i = 1, 2; z_{11}(t) = \xi^{(4)}(t) - \hat{\theta}_2 \xi(t),$
 $z_{21}(t) = \dot{\zeta}_1(t) \zeta_2(t) - \zeta_1(t) \dot{\zeta}_2(t), \quad z_{22}(t) = \dot{\zeta}_3(t) \zeta_2(t) - \zeta_3(t) \dot{\zeta}_2(t),$
 $\dot{\zeta}_1(t) = \xi^{(4)}(t) \xi^2(t), \quad \dot{\zeta}_2(t) = \left(\xi^{(2)}(t) \right)^2, \quad \dot{\zeta}_3(t) = \xi(t) \xi^2(t).$

Теорема 4. Рассматривается система (12)–(14), где матрица A гурвицева, $\tau = 0, \varkappa = Cx$, и закон управления

$$u(t) = -\frac{a_0}{b_0} \hat{\xi}_0(t) - \sum_{i=1}^l \frac{k_{pi}(t) \hat{\xi}_i(t) - k_{di}(t) \dot{\hat{\xi}}_i(t)}{\hat{L}_{ui}(t)}, \quad (58)$$

$$k_{pi}(t) = \cos(D\hat{\omega}_i(t) - \hat{\varphi}_{ui}(t)), \quad k_{di}(t) = \frac{\sin(D\hat{\omega}_i(t) - \hat{\varphi}_{ui}(t))}{\hat{\omega}_i(t)}, \quad (59)$$

$$\hat{L}_{ui}(t) = \left| \frac{b(j\hat{\omega}_i(t)) \lambda_0^{2l}}{a(j\hat{\omega}_i(t)) \gamma(j\hat{\omega}_i(t))} \right|, \quad \hat{\varphi}_{ui}(t) = \arg \frac{b(j\hat{\omega}_i(t)) \lambda_0^{2l}}{a(j\hat{\omega}_i(t)) \gamma(j\hat{\omega}_i(t))}, \quad (60)$$

где $\hat{\omega}_i(t), \hat{\xi}_0(t), \hat{\xi}_i(t), \dot{\hat{\xi}}_i(t)$ определены в (35)–(42), полиномы $b(s)$ и $a(s)$ соответствуют передаточной функции $\frac{b(s)}{a(s)} = C(sI - A)^{-1}B$, $a_0 = a(0)$ и $b_0 = b(0)$. Тогда выходная переменная замкнутой системы $y(t)$ ограничена и выполняются цели (6) и (7) в зависимости от наличия нерегулярной составляющей ζ_0 .

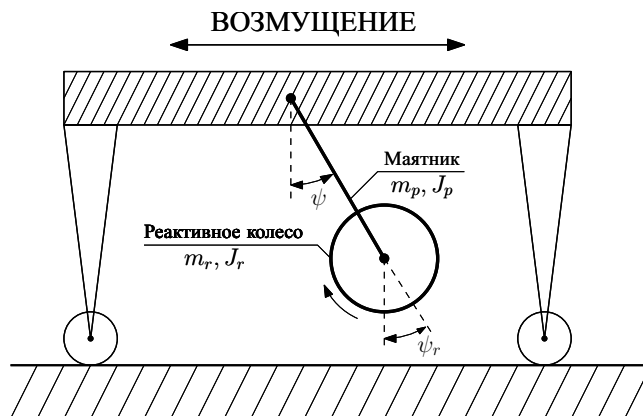
Для иллюстрации работоспособности полученного закона управления показаны результаты экспериментального исследования на мехатронном исследовательском комплексе (см. Рис. 3). Рассмотрена задача стабилизации маятника с инерционным маховиком на подвижной платформе [7, 10, 50, 56, 62, 110, 111]. Механическая часть объекта представляет собой однозвенный маятник, пассивно закрепленный на оси вращения, с расположенным на его конце, удаленном от оси вращения, инерционным маховиком.

На Рис. 4 показаны результаты эксперимента для реального возмущающего воздействия и подвижной платформы. Возмущение создается рукой, что приводит к колебаниям маятника. Показаны результаты для закона управления с параметрами $l = 1, k = 10$ и $\lambda = 6$ и запаздыванием $D = 0,5$. Закон управления стабилизирует систему в некоторой окрестности положения равновесия. Сравнивая амплитуды колебаний маятника без управления и с использованием адаптивного алгоритма, убеждаемся в эффективности предлагаемого подхода.

В пятой главе в рамках задачи 2 представлены алгоритмы стабилизации неустойчивых объектов с запаздывающим управлением при допущении, что вектор переменных состояния доступен для измерения $\varkappa = x$.



(а) Мехатронный маятниковый стенд

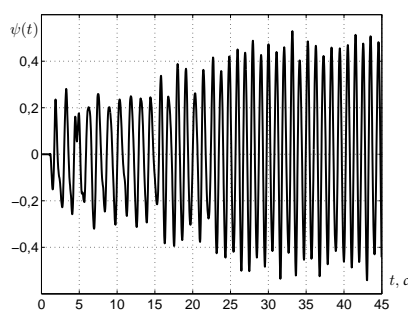


(б) Схема маятниковой системы

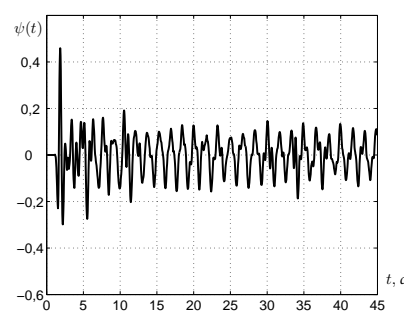
Рисунок 3 – Маятник с инерционным колесом на подвижной платформе.



(а) Оценка частоты возмущения



(б) Переходные процессы для \$\psi(t)\$ без управления



(в) Переходные процессы для \$\psi(t)\$ с управлением

Рисунок 4 – Результаты эксперимента.

Теорема 5. Рассматривается система (12)–(14), где $\varpi = 0$, и закон управления

$$u(t) = u_2(t) + K \left[e^{AD} x(t) + \int_{t-D}^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau \right], \quad (61)$$

где вектор K такой, что матрица $(A + BK)$ гурвицева, и сигнал u_2 рассчитан согласно (58). Тогда выходная переменная замкнутой системы $y(t)$ ограничена и выполняются цели (6) и (7) в зависимости от наличия составляющей ζ_0 .

Отдельно рассматривается случай, когда $\varpi \neq 0$. Пусть объект управления (12)–(14) записан в виде системы дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= x_{i+1}(t) + \varpi_i(y(t - \tau_i)) + a_i y(t), \quad i = 1..(n - 1), \\ \dot{x}_n(t) &= u(t - D) + \varpi_n(y(t - \tau_n)) + a_n y(t) + \delta(t), \\ y(t) &= x_1(t), \end{aligned} \quad (62)$$

где $x(t) = \text{col}\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – измеряемый вектор переменных состояния модели (62), $u(t)$ – сигнал управления, $y(t)$ – скалярная выходная переменная, $D \geq 0$ – известное постоянное запаздывание, a_i – известные постоянные параметры, $\varpi_i(y(t - \tau_i))$ и τ_i – соответственно, известные нелинейные функции и положительные константы, $\delta(t) = \sigma_0 + \sum_{i=1}^l \sigma_i \sin(\omega_i t + \phi_i)$ – неизмеряемое возмущающее воздействие. Будем полагать, что $u(t - D) = 0$ при $t < D$, а также $\tau_i \geq D$ для всех $i = \overline{1, n}$.

Для оценки возмущающего воздействия

$$\delta(t) = \sigma_0 + \sum_{i=1}^l \sigma_i \sin(\omega_i t + \phi_i) = \sigma_0 + \sum_{i=1}^l (\mu_i \sin \omega_i t + \nu_i \cos \omega_i t).$$

формируется наблюдатель вида

$$\dot{\hat{x}}_n(t) = u(t - D) + \varpi(y) + a_n y(t) + k_n \tilde{x}_n(t), \quad (63)$$

где $\hat{x}_n(t)$ – оценка переменной $x_n(t)$, $\tilde{x}_n(t) = x_n(t) - \hat{x}_n(t)$ и параметр $k_n > 0$.

Для оценки частот ω_i используется алгоритм (35)–(40), где вместо $y(t)$ используется сигнал $\tilde{x}_n(t)$.

Запишем алгоритм управления, компенсирующий возмущение:

$$u(t) = u_0(t) - \hat{\delta}(t + D), \quad (64)$$

где u_0 – контур управления, необходимый для стабилизации объекта,

$$\hat{\delta}(t + D) = \hat{\sigma}_0 + \sum_{i=0}^l (\kappa_i \sin(\hat{\omega}t) + \zeta_i \cos(\hat{\omega}t)), \quad (65)$$

$$\kappa_i = \hat{\mu}_i \cos(\hat{\omega}_i D) - \hat{\nu}_i \sin(\hat{\omega}_i D), \quad \zeta_i = \hat{\mu}_i \sin(\hat{\omega}_i D) + \hat{\nu}_i \cos(\hat{\omega}_i D). \quad (66)$$

Параметры $\hat{\sigma}_0$, $\hat{\mu}_i$, $\hat{\nu}_i$ оцениваются по алгоритму

$$\hat{\delta}(t) = \hat{\rho}^T \hat{v}, \quad \hat{\rho} = \hat{\chi} + \gamma_\rho \hat{v} \tilde{x}_n, \quad \dot{\hat{\chi}} = -\gamma_\rho \hat{v} \hat{v}^T \hat{\rho} + \gamma_\rho k_n \tilde{x}_n - \gamma_\rho \hat{v} \tilde{x}_n, \quad (67)$$

где $\hat{\rho} = [\hat{\sigma}_0 \quad \hat{\mu}_1 \quad \hat{\nu}_1 \quad \dots \quad \hat{\mu}_l \quad \hat{\nu}_l]^T$, $\hat{v} = [1 \quad \sin \hat{\omega}_1 t \quad \cos \hat{\omega}_1 t \quad \dots \quad \sin \hat{\omega}_l t \quad \cos \hat{\omega}_l t]^T$, $\hat{v} = [0 \quad \hat{\omega}_1 \cos \hat{\omega}_1 t \quad -\hat{\omega}_1 \sin \hat{\omega}_1 t \quad \dots \quad \hat{\omega}_l \cos \hat{\omega}_l t \quad -\hat{\omega}_l \sin \hat{\omega}_l t]^T$.

Сигнал $u_0(t)$ рассчитывается по формуле

$$u_0(t) = u_1(t) - \left(\frac{\partial^{n-1} \varpi_1(y(t + D - \tau_1))}{\partial y(t + D - \tau_1)^{n-1}} \zeta_2^{n-1}(t + D - \tau_1) + \dots \right. \\ \left. + \frac{\partial \varpi_1(y(t + D - \tau_1))}{\partial y(t + D - \tau_1)} \zeta_n(t + D - \tau_1) + \dots + \varpi_n(y(t - \tau_n)) \right), \quad (68)$$

$$u_1(t) = L e^{\Gamma D} \zeta(t) + L \int_{t-D}^t e^{\Gamma(t-\tau)} q u_1(\tau) d\tau, \quad (69)$$

где вектор-строка L определяется из условия гурвицевости матрицы $F = \Gamma + qL$,

$$\dot{\zeta}(t) = \Gamma \zeta(t) + q u_1(t - D) + \tilde{\delta}(t), \quad y(t) = h^T \zeta(t),$$

$$\text{где } \zeta(t) = \begin{bmatrix} \zeta_1(t) \\ \zeta_2(t) \\ \vdots \\ \zeta_n(t) \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n & a_{n-1} & \dots & a_1 \end{bmatrix}, \quad q = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \text{ и } h^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Также рассматривается система (12)–(14), где $\varpi = 0$, параметры матрицы

$$A \text{ могут быть не известны, } A = \begin{bmatrix} \theta_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \theta_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_n & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Вводятся в рассмотрение n линейных фильтров первого порядка для каждой переменной состояния и 1 фильтр для запаздывающего сигнала управления:

$$\dot{\xi}_i(t) = -\lambda \xi_i(t) + \lambda x_i(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (70)$$

$$\dot{\xi}_u(t) = -\lambda \xi_u(t) + \lambda u(t - D), \quad (71)$$

где $\lambda > 0$ – положительный параметр фильтров.

Алгоритм оценивания неизвестных параметров в случае $\delta = 0$:

$$\dot{\hat{\theta}}_i = k_i \xi_1 \left(\dot{\xi}_i - \xi_{i+1} - \hat{\theta}_i \xi_1 \right), \quad i = \overline{1, n-1}, k_i > 0, \quad (72)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_n = k_n \xi_1 \left(\dot{\xi}_n - \xi_u - \hat{\theta}_n \xi_1 \right), \quad k_n > 0. \quad (73)$$

Закон управления построим в виде:

$$u(t) = \hat{K}(t)e^{\hat{A}(t)D}x(t) + \hat{K}(t) \int_{t-D}^t e^{\hat{A}(t)(t-s)} Bu(s) ds, \quad (74)$$

где вектор-строка $\hat{K}(t)$ определяется из условия гурвицевости матрицы $\hat{A}(t) + B\hat{K}(t)$ в каждый момент времени t .

Для компенсации возмущения $\delta = \sigma_0$ синтезирован алгоритм управления:

$$u(t) = -\hat{\delta}(t) + \hat{K}(t)e^{\hat{A}(t)D}x(t) + \hat{K}(t) \int_{t-D}^t e^{\hat{A}(t)(t-s)} Bu_0(s) ds, \quad (75)$$

$$\hat{\delta}(t) = \dot{\xi}_n(t) - \xi_u(t) - \hat{\theta}_n(t) \xi_1(t), \quad \hat{\theta}_n(t) = \chi(t) + k_n \dot{\xi}_1(t) \dot{\xi}_n(t), \quad (76)$$

$$\dot{\chi}(t) = -k_n \dot{\xi}_1(t) \dot{\xi}_u(t) - k_n \hat{\theta}_n(t) \dot{\xi}_1^2(t) - k_n \dot{\xi}_n(t) \left(\lambda x_2(t) - \lambda \dot{\xi}_1(t) + \hat{\theta}_1(t) x_1(t) \right). \quad (77)$$

В шестой главе решены задачи управления по выходу для неустойчивых линейных систем ($\varpi = 0$) при действии возмущения на состояние $\Delta(t) = B\delta(t)$ и выходную измеряемую переменную $\varkappa(t) = Cx(t) + \alpha\delta(t)$, где α — константа, и возмущение $\delta(t) \in \mathbb{R}$ — функция вида (15).

Рассматривается задача слежения за неизвестным мультисинусоидальным сигналом для линейной системы в условиях запаздывания по управлению и наличию внешнего возмущающего воздействия

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 u(t-D) + B_3 \delta(t), \quad (78)$$

$$y(t) = Cx(t), \quad (79)$$

$$\varkappa(t) = Cx(t) + \alpha\delta(t), \quad (80)$$

$$e(t) = y^*(t) - y(t), \quad (81)$$

где $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}$, $y(t) \in \mathbb{R}$, $\varkappa(t) \in \mathbb{R}$ — соответственно, вектор состояния, сигнал управления, регулируемая переменная и доступный для измерения сигнал, D — известное постоянное запаздывание, $y^* \in \mathbb{R}$ — задающее воздействие, $e \in \mathbb{R}$ — ошибка слежения, $A_{n \times n}$, $B_1 (n \times 1)$, $B_3 (n \times 1)$, $C_{1 \times n}$ — соответственно, матрицы состояния, входов управления, входов возмущения и выхода.

Вначале представим решение задачи оценивания компенсации возмущающего воздействия. Рассматривается линейный наблюдатель вида

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t-D) + L\tilde{y}(t), \quad \hat{y}(t) = C\hat{x}(t), \quad (82)$$

$$\tilde{y}(t) = \varkappa(t) - \hat{y}(t) = C\tilde{x}(t) + \alpha\delta(t), \quad (83)$$

где $\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, и вектор-строка L выбирается из условия гурвицевости матрицы $A - LC$. Для оценки частот ω_i используется алгоритм (35)–(40), где вместо $y(t)$ используется сигнал $\tilde{y}(t)$.

На втором этапе необходимо построить наблюдатели возмущения в текущем времени $\hat{\delta}(t)$ и с упреждением $\hat{\delta}(t+D)$, необходимые для синтеза алгоритма компенсации.

Используя $\hat{\sigma}$, $\hat{\mu}_i$ и $\hat{\nu}_i$, получаем наблюдатель возмущения $\delta(t)$ в виде

$$\hat{\delta}(t) = \hat{\sigma} + \sum_{i=1}^l [\hat{\mu}_i \sin(\hat{\omega}_i t) + \hat{\nu}_i \cos(\hat{\omega}_i t)]. \quad (84)$$

Предиктор для возмущающего воздействия найдем, воспользовавшись (84):

$$\hat{\delta}(t + D) = \hat{\sigma}(t) + \sum_{i=1}^l [\kappa_i(t) \sin(\hat{\omega}_i(t)t) + \zeta_i(t) \cos(\hat{\omega}_i(t)t)], \quad (85)$$

$$\kappa_i(t) = \hat{\mu}_i(t) \cos(\hat{\omega}_i(t)D) - \hat{\nu}_i(t) \sin(\hat{\omega}_i(t)D), \quad (86)$$

$$\zeta_i(t) = \hat{\mu}_i(t) \sin(\hat{\omega}_i(t)D) + \hat{\nu}_i(t) \cos(\hat{\omega}_i(t)D). \quad (87)$$

Следующий шаг — это синтез алгоритмов оценивания $\hat{\sigma}$, $\hat{\mu}_i$ и $\hat{\nu}_i$:

$$\hat{\sigma}(t) = \frac{a_0}{b_0} \hat{\xi}_0(t), \quad (88)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\mu}_i(t) \\ \hat{\nu}_i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_\mu \hat{\vartheta}_i(t) \\ k_\nu \frac{\hat{\vartheta}_i(t)}{\hat{\omega}_i(t)} \end{bmatrix} \left(\hat{\xi}_i(t) - \hat{\mu}_i(t) \hat{\vartheta}_i(t) - \hat{\nu}_i(t) \frac{\hat{\vartheta}_i(t)}{\hat{\omega}_i(t)} \right), \quad (89)$$

где a_0 и b_0 — свободные члены полиномов $a(s)$ и $b(s)$, $k_\mu > 0$, $k_\nu > 0$, функции $\hat{\omega}_i(t)$, $\hat{\xi}_0(t)$, $\hat{\xi}_i(t)$, $\hat{\xi}_i(t)$ определены в (35)–(42).

Регулятор выбирается в виде

$$u(t) = -\hat{\delta}(t + D) + \psi(t), \quad (90)$$

где наблюдатель $\hat{\delta}(t)$ строится согласно (84) и $\psi(t)$ — дополнительное управляющее воздействие, которое будет определено далее с целью стабилизации замкнутой системы

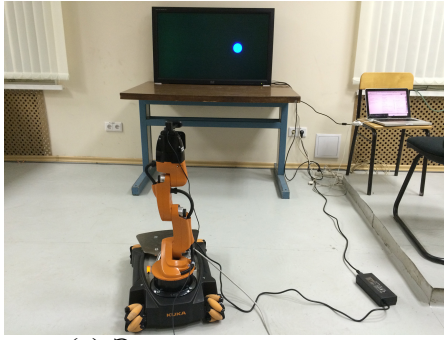
$$\psi(t) = K e^{AD} \bar{x}(t) + K \int_0^D e^{A(D-\tau)} B \psi(\tau) d\tau. \quad (91)$$

На базе представленного алгоритма формируется закон управления, решающий задачу слежения за мультисинусоидальным задающим воздействием с неизвестными параметрами по измерениям ошибки слежения $e(t)$. Для иллюстрации адаптивной системы слежения представлены результаты экспериментального исследования задачи сопровождения цели. Система управления должна обеспечивать совмещение и удержание линии наблюдения устройства слежения с направлением на подвижный объект с некоторой точностью.

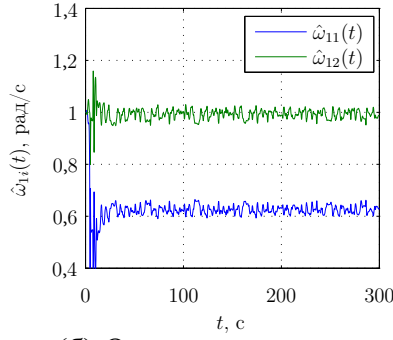
Устройство слежения представляет собой двухканальную систему, выходами которой являются угол места и азимут линии наблюдения, которые должны стремиться к углу места и азимуту цели соответственно. Управление осуществляется по сигналам, связанным с рассогласованием по этим углам. Предполагается, что изменение угла места и азимута подвижного объекта может быть приближенно описано с помощью мультисинусоидальных функций. Устройством наблюдения является USB web-камера Logitech C170, расположенная на последнем звене мобильного робота-манипулятора Kuka youBot, внешний вид которого представлен на Рис. 5а. В качестве подвижного объекта выступает изображение круга выводимое на жидко-кристаллическую панель Cisco LCD 110 PRO 52S. На Рис. 5 приведены результаты эксперимента в виде графиков оценок частот, сигналов управления и измерения для значения запаздывания $D = 2,5$ секунды.

Для наглядной иллюстрации эффективности разработанного в диссертационной работе алгоритма на Рис. 5е изображены результаты эксперимента, при котором до момента времени $t = 100$ секунд в контуре управления использовался пропорциональный регулятор, который в последствии был переключен на адаптивный закон управления вида (90).

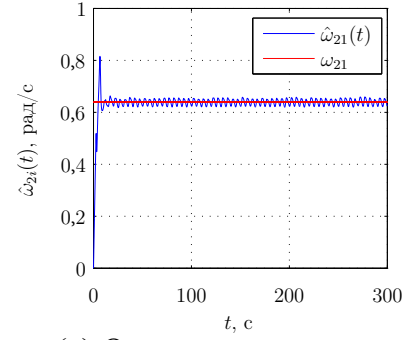
В седьмой главе решена частная задача управления синхронным двигателем с постоянными магнитами, динамическая модель которого может быть описана уравнениями (12)–(14). Управление двигателем осуществляется с помощью напряжения на обмотках статора. Регулируемыми переменными являются



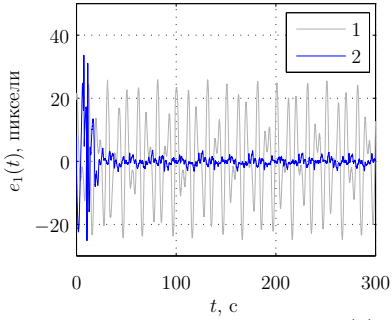
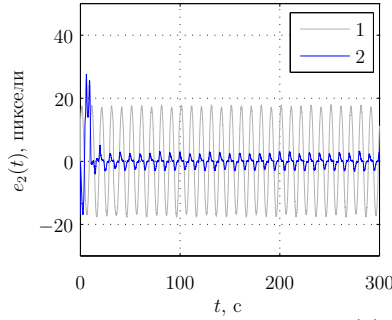
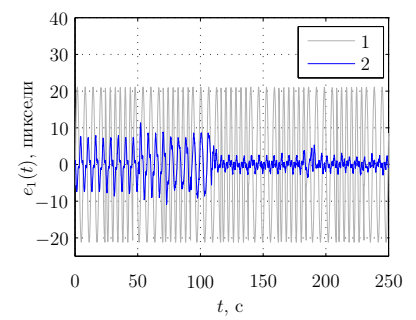
(а) Экспериментальное оборудование



(б) Оценки частот по первому каналу



(в) Оценка частоты по второму каналу

(г) Ошибка слежения $e_1(t)$ по первому каналу(д) Ошибка слежения $e_2(t)$ по второму каналу

(е) Переходные процессы для ошибки слежения

Рисунок 5 – Результаты работы полученного алгоритма для $D = 2,5$ секунд:
1 – без управления, 2 – для замкнутой системы.

угол поворота и скорость вращения ротора, а измеряемыми сигналами — силы тока и напряжения в обмотках, следовательно, переменные x и y не совпадают.

Рассматривается двухфазная $\alpha\beta$ -модель синхронного двигателя с постоянными магнитами и неявно выраженными полюсами [37, 44, 102]:

$$\dot{\theta}(t) = \omega(t), \quad (92)$$

$$j\dot{\omega}(t) = -f\omega(t) + \tau_e(t) + \delta(t), \quad (93)$$

$$\dot{\lambda}(t) = v(t) - Ri(t), \quad (94)$$

где $\theta \in \mathbb{S} := [0, 2\pi)$ — угол поворота ротора, $\omega \in \mathbb{R}$ — угловая скорость вращения ротора, $j > 0$ — момент инерции ротора, $f \geq 0$ — коэффициент вязкого трения, δ — нагрузочный момент, $\lambda \in \mathbb{R}^2$ — магнитный поток, $i \in \mathbb{R}^2$ — токи, $v \in \mathbb{R}^2$ — напряжения, $R > 0$ — сопротивление обмоток статора, $\tau_e = n_p(i_2\lambda_1 - i_1\lambda_2)$ — электромагнитный момент, $n_p \in \mathbb{N}$ — число пар полюсов.

Для двигателей с поверхностной установкой постоянных магнитов значение магнитного потока имеет вид

$$\lambda = Li + \lambda_m C(\theta), \quad (95)$$

где $L > 0$ — индуктивность статора, $C(\theta) := \text{col}(\cos(n_p\theta), \sin(n_p\theta))$, откуда

$$L \frac{di}{dt} = -Ri - \lambda_m \omega C'(\theta) + v, \quad (96)$$

где $C'(\theta)$ обозначает производную по углу θ . Пусть момент нагрузки имеет вид:

$$\delta(t) = \sigma_0 + \sum_{i=1}^l (\mu_i \sin(\omega_i t) + \nu_i \cos(\omega_i t)) + \varsigma_0, \quad (97)$$

где σ_0 , μ_i и ν_i — неизвестные постоянные константы, ω_i — неизвестная частота i -ой гармоники, ς_0 — аддитивная нерегулярная составляющая.

Управление двигателем осуществляется с помощью напряжения на обмотках статора, благодаря которому возникает ток и электромагнитный момент. Сформулируем задачу управления двигателем как поиск желаемого сигнала электромагнитного момента $\tau_e(t)$ для следующих сценариев.

- (i) Пусть угол θ доступен для измерения, угловая скорость ω не доступна для измерения. Пусть параметр f не известен, нагрузочный момент $\delta = \sigma$ является постоянной функцией времени.
- (ii) Пусть угол θ доступен для измерения, угловая скорость ω не доступна для измерения. Пусть параметр f известен, нагрузочный момент δ является мультисинусоидальной функцией времени вида (97).

Цель управления для задач (i) и (ii) — стабилизация заданного угла положения ротора или скорости вращения ротора:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\theta^*(t) - \theta(t)| = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} |\omega^*(t) - \omega(t)| = 0. \quad (98)$$

Задача (i) решается с помощью алгоритма адаптивного управления вида (75)–(77). Решение задачи (ii) получается при помощи алгоритма (82)–(91).

- (iii) Пусть угол θ и угловая скорость ω не доступны для измерения. Требуется синтезировать наблюдатель угла и угла поворота, гарантирующий выполнение целевых условий

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\theta(t) - \hat{\theta}(t)| = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} |\omega(t) - \hat{\omega}(t)| = 0. \quad (99)$$

Для решения задачи (iii) рассматриваются следующие допущения.

Допущение 8. Измерению доступны ток и напряжение $i(t)$ и $v(t)$.

Допущение 9. Сигнал управления $v(t)$ и неизвестный внешний нагрузочный момент $\delta(t)$ такие, что для всех моментов времени $t \geq 0$ существуют решения для динамической модели (96), и они ограничены.

Допущение 10. Сопротивление R и L известны, но другие параметры электродвигателя, то есть λ_m , f , j , не известны.

Допущение 11. Сигналы $v(t)$ и $\tau_L(t)$ такие, что скорость ротора как функция времени удовлетворяет условию предельной интегральной невырожденности, то есть существуют такие константы $T > 0$ и $\delta > 0$

$$\int_t^{t+T} \omega^2(\tau) d\tau \geq \delta, \quad \forall t \geq 0. \quad (100)$$

Допущение 12. Сигналы $i(t)$ и $v(t)$ интегрально ограничены.

Утверждение 3. Рассмотрим модель синхронного двигателя (92), (93), (96). Сформируем наблюдатель положения ротора 9-ого порядка

$$\dot{\xi} = F(\xi, i, v), \quad \hat{\theta} = H(\xi, i, v),$$

где преобразования $F : \mathbb{R}^9 \times \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^9$ и $H : \mathbb{R}^9 \times \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ определены следующим образом ¹

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{14} &= \begin{bmatrix} v \\ i \end{bmatrix}, \quad \dot{\xi}_5 = -\alpha (\xi_5 + |q|^2), \quad \dot{\xi}_{67} = -\alpha (\xi_{67} - 2q), \quad \dot{\xi}_{89} = \Gamma \Omega (y - \Omega^\top \xi_{89}), \\ q &= \xi_{12} - R\xi_{34} - Li, \quad y = -\alpha (|q|^2 + \xi_5), \quad \Omega = \alpha (2q - \xi_{67}), \\ \hat{\theta} &= \frac{1}{n_p} \arctan \left\{ \frac{q_2 + \xi_9}{q_1 + \xi_8} \right\}, \end{aligned}$$

где $\alpha > 0$ и $\Gamma = \Gamma^\top > 0$ — настроечные коэффициенты.

¹ *Специальные обозначения* Для вектора-столбца $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n) \in \mathbb{R}^n$, $|\xi|$ — евклидова норма. Для двух положительных целых чисел i, j , с $n \geq j > i$, вектор-столбец ξ_{ij} определяется как $\xi_{ij} := (\xi_i, \xi_{i+1}, \dots, \xi_j)$.

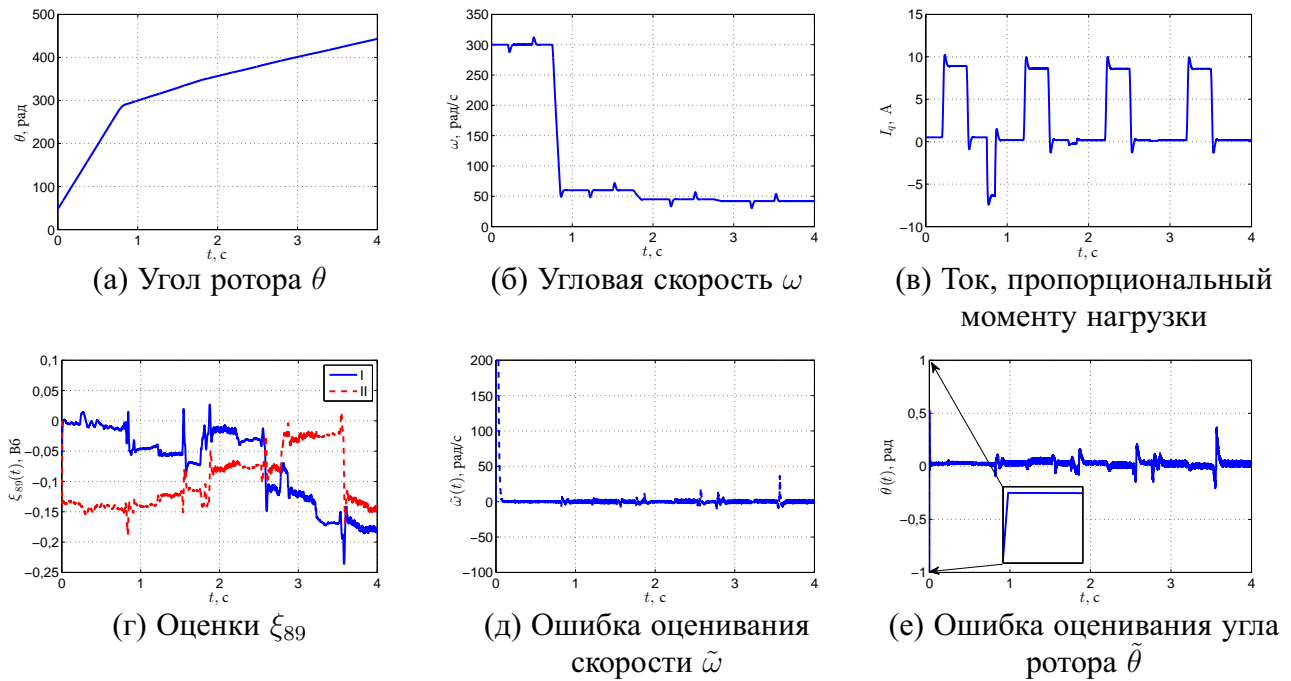


Рисунок 6 – Экспериментальное исследование адаптивного наблюдателя.

- (i) Если выполнены допущения 8–10, то ошибка оценивания $\tilde{\theta} := \hat{\theta} - \theta$ удовлетворяет неравенству

$$|\tilde{\theta}(t)| \leq c_1 |\tilde{\theta}(0)| + c_2, \quad \forall t \geq 0,$$

при некоторых константах $c_1, c_2 > 0$.

- (ii) Если дополнительно выполнены допущения 11 и 12 то все сигналы в системе ограничены и

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\tilde{\theta}(t)| \rightarrow 0.$$

Разработанный наблюдатель был исследован на экспериментальной установке с промышленным сервоусилителем DM2020 для двух синхронных серводвигателей FAST1M6030. Во время теста основной двигатель управляется в режиме регулировки скорости. Второй двигатель работает в режиме нагрузочного момента, создавая программно заданную нагрузку для первого двигателя.

На Рис. 6 представлены результаты эксперимента, где двигатель начинает движение со скоростью 300 рад/с, затем ступенчато до 60 рад/с, далее до 45 рад/с, и в конце до 42 рад/с. В средней точке между переключениями заданной скорости создается нагрузочный момент в форме импульса амплитудой 5 Нм, и затем внешний момент устанавливается в ноль. Заметим, что ошибка оценивания во всех переходных процессах достаточно маленькая и практически не превышает 6 градусов за исключением моментов времени, когда возникают импульсные возмущения на валу двигателя.

В заключении приведены основные результаты, описывающие разработанный комплекс методов адаптивного управления нелинейными системами с временным запаздыванием в условиях мультисинусоидальных возмущающих воздействий, параметрических и функциональных неопределенностей математической модели и неполной информации о переменных состояния.

Публикации по теме диссертации

1. Пыркин, А.А. Управление в условиях запаздывания [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2007. — № 38. — С. 287–292. — 0,375/0,25 п.л.
2. Пыркин, А.А. Компенсация гармонического возмущения в условиях запаздывания по управлению [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2008. — № 4. — С. 19–23. — 0,3125/0,125 п.л.
3. Компенсация гармонического возмущения [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, С.А. Колюбин [и др.] // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2008. — № 55. — С. 51–60. — 0,625/0,4375 п.л.
4. Пыркин, А.А. Компенсация неизвестного синусоидального возмущения для линейного объекта любой относительной степени [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов // Автоматика и телемеханика. — 2009. — № 3. — С. 114–122. — 0,5625/0,3125 п.л.
5. Пыркин, А.А. Адаптивный наблюдатель неизвестного синусоидального выходного возмущения для линейного объекта [Текст] / А.А. Пыркин, С.В. Арановский, А.А. Бобцов // Автоматика и телемеханика. — 2009. — № 11. — С. 108–116. — 0,5625/0,1875 п.л.
6. Синтез наблюдателя в условиях возмущения процесса измерения выхода объекта [Текст] / С.В. Арановский, В.М. Бардов, А.А. Бобцов [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. — 2009. — № 11. — С. 28–32. — 0,3125/0,0625 п.л.
7. Пыркин, А.А. Адаптивное управление маятником с реакционным маховиком [Текст] / А.А. Пыркин, С.А. Колюбин // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2010. — № 5. — С. 28–32. — 0,3125/0,1875 п.л.
8. Пыркин, А.А. Адаптивный алгоритм компенсации параметрически не определенного смещенного гармонического возмущения для линейного объекта с запаздыванием в канале управления [Текст] / А.А. Пыркин // Автоматика и телемеханика. — 2010. — № 8. — С. 62–78. — 1,0625 п.л.
9. Пыркин, А.А. Компенсация неизвестного мультигармонического возмущения для нелинейного объекта с запаздыванием по управлению [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, С.А. Колюбин // Автоматика и телемеханика. — 2010. — № 11. — С. 136–148. — 0,8125/0,625 п.л.
10. Пыркин, А.А. Управление нетривиальными маятниковыми системами в условиях параметрической и функциональной неопределенностей [Текст] / А.А. Пыркин, С.А. Колюбин // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2010. — № 69. — С. 34–39. — 0,375/0,25 п.л.
11. Пыркин, А.А. Компенсация гармонического возмущения для параметрически и функционально не определенного нелинейного объекта [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, А.С. Кремлев // Автоматика и телемеханика. — 2011. — № 1. — С. 121–129. — 0,5625/0,1875 п.л.
12. Технология LEGO MINDSTORMS NXT в обучении студентов основам адаптивного управления [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, Ю.А. Капитанюк [и др.] // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2011. — № 71. — С. 103–108. — 0,375/0,0625 п.л.
13. Пыркин, А.А. Новый функционал Ляпунова-Красовского для доказательства экспоненциальной устойчивости нелинейной системы с запаздыванием [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2011. — № 2. — С. 169. — 0,0625/0,04 п.л.
14. Пыркин, А.А. К задаче управления параметрически неопределенным линейным объектом с запаздыванием в канале управления [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2011. — № 3. — С. 138. — 0,0625/0,04 п.л.

15. Пыркин, А.А. Алгоритм управления по выходной переменной для линейного объекта с неизвестными параметрами и динамической размерностью [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2011. — № 4. — С. 160–162. — 0,1875/0,0625 п.л.
16. Пыркин, А.А. Повышение точности оценки частоты синусоидального сигнала с использованием нелинейного фильтра [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, А.А. Крылов // Известия ВУЗов. Приборостроение. — 2011. — № 6. — С. 7–12. — 0,375/0,1875 п.л.
17. Пыркин, А.А. Синтез гибридного наблюдателя для линейного объекта в условиях гармонического возмущения [Текст] / А.А. Пыркин, С.В. Арановский, Бобцов А.А. // Известия ВУЗов. Приборостроение. — 2011. — № 6. — С. 13–18. — 0,375/0,125 п.л.
18. Алгоритмы управления автономным двухколесным мобильным роботом “Мотобот” [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, А.С. Боргуль, К.А. Зименко // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2011. — Т. 75. — С. 63–68. — 0,375/0,125 п.л.
19. Пыркин, А.А. Идентификация линейно меняющейся частоты синусоидального сигнала [Текст] / А.А. Пыркин, С.В. Арановский, А.А. Бобцов // Научно-технический вестник ИТМО. — 2012. — № 1. — С. 28–32. — 0,3125/0,0625 п.л.
20. Пыркин А.А. Бобцов, А.А. Алгоритм адаптивного оценивания частоты смещенного синусоидального сигнала с аддитивной нерегулярной составляющей [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, Д.В. Ефимов, А. Золгадри // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2012. — № 2. — С. 16–21. — 0,375/0,25 п.л.
21. Пыркин, А.А. Алгоритм управления по выходу с компенсацией синусоидального возмущения для линейного объекта с параметрическими и структурными неопределенностями [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, С.А. Коллюбин // Научно-технический вестник ИТМО. — 2012. — № 3. — С. 68–72. — 0,3125/0,125 п.л.
22. Пыркин, А.А. Каскадная редукция в задачах идентификации [Текст] / А.А. Пыркин, С.В. Арановский, А.А. Бобцов // Научно-технический вестник ИТМО. — 2012. — № 3. — С. 149–150. — 0,125/0,0625 п.л.
23. Алгоритм улучшения параметрической сходимости неизвестной частоты синусоидального сигнала с использованием каскадной редукции [Текст] / А.А. Пыркин, С.В. Арановский, А.А. Бобцов [и др.] // Научно-технический вестник ИТМО. — 2012. — № 4. — С. 149–151. — 0,1875/0,0625 п.л.
24. Итеративный алгоритм адаптивного управления по выходу с полной компенсацией неизвестного синусоидального возмущения [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, С.А. Коллюбин, А.С. Кремлев // Автоматика и телемеханика. — 2012. — № 8. — С. 64–75. — 0,75/0,1875 п.л.
25. Пыркин, А.А. Алгоритм компенсации неизвестного синусоидального возмущения для нелинейной системы с запаздыванием в управлении [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов // Известия ВУЗов. Приборостроение. — 2012. — № 12. — С. 60–62. — 0,1875/0,0625 п.л.
26. Робастное управление мобильными роботами с использованием технического зрения [Текст] / Пыркин А.А., М.В. Фаронов, И.Б. Фуртат [и др.] // Известия ВУЗов. Приборостроение. — 2012. — № 12. — С. 63–65. — 0,1875/0,0625 п.л.
27. Пыркин, А.А. Алгоритм адаптивного оценивания частоты смещенного синусоидального сигнала с аддитивной нерегулярной составляющей [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, М.О. Суров // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 3. — С. 65–70. — 0,375/0,125 п.л.

28. Пыркин, А.А. Управление нелинейным параметрически не определенным объектом с входным запаздыванием [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов // Научно-технический вестник ИТМО. — 2013. — № 1. — С. 15–18. — 0,25/0,125 п.л.
29. Гибридный алгоритм идентификации частот мультисинусоидального сигнала [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, А.А. Ведяков, С.А. Колюбин // Научно-технический вестник ИТМО. — 2013. — № 1. — С. 28–29. — 0,125/0,0625 п.л.
30. Пыркин, А.А. Внедрение комплексов промышленных манипуляционных роботов в образовательный процесс [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, С.А. Колюбин // Научно-технический вестник ИТМО. — 2013. — № 1. — С. 43–45. — 0,1875/0,0625 п.л.
31. Гибридный алгоритм управления по выходу с компенсацией неизвестного мультисинусоидального возмущения [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, А.А. Ведяков, С.А. Колюбин // Известия ВУЗов. Приборостроение. — 2013. — Т. 56, № 4. — С. 7–10. — 0,25/0,0625 п.л.
32. Синтез системы управления квадрокоптером с использованием упрощенной математической модели [Текст] / А.А. Пыркин, Т.А. Мальцева, Д.В. Лабадин [и др.] // Известия ВУЗов. Приборостроение. — 2013. — Т. 56, № 4. — С. 47–51. — 0,3125/0,25 п.л.
33. Пыркин, А.А. Алгоритм управления линейным параметрически не определенным объектом с входным запаздыванием и неизвестным постоянным возмущением [Текст] / А.А. Пыркин, С.В. Арановский, А.А. Бобцов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 5. — С. 5–9. — 0,3125/0,1875 п.л.
34. Пыркин, А.А. Архитектура системы удаленного управления робототехническими объектами [Текст] / А.А. Пыркин, С.В. Шаветов, А.А. Ведяков // Научно-технический вестник ИТМО. — 2014. — Т. 90, № 2. — С. 161–163. — 0,1875/0,0625 п.л.
35. Адаптивное управление по выходу многоканальными линейными стационарными параметрически неопределенными системами [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, М.В. Фаронов [и др.] // Научно-технический вестник ИТМО. — 2014. — Т. 94, № 6. — С. 63–70. — 0,5/0,125 п.л.
36. Пыркин, А.А. Стабилизация нелинейного объекта с входным запаздыванием и синусоидальным возмущающим воздействием [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, С.А. Колюбин // Автоматика и телемеханика. — 2015. — № 1. — С. 21–30. — 0,625/0,25 п.л.
37. Пыркин, А.А. Адаптивный наблюдатель магнитного потока для синхронного двигателя с постоянными магнитами [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, Р. Ортега // Научно-технический вестник ИТМО. — 2015. — Т. 15, № 1. — С. 40–45. — 0,375/0,125 п.л.
38. Способы стабилизации двуногих роботов в положении стоя на подвижной опоре [Текст] / А.А. Пыркин, Д.Н. Базылев, А.А. Маргун [и др.] // Научно-технический вестник ИТМО. — 2015. — Т. 15, № 3. — С. 418–425. — 0,5/0,125 п.л.
39. Adaptive observer design for a chaotic Duffing system [Text] / A. Pyrkin, A. Bobtsov, N. Nikolaev, O. Slita // International Journal of Robust and Nonlinear Control. — 2009. — Vol. 19, no. 7. — P. 829–841. — 0,8125/0,25 п.л.
40. Pyrkin, A.A. Hybrid adaptive observers for locally Lipschitz systems [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, D.V. Efimov // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. — 2011. — Vol. 25, no. 1. — P. 33–47. — 0,9375/0,3125 п.л.

41. Pyrkin, A.A. Cancellation of unknown multiharmonic disturbance for nonlinear plant with input delay [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. — 2012. — Vol. 26, no. 4. — P. 302–315. — 0,875/0,625 п.л.
42. Switched algorithm for frequency estimation with noise rejection [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, D.V. Efimov, A. Zolghadri // IEEE transactions on automatic control. — 2012. — Vol. 57, no. 9. — P. 2400–2404. — 0,3125/0,1875 п.л.
43. Pyrkin, A.A. Simple output feedback adaptive control based on passification principle [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. — 2014. — Vol. 28, no. 7–8. — P. 620–632. — 0,8125/0,4375 п.л.
44. Pyrkin, A.A. A New Approach for Estimation of Electrical Parameters and Flux Observation of Permanent Magnet Synchronous Motors [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, R. Ortega // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. — 2015. — P. 1–15. — 0,9375/0,3125 п.л. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/acs.2579/epdf>.
45. Pyrkin, A. A new approach to MRAC problem with disturbance rejection [Text] / A. Pyrkin, A. Bobtsov // Adaptation and Learning in Control and Signal Processing. — Vol. 9. — Saint Petersburg : IFAC, 2007. — P. 92–97. — 0,375/0,0625 п.л.
46. Pyrkin, A.A. Experimental research of consecutive compensator approach on basis of mechatronic systems [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov // EUROMECH Conference ENOC. — Vol. 6. — Saint Petersburg : [s. n.], 2008. — 0,375/0,25 п.л. URL: <http://lib.physcon.ru/doc?id=c9edebc98829>.
47. An adaptive observer for chaotic duffing system [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.V. Aranovskiy [et al.] // EUROMECH Conference ENOC. — Vol. 6. — Saint Petersburg : [s. n.], 2008. — 0,375/0,125 п.л. URL: <http://lib.physcon.ru/doc?id=07141fb4e364>.
48. Adaptive observer design for chaotic Duffing system [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.V. Aranovskiy [et al.] // IFAC World Congress. — Vol. 17. — Seoul, Republic Korea : IFAC, 2008. — P. 10160–10165. — 0,375/0,125 п.л.
49. Stabilization of a chaotic Van der Pole system [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, N.A. Nikolaev, O.V. Slita // IFAC World Congress. — Vol. 17. — Seoul, Republic Korea : IFAC, 2008. — P. 15143–15147. — 0,375/0,125 п.л.
50. Pyrkin, A.A. Adaptive stabilization of a reaction wheel pendulum on moving LEGO platform [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin // International Conference on Control Applications. — Vol. 18. — Saint Petersburg : IEEE, 2009. — P. 1218–1223. — 0,375/0,1875 п.л.
51. Bobtsov, A.A. Hybrid adaptive observers for locally Lipschitz systems with application to mechanical oscillators [Text] / A.A. Bobtsov, D.V. Efimov, A.A. Pyrkin // International Conference on Control Applications. — Vol. 18. — Saint Petersburg : IEEE, 2009. — P. 619–624. — 0,375/0,125 п.л.
52. Pyrkin, A.A. Stabilization of Reaction Wheel Pendulum on Movable Support with On-line Identification of Unknown Parameters [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin // International Conference “Physics and Control”. — Vol. 4. — Catania, Italy : [s. n.], 2009. — 0,375/0,25 п.л. URL: <http://lib.physcon.ru/doc?id=891f49cba80c>.
53. Rejection of sinusoidal disturbance of unknown frequency for linear system with input delay [Text] / A.A. Pyrkin, A. Smyshlyaev, N. Bekiaris-Liberis, M. Krstic // American Control Conference. — Baltimore, USA : IEEE, 2010. — P. 5688–5693. — 0,375/0,25 п.л.

54. Output control algorithm for unstable plant with input delay and cancellation of unknown biased harmonic disturbance [Text] / A.A. Pyrkin, A. Smyshlyaev, N. Bekiaris-Liberis, M. Krstic // Time Delay Systems. — Vol. 9. — Prague, Czech Republic : IFAC, 2010. — P. 39–44. — 0,375/0,25 п.л.
55. Pyrkin, A.A. Adaptive output stabilization of time-delay nonlinear system [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov // Time Delay Systems. — Vol. 9. — Prague, Czech Republic : IFAC, 2010. — P. 307–312. — 0,375/0,1875 п.л.
56. Pyrkin, A.A. Rejection of unknown biased harmonic disturbance for nonlinear system with input delay [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, A.S. Kremlev // Time Delay Systems. — Vol. 9. — Prague, Czech Republic : IFAC, 2010. — P. 241–246. — 0,375/0,25 п.л.
57. Pyrkin, A.A. An Adaptive Observer with Reduced Order for Chaotic Duffing System Transmitting a Vector of Parameters [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin // Symposium on Nonlinear Control Systems. — Vol. 8. — Bologna, Italy : IFAC, 2010. — P. 290–295. — 0,375/0,25 п.л.
58. Compensation of unknown multiharmonic disturbance for nonlinear plant with delay in control [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Chepinskiy, Y.A. Kapitanyuk // Symposium on Nonlinear Control Systems. — Vol. 8. — Bologna, Italy : IFAC, 2010. — P. 481–486. — 0,375/0,25 п.л.
59. Adaptive cancellation of unknown multiharmonic disturbance for nonlinear plant with input delay [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, Y.A. Kapitanyuk [et al.] // Mediterranean Conference on Control & Automation. — Vol. 19. — Corfu, Greece : IEEE, 2011. — P. 874–879. — 0,375/0,25 п.л.
60. Pyrkin, A.A. Output control for time-delay nonlinear system providing exponential stability [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, M.V. Faronov // Mediterranean Conference on Control & Automation. — Vol. 19. — Corfu, Greece : IEEE, 2011. — P. 515–520. — 0,375/0,25 п.л.
61. Using of LEGO Mindstorms NXT Technology for Teaching of Basics of Adaptive Control Theory [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin [et al.] // IFAC World Congress. — Vol. 18. — Milano, Italy : IFAC, 2011. — P. 9818–9823. — 0,375/0,125 п.л.
62. Pyrkin, A.A. Stabilization of the Schmid Pendulum on the Movable Platform with Real-Time Controller Adjustment and Adaptive Friction Compensation [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin // IFAC World Congress. — Vol. 18. — Milano, Italy : IFAC, 2011. — P. 4137–4142. — 0,375/0,25 п.л.
63. Cancellation of Unknown Harmonic Disturbance for Nonlinear System with Input Delay [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, A.S. Kremlev, S.V. Aranovskiy // IFAC World Congress. — Vol. 18. — Milano, Italy : IFAC, 2011. — P. 1516–1521. — 0,375/0,25 п.л.
64. Robust Output Stabilization of Time-Delay Nonlinear System [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, M.V. Faronov [et al.] // IFAC World Congress. — Vol. 18. — Milano, Italy : IFAC, 2011. — P. 5124–5129. — 0,375/0,1875 п.л.
65. Compensation of Harmonic Disturbance for Nonlinear Plant with Parametric and Functional Uncertainty [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, A.S. Kremlev, Titov A.V. // IFAC World Congress. — Vol. 18. — Milano, Italy : IFAC, 2011. — P. 1528–1533. — 0,375/0,1875 п.л.
66. Output control approach “consecutive compensator” providing exponential and L_∞ -stability for nonlinear systems with delay and disturbance [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin [et al.] // International Conference on Control Applications. — Vol. 20. — Denver, USA : IEEE, 2011. — P. 1499–1504. — 0,375/0,25 п.л.
67. Output adaptive control for active suspension rejecting road disturbance [Text] / A.A. Pyrkin, A.V. Titov, A.A. Bobtsov [et al.] // International Conference on

- Control Applications. — Vol. 20. — Denver, USA : IEEE, 2011. — P. 527–531. — 0,375/0,25 п.л.
68. Pyrkin, A.A. Output control for nonlinear system with time-varying delay and stability analysis [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov // Conference on Decision and Control and European Control Conference. — Vol. 50. — Orlando, USA : IEEE, 2011. — P. 7392–7397. — 0,375/0,25 п.л.
 69. Frequency estimation for periodical signal with noise in finite time [Text] / A.A. Pyrkin, D.V. Efimov, A.A. Bobtsov, A. Zolghadri // Conference on Decision and Control and European Control Conference. — Vol. 50. — Orlando, USA : IEEE, 2011. — P. 3646–3651. — 0,375/0,25 п.л.
 70. Control Approaches for Complicated Self-Unstable Plants with Applications for Two-Wheel Mobile Robot Motobot in Educational Purposes [Text] / A.A. Pyrkin, A.S. Borgul, K.A. Zimenko, A.A. Bobtsov // Advances in Control Education. — Vol. 9. — Nizhny Novgorod : IFAC, 2012. — P. 107–111. — 0,375/0,125 п.л.
 71. Lego Mindstorms NXT for Students' Research Projects in Control Field [Text] / A.A. Pyrkin, S.A. Kolyubin, A.A. Bobtsov [et al.] // Advances in Control Education. — Vol. 9. — Nizhny Novgorod : IFAC, 2012. — P. 102–106. — 0,375/0,125 п.л.
 72. Mechatronic and Robotic Setups for Modern Control Theory Workshops [Text] / A.A. Pyrkin, S.A. Kolyubin, A.A. Bobtsov [et al.] // Advances in Control Education. — Vol. 9. — Nizhny Novgorod : IFAC, 2012. — P. 348–353. — 0,375/0,125 п.л.
 73. Output controller for uncertain nonlinear systems with structural, parametric, and signal disturbances [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin, M.V. Faronov // International Conference on Control Applications. — Vol. 21. — Dubrovnik, Croatia : IEEE, 2012. — P. 1528–1533. — 0,375/0,1875 п.л.
 74. Precise frequency estimator for noised periodical signals [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin, A.A. Vedyakov // International Conference on Control Applications. — Vol. 21. — Dubrovnik, Croatia : IEEE, 2012. — P. 92–97. — 0,375/0,25 п.л.
 75. Pyrkin, A.A. Attitude control of the spacecraft with unknown inertia tensor [Text] / A.A. Pyrkin, M.O. Surov, A.A. Bobtsov // International Conference on Control Applications. — Vol. 21. — Dubrovnik, Croatia : IEEE, 2012. — P. 820–824. — 0,3125/0,125 п.л.
 76. Pyrkin, A.A. Rejection of Sinusoidal Disturbance Approach Based on High-Gain Principle [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin // Conference on Decision and Control. — Vol. 51. — Maui, USA : IEEE, 2012. — P. 6786–6791. — 0,375/0,1875 п.л.
 77. Simple Output Stabilization Approach for Robotic Systems [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin [et al.] // Manufacturing Modelling, Management, and Control. — Vol. 7. — Saint Petersburg : IFAC, 2013. — P. 1873–1878. — 0,375/0,1875 п.л.
 78. Dynamic Positioning System for Nonlinear MIMO Plants and Surface Robotic Vessel [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin [et al.] // Manufacturing Modelling, Management, and Control. — Vol. 7. — Saint Petersburg : IFAC, 2013. — P. 1867–1872. — 0,375/0,25 п.л.
 79. Pyrkin, A.A. Motion control of the six-legged walking robot with unknown inertia matrix [Text] / A.A. Pyrkin, M.O. Surov, A.A. Bobtsov // Manufacturing Modelling, Management, and Control. — Vol. 7. — Saint Petersburg : IFAC, 2013. — P. 234–238. — 0,3125/0,125 п.л.
 80. Control Approaches for Complicated Self-Unstable Plants with Applications for Two-Wheel Mobile System [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, A.S. Borgul,

- K.A. Zimenko // Manufacturing Modelling, Management, and Control. — Vol. 7. — Saint Petersburg : IFAC, 2013. — P. 609–613. — 0,375/0,125 п.л.
81. Pyrkin, A.A. Output controller for nonlinear and MIMO systems with delay [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin // Mediterranean Conference on Control & Automation. — Vol. 21. — Plataniias-Chania, Greece : IEEE, 2013. — P. 1063–1068. — 0,375/0,1875 п.л.
 82. Pyrkin, A.A. Simple output controller for nonlinear systems with multisinusoidal disturbance [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin // Mediterranean Conference on Control & Automation. — Vol. 21. — Plataniias-Chania, Greece : IEEE, 2013. — P. 1087–1091. — 0,3125/0,125 п.л.
 83. Fast Compensation of Unknown Multiharmonic Disturbance for Nonlinear Plant with Input Delay [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin [et al.] // Adaptation and Learning in Control and Signal Processing. — Vol. 11. — Caen, France : IFAC, 2013. — P. 546–551. — 0,375/0,1875 п.л.
 84. Pyrkin, A.A. Rejection of Multiharmonic Disturbance Approach Based on Simple Adaptive Control Principle [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin // Adaptation and Learning in Control and Signal Processing. — Vol. 11. — Caen, France : IFAC, 2013. — P. 408–413. — 0,375/0,125 п.л.
 85. Pyrkin, A.A. Stabilization of biped robot standing on nonstationary plane [Text] / A.A. Pyrkin, D.N. Bazylev // International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. — Vol. 18. — Miedzyzdroje, Poland : IEEE, 2013. — P. 459–463. — 0,3125/0,125 п.л.
 86. Pyrkin, A.A. Adaptive controller for linear system with input delay and output disturbance [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov // Conference on Decision and Control. — Vol. 52. — Firenze, Italy : IEEE, 2013. — P. 5577–5582. — 0,375/0,25 п.л.
 87. Hybrid output controller for parametrically uncertain systems with matching harmonic disturbances rejection [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin, V.S. Gromov // Mediterranean Conference on Control & Automation. — Vol. 22. — Palermo, Italy : IEEE, 2014. — P. 91–96. — 0,3125/0,125 п.л.
 88. Output controller for quadcopters based on mathematical model decomposition [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin [et al.] // Mediterranean Conference on Control & Automation. — Vol. 22. — Palermo, Italy : IEEE, 2014. — P. 1281–1286. — 0,375/0,1875 п.л.
 89. Output Control of Nonlinear Systems with Unmodelled Dynamics [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin [et al.] // IFAC World Congress. — Vol. 19. — Cape Town, South Africa : IFAC, 2014. — P. 1302–1307. — 0,375/0,125 п.л.
 90. Stabilization of Nonlinear System with Input Delay and Biased Sinusoidal Disturbance [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin [et al.] // IFAC World Congress. — Vol. 19. — Cape Town, South Africa : IFAC, 2014. — P. 12104–12109. — 0,375/0,125 п.л.
 91. Adaptive Controller for Linear Plant with Parametric Uncertainties, Input Delay and Unknown Disturbance [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.V. Aranovskiy [et al.] // IFAC World Congress. — Vol. 19. — Cape Town, South Africa : IFAC, 2014. — P. 11294–11298. — 0,3125/0,1875 п.л.
 92. Output Control Approach for Delayed Linear Systems with Adaptive Rejection of Multiharmonic Disturbance [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, V.O. Nikiforov [et al.] // IFAC World Congress. — Vol. 19. — Cape Town, South Africa : IFAC, 2014. — P. 12110–12115. — 0,375/0,25 п.л.
 93. Course of lab activities on control theory based on the Lego NXT [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Kapitonov, A.A. Bobtsov [et al.] // IFAC World Congress. —

- Vol. 19. — Cape Town, South Africa : IFAC, 2014. — P. 9063–9068. — 0,375/0,0625 п.л.
94. Output adaptive controller for linear system with input delay and multisinusoidal disturbance [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, V.O. Nikiforov [et al.] // International Conference on Control Applications. — Vol. 23. — Antibes, France : IEEE, 2014. — P. 1777–1782. — 0,375/0,1875 п.л.
 95. Improved frequency identification via an adaptive filters cascade [Text] / A.A. Pyrkin, S.V. Aranovskiy, A.A. Bobtsov, P.A. Gritcenko // International Conference on Control Applications. — Vol. 23. — Antibes, France : IEEE, 2014. — P. 140–145. — 0,375/0,125 п.л.
 96. Output controller for quadcopters with wind disturbance cancellation [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, S.A. Kolyubin [et al.] // International Conference on Control Applications. — Vol. 23. — Antibes, France : IEEE, 2014. — P. 166–170. — 0,375/0,1875 п.л.
 97. Robust control of rapid thermal processes applied to vapor deposition processing [Text] / A.A. Pyrkin, S.V. Aranovskiy, A.A. Kapitonov [et al.] // International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems. — Vol. 6. — Saint Petersburg : IEEE, 2014. — P. 578–583. — 0,375/0,125 п.л.
 98. Adaptive control of linear MIMO systems [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, M.V. Faronov [et al.] // International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems. — Vol. 6. — Saint Petersburg : IEEE, 2014. — P. 584–589. — 0,375/0,1875 п.л.
 99. Simple adaptive tracking control for mobile robots [Text] / A.A. Pyrkin, A.A. Bobtsov, M.V. Faronov, S.A. Kolyubin // International conference on mathematical problems in engineering, aerospace and sciences. — Vol. 10. — [S. l.] : AIP Publishing, 2014. — P. 1433–1441. — 0,375/0,125 п.л.
 100. Simple Robust and Adaptive Tracking Control for Mobile Robots [Text] / A. Pyrkin, A. Bobtsov, S. Kolyubin [et al.] // 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems. — Saint Petersburg : IFAC, 2015. — P. 153–159. — 0,4375/0,1875 п.л.
 101. Output Control Algorithms of Dynamic Positioning and Disturbance Rejection for Robotic Vessel [Text] / A. Pyrkin, J. Wang, A. Bobtsov [et al.] // 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems. — Saint Petersburg : IFAC, 2015. — P. 305–310. — 0,375/0,25 п.л.
 102. Flux and Position Observer of Permanent Magnet Synchronous Motors with Relaxed Persistency of Excitation Conditions [Text] / A. Pyrkin, S. Aranovskiy, A. Bobtsov [et al.] // 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems. — Saint Petersburg : IFAC, 2015. — P. 311–316. — 0,375/0,1875 п.л.
 103. On Stability of Tunable Linear Time-Varying Band-Pass Filters [Text] / A. Pyrkin, J. Wang, S. Aranovskiy [et al.] // 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems. — Saint Petersburg : IFAC, 2015. — P. 355–357. — 0,1875/0,0625 п.л.
 104. Hybrid Output Controller for Biased and Time-Varying Periodic Disturbances Rejection [Text] / A. Pyrkin, A. Bobtsov, S. Kolyubin, N. Nikolaev // 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems. — Saint Petersburg : IFAC, 2015. — P. 882–887. — 0,375/0,125 п.л.
 105. Output Adaptive Controller for a Class of MIMO Systems with Input Delay and Multisinusoidal Disturbance [Text] / A. Pyrkin, J. Wang, A. Vedyakov [et al.] // 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems. — Saint Petersburg : IFAC, 2015. — P. 902–909. — 0,5/0,1875 п.л.
 106. Пыркин, А.А. Методы адаптивного и робастного управления в условиях запаздывания и возмущающих воздействий [Текст] : дис. ... канд. тех. наук :

- 05.13.01 / А.А. Пыркин ; СПбГУ ИТМО. — СПб. : [б. и.], 2010. — С. 151. — 9,4375 п.л.
107. Пыркин, А.А. Адаптивное и робастное управление с компенсацией неопределенностей. Учебное пособие [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов. — СПб. : НИУ ИТМО, 2013. — С. 135. — 8,4375/6,25 п.л.
108. Адаптивное и робастное управление нелинейными объектами: учебное пособие для высших учебных заведений [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, В.О. Никифоров [и др.]. — СПб. : НИУ ИТМО, 2013. — С. 277. — 16,3125/3,125 п.л.
109. Пыркин, А.А. Управление системами с запаздыванием. Учебное пособие [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, И.Б. Фуртат. — СПб. : Университет ИТМО, 2014. — С. 120. — 7,5/3,75 п.л.
110. Пыркин, А.А. Однозвенный маятник с однородным диском на подвижном основании [Текст]. — Патент на полезную модель № 105754 (заявка № 2010145412). — Зарегистрирован 20.06.2011, приоритет полезной модели 01.11.2010. — 0,4375 п.л.
111. Пыркин, А.А. Программа адаптивного управления маятником “RWP Control” [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, С.А. Колюбин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2010613462. — 26.05.2010. — 0,5625/0,4375 п.л.
112. Система стабилизации и управления автономным двухколесным мобильным роботом [Текст] / А.А. Пыркин, А.С. Боргуль, А.А. Бобцов, К.А. Зименко // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2012615105. — 07.06.2012. — 0,5625/0,1875 п.л.
113. Пыркин, А.А. Программа адаптивного управления с компенсацией возмущений “Iterative LCC Control” [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, С.А. Колюбин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2012617950. — 03.09.2012. — 0,5625/0,1875 п.л.
114. Оценивание частоты зашумленного гармонического сигнала с использованием 1-1 оптимизации [Текст] / А.А. Пыркин, С.В. Арановский, А.А. Ведяков, А.А. Бобцов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2012660462. — 21.11.2012. — 0,5625/0,1875 п.л.
115. Пыркин, А.А. Программа для управления роботом-бабочкой “Butterfly controller” [Текст] / А.А. Пыркин, М.О. Суров, А.А. Бобцов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2013613682. — 15.04.2013. — 0,5625/0,1875 п.л.
116. Программа для адаптивной компенсации мультисинусоидального возмущения для объектов с запаздывающим управлением [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Бобцов, С.А. Колюбин, А.А. Ведяков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2013614342. — 29.04.2013. — 0,5625/0,4375 п.л.
117. Идентификация мультигармонического возмущающего сигнала [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Маргун, А.А. Бобцов [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2013616872. — 31.05.2013. — 0,5625/0,1875 п.л.
118. Программа для управления роботизированным макетом надводного судна [Текст] / А.А. Пыркин, В.С. Громов, О.И. Борисов [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2014661674. — 11.11.2014. — 0,625/0,25 п.л.
119. Программа для управления робототехнической системой в условиях действия мультигармонических возмущений [Текст] / А.А. Пыркин, А.А. Ведяков, В.С. Громов [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2015615898. — 27.05.2015. — 0,75/0,25 п.л.