

На правах рукописи



КАБАНОВ Алексей Александрович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ
ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА**

Специальность: 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика (технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Севастополь – 2026

Работа выполнена на кафедре «Искусственный интеллект и автономные системы управления» в ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».

Научный консультант: **Дубовик Сергей Андреевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Официальные оппоненты: **Курина Галина Алексеевна,**
доктор физико-математических наук,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Пряничников Валентин Евгеньевич,
доктор технических наук,
Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Фархадов Маис Паша Оглы,
доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

Защита состоится 17 ноября 2026 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.224.01 ФИЦ ИУ РАН по адресу: 117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, 9 (конференц-зал, 1-й этаж).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИЦ ИУ РАН по адресу: г. Москва, ул. Вавилова, д. 40 и на официальном сайте ФИЦ ИУ РАН:
https://www.frccsc.ru/diss-council/00207304/diss/list/46-kabanov_aa

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119333, ул. Вавилова, д.44, корп.2, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.224.01.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.
Телефон для справок: +7(499) 135-51-64

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.224.01,
д.т.н., доцент

И.В. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена тем, что автономные подвижные объекты (АПО) – беспилотные летательные, наземные, надводные и подводные аппараты – становятся неотъемлемой частью многих аспектов человеческой деятельности. Они используются для задач логистики, мониторинга, поиска объектов, обслуживания инфраструктуры и пр. Их эффективность зависит от способности выполнять сложные пространственные движения в слабоструктурированных средах при воздействии возмущений, неполноте измерений и риске отказов. Различные аспекты управления АПО в условиях неопределённости исследованы в трудах В.Х. Пшихопова, М.Ю. Медведева, М.П. Фархадова, В.Ф. Филаретова, Т. Fossen, G. Antonelli и др.

В современной теории управления существуют устоявшиеся понятия робастности и адаптивности, характеризующие способность системы функционировать в условиях возмущений. Однако для АПО, выполняющих миссии в сложных условиях окружающей среды, применение только адаптивных или робастных методов является недостаточным. Критические события могут развиваться быстрее, чем адаптивный контур успеет настроить параметры. Возникает проблема обеспечения гарантированного выполнения миссии АПО в условиях возмущений, приводящих к редким, но критическим событиям. Для решения этой проблемы в диссертации используется свойство функциональной устойчивости, объединяющее робастность, адаптивность и способность к предотвращению опасных состояний через прогнозирование и реконфигурацию системы.

Концепция функциональной устойчивости сформировалась из критики традиционного подхода монолитного регулятора в теории автоматического управления. В 2006 г. E. Hollnagel предложил парадигму «Resilience Engineering», выделив четыре способности системы: реагирование, мониторинг, прогнозирование и обучение, а D. Woods затем ввел понятие адаптивной емкости как способности системы расширять свои функциональные возможности в ответ на новые или непредвиденные обстоятельства, отличая её от обычной устойчивости и подчеркивая важность активной адаптации к изменяющимся условиям. Параллельно в 2000-х гг. Ю.В. Бородакий, А.А. Тарасов формализовали функциональную устойчивость информационно-вычислительных систем, которая затем была расширена А.Н. Королевым на навигационно-информационные системы. В 2011 г. Ю.М. Монахов определил функциональную устойчивость информационных систем, предназначенных для автоматизации управления, как интегральное свойство, объединяющее надежность, живучесть и безопасность. Немного позже С.А. Дубовик перенёс акцент на управление динамическими системами через идею синтеза, где функциональная устойчивость системы, как способность гарантированного выполнения задачи, достигается за счет построения параметризованного семейства регуляторов и их реконфигурации в зависимости от текущего состояния и прогноза управляемого процесса.

Степень разработанности темы. Функциональная устойчивость объединяет классические свойства робастности и адаптивности со способностью к прогнозированию (служит основой для упреждающей реконфигурации системы) и обучению. Реализация этих аспектов требует выделения в системе трех функциональных уровней:

1. Исполнительный уровень (структурная декомпозиция и редукция моделей системы, нелинейный синтез оптимальных управлений, управление с прогнозирующей моделью, компенсация возмущений).

2. Информационный уровень (оценивание текущего состояния системы и действующих возмущений по зашумлённым и неполным измерениям).

3. Стратегический уровень (ситуационное прогнозирование с распознаванием сценариев развития управляемого процесса, оценка риска выхода в критические состояния и выбор режимов управления для упреждающей адаптации системы, а также обучение – уточнение сценариев на основе опыта).

Разработка структуры системы управления с выделением указанных уровней, структуры самих уровней и методов определения их параметров составляет задачу структурно-параметрического синтеза для обеспечения гарантированного выполнения миссии АПО.

Поскольку функциональная устойчивость предполагает предотвращение выхода системы в критические состояния, соответствующие нарушению функциональности АПО (например, превышение допустимых углов крена подводного аппарата, угла атаки летательного аппарата, столкновение с препятствиями и пр.) через прогнозирование, то для реализации исполнительного уровня рациональным представляется использовать концепцию управления с прогнозирующей моделью (англ. Model Predictive Control, MPC), которая эффективно применяется как для детерминированных, так и для стохастических систем. Существенный вклад в развитие теории и практики MPC внесли E. Camacho, B. Kouvaritakis, J. Rawlings, D. Mayne, M. Cannon и др. Здесь стоит выделить так называемое MPC на основе «трубок» (англ. tube-based MPC), где прогнозирующая модель разделяется на номинальную модель и модель отклонений, а «трубка» – это область пространства состояний вокруг номинальной траектории, внутри которой должна находиться реальная траектория системы. Соответственно, управление разделяется на номинальное и компенсирующее, чтобы гарантировать нахождение состояния системы внутри заданной трубки. Такое разделение определяет структуру исполнительного уровня и естественно согласуется с процедурой прогнозирования на стратегическом уровне.

Для номинального контура базовым обычно является синтез оптимального управления. А поскольку нелинейная динамика АПО делает неприменимыми классические линейные методы, то естественным аппаратом здесь может выступать представление динамики в форме пространства состояния с коэффициентами, зависящими от состояния (англ. state-dependent coefficients, SDC), позволяющее точно описать нелинейную систему и использовать мощный инструментарий линейной теории, что приводит к уравнениям Риккати с зависящими от состояния коэффициентами (англ. state-dependent Riccati equation, SDRE), применение которых развито в работах J.R. Cloutier, T. Çimen, M.H. Korayem, A. Heydari, S.R. Nekoо и др. Такой подход позволяет строить нелинейную обратную связь, аналогичную линейно-квадратичному регулятору с поточечной проверкой управляемости и наблюдаемости. Однако для задач на конечном интервале времени требуется решение дифференциального уравнения Риккати с зависящими от состояния коэффициентами (англ. state-dependent differential Riccati equation, SDDRE) в обратном времени при неизвестном векторе

состояния, что создаёт вычислительные трудности.

Информационный уровень (оценивание состояния и возмущений) также может использовать SDC-представление, методы оптимизации и сингулярных возмущений, редукции и преобразования моделей для построения наблюдателей, что обеспечивает единообразие подхода. Однако стандартная SDC техника синтеза наблюдателя состояния не рассматривает случай неизвестных начальных условий, что может часто иметь место в задачах оценивания состояния АПО. Этот пробел решается в диссертации на основе диффузной инициализации.

Наряду с этим, задачи оценивания неизмеряемых возмущений в нелинейных системах успешно решаются методами, основанными на скользящих режимах и каскадных наблюдателях, развитыми в трудах С.А. Красновой, В.А. Уткина и их коллег, а также логико-динамическим подходом А.Н. Жирабка, А.Е. Шумского и др. Эти подходы обеспечивают эффективное обнаружение и изоляцию дефектов, но требуют выполнения специальных условий согласования. Предлагаемый в диссертации метод синтеза наблюдателей возмущений, сводящий задачу оценивания к вспомогательной задаче оптимального слежения, не требует выполнения этих жёстких структурных условий и тем самым может расширить набор средств, доступных для построения наблюдателей в АПО.

Разнотемповость динамики АПО (медленное траекторное движение и быстрая угловая стабилизация) делает теорию сингулярных возмущений, вклад в развитие которой внесли отечественные исследователи А.Н. Тихонов, А.Б. Васильева, В.Ф. Бутузов, М.Г. Дмитриев, С.А. Дубовик, В.Г. Козырев, а также зарубежные ученые P.V. Kokotovic, D.S. Naidu, J. O'Reilly, R.E. O'Malley, Z. Gajic и др., эффективным инструментом для упрощения синтеза. Она позволяет разделить исходную систему на подсистемы для медленных и быстрых движений и строить регуляторы и наблюдатели отдельно для этих подсистем. Также для упрощения синтеза можно использовать преобразования нелинейных систем, в т.ч. в канонические формы. Для нелинейных аффинных по управлению систем в общем виде здесь широко используется метод нормальной формы. Существуют методы преобразования и для систем в SDC-представлении, которые по сравнению с методом нормальной формы позволяют работать без явно выделенного выхода и предлагают более простую процедуру обратного перехода от преобразованных координат к исходным. Однако существующие результаты получены для SDC-систем со скалярным управлением, их расширение на системы с векторным управлением, к которым относятся большинство АПО, а также на сингулярно возмущенные системы является актуальной задачей.

В компенсирующем канале tube-based MPC для подавления отклонений используются стохастические варианты MPC, опирающиеся на анализ моментов распределения. Это не позволяет явно анализировать траектории редких, но критических событий и может вести к недооценке вероятности больших отклонений траектории, возникающих даже при малых гауссовских возмущениях за счёт нелинейной динамики системы и конечного времени наблюдения. Не менее значимой проблемой MPC является определение горизонта прогнозирования, который представляет собой компромисс между точностью работы и численной сложностью реализации.

Эти проблемы указывают на необходимость развития методов MPC с

использованием математического аппарата, способного анализировать траектории редких, но опасных движений. Теория больших уклонений (ТБУ), разработанная А.Д. Вентцелем, М.И. Фрейдлиным, S.R.S. Varadhan, А.А. Пухальским и др., предоставляет строгий математический аппарат для анализа таких редких событий. Она позволяет оценить асимптотическую вероятность выхода траектории возмущенной системы на границу заданной области и определить наиболее вероятный путь к ней (А-профиль). На стыке МРС и ТБУ возникает конструктивная идея – использовать оценку времени первого выхода траектории больших уклонений на границу трубки вокруг номинальной траектории для выбора горизонта прогнозирования.

Параллельно с методом ТБУ как основу логики работы стратегического уровня целесообразно использовать сценарный подход для МРС, который бы определял соответствующий режим управления в зависимости от распознанного сценария. При этом для учета редких событий классический сценарный подход требуется дополнить формированием редких сценариев, которые вытекают из анализа больших уклонений и могут быть построены на базе А-профилей. Этот механизм можно использовать как основу ситуационного прогнозирования на стратегическом уровне. Однако существует фундаментальный разрыв между оффлайн анализом ТБУ, проводимым на этапе проектирования, и онлайн-МРС управлением с ситуационным прогнозированием в реальном времени.

Таким образом, научно-техническая проблема, решаемая в диссертации, заключается в том, что существующие методы синтеза систем управления не гарантируют выполнение миссий АПО с заданной вероятностью в условиях малых гауссовских возмущений, которые могут приводить к редким, но критическим уклонениям траектории. Классические стохастические методы, опирающиеся на моменты распределения, недооценивают вероятность таких больших уклонений, тогда как ТБУ позволяет получать асимптотически точные оценки вероятности этих редких событий.

Целью диссертационной работы является разработка теоретических основ, методов и алгоритмов для структурно-параметрического синтеза систем управления АПО, обеспечивающих гарантированное выполнение миссии с заданной вероятностью в условиях малых случайных возмущений и риска редких критических событий.

Объектом исследования являются АПО, динамика которых описывается стохастическими системами нелинейных дифференциальных уравнений, функционирующие в условиях действия малых случайных возмущений и риска наступления редких критических событий.

Предметом исследования являются теоретические основы, методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза систем управления АПО, обеспечивающие их функциональную устойчивость, т.е. способность гарантированного выполнения миссии при действии возмущений.

Задачи исследования:

1. Разработка теоретических основ структурно-параметрического синтеза систем управления АПО, обеспечивающих гарантированное выполнение миссии с заданной вероятностью, формализующих единый математический аппарат на базе SDC-представления нелинейных систем, на котором строятся методы и

алгоритмы для трёх функциональных уровней системы (исполнительный, информационный, стратегический), а также принципы их организации и взаимодействия.

2. Разработка методов преобразования нелинейных динамических систем в SDC-представлении в канонические формы для выделения явной структуры, обеспечивающей упрощенный синтез регуляторов и наблюдателей. Методы должны быть применимы к разнотемповым системам, включая сингулярно возмущённые системы, и обеспечивать возможность редукции систем для выделения отдельных компонентов возмущений.

3. Разработка методов решения задач оптимального управления на конечных интервалах времени для нелинейных систем в SDC-представлении: точного терминального и следящего управления выходом системы.

4. Разработка методов синтеза наблюдателей в SDC-представлении для оценивания состояния нелинейных систем при полной неопределённости в начальных условиях и для оценивания неизмеряемых возмущений, включая синтез наблюдателей для оценивания отдельных компонентов возмущений.

5. Разработка метода синтеза управления с прогнозирующей моделью с адаптивным выбором горизонта прогнозирования на основе оценки времени первого выхода траектории возмущенной системы на границу допустимой области через анализ больших уклонений.

6. Разработка метода ситуационного прогнозирования, основанного на распознавании типовых и редких сценариев развития управляемого процесса, полученных через анализ больших уклонений, с последующей оценкой риска выхода в критические состояния и выбором режимов управления для упреждающей адаптации.

Научная новизна полученных в работе результатов состоит в следующем:

1. Разработаны теоретические основы структурно-параметрического синтеза систем управления АПО, обеспечивающие гарантированное выполнение миссии с заданной вероятностью (функциональную устойчивость) в условиях малых случайных возмущений и риска редких критических событий через интеграцию контуров управления, оценивания и прогнозирования на базе единого формализма. Предложена и формализована структура системы, состоящая из трех функциональных уровней, определены информационные потоки и логические условия переключения режимов на основе оценок риска выхода системы на границу допустимой области.

2. Разработаны новые методы синтеза канонических преобразований нелинейных динамических систем в SDC-представлении, включая случай сингулярно возмущённых систем, позволяющие приводить такие системы к канонической форме с Фробениусовой структурой, обеспечивающей упрощенный синтез регуляторов и наблюдателей. Методы позволяют выполнять линеаризацию обратной связью, явно выделять динамику, чувствительную к отдельным компонентам возмущений.

3. Разработаны новые методы решения задач оптимального управления на конечных интервалах времени для нелинейных систем в SDC-представлении, включающие: метод синтеза точного терминального управления выходом на базе обратного интегрирования дифференциальных уравнений оптимального

управления, отличающийся использованием терминального закона регулирования при движении в обратном времени вместо классического стабилизирующего регулятора; метод синтеза оптимального следящего управления на базе одноэтапной процедуры прямого интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений оптимального управления, отличающийся однозначным заданием начальных условий.

4. Разработаны новые методы оценивания состояния и возмущений, включающие: метод оценивания состояния нелинейных систем на основе диффузного фильтра Калмана в SDC-представлении, позволяющий восстанавливать состояние системы при полной неопределённости в начальных условиях; метод оценивания неизмеряемых возмущений в динамических системах, основанный на решении вспомогательной задачи оптимального следящего управления для синтеза наблюдателя возмущений, который формируется так, чтобы минимизировать функционал невязки.

5. Разработан новый метод управления с прогнозирующей моделью, отличающийся адаптивным выбором горизонта прогнозирования на основе оценки времени первого выхода траектории возмущенной системы на границу допустимой области, полученной из анализа больших отклонений путем минимизации функционала действия Вентцеля-Фрейдлина. Предложенный метод преобразует процедуру классического MPC, обеспечивая обоснованный выбор горизонта прогнозирования.

6. Разработан новый метод ситуационного прогнозирования, основанный на распознавании сценариев развития управляемого процесса путем сопоставления оценок с эталонными траекториями из сценарной базы знаний, с последующей оценкой риска выхода в критические состояния и выбором режимов управления для упреждающей адаптации системы. Особенностью метода является учет не только типовых, но и редких сценариев для наиболее вероятных траекторий выхода системы в критические состояния, определяемых из анализа больших отклонений путем минимизации функционала действия Вентцеля-Фрейдлина.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке теоретических основ структурно-параметрического синтеза функционально устойчивых систем управления АПО, включающих структуру из трех функциональных уровней с формальным описанием информационных потоков и условий переключения режимов управления на основе оценок риска. В рамках этих основ предложено общее математическое обеспечение указанных трех уровней на базе SDC-представления нелинейных систем, что позволяет строить регуляторы, наблюдатели и прогнозирующие модели в едином формализме. Разработанный подход вносит вклад в теорию больших отклонений Вентцеля-Фрейдлина, устанавливая процедуру определения наиболее вероятных траекторий выхода в критические состояния для построения сценарной базы знаний и обоснованного выбора горизонта прогнозирования в системах управления с прогнозирующей моделью.

Разработанные методы имеют практическую ценность и могут быть использованы при проектировании и синтезе систем управления автономными беспилотными аппаратами, функционирующими в различных средах (надводных, подводных, наземных, воздушных), особенно в приложениях с жесткими

требованиями к безопасности и автономности функционирования.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, использованы в: ФГБУН «Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук» (г. Владивосток) при выполнении научно-исследовательских работ по созданию систем управления электроприводами робототехнических комплексов; АО «НПП ПТ «Океанос» (г. Санкт-Петербург) при разработке алгоритмов управления автономным необитаемым подводным аппаратом; ПАО «Дальприбор» (г. Владивосток) при решении задач обработки гидроакустической информации для отслеживания объектов; ООО «РОБОКОРП» (г. Севастополь) при построении информационно-управляющей системы автономного необитаемого подводного аппарата МХ-1; АНО «Институт морского приборостроения и робототехники» (г. Севастополь) при реализации совместного проекта с АО «НПО «Аврора» по разработке систем автономного необитаемого подводного аппарата «РИФ».

Полученные в диссертации результаты использовались также при выполнении научных исследований в Севастопольском государственном университете и ФИЦ ИУ РАН по проектам в рамках выполнения государственного задания по науке, грантов Российского научного фонда и других научных программ (более 10 научно-исследовательских проектов), в которых автор выступал в качестве руководителя и ответственного исполнителя.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в диссертации используется многоуровневый подход к синтезу систем управления, применяются методы нелинейной теории управления, SDC-представление нелинейных систем, методы оптимального управления, методы теории оценивания, теория сингулярных возмущений, методы анализа больших уклонений, методы управления с прогнозирующей моделью, методы сопоставления шаблонов, численные методы решения дифференциальных уравнений, метод Монте-Карло для статистического анализа.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. По тематике, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика», а именно: п. 1 «Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; п. 11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов».

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретические основы структурно-параметрического синтеза систем управления АПО, обеспечивающие их функциональную устойчивость через определение структуры системы в виде трех функциональных уровней с формализацией информационных потоков и логических условий переключения режимов на основе оценок риска.

2. Методы синтеза канонических преобразований нелинейных динамических систем в SDC-представлении, включая случай сингулярно возмущённых систем,

позволяющие приводить такие системы к канонической форме с Фробениусовой структурой, обеспечивающей упрощенный синтез регуляторов и наблюдателей.

3. Методы и алгоритмы решения нелинейных задач оптимального управления на конечных интервалах времени в SDC-представлении, включающие: метод синтеза точного терминального управления выходом на базе обратного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений оптимального управления с использованием терминального закона регулирования при движении в обратном времени; метод синтеза оптимального следящего управления выходом на базе одноэтапной процедуры прямого интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений для управления с однозначным заданием начальных условий на левом конце интервала времени.

4. Методы оценивания состояния и возмущений, включающие: метод оценивания состояния нелинейных систем при полной неопределённости в начальных условиях на основе диффузного фильтра Калмана в SDC-представлении; метод оценивания неизмеряемых возмущений в динамических системах, основанный на решении вспомогательной задачи оптимального следящего управления для синтеза наблюдателя возмущений, который формируется так, чтобы минимизировать функционал невязки.

5. Метод и алгоритм управления с прогнозирующей моделью, отличающийся адаптивным горизонтом прогнозирования на основе оценки времени первого выхода траектории возмущённой системы на границу допустимой области, полученной из анализа больших уклонений путем минимизации функционала действия Вентцеля-Фрейдлина.

6. Метод ситуационного прогнозирования, основанный на распознавании типовых и редких сценариев путем сопоставления оценок траектории возмущенной системы с эталонными траекториями из сценарной базы знаний, с последующей оценкой риска выхода в критические состояния и выбором режимов управления для упреждающей адаптации системы.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждается применением общепринятых численных методов, использованием математически корректных методов, четким выполнением математических выкладок и преобразований, строгим доказательством основных теоретических результатов, сравнением результатов со статистическими данными и истинными значениями.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах и конференциях: X Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'15 (Москва, 2015); International Symposium Automated Systems and Technologies AST2015 (Санкт-Петербург, 2015); Всероссийская конференция по проблемам управления в технических системах (Санкт-Петербург, 2015); International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Москва, 2016); Всероссийская НПК «Перспективные системы и задачи управления» (п.Домбай, 2016, 2017, 2022, 2023); Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ 2017, 2018, 2022); Всероссийская конференция «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2016) (Санкт-Петербург, 2016 г.); International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Сочи, 2017, 2022-2025); Second International Scientific Conference “Intelligent Information

Technologies for Industry” (ИТИ’17), 2017; International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017, 2018), Sevastopol; Международная научно-техн. конф. «Системы контроля окружающей среды (СКОС-2017)» (Севастополь, 2017, 2019); International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (Sochi, 2018, 2020-2025); 3rd International Conference on Control in Technical Systems; Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах (г. Москва, 2019); International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), Lisbon, Portugal, Jul. 2022; Международная научно-техническая конференция «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА» (г. Санкт-Петербург, 2023, 2024).

Кроме того, результаты диссертации были заслушаны на научных семинарах в АГТУ, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, на научно-техническом совете Международного академико-индустриального сетевого консорциума «Синергия», в составе которого на системной основе принимают участие ведущие специалисты в области мехатроники, автоматизации и управления из БГТУ Военмех имени Д.Ф. Устинова, ОмГТУ, МЭИ, ДВФУ, КарГТУ, НовГТУ, ВлГУ, СПбПУ, УрФУ.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 70 научных публикациях, из них 1 монография, 29 публикаций в изданиях из перечня ВАК и приравненных к ним (в т.ч. по категориям ВАК 13 – K1, 2 – K2, 1 – K3; по квартилям Scopus 2 – Q1, 8 – Q2, 2 – Q3, 1 – Q4), 24 статьи в сборниках трудов международных конференций, индексируемых базой Scopus, 16 – статьи в сборниках конференций всероссийского уровня и прочие публикации. Получен 1 патент на полезную модель и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. В работах без соавторов [9, 11, 44, 46] представлены разработанные методы оптимального управления для нелинейных систем на конечном интервале времени в SDC-представлении, в [16, 47] рассмотрен вопрос оптимальной SDC-параметризации матриц системы. В статьях [1, 2, 20, 29, 30, 34, 36, 37] рассмотрены задачи синтеза канонических преобразований подобия и линеаризации обратной связью на их основе. В [56, 57] эти задачи рассматриваются для сингулярно возмущенных систем. В публикациях с соавторами личный вклад соискателя характеризуется следующим образом: в монографии [70] автору принадлежат главы 4, 5 посвященные синтезу сингулярно возмущенных систем, материалы главы 6 в части алгоритма прогноза, а также решение практических примеров в главах 7, 8 по композиционному синтезу; идея построения верхнего уровня на основе ситуационного прогноза дана в [38, 35, 61, 64, 65], где рассмотрены примеры А-профилей для осциллятора, а в работах [3, 4, 35, 39, 40, 43, 50] соискателем предложен подход к анализу больших уклонений через решение задачи точного терминального управления в форме обратной связи, в т.ч. в SDC постановке; построение А-профилей и численное моделирование примеров в задачах контроля столкновения подводных аппаратов выполнено автором в [10, 13, 15, 65, 67]; решение задач контроля и прогнозирования качки судна представлено в [6, 31, 32, 60], где автором получены А-профили, а в [62, 63] соискателем предложена математическая модель, алгоритм работы имитатора качки судна для исследования алгоритмов контроля крена через анализ больших уклонений. В

работах [49, 55, 58] вклад автора сделан в алгоритмизацию композиционного синтеза управления и численное моделирование рассматриваемых примеров. В работах по оцениванию возмущений и дефектов автору принадлежит идея решения задачи оценивания через задачу оптимального слежения, в частности, формализация и решение задачи синтеза наблюдателя в линейной постановке [5, 27, 45, 53, 66], в нелинейной постановке [8, 28, 52]. Применение предложенного метода к задаче оценивания дефектов в электроприводах показано в [7, 12, 14], где автором выполнен синтез наблюдателя и численное моделирование, а в [51, 52, 68] автором предложена концепция астатических наблюдателей возмущений. В [41] автору принадлежит идея диффузного фильтра Калмана в SDC-представлении. В [17, 24-26] соискателем получены математические модели рассматриваемых подводных аппаратов, к которым применены разработанные SDC-методы управления и оценивания, предложенные автором. В работах [18, 21, 22] автором выполнен синтез контуров оптимальной стабилизации объекта, а в [23, 42, 49] SDC-методы управления применены автором для синтеза управления подводным манипулятором. В совместных публикациях по теме канонических преобразований и линеаризации обратной связью [19, 32, 59] автору принадлежит постановка задачи, синтез преобразований, решение численных примеров.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 304 страницах, содержит 18 таблиц и 56 иллюстраций. Библиография включает 263 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность выполненного исследования, сформулирована проблема, определены цель и научные задачи; перечислены основные результаты с оценкой их научной новизны, теоретического и практического значения; указаны методы исследования.

В первой главе рассматриваются теоретические основы структурно-параметрического синтеза функционально устойчивых систем управления, вводится структура системы, включающая три функциональных уровня (рис.1):

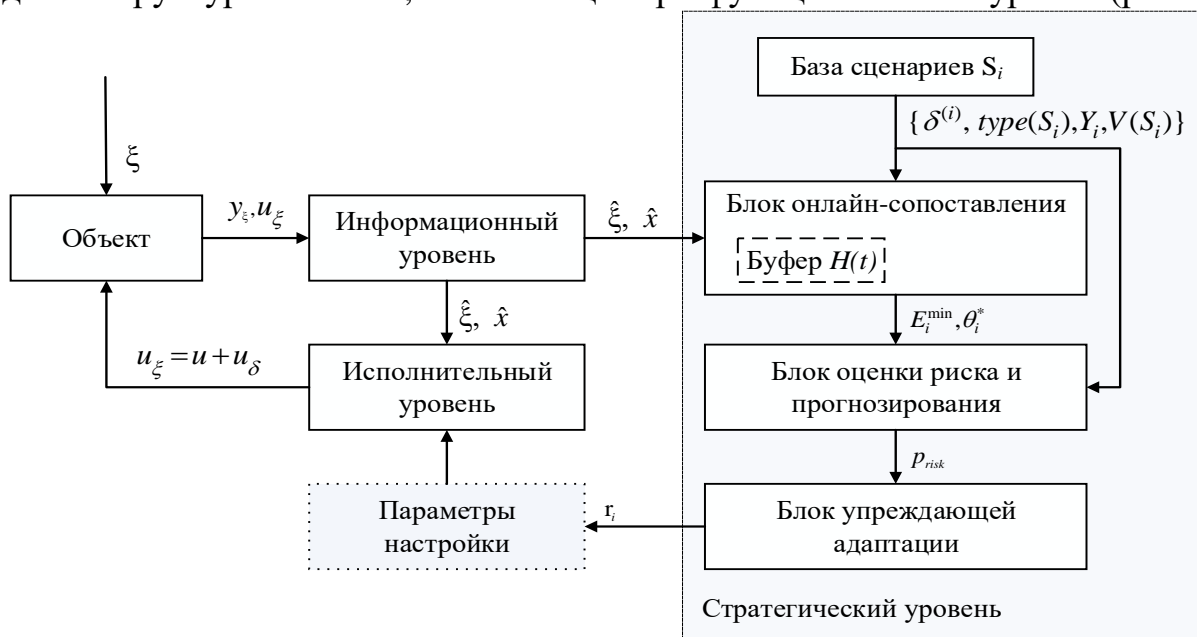


Рис.1. Структура функционально устойчивой системы управления.

1. Исполнительный уровень – обеспечивает непосредственную реализацию управляющих воздействий, обрабатывает режим, заданный на стратегическом уровне.

2. Информационный уровень – обеспечивает формирование оценок текущего состояния системы и возмущений.

3. Стратегический уровень – реализует принцип опережающего отражения, его задача – не просто реагировать на текущие ошибки, а предсказывать будущее поведение системы.

Таким образом, задача создания функционально устойчивой системы сводится к совместной разработке методов и алгоритмов для данных трех уровней.

Постановка задачи синтеза функционально устойчивой системы управления движением АПО. Рассматривается динамическая модель движения АПО в виде системы дифференциальных уравнений в SDC-представлении:

$$\begin{aligned}\dot{x}_\xi(t) &= A(x_\xi)x_\xi + B(x_\xi)u_\xi + G\xi(t), x_\xi(t_0) = x_0, \\ y_\xi(t) &= Cx_\xi + \eta(t),\end{aligned}\quad (1)$$

где $x_\xi \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния (индекс « ξ » указывает на учёт возмущений); $u_\xi \in \mathbb{R}^r$ – вектор управляющих воздействий; $y_\xi \in \mathbb{R}^m$ – вектор измеряемых выходов; $\xi(t) = (\xi_1 \dots \xi_{n_d})^T$ – вектор возмущений с матрицей распределения $G = (G_1 \dots G_{n_d})$, G_i – вектор размера $n \times 1$ распределения возмущений ξ_i ; ξ_i – скалярное возмущение (характеризует внешнее возмущение или внутренний дефект, неточность и т.п.); $\eta(t) \in \mathbb{R}^m$ – вектор шумов при измерениях (некоррелированный случайный процесс с нулевым средним и ковариационной матрицей $R_y(t) > 0$), матричные функции $A(x_\xi): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$, $B(x_\xi): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times r}$ предполагаются непрерывно дифференцируемыми и имеющими ограниченные на компактных подмножествах производные. Предполагается, что вектор ξ содержит аддитивный шум \dot{W} – вектор стандартных независимых белых шумов с единичной ковариационной матрицей и матрицей интенсивности $\varepsilon \Sigma_W$ ($\varepsilon > 0$ – малый параметр), определяющей распределение шума по компонентам x_ξ и корреляции.

Задача управления формализуется как задача выполнения целевых условий миссии, которые задаются для номинальной (невозмущенной) системы

$$\dot{x}(t) = A(x)x + B(x)u, x(t_0) = x_0, y(t) = C(x)x, \quad (2)$$

либо в терминальный момент времени t_f , либо на всем интервале:

$$y(t_f) = y_{target}(t_f) \text{ или } \|y(t) - y_{target}(t)\| \leq \varepsilon_y \quad \forall t \in [t_0, t_f], \varepsilon_y > 0. \quad (3)$$

Ограничения безопасности для реальной возмущенной системы с учётом стохастических возмущений формулируются как вероятностные:

$$P(x_\xi(t) \in X_{safe} \quad \forall t \in [t_0, t_f]) \geq 1 - \beta, \quad (4)$$

где $\beta \in (0,1)$ – заданный уровень допустимого риска, X_{safe} – множество допустимых состояний формализуется как трубка вокруг номинальной траектории выхода (здесь $K_{dev} > 0$ – радиус трубки):

$$X_{safe} = \{x_\xi(t) \in \mathbb{R}^n: \|C(x_\xi(t) - x(t))\| < K_{dev}\}. \quad (5)$$

Ограничение на управление является детерминированным:

$$u_\xi(t) \in \mathbb{U}_{feasible}, \mathbb{U}_{feasible} = \{u_\xi \in \mathbb{R}^r : \|u_\xi(t)\|_\infty \leq u_{max}\}. \quad (6)$$

Требуется построить функционально устойчивую систему управления для выполнения миссии (3) АПО, заданного моделью (1), при ограничениях (4) – (6).

На исполнительном уровне для решения применяется декомпозиция, основанная на подходе tube-based MPC: состояние разделяется на номинальную траекторию и отклонение $x_\xi(t) = x(t) + \delta(t)$, а вместо одного регулятора используется многоканальная схема управления $u_\xi(t) = u(t) + u_\delta(t)$.

Номинальное управление $u(t)$ находится как решение детерминированной задачи оптимального управления $P(t, x, t_f, r)$ с критерием качества

$$\min_u J(u, r) = \min_u \frac{1}{2} \left[S_f(t_f, y(t_f), r) + \int_{t_0}^{t_f} L(s, x(s), u(s), r) ds \right], \quad (7)$$

на движениях номинальной системы (2). Здесь и далее параметр r в задачах исполнительного уровня определяет режим работы, например, базовый режим при малом риске, осторожный – при среднем риске, антикризисный – при высоком риске. Каждому режиму r соответствует свой набор параметров.

Компенсирующее управление $u_\delta(t)$ строится через решение задачи MPC управления (задача $P_\delta(t, \delta, t + \tau, r)$)

$$\min_{u_\delta} J_\delta(u_\delta, r), \quad (8)$$

$$J_\delta(u_\delta, r) = \frac{1}{2} \left[S_{f\delta}(t_i + \tau, \delta(t_i + \tau), r) + \int_{t_i}^{t_i + \tau} L_\delta(s, \delta(s), u_\delta(s), r) ds \right]$$

при ограничении (4) на вероятность выхода отклонения за заданную границу, которое переопределим в терминах отклонения

$$P(\|C\delta(s)\| \geq K_{dev}) \geq 1 - \beta_\delta \quad \forall s \in [t_i, t_i + \tau], \quad (9)$$

где $\beta_\delta = \beta/N$ (N – число подынтервалов $[t_k, t_k + \tau]$ на $[t_0, t_f]$) и ограничении на управление, которое обеспечивает (6)

$$u_\delta(t_i + s) + u(t_i + s) \in \mathbb{U}_{feasible}, \quad \forall s \in [t_i, t_i + \tau], \quad (10)$$

$$\mathbb{U}_{feasible} = \{u_\delta \in \mathbb{R}^r : \|u_\delta(t_i + s) + u(t_i + s)\|_\infty \leq u_{max}\}$$

при $\delta(t_i) = 0$ и горизонте прогнозирования $\tau > 0$ для модели динамики $\delta(t)$ (далее будем называть ее моделью уклонений, а вектор $\delta(t)$ – уклонением)

$$\dot{\delta} = A_\delta(t)\delta + B_\delta(t)u_\delta + G_\delta\xi, \delta(0) = 0, y_\delta = C\delta, \quad (11)$$

где матрицы $A_\delta(t)$, $B_\delta(t)$, G_δ определяются при вычислении этой модели путем вычитания номинальной системы (2) из исходной (1).

Таким образом на исполнительном уровне приходим к подзадачам:

1. Задача $P(t, x, t_f, r)$ – оптимальное в смысле (7) управление на конечном интервале времени для номинальной системы в SDC-представлении (2) либо при заданных терминальных ограничениях на выход, либо при заданном для отслеживания выходом сигнале (3).

2. Задача $P_\delta(t, \delta, t + \tau, r)$ – стохастическое MPC управление уклонениями (11) на горизонте прогнозирования τ при ограничениях (9), (10).

На информационном уровне для нелинейной системы в SDC-представлении (1) требуется построить оценку состояния $\hat{x}_\xi(t)$ при неизвестных в начальных условиях и оценку неизмеряемых возмущений $\hat{\xi}(t)$. Заметим, что канал номинального управления может быть дополнен управлением с активной компенсации возмущений на основе оценки $\hat{\xi}(t)$ для того, чтобы снизить нагрузку с корректирующего MPC канала.

На стратегическом уровне реализуется система выбора режима управления r на основе ситуационного прогнозирования. Основное место здесь занимает сценарная база знаний, которая содержит информацию о поведении системы при различных возмущениях. База должна быть построена комбинированно, т.е. содержать сценарии для типовых возмущений, а также А-профили больших отклонений, синтезируемые через анализ больших отклонений. Каждый А-профиль показывает наиболее вероятную траекторию большого отклонения от номинального режима и оценку времени первого выхода τ^* из безопасной области. При этом оценка τ^* используется для определения горизонта прогнозирования t на исполнительном уровне в задаче $P_\delta(t, \delta, t + \tau, r)$.

На каждом временном шаге алгоритм распознавания сценариев сопоставляет наблюдаемую историю отклонений в окне наблюдения со сценариями из базы. Затем по выбранному сценарию вычисляется индекс риска, на основе которого стратегический уровень выбирает режим управления r (например, базовый, осторожный или антикризисный) и переконфигурирует параметры исполнительного уровня, например, вид и параметры критериев в задачах $P(t, x, t_f, r)$ и $P_\delta(t, \delta, t + \tau, r)$. Особенность такой структуры в том, что стратегический уровень не добавляет дополнительный независимый контур управления, а переконфигурирует параметры контуров исполнительного уровня.

Во второй главе рассматриваются методы синтеза канонических преобразований и линеаризации обратной связью для нелинейных систем в SDC-представлении. **В подразделе 2.1.1** для управляемой системы (2) решается задача построения невырожденного преобразования $z = T(x)x$, которое приводит ее к блочному каноническому виду $\dot{z}(t) = \tilde{A}(z)z + \tilde{B}(z)u$, где матрица $\tilde{A}(z)$ имеет блочную структуру с матрицами Фробениуса на диагонали, а матрица \tilde{B} допускает факторизацию $\tilde{B}(x) = \tilde{B}\hat{C}$, с невырожденной верхнетреугольной матрицей \hat{C} .

Преобразование $T(x)$ определяется через линейно независимые столбцы специальной матрицы, которая является невырожденной при условии полной равномерной управляемости системы для всех $x \in \mathbb{R}^n$. Существование и невырожденность преобразования $T(x)$ доказывается в теореме 2.1.

В подразделе 2.1.2 решается задача поиска невырожденного преобразования

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = T(x)x = \begin{pmatrix} T_1(x_1) & 0 \\ 0 & T_2(x_1, x_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

с помощью которого сингулярно возмущенную систему в SDC-представлении (здесь $x_1 \in \mathbb{R}^{n_1}$ и $x_2 \in \mathbb{R}^{n_2}$ – медленные и быстрые переменные состояния соответственно; $\varepsilon > 0$ – малый параметр)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= A_{11}(x)x_1 + A_{12}(x)x_2 + B_1(x)u \\ \varepsilon \dot{x}_2(t) &= A_{21}(x)x_1 + A_{22}(x)x_2 + B_2(x)u \end{aligned} \quad (13)$$

можно преобразовать к сингулярно возмущенному каноническому виду

$E(\varepsilon)\dot{z} = A_C(z)z + \varepsilon A_D(z)z + B_C(z)u$, где $A_C(z)$ есть матрица Фробениуса с последней функциональной строкой, $B_C = (0 \ e_{n_2}^T)^T$, $E(\varepsilon) = \text{diag}(I_1, \varepsilon I_2)$.

На основе преобразования (12) для системы (13) строится управление с линеаризующей обратной связью (ЛОС) по технологии композиционного синтеза. Выполнен анализ устойчивости сингулярно возмущенной системы (13), замкнутой ЛОС, найдены условия, при которых замкнутая сингулярно возмущенная система будет асимптотически устойчивой $\forall \varepsilon \in (0, \varepsilon^*)$, $\varepsilon^* > 0$. Соответствующий результат приведен в теореме 2.2.

В разделе 2.2 рассматривается задача построения канонического преобразования для нелинейной системы с двумя типами внешних возмущений:

$$\dot{x}(t) = A(x)x(t) + B(x)u(t) + G_1\xi_1(t) + G_2\xi_2(t), y(t) = h(x),$$

где возмущения $\xi_1(t) \in \mathbb{R}^q$ и $\xi_2(t) \in \mathbb{R}^p$ предполагаются ограниченными и неизвестными; $G_1 \in \mathbb{R}^{n \times q}$ и $G_2 \in \mathbb{R}^{n \times p}$ – постоянные матрицы; $y = h(x)$ – скалярная функция выхода; остальные обозначения соответствуют принятым ранее. Цель – построить редуцированную динамическую модель порядка $k < n$

$$\dot{\eta} = \tilde{A}(\eta)\eta + \tilde{B}(\eta)u + \tilde{G}\xi_1, \quad (14)$$

в которой вектор $\xi_2(t)$ полностью исключён из уравнений модели, вектор $\xi_1(t)$ сохранён в модели и входит линейным образом, а матрица динамики приведена к форме Фробениуса с последней функциональной строкой.

Преобразование строится через матрицу $Q \in \mathbb{R}^{n \times k}$, столбцы которой образуют ортонормированный базис подпространства $\mathcal{L}^\perp = \ker(G_2^T)$, ортогонального подпространству действия возмущения. Матрица Q удовлетворяет условиям $G_2^T Q = 0_{p \times k}$, $Q^T Q = I_k$, где $0_{p \times k}$ – нулевая матрица $p \times k$, I_k – единичная матрица $k \times k$. Новые переменные, инвариантные относительно ξ_2 : $\eta = Q^T x \in \mathbb{R}^k$. Если существует матрица P , такая что $Q^T A(x)P = 0_{k \times l} \forall x$, то вектор состояния можно выразить в виде $x = Q\eta + P\mu$, где $\mu(t) \in \mathbb{R}^l$ – дополнительные координаты, соответствующие направлениям, возбуждаемым возмущением ξ_2 . При выполнении этого условия уравнение для η принимает вид (14), где $\tilde{A}(\eta) = Q^T A(Q\eta)Q$, $\tilde{B}(\eta) = Q^T B(Q\eta)$, $\tilde{G} = Q^T G_1$. Условия получения редуцированной модели (14) сформулированы в теореме 2.3.

В последнем разделе главы 2 представлены примеры применения разработанных методов в задаче управления мобильным роботом и в задаче управления перевернутым маятником с двигателем постоянного тока.

В третьей главе рассматривается развитие SDC-методов и их применение к задачам нелинейного оптимального управления на конечном интервале времени (задачи $P(t, x, t_f, r)$). **В разделе 3.1** решается задача терминального управления выходом на конечном интервале для системы (2) в соответствии с критерием качества

$$J(u) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (x^T Q(x)x + u^T R(x)u) dt, Q(x) \geq 0, R(x) > 0$$

при условии приведения выхода системы (2) в заданную точку $y(t_f) = y_f$.

Используя преобразования $\lambda = K(x)x + S(x)v$, $y_f = W(x)x - M(x)v$, где v – вектор множителей Лагранжа, и необходимые условия оптимальности, получаются нелинейные дифференциальные уравнения оптимального

управления, которые приводятся к виду матричных уравнений специального вида:

$$\begin{aligned} -\dot{K} &= K(x)A(x) + A^T(x)K(x) - K(x)B(x)R^{-1}(x)B^T(x)K(x) + Q(x), \\ \dot{W} &= -W(x)(A(x) - B(x)R^{-1}(x)B^T(x)K(x)), \\ \dot{M} &= -W(x)B(x)R^{-1}(x)B^T(x)W^T(x), \\ K(t_f) &= 0, \quad W(t_f) = C, \quad M(t_f) = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

при выполнении дополнительных условий оптимальности

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left[\frac{\partial Q(x)}{\partial x} x \right]^T + \left(\left[\frac{\partial A(x)}{\partial x} x \right]^T + \left[\frac{\partial B(x)}{\partial x} u \right]^T + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial R(x)}{\partial x} u \right]^T R^{-1}(x)B^T(x) \right) K(x) = 0, \\ \left(\left[\frac{\partial A(x)}{\partial x} x \right]^T + \left[\frac{\partial B(x)}{\partial x} u \right]^T + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial R(x)}{\partial x} u \right]^T R^{-1}(x)B^T(x) \right) S(x) = 0. \end{aligned}$$

Оптимальное управление в форме обратной связи определяется как

$$u = -R^{-1}(x)B^T(x)(K(x)x(t) - W^T(x)M^{-1}(x)(W(x)x(t) - y_f)). \quad (16)$$

Таким образом, решение задачи терминального приведения выхода сводится к решению дифференциальных уравнений (15) при начальных условиях на правом конце. Для их численного решения рассмотрены два классических метода – итерационный и одноэтапный с «замораживанием», а также предложен модифицированный метод обратного интегрирования с терминальным законом управления при движении в обратном направлении для получения информации о переменных состояния. Т.е. при движении в обратном времени $\tau \in [0, t_f - t_0]$ от $x_p(0) = x_f$ к $x_p(t_f - t_0) = x_0$ дополнительно решается задача

$$\begin{aligned} \min_{u_p} J_p(u_p) &= \frac{1}{2} \int_0^{t_f - t_0} (x_p^T Q(x_p)x_p + u_p^T R(x_p)u_p) d\tau, \quad Q(x_p) \geq 0, \quad R(x_p) > 0, \\ \dot{x}_p(\tau) &= -A(x_p)x_p(\tau) - B(x_p)u_p(\tau). \end{aligned}$$

Преимущество терминального закона управления при движении в обратном времени по сравнению со стандартным SDRE в том, что траектория состояния носит терминальный характер и соответствует природе движения системы.

В разделе 3.2 решается задача оптимального следящего управления выходом нелинейной системы (2) в соответствии с критерием

$$J(u) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} ((y - r)^T Q(x)(y - r) + u^T R(x)u) dt, \quad y = Cx.$$

Введя преобразование Риккати $x = M(x)\lambda + g(x)$, для оптимального управления получаем $u = -R^{-1}(x)B^T(x)M^{-1}(x)(x - g(x))$, где для матрицы $M(x)$ справедливо алгебраическое уравнение Риккати

$$MA^T(x) + A(x)M - B(x)R^{-1}(x)B^T(x) + MC^T Q(x)CM = 0 \quad (17)$$

и для вектора прямой связи $g(x)$ дифференциальное уравнение

$$\dot{g}(x) = (A + MC^T Q(x)C)g(x) - MC^T Q(x)r, \quad g(t_0) = x_0, \quad (18)$$

при выполнении дополнительных условий оптимальности

$$\begin{aligned} \dot{M} - M \left\{ \left[\frac{\partial A}{\partial x} x \right]^T - \left[\frac{\partial B}{\partial x} u \right]^T - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} (Cx - r) \right)^T CM \right. \\ \left. - \frac{1}{2} u^T \frac{\partial R}{\partial x} u + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} (Cx - r) \right)^T Cg + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} (Cx - r) \right)^T r \right\} = 0. \end{aligned}$$

Интегрирование уравнения (18) выполняется в прямом времени от известных начальных условий в момент t_0 в отличие от классических методов, требующих обратного интегрирования и подбора начальных условий на правом конце.

Далее рассматриваются дополнительные аспекты задач управления в SDC-постановке. В частности, в подразделе 3.3 рассматривается подход к решению рассмотренных выше задач в случае, когда матрица $B(x, u)$ нелинейно зависит от управления. В разделе 3.4 рассмотрены подходы к выбору оптимальной SDC-параметризации матриц нелинейной системы на основе различных критериев, связанных с обусловленностью матриц и оптимальностью управления.

В оставшейся части главы 3 рассмотрены примеры применения разработанных методов для модели осциллятора Ван дер Поля с нелинейностями в управлении и их сравнение с существующими методами по метрикам среднеквадратичной ошибки и терминальной ошибки. Показано, что решение на базе предложенного алгоритма с терминальным вычислением вектора состояния при обратном интегрировании дает терминальную точность выше в 1.6 раза по сравнению с классическим решением. Также проводился анализ эффективности алгоритма оптимальной параметризации. Показано, что выбор оптимальной параметризации позволяет повысить терминальную точность в 2 раза, а также повысить точность в задачах слежения, снижая среднеквадратичную ошибку.

В четвёртой главе разрабатываются методы оценивания состояния и возмущений в динамических системах типа (1). **В разделе 4.1** решается задача оценивания состояния нелинейной системы при неопределённости в начальных условиях. Рассматривается система (1), в которой $\xi(t) \in \mathbb{R}^n$ – шум в динамике объекта и $\eta(t) \in \mathbb{R}^m$ – шум при измерениях (некоррелированные случайные процессы с нулевым средним и ковариационными матрицами $Q_\xi(t) \geq 0$ и $R_\eta(t) > 0$ соответственно). Случайный вектор $x_\xi(t)$ не коррелирует с $\xi(t)$ и $\eta(t)$ для $t \in [t_0, t_f]$. Априорная информация о векторе состояния $x_\xi(t_0)$ отсутствует, и его элементы рассматриваются как случайные величины с нулевым средним, а ковариационная матрица пропорциональна малому параметру $\lambda_f > 0$.

Для такой системы уравнение нелинейного наблюдателя имеет вид

$$\dot{\hat{x}} = A(\hat{x})\hat{x} + B_u(\hat{x})u + G_e(\hat{x}, t)(y - C\hat{x}), \quad G_e(\hat{x}, t) = P_e(\hat{x}, t)C^T R_v^{-1}, \quad (19)$$

и матрица $P_e(\hat{x})$ – решение SDDRE

$$\dot{P}_e(\hat{x}) = A(\hat{x})P_e + P_e A^T(\hat{x}) - P_e C^T R_\eta^{-1} C P_e + G Q_\xi G^T,$$

которое решается в прямом времени при заданных начальных условиях $P_e(\hat{x}, t_0)$.

При отсутствии априорной информации о начальных условиях вектора состояния матрица ковариации определяется выражением $P_e(\hat{x}, t_0) = \lambda_f^{-1} P_{e0}$, где $P_{e0} > 0$, $\lambda_f > 0$ – определяет величину неопределённости в начальных условиях, (чем меньше λ_f , тем больше начальная неопределённость). Задача состоит в том, чтобы спроектировать диффузный фильтр Калмана в SDC-представлении (19) при

$\lambda_f \rightarrow 0$. Эта задача двойственна задаче точного терминального приведения системы в заданное значение с заданной точностью на конечном интервале времени. Приведем решение: $P_e(\hat{x}) = K_e(\hat{x}) + W_e(\hat{x})(M_e(\hat{x}) + \lambda_f P_{e0}^{-1})^{-1} W_e^T(\hat{x})$, где матрицы $K_e(t)$, $W_e(t)$ и $M_e(t)$ удовлетворяют уравнениям

$$\begin{aligned} \dot{K}_e &= A(\hat{x})K_e(\hat{x}) + K_e(\hat{x})A^T(\hat{x}) - K_e(\hat{x})C^T R_\eta^{-1} C K_e(\hat{x}) + G Q_\xi G^T, K_e(\hat{x}, t_0) = 0, \\ \dot{W}_e &= (A(\hat{x}) - K_e(\hat{x})C^T R_\eta^{-1} C)W_e, W_e(\hat{x}, t_0) = I, \\ \dot{M}_e &= -W_e^T(\hat{x})C^T R_v^{-1} C W_e(\hat{x}), M_e(\hat{x}, t_0) = 0. \end{aligned}$$

При $\lambda_f \rightarrow 0$ для матрицы усиления фильтра (19) имеем $\bar{\Gamma}_e(\hat{x}) = \lim_{\lambda_f \rightarrow 0} \Gamma_e(\hat{x}) = \bar{P}_e(\hat{x})C_e^T R_\eta^{-1}$, где $\bar{P}_e(t) = K_e(\hat{x}) + W_e(\hat{x})M_e^{-1}(\hat{x})W_e^T(\hat{x})$. Если пара $(A_e(\hat{x}), C_e)$ равномерно полностью наблюдаема на $[t_0, t_f]$ вдоль траектории оценки $\hat{x}(t)$, матрица $G Q_\xi G^T > 0$, то матрица усиления $\bar{\Gamma}_e(t)$ ограничена на любом интервале $[t_1, t_f]$ с $t_1 > t_0$, и $\|\bar{\Gamma}_e(t)\| \rightarrow \infty$ при $t \rightarrow t_0$, что доказывается в теореме 4.1. Также вводятся ряд условий, связанных с липшицевостью матриц системы, на основе которых в теореме 4.2 доказывается сходимость ошибки оценивания.

В разделе 4.2 решается задача оценивания возмущений для системы в виде (1) с измеряемым выходом $y_\xi = C x_\xi$. На основе известных измерений $y_\xi(t)$ требуется построить оценку $\xi_*(t, t_f)$ неизвестного возмущения $\xi(t)$ такую, что $\lim_{t_f \rightarrow \infty} \xi_*(t, t_f) = \xi(t)$. Ключевая идея решения заключается в переходе к вспомогательной задаче оптимального управления для системы-наблюдателя

$$\dot{z} = A(z)z + B(z)u + G(z)v, z(t_0) = x_0, y_z = C(z)z, \quad (20)$$

где вспомогательное управление $v(t)$ играет роль неизвестного возмущения $\xi(t)$. Управление выбирается для минимизации функционала невязки

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (e_y^T Q e_y + v^T R v) dt \rightarrow \min_v, \quad (21)$$

где $e_y(t) = y_z(t) - y_\xi(t) \in \mathbb{R}^k$ – вектор невязки, $Q \in \mathbb{R}^{k \times k}$ – положительно-полуопределённая матрица; $R \in \mathbb{R}^{n_d \times n_d}$ – положительно определенная матрица.

Оценивание возмущений идет путём синтеза оптимального следящего управления $v(t)$ для системы-наблюдателя (20) по слежению за выходом $y_\xi(t)$ исходной возмущенной системы (1) в соответствии с критерием (21), т.е. нужно построить оптимальное управление $v(t)$ и порождаемую им траекторию системы (20) такие, что $\|y_z(t) - y_\xi(t)\| \rightarrow 0$, $\|v(t) - d(t)\| \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

В рассмотрение вводятся ошибка наблюдения $e(t) = z(t) - x_\xi(t)$, ошибка оценивания возмущения $e_\xi = v - \xi$ и выводится модель динамики ошибки

$$\dot{e} = A(x_\xi)e + G(x_\xi)e_\xi + \Psi(z, x_\xi, u, v), e_y = Ce,$$

где $\Psi(z, x_\xi, u, v) = (A(z) - A(x_\xi))z + (B(z) - B(x_\xi))u + (G(z) - G(x_\xi))v$.

Затем для модели динамики ошибки вводится ряд условий, связанных с липшицевостью матриц системы, а также поточечной управляемостью и наблюдаемостью, что позволяет доказать в теореме 4.3, что невязка выхода $e_y(t)$ сходится к нулю при $t \rightarrow \infty$, а ошибка наблюдения $e(t)$ остаётся ограниченной. Тогда, вводя условие поточечной сильной обнаруживаемости системы ошибки, с

учетом ряда условий в теореме 4.4 доказывается, что $v(t) \rightarrow \xi(t)$ при $t \rightarrow \infty$.

Само решение задачи оптимального слежения (20), (21) представлено в разделе 3.2. Результирующее выражение для нелинейного наблюдателя возмущений имеет вид $\dot{z} = A(z)z + B(z)u - G(z)R^{-1}G^T(z)\bar{M}^{-1}(z)(z - \bar{g}(z))$, а оценка возмущения определяется формулой $v = -R^{-1}G^T(z)M^{-1}(z)(z - g(z))$, где $M(z)$ является решением SDRE (17), а $g(z)$ является решением (18).

Также в данном разделе решаются задачи синтеза наблюдателей для систем с разными видами возмущений: $\dot{x}_\xi = A(x_\xi)x_\xi + B(x_\xi)u + G_1\xi_1 + G_2\xi_2$, где $G_1 \in \mathbb{R}^{n \times q}$ – известная постоянная матрица входа возмущения ξ_1 ; $G_2 \in \mathbb{R}^{n \times s}$ – известная постоянная матрица входа возмущения ξ_2 ; $\xi_1 \in \mathbb{R}^q$ – неизвестный входной сигнал возмущения, подлежит оценке; $\xi_2 \in \mathbb{R}^s$ – неизвестный входной сигнал, описывающий действующее на систему возмущение, которое требуется исключить из редуцированной модели. За счет преобразований из главы 2, можно получить редуцированную модель, которая будет нечувствительна к возмущению ξ_2 и при этом будет реагировать на возмущение ξ_1 , для которой решается задача оценивания возмущения описанным выше методом.

В конце главы 4 представлены примеры применения разработанных методов для различных моделей приводов с двигателями постоянного тока. В частности, проводились реальные эксперименты на стенде (см. рис.2) – проверялся пример с оцениванием суммарного внешнего момента, действующего на выходном валу привода с учетом наличия шума в канале измерения силы тока. Результат работы наблюдателя при оценке нагрузки показан на рис.3. Проверка на стенде показала хорошее качество оценивания возмущения.

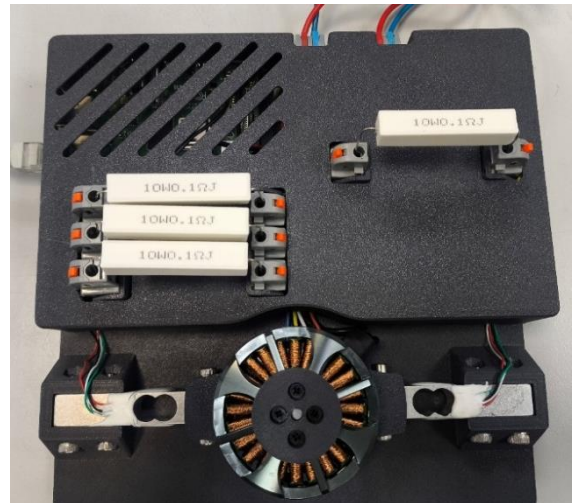


Рис.2. Внешний вид стенда

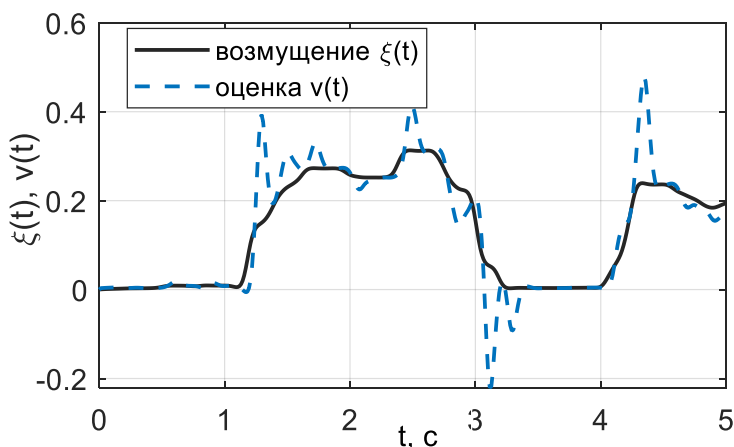


Рис.3. Результат эксперимента

Раздел 5.1 посвящен интеграции ТБУ и прогнозирующего управления. Здесь рассматривается постановка задачи из главы 1, в которой для упрощения выводов в качестве возмущений рассматривается только аддитивный шум, т.е.:

Пятая глава посвящена разработке стратегического уровня системы управления. В частности, рассматриваются сценарный подход и метод анализа больших отклонений на основе решения задачи точного терминального управления, их применение для построения сценариев развития управляемого процесса для больших отклонений, для выбора горизонта прогнозирования в MPC управлении.

$$\dot{x}_\xi = A(x_\xi)x_\xi + B(x_\xi)u_\xi + \varepsilon G\dot{W}(t), x_\xi(0) = x_0, \quad (22)$$

где $\varepsilon > 0$ – малый параметр, $\dot{W}(t) \in \mathbb{R}^k$ – вектор стандартных независимых белых шумов с матрицей интенсивности $G \in \mathbb{R}^{n \times k}$; остальные параметры соответствуют принятым ранее обозначениям.

Для модели уклонений системы (22)

$$\dot{\delta} = A_\delta(t)\delta + B_\delta(t)u_\delta + \varepsilon G_\delta \dot{W}(t), \delta(0) = 0, y_\delta = C\delta, \quad (23)$$

где $G_\delta = \varepsilon G$, рассматриваем задачу $P_\delta(t, \delta, t + \tau, r)$ MPC управления (8) с ограничениями (9), (10). Для определения горизонта прогнозирования τ используется ТБУ, которая позволяет оценить вероятность события (9) для системы уклонений (23) через функционал действия:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^2 \ln P \left(\sup_{t \in [0, t_f]} \|C(x_\xi(t) - x(t))\| \geq K_{dev} \right) = - \inf_{w \in S^u} I(w),$$

где $S^u = \{w \in C_{x_0}[0, t_f] : \sup_{t \in [0, t_f]} \|C(w(t) - x(t))\| \geq K_{dev}, w(0) = x_0\}$ – множество

траекторий $w(t)$, отклоняющихся от номинальной $x(t)$ не менее чем на K_{dev} в супремум-норме; $C_{x_0}[0, t_f]$ – пространство непрерывных функций, начинающихся в x_0 ; $I(w)$ – функционал действия (ФД) Вентцеля-Фрейдлина, определяемый как

$$I(w) = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \|\dot{w}(t) - A_\delta(t)w(t) - B_\delta(t)u_\delta\|_{(G_\delta G_\delta^T)^{-1}}^2 dt,$$

при условии, что интеграл конечен (для сингулярных путей $I(w) = \infty$).

Момент τ^* , где «стоимость» уклонения минимальна, можно определить через решение оптимизационной задачи

$$\tau^* = \arg \min_{\tau} \left(\min_{w \in S_u^\tau} I(w) \right), \quad (24)$$

где $S_u^\tau = \{w : w(t_0) = x_0, \|C(w(\tau) - x(\tau))\| = K_{dev}\}$.

Внутренняя задача минимизации ФД в (24) формулируется как задача точного терминального управления для системы путей $\dot{\delta} = A_\delta(t)\delta(t) + G_\delta v(t)$ в соответствии с критерием $I(\delta) = \frac{1}{2} \int_0^\tau v^T v dt$ и граничными условиями $\delta(0) = 0$, $\|C\delta(\tau)\| = K_{dev}$. Решение этой задачи в форме обратной связи можно записать на основе материалов главы 3:

$$v = -G_\delta^T(t)W_\delta^T(t)C^T M_\delta^{-1}(t)C(W_\delta(t)\delta(t) - \delta(\tau)), \quad (25)$$

где $W_\delta(t) = \Phi_\delta^T(\tau, t)$, $M_\delta(t) = C(W_\delta(t)LW_\delta^T(t) - L)C^T$, где $\Phi_\delta(\tau, t)$ – фундаментальная матрица системы $\dot{\delta} = A_\delta(t)\delta$; матрица L является решением алгебраического уравнения Ляпунова $A_\delta(t)L + LA_\delta^T(t) - G_\delta(t)G_\delta^T(t) = 0$.

С учетом (25) и граничных условий $\delta(0) = 0$, $\|C\delta(\tau)\| = K_{dev}$ имеем $I_{0\tau}(\delta) = \delta^T(\tau)C^T M_\delta^{-1}(0)C\delta(\tau)$, где $M_\delta(0) = C(\Phi_\delta(\tau, 0)L\Phi_\delta^T(\tau, 0) - L)C^T$.

В классической постановке задачи выхода требуется решать вариационную задачу. Здесь же, используя обратную связь, задача сведена к матричным уравнениям, что даёт аналитическое выражение для минимального действия и позволяет определить траекторию $w(t)$ с наименьшей «энергией» достижения

границы $\|C(w(\tau) - x(\tau))\| = K_{dev}$ к моменту τ . Таким образом решение задачи (24) принимает вид $\tau^* = \arg \min_{\tau} \left(\min_{\|C\delta(\tau)\|=K_{dev}} \frac{1}{2} \delta^T(\tau) C^T M_{\delta}^{-1}(0) C \delta(\tau) \right)$.

При фиксированном τ и $\|C\delta(\tau)\| = K_{dev}$ минимум достигается, когда $\delta(\tau)$ направлен вдоль собственного вектора, соответствующего минимальному собственному числу $\lambda_{\min}(M_{\delta}^{-1}(0)) = \lambda_{\max}(M_{\delta}(0))^{-1}$. Тогда задача (24) сводится к

$$\tau^* = \arg \min_{\tau} \frac{1}{\lambda_{\max}(M_{\delta}(0))} = \arg \max_{\tau} \lambda_{\max}(M_{\delta}(0)) \quad (26)$$

Критическое время τ^* , соответствующее максимальной вероятности выхода (или минимальному действию), определяется через (26). Это время используется для задания горизонта прогнозирования в MPC регуляторе $\tau = \alpha \cdot \tau^*$, $\alpha \in (0,1)$, где α – коэффициент безопасности. В безопасных областях (большое τ^*) горизонт расширяется, позволяя системе видеть дальние угрозы. При приближении к границе опасности (малый τ^*) горизонт сужается, экономя вычислительные ресурсы. При таком подходе ФД становится инструментом онлайн анализа и управления. Применяя (25) к системе путей можно рассчитать А-профиль для сценарной базы, оценить вероятность наступления события $\|C\delta(\tau)\| = K_{dev}$, оценить время первого выхода уклонения на границу K_{dev} .

На основе оценки τ^* в разделе 5.2 приводится алгоритм tube-based MPC управления с адаптивным выбором горизонта прогнозирования $\tau = \alpha \cdot \tau^*$.

Сценарный подход к ситуационному прогнозированию приведен в разделе 5.3. Структура подсистемы ситуационного прогнозирования включает четыре модуля: базу сценариев, блок онлайн-сопоставления, блок оценки риска и прогнозирования, блок упреждающей адаптации.

База сценариев $\mathcal{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ является структурированным знанием о возможных сценариях, каждый из которых S_i содержит: временной профиль уклонения $\delta^{(i)}(t)$ длительностью $T_s^{(i)}$; тип сценария (типовой или критический); для критических – А-профиль с минимальным ФД $I_{\min}^{(i)}$, критическим временем $\tau^{*(i)}$; а также индикатор опасности $V(S_i)$. Для типовых сценариев $V(S_i) = 0$, для критических – $V(S_i) = 1$. Типовые сценарии формируются статистически или экспертным путём, критические – через определение А-профилей на основе минимизации ФД.

Блок онлайн-сопоставления решает задачу идентификации текущего сценария. На вход поступает оценка уклонения $\hat{\delta}(t)$. Формируется скользящее окно фиксированной длины L_t : $H(t) = \{\hat{\delta}(s) \mid s \in [t - L_t, t]\}$. Для каждого сценария S_i ищется оптимальный временной сдвиг θ , при котором фрагмент профиля $\delta^{(i)}(\theta + s)$ наилучшим образом соответствует наблюдениям. Критерий – минимизация функционала ошибки с масштабированием амплитуды: $E_i(t, \theta) = \int_0^{L_t} \|\hat{\delta}(t - L_t + s) - \gamma_i(t, \theta) \delta^{(i)}(\theta + s)\|^2 ds$, где $\gamma_i(t, \theta)$ – коэффициент масштабирования. Оптимальный сдвиг $\theta_i^*(t)$ и минимальная ошибка $E_i^{\min}(t)$ определяются решением задачи $\theta_i^*(t) = \arg \min_{\theta \in [0, T_s^{(i)} - L_t]} E_i(t, \theta)$. Затем ошибки преобразуются в нормированные веса (апостериорные вероятности) с помощью

softmax-функции: $w_i(t) = \frac{\exp(-\gamma E_i^{\min}(t))}{\sum_{j=1}^N \exp(-\gamma E_j^{\min}(t))}, i = 1, \dots, N.$ Параметр чувствительности $\gamma > 0$, веса $w_i(t) \geq 0$.

Блок оценки риска и прогнозирования вычисляет скалярный интегральный индекс риска $p_{\text{risk}}(t) = \sum_{i=1}^N w_i(t) V(S_i)$. Параллельно для наиболее вероятных сценариев строится прогноз уклонения на упреждающем горизонте T_p . Если в момент t идентифицирован сценарий S_i со сдвигом $\theta_i^*(t)$, то текущему времени соответствует сценарное время $s_i(t) = \theta_i^*(t) + L_t$.

Блок адаптации завершает цикл ситуационного прогнозирования, преобразуя информацию в корректирующие параметры исполнительного уровня. На основе $p_{\text{risk}}(t)$ и идентифицированного сценария система переключается между предопределёнными режимами, например, базовый ($p_{\text{risk}} < \beta_1$), осторожный ($\beta_1 \leq p_{\text{risk}} < \beta_2$), антикризисный ($p_{\text{risk}} \geq \beta_2$). Каждому режиму соответствуют корректировки параметров исполнительного уровня.

Таким образом, сценарный подход дополняет классические методы обратной связи и прогнозирующего управления, реализуя цикл «наблюдение – прогноз – адаптация» на уровне ситуационного прогнозирования. Это позволяет системе не только оптимально реагировать на текущие уклонения, но и осуществлять упреждающую адаптацию к потенциально опасным ситуациям.



Рис.4. Внешний вид стенда «Имитатор качки»

В разделе 5.4 показаны примеры расчета А-профилей в задаче контроля качки судна. Были получены численные результаты построения А-профиля для угла крена судна в условиях возмущения от волнения и ветра. Для проверки алгоритмов вычисления вероятностных оценок критических состояний крена использовался стенд (рис.4), имитирующий различные режимы качки. Были проведены расчеты вероятности критической ситуации в реальном времени на основе измерений параметров

крена, полученных от имитатора качки. Результаты показали, что качество оценок является хорошим и может быть использовано для систем контроля мореходности.

В шестой главе основные результаты, полученные в настоящей работе, применяются для построения функционально устойчивой системы управления траекторным движением автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). В качестве конкретной модели АНПА взят аппарат ММТ-300 (рис.5).

Для численного моделирования и синтеза законов управления используется модель АНПА в виде нелинейной системы в SDC-представлении:

$$\dot{\mathbf{x}}_{\xi} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_{\xi})\mathbf{x}_{\xi} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{\xi} + \mathbf{d}(\mathbf{x}_{\xi}) + \mathbf{G}(\boldsymbol{\tau}_{\text{wave}} + \boldsymbol{\tau}_{\text{current}}) + \mathbf{G}_{\delta}\dot{\mathbf{W}}(t),$$

где $\mathbf{x}_{\xi} = [\boldsymbol{\eta}^T, \mathbf{v}^T]^T \in \mathbb{R}^{12}$, $\boldsymbol{\eta} = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ – вектор положения центра масс и углов ориентации (крен, дифферент, рыскание) в инерциальной системе, а $\mathbf{v} = [u, v, w, p, q, r]^T$ – вектор линейных и угловых скоростей в связанной системе;

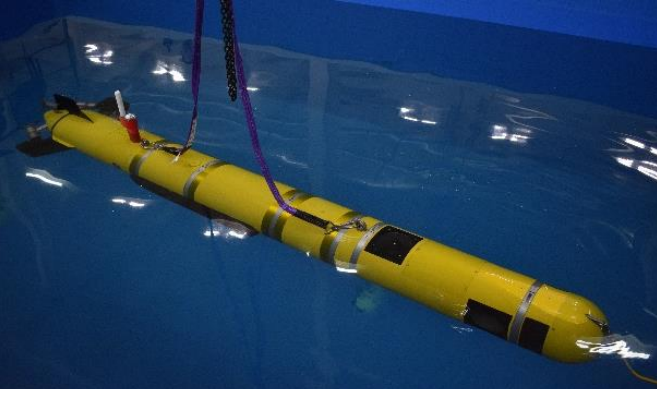


Рис. 5. Внешний вид АНПА ММТ-300

$\dot{\mathbf{W}} \in \mathbb{R}^6$ – белый шум с нулевым средним и матрицей интенсивности $\varepsilon \Sigma_v$, $\varepsilon > 0$ – неизвестный малый параметр; $\boldsymbol{\tau}_{\text{current}} \in \mathbb{R}^6$ – воздействие морского течения, $\boldsymbol{\tau}_{\text{wave}} \in \mathbb{R}^6$ – волновые нагрузки. Матрицы системы рассчитываются в соответствии с известными методиками. Начальное состояние \mathbf{x}_0 может быть частично известно.

На интервале времени $[0, T_f]$

задана желаемая траектория $\boldsymbol{\eta}_d(t)$ (положение и ориентация АНПА), которую необходимо отслеживать в соответствии с квадратичным критерием качества $J = \frac{1}{2} \int_0^{T_f} ((\mathbf{y} - \boldsymbol{\eta}_d)^T \mathbf{Q}_{\text{pos}} (\mathbf{y} - \boldsymbol{\eta}_d) + \mathbf{u}^T \mathbf{R}_u \mathbf{u}) dt$, где $\mathbf{y} = \mathbf{C}_{\text{pos}} \mathbf{x}$ – выход системы (положение и ориентация); $\boldsymbol{\eta}_d$ – желаемая траектория; $\mathbf{C}_{\text{pos}} = [\mathbf{I}_{6 \times 6}, \mathbf{0}_{6 \times 6}]$ – матрица выхода по положению аппарата; $\mathbf{Q}_{\text{pos}} \geq \mathbf{0}, \mathbf{R}_u > \mathbf{0}$ – весовые матрицы соответствующих размеров (выбираются при синтезе номинального регулятора).

Требуется построить функционально устойчивую систему управления $\mathbf{u}_\xi(t)$, который обеспечивает выполнение следующих условий:

1. Вероятностное ограничение: $P \left\{ \sup_{t \in [0, T_f]} \|\mathbf{C}_{\text{dev}}(\mathbf{x}_\xi(t) - \mathbf{x}(t))\| \leq K_{\text{dev}} \right\} \geq 1 - \beta$,

где $\mathbf{C}_{\text{dev}} = [\mathbf{I}_{3 \times 3} \ \mathbf{0}_{3 \times 9}]$, выделяет позиционные координаты (x, y, z) .

2. Ограничения на управление: $\mathbf{u}_{\text{min}} \leq \mathbf{u}_\xi(t) \leq \mathbf{u}_{\text{max}}, \forall t \in [0, T_f]$, где $\mathbf{u}_{\text{min}}, \mathbf{u}_{\text{max}} \in \mathbb{R}^6$ – векторы минимальных и максимальных допустимых сил и моментов. Для аппаратов класса ММТ-300 типичные значения находятся в диапазоне $|u_i| \lesssim 50$ Н для линейных сил (первые три компоненты) и $|u_i| \lesssim 10$ Н·м для моментов (последние три компоненты).

Далее решаются задачи $P(t, \mathbf{x}, t_f, \boldsymbol{\eta}_d, r)$ и $P_\delta(t, \delta, t + T_{MPC}, r)$ для синтеза исполнительного уровня. При этом для задачи $P(t, \mathbf{x}, t_f, \boldsymbol{\eta}_d, r)$ строится редуцированная модель на основе теории сингулярных возмущений и следящий регулятор методом из раздела 3.2.

Численное решение задачи $P_\delta(t, \delta, t + T_{MPC}, r)$ выполнено в дискретном времени с шагом Δt на модели $\boldsymbol{\delta}_{k+i+1|k} = \mathbf{A}_{d,k+i} \boldsymbol{\delta}_{k+i|k} + \mathbf{B}_d \mathbf{u}_{\delta,k+i}, i = 0, \dots, N - 1$, где $\boldsymbol{\delta}_{k|k} = \boldsymbol{\delta}(t_k)$ – текущее уклонение, N – число шагов прогнозирования, связано с T_{MPC} соотношением $N = \lceil T_{MPC} / \Delta t \rceil$, $\mathbf{A}_{d,k+i}, \mathbf{B}_d$ – матрицы, полученные в результате дискретизации непрерывной модели с шагом Δt . Выбор горизонта прогнозирования T_{MPC} выполняется на основе оценки τ^* времени первого выхода траектории уклонения на границу K_{dev} : $T_{MPC} = \alpha \cdot \tau^*, \alpha \in (0, 1)$.

Для снижения нагрузки на регулятор уклонений используется контур активной компенсации внешних возмущений. Оценка суммарного вектора сил и моментов $\hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{wc}}(t)$, создаваемых течением и волнением, формируется с помощью наблюдателей. На основе этой оценки задаётся компенсирующее управление $\mathbf{u}_{\text{wc}}(t) = -\mathbf{B} \hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{wc}}(t)$, так что полное управление, подаваемое на движители

аппарата, имеет вид $\mathbf{u}_\xi(t) = \mathbf{u}(t) + \mathbf{u}_\delta(t) + \mathbf{u}_{wc}(t)$. Используемые для получения оценки $\hat{\mathbf{t}}_{wc}$ наблюдатели строятся на базе части модели АНПА, описывающей динамику скоростей \mathbf{v} в связанной системе координат, для которой прямое оценивание \mathbf{t}_{wc} по всем шести каналам одновременно затруднено из-за взаимного влияния управлений. Для решения этой задачи используется декомпозиция и приведение к редуцированным моделям (раздел 2.3). В итоге для каждого i -го канала ($i = 1, \dots, 6$) формируется матрица ортогонального дополнения $\mathbf{Q}_i \in \mathbb{R}^{5 \times 6}$, которая позволяет получить редуцированную модель первого порядка для каждого канала возмущений. Затем выполняется синтез наблюдателей методами главы 4, что дает оценку $\hat{\mathbf{t}}_{wc}(t) = [\hat{t}_1(t), \hat{t}_2(t), \dots, \hat{t}_6(t)]^T$.

Для реализации управления необходима оценка полного вектора состояния по зашумленным измерениям. Вектор измерений формируется на основе данных от бортовых датчиков, состав которых приведён в таблице 1, имеет размерность $m = 12$ и может быть записан как $\mathbf{y}_\xi = \mathbf{C}\mathbf{x}_\xi + \mathbf{v}$, где \mathbf{C} – матрица (12×12), соответствующая указанному составу датчиков, а \mathbf{v} – вектор шумов, который предполагается белым гауссовским с нулевым средним и ковариационной матрицей $\mathbf{R}_{meas} = \text{diag}(\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_w^2, \sigma_p^2, \sigma_q^2, \sigma_r^2, \sigma_z^2, \sigma_\phi^2, \sigma_\theta^2, \sigma_\psi^2, \sigma_x^2, \sigma_y^2)$.

Табл.1. Состав измерительной системы и характеристики шумов датчиков

Измерение	Тип датчика	Обозначение	СКО шума
Линейные скорости u, v, w	Доплеровский лаг (ДЛ)	$\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$	3.4×10^{-3} м/с
Угловые скорости p, q, r	МЭМС-гироскоп	$\sigma_p, \sigma_q, \sigma_r$	6.2×10^{-4} рад/с
Глубина z	Датчик давления	σ_z	1.0×10^{-2} м
Углы крена ϕ , дифферента θ	МЭМС-акселерометры	$\sigma_\phi, \sigma_\theta$	2.9×10^{-3} рад
Угол рыскания ψ	Магнитометр	σ_ψ	1.16×10^{-2} рад
Координаты x, y (для дистанции ~ 200 м)	Гидроакустическая система УКБ (ультракороткая база)	σ_x, σ_y	0,35 м

Для оценки состояния используется фильтр Калмана с диффузной инициализацией по результатам раздела 4.3. Фильтр позволяет получать текущую оценку $\hat{\mathbf{x}}(t)$ для вычисления уклонения $\hat{\boldsymbol{\delta}}(t) = \hat{\mathbf{x}}_\xi(t) - \mathbf{x}(t)$.

На первом этапе моделировалось движение АНПА при отсутствии внешних возмущений и шумов. Номинальная система отработывала заданную траекторию типа «галс». Результаты представлены на рис. 6. Моделирование показало, что номинальное управление обеспечивает точное слежение с ошибкой по положению менее 0.05 м и по углам менее 0.01 рад.

На втором этапе в систему вводились возмущения (течение, волнение и аддитивный шум) и шумы измерений. Для оценки внешних воздействий использовались наблюдатели, описанные в разделе 4.2.

Каждый из шести наблюдателей строился для соответствующего канала и имел следующие параметры: $Q_r = 10^3$; $R_\tau = 10^{-3}$. Наблюдатели дают оценки, которые затем используются для активной компенсации возмущений. А для компенсации высокочастотных составляющих возмущений далее использовался регулятор уклонений на основе МРС.

Стратегический уровень работает параллельно с другими и включает в себя базу сценариев, блок онлайн-сопоставления текущего процесса с базой, блок оценки риска и блок адаптации параметров через выбор режима управления. Для построения базы сценариев решается задача поиска А-профилей для различных возможных направлений выхода в пространстве позиций (см. рис.7). Поскольку А-профили $\delta_{pos} = C_{dev} \delta$ являются оптимальными, то в независимости от направления выхода для одного и того же значения K_{dev} нормы отклонения профиля $\|C_{dev} \delta\|$ с точностью до погрешности вычисления не будут зависеть от направления выхода, т.е. будут одинаковыми. Это позволяет для одного значения K_{dev} использовать только один профиль и выполнять сценарное сравнение не по траектории уклонения δ_{pos} в пространстве, а именно по норме

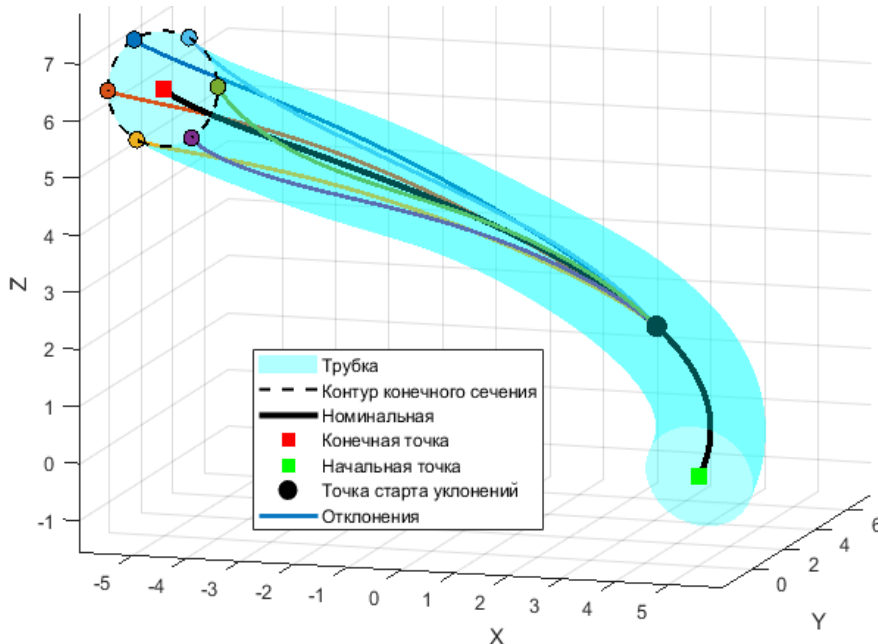


Рис. 7. Иллюстрация вариантов А-профилей уклонений для различных возможных направлений выхода в пространстве позиций

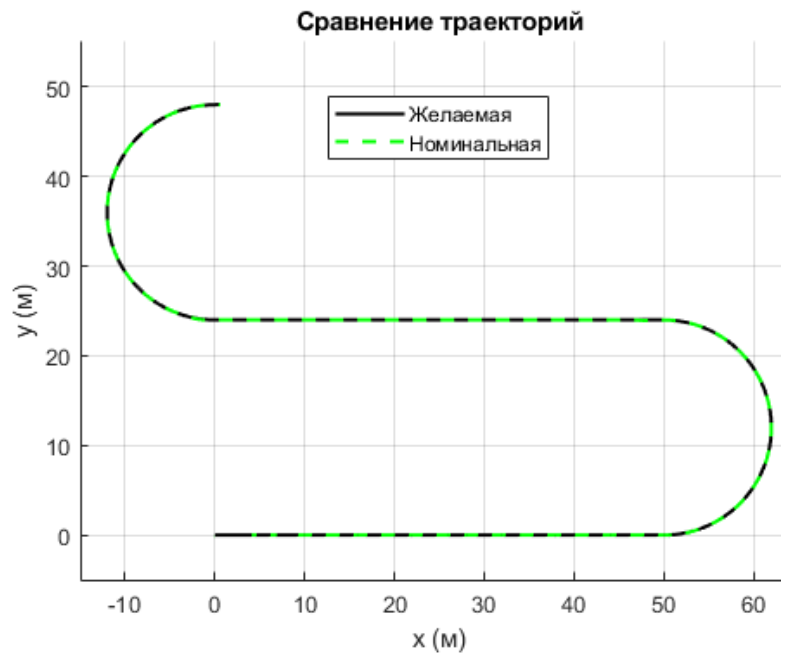


Рис.6. Графики траектории номинального движения

$\|C_{dev} \delta\|$ его отклонения. Это позволяет сократить размер базы сценариев и уменьшить вычислительные затраты блока онлайн-сопоставления и классификации. Второй аспект, который вытекает из (26) – время выхода для всех сценариев, параметризованных значением K_{dev} , одинаково и определяется значением максимального собственного числа матрицы $M_\delta(0)$. А поскольку блок онлайн-

сопоставления предусматривает коэффициент масштабирования амплитуды, то для базы сценариев достаточно взять один нормированный А-профиль, например, единичной амплитуды (график А-профиля показан на рис.8). Первые 8 секунд система накапливает возмущения (поэтому этот интервал исключен из А-профиля), а

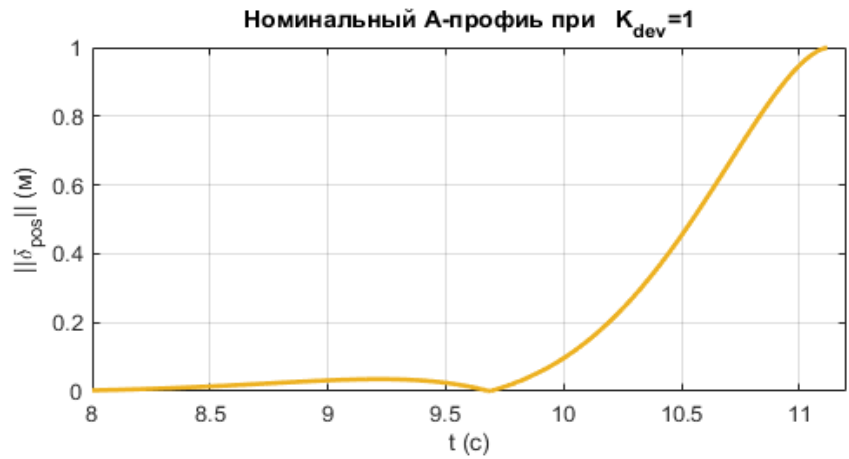


Рис. 8. А-профиль нормы отклонения для критического сценария

затем в оставшиеся 3-4 секунды накопленные возмущения приводят к выходу нормы отклонения на границу K_{dev} . Дополнительно кроме критического сценария в базу добавляется номинальный сценарий с нулевыми отклонениями.

На каждом шаге подсистема ситуационного прогнозирования на основе сопоставления оценки $\|\hat{\delta}_{pos}\|$ со сценариями рассчитывает интегральный показатель риска p_{risk} , сравнивая который с порогами $\beta_1 = 0.5$ и $\beta_2 = 0.7$, выбирает режим исполнительного уровня со своими параметрами настройки.

На рис.9 показан результат моделирования системы при действии всех возмущений (волнение, течения и аддитивный шум) с использованием функционально устойчивого управления на основе ситуационного прогнозирования. На верхнем графике показано изменение нормы отклонения реальной траектории от номинальной. Ниже показан график переключения режимов управления. Временные отрезки работы разных режимов обозначены разными цветами: зелёный – базовый режим; желтый – осторожный режим; красный – критический режим. Синим и красным пунктиром на этом графике показаны пороги β_1 и β_2 соответственно, черной линией показано значение интегрального риска p_{risk} . На нижнем графике показаны фрагменты распознанных сценариев – красным обозначены участки графика нормы отклонения, на которых система зафиксировала совпадение с фрагментом А-профиля.

Адаптивный горизонт прогнозирования позволяет снизить вычислительную нагрузку по сравнению с фиксированным длинным горизонтом, используемым во всех режимах. В базовом режиме ($\alpha = 0.3$, $\tau^* \approx 12$ с) горизонт составляет $T_{MPC} \approx 3.6$ с (что соответствует длительности активной фазы А-профиля, см. рис.9), число шагов $N = T_{MPC}/\Delta t_{MPC} = 72$ (при $\Delta t_{MPC} = 0.05$ с). В критическом режиме ($\alpha = 0.05$, $T_{MPC} \approx 0.6$ с, $\Delta t_{MPC} = 0.025$ с) $N = 24$. Размерность задачи квадратичного программирования (число переменных) пропорциональна $18N$ (число переменных состояния 12, число переменных управления 6). Переход от $N = 72$ к $N = 24$ уменьшает число переменных в 3 раза, что в типичных алгоритмах QR сокращает время решения примерно в 9 раз.

Для оценки эффективности также была проведена серия из 1000 статистических испытаний. В каждом испытании генерировались новые

реализации всех случайных процессов (течения, волнения, шумов динамики и измерений) при фиксированных параметрах моделей. Симуляции выполнялись параллельно. Для каждой симуляции фиксировалось максимальное отклонение от номинальной траектории и факт выхода за пределы трубки K_{dev} . Моделировались варианты системы с включенным и выключенным стратегическим уровнем. Результаты представлены в таблице 2.

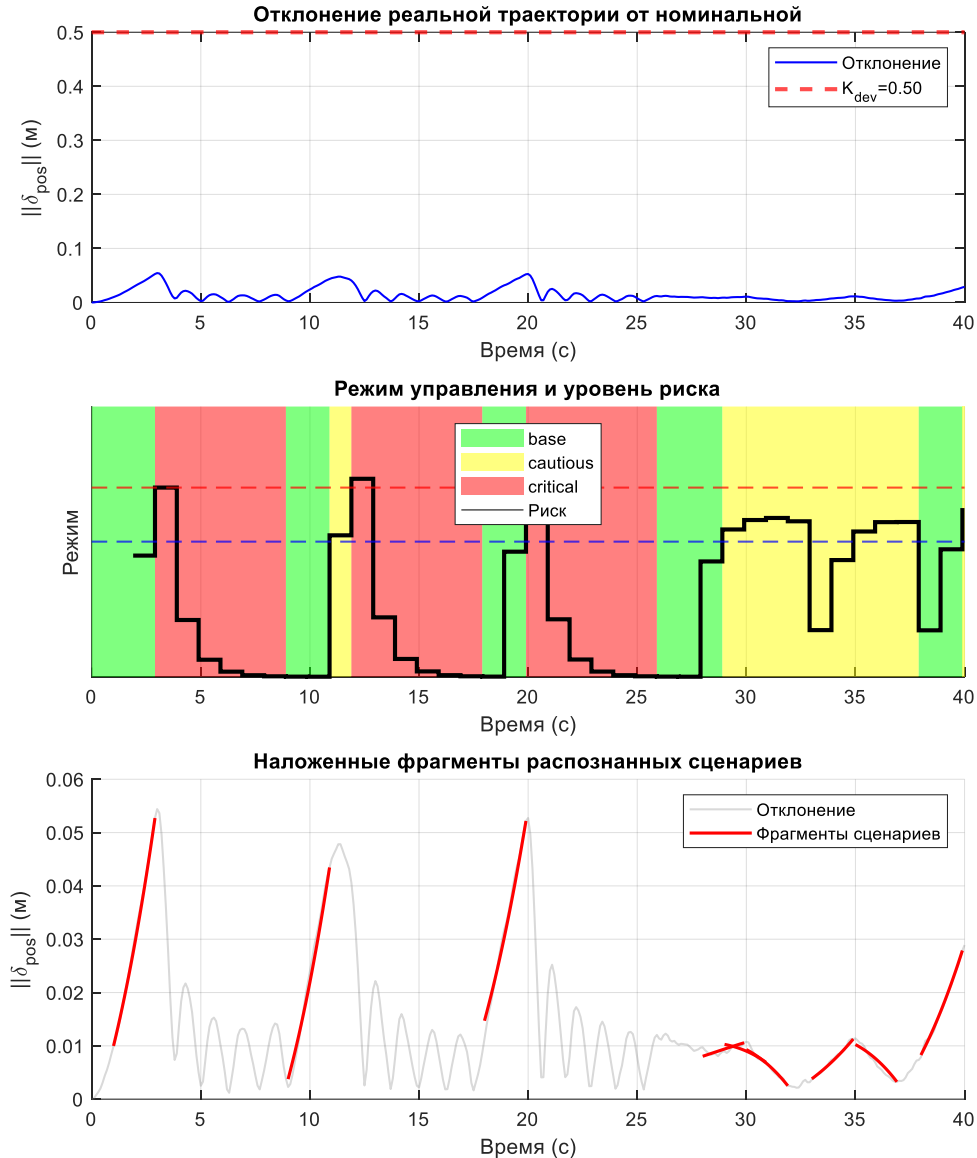


Рис. 9. Результат моделирования функционально устойчивой системы.

Табл.2. Результаты статистического моделирования

Показатель	Система без стратег. уровня	Система со стратег. уровнем
Количество симуляций	1000	1000
Выходов за K_{dev}	71	0
Доля выходов, %	7.1	0
Среднее максимальное отклонение, м	0.3159	0.0927
Медиана, м	0.3022	0.0869
95-й процентиль, м	0.5556	0.1569

При использовании исполнительного уровня с MPC с фиксированными параметрами доля выходов за допустимую границу может превышать заданный уровень риска (в эксперименте без использования стратегического уровня доля выходов составила 7.1% при заданном уровне риска $\beta = 0.05$), поскольку регулятор с постоянными настройками не всегда адекватно реагирует на редкие опасные события. Для решения этой проблемы вводится стратегический уровень, который на основе анализа больших отклонений траектории идентифицирует развитие ситуации по критическому сценарию и адаптирует параметры регуляторов, гарантируя нахождение внутри безопасной области – обеспечивая функциональную устойчивость.

Приведенные статистические испытания проводились при условии точного знания параметров модели АНПА (массы, моментов инерции, присоединённых масс, коэффициентов демпфирования и интенсивности шумов). Однако на практике гидродинамические параметры часто определены с некоторой погрешностью. Поэтому для комплексной оценки функциональной устойчивости разработанной системы управления была выполнена проверка ее работоспособности при параметрической неопределённости. На основе анализа пределов типичных ошибок идентификации были выбраны следующие вариации параметров динамики: масса и моменты инерции – $\pm 10\%$; присоединённые массы – $\pm 15\%$; коэффициенты линейного демпфирования – $\pm 15\%$; коэффициенты нелинейного демпфирования – $\pm 20\%$; интенсивность аддитивного шума в динамике – $\pm 20\%$. Результаты моделирования одной из реализаций модели динамики АНПА со случайным образом сгенерированными неопределенностями параметров в указанных пределах даны на рис.10 (при неизменной номинальной модели). Видно, что норма отклонения выше, чем при номинальных параметрах модели (рис.9), но по-прежнему лежит в пределах трубки ($K_{dev} = 0.5$ м). Для тестирования также было выполнено 1000 симуляций, в каждой из которых параметры истинной динамики АНПА генерировались независимо с равномерным распределением в указанных пределах, что позволяет оценить поведение системы при сочетании нескольких параметрических ошибок одновременно. Для каждой симуляции фиксировалось максимальное отклонение от номинальной траектории $\max\|C_{dev}\delta(t)\|$ и факт выхода за пределы трубки K_{dev} . В итоге доля выходов за пределы трубки составила 2%, среднее отклонение, 0.35 м, медиана 0.3 м, 95-й перцентиль, 0.47 м.

Была также выполнена экспериментальная проверка базовых элементов разработанной системы функционально устойчивого управления в Камышовой бухте, г. Севастополь (рис.11). Основная цель эксперимента – в реальных морских условиях подтвердить работоспособность подсистемы ситуационного прогнозирования и ее информационную совместимость со штатными средствами исполнительного уровня АНПА.

Допустимый радиус трубки безопасности $K_{dev} = 0.5$ м, согласован с типовой точностью позиционирования УКБ-системы ММТ-300 на рабочих дистанциях. Натурный эксперимент проводился в благоприятных гидрометеорологических условиях (волнение до 1 балла, слабое течение), поэтому подавление возмущений не требовалось, нарушение трубки не ожидалось, и его отсутствие не противоречит результатам моделирования.

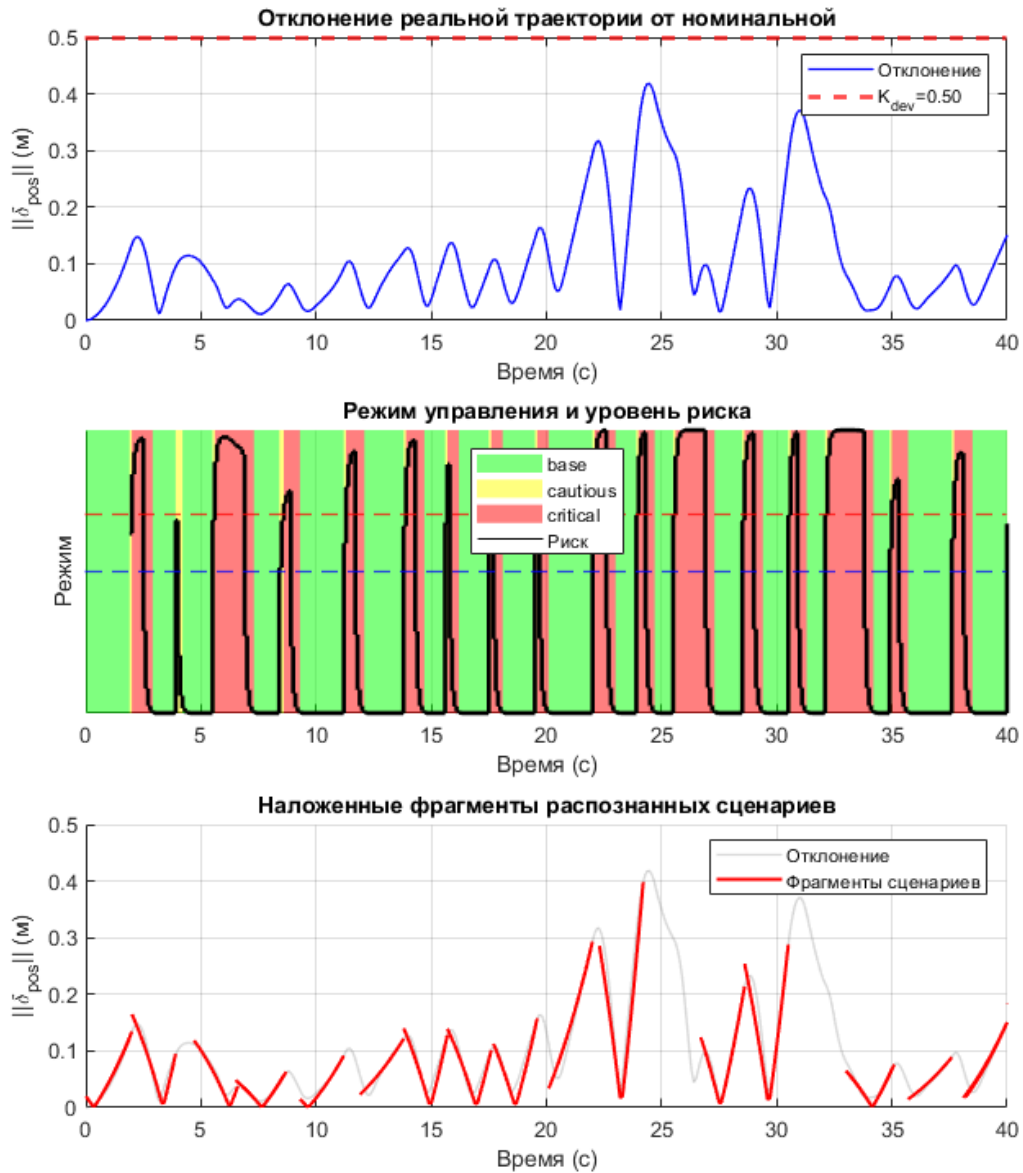


Рис. 10. Фрагмент моделирования при неопределенности в модели.

В эксперименте номинальная траектория состояла из 5 команд TaskYaw штатной системы управления АНПА, описывающих прямолинейные галсы разной длины на скорости 0.8 м/с с разворотом в 90 градусов между ними. Глубина стабилизировалась штатными регуляторами вертикального канала. На протяжении всего движения никаких корректирующих команд MovementCorrection не подавалось – исполнительный уровень работал по предписанному скрипту. Анализ отклонений от номинальной траектории выполнялся на прямолинейных участках галсов, где отклонение аппарата от заданного курса имеет большее значение для точности выполнения миссии.



Рис.11. Один из моментов выполнения эксперимента

Координаты аппарата x, y, z определялись гидроакустической УКБ системой с периодичностью около 0.3 Гц и комплексировались с данными доплеровского лага и датчика глубины. На посту оператора функционировал SDC-фильтр Калмана, синтезированный по математической модели ММТ-300. Он формировал непрерывную оценку вектора состояния. По этой оценке вычислялся вектор позиционного уклонения $\hat{\delta}_{pos}$ относительно номинальной траектории, и норма $\|\hat{\delta}_{pos}\|$ подавалась на блок ситуационного прогнозирования.

Блок прогнозирования использовал базу, содержащую один эталонный А-профиль, построенный для $K_{dev} = 1$ м. На каждом такте измерений вычислялся интегральный показатель риска p_{risk} путём сравнения нормы уклонения с масштабированным фрагментом профиля. Автоматическая выдача управляющих команд не производилась – стратегический уровень работал в режиме мониторинга, накапливая данные для последующей валидации алгоритмов прогнозирования. По завершении миссии навигационные данные были выгружены с бортового накопителя в json(json) файле. Траектория была восстановлена в локальных прямоугольных координатах (рис.12). Анализ результатов показал, что на прямолинейных участках штатный автопилот обеспечил максимальное отклонение от номинальной траектории 0.42 м, т.е. требование $K_{dev} = 0.5$ м не было нарушено. Такой результат согласуется с условиями эксперимента и не противоречит данным моделирования. Блок ситуационного прогнозирования на всём протяжении эксперимента удерживал показатель риска ниже порога $\beta_1 = 0.5$, не генерируя ложных тревог. Динамика оценки риска качественно коррелировала с изменениями нормы уклонения: при возрастании $\|\hat{\delta}_{pos}\|$ показатель риска увеличивался, при затухании – снижался. Такое поведение подтверждает адекватность механизма сравнения с А-профилем и корректность выбранных параметров прогнозирования. Таким образом, натурный эксперимент подтвердил, что подсистема ситуационного прогнозирования функционируют корректно на реальной телеметрии ММТ-300.

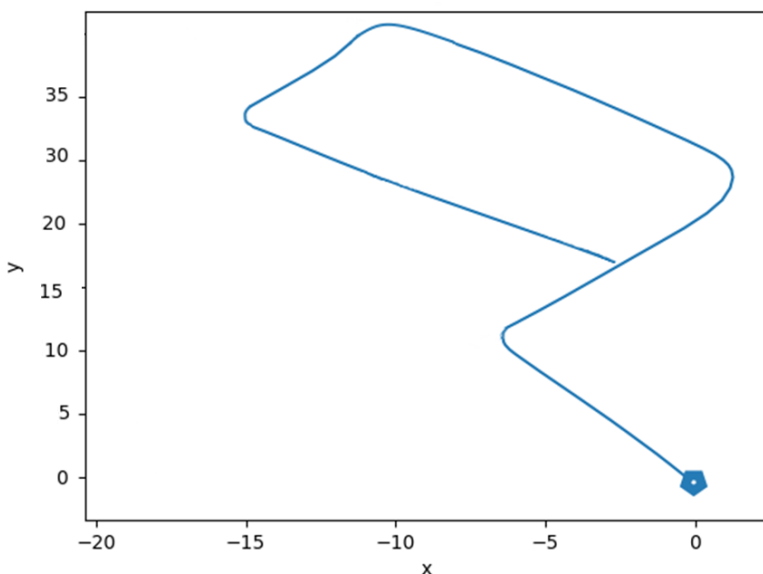


Рис.12. Траектория, построенная по навигационным данным

Полученные результаты позволяют утверждать, что предложенная трехуровневая структура и методы структурно-параметрического синтеза разрешают сформулированную научно-техническую проблему обеспечения гарантированного выполнения миссий АПО с заданной вероятностью. Статистическое моделирование с 1000 независимых реализаций внешних возмущений показало, что интеграция стратегического уровня снизила долю критических выходов за пределы безопасной трубки с 7.1 % до

нуля при одновременном уменьшении среднего и максимального отклонений. Это количественно доказывает, что система приобрела способность к упреждающему парированию редких опасных уклонений траектории управляемого процесса.

В приложении А представлены копии актов о внедрении результатов работы. Приложение Б содержит описание программного комплекса расчета и моделирования функционально устойчивой системы управления АНПА.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертационной работе решена важная научно-техническая проблема, имеющая существенное значение для развития теории и практики управления АПО, заключающаяся в разработке теоретических основ, методов и алгоритмов для структурно-параметрического синтеза функционально устойчивых систем управления, обеспечивающих гарантированное выполнение миссий с заданной вероятностью в условиях малых гауссовских возмущений и риска редких критических событий (больших уклонений траектории).

В отличие от существующих подходов, ориентированных преимущественно либо на робастность, либо на адаптацию, в диссертации предложен общий подход к синтезу функционально устойчивых систем управления, объединяющий в рамках единого математического базиса контуры оптимального управления, оценивания состояния и возмущений, прогнозирующего управления и упреждающего ситуационного прогнозирования. В качестве такого базиса использовано SDC-представление нелинейных систем.

Разработанный подход развивает теорию структурно-параметрического синтеза сложных динамических систем и формализует принципы построения интеллектуальных систем управления, способных не только компенсировать текущие возмущения, но и прогнозировать развитие опасных сценариев с упреждающей адаптивной реконфигурацией исполнительного уровня. Тем самым обеспечивается переход от реактивных принципов управления к управлению с опережающим отражением угроз.

Основные научные результаты:

1. Разработаны теоретические основы структурно-параметрического синтеза функционально устойчивых систем управления АПО. Формализовано понятие функциональной устойчивости как интегрального свойства системы, объединяющего робастность, адаптивность и способность к упреждающему прогнозированию критических ситуаций. Предложена трехуровневая структура системы управления, включающая исполнительный, информационный и стратегический уровни.

2. Разработаны новые методы синтеза канонических преобразований нелинейных динамических систем в SDC-представлении, включая случай сингулярно возмущённых систем. Получены условия приведения систем к каноническим формам с Фробениусовой структурой, обеспечивающим упрощение процедур синтеза регуляторов и наблюдателей.

3. Разработаны новые методы решения задач нелинейного оптимального управления на конечных интервалах времени в SDC-представлении:

– предложен метод синтеза точного терминального управления на основе обратного интегрирования дифференциальных уравнений оптимального

управления с использованием терминального закона регулирования при движении в обратном времени;

- разработан метод синтеза оптимального следящего управления на основе одноэтапной процедуры прямого интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений управления.

Полученные результаты развивают методы нелинейного оптимального управления.

4. Разработаны методы оценивания состояния и неизмеряемых возмущений нелинейных динамических систем:

- предложен метод оценивания состояния при полной неопределённости в начальных условиях на основе диффузного фильтра Калмана в SDC-представлении;

- разработан метод синтеза наблюдателей возмущений, основанный на решении вспомогательной задачи оптимального следящего управления, обеспечивающий оценивание возмущений по критерию минимизации функционала невязки.

5. Разработан новый метод управления с прогнозирующей моделью, отличающийся адаптивным выбором горизонта прогнозирования на основе анализа больших уклонений. Впервые предложено определять горизонт прогнозирования через оценку времени первого выхода траектории возмущённой системы на границу допустимой области посредством минимизации функционала действия Вентцеля-Фрейдлина. Тем самым обеспечено конструктивное объединение ТБУ и MPC-управления в рамках единой вычислительной процедуры.

6. Разработан метод ситуационного прогнозирования, основанный на распознавании типовых и редких сценариев развития управляемого процесса. В отличие от существующих подходов, метод учитывает не только типовые режимы функционирования, но и наиболее вероятные траектории выхода системы в критические состояния (А-профили), полученные из анализа больших уклонений. На основе сопоставления текущих оценок состояния с эталонными сценариями осуществляется оценка риска и адаптивный выбор режимов управления исполнительного уровня.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Полученные результаты создают основу для решения более сложных задач автономной робототехники. Наиболее перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- распространение предложенного подхода на групповое управление гетерогенными АПО с учётом взаимных опасных сближений;

- интеграция методов машинного обучения (прежде всего обучения с подкреплением) для решения задач оптимального управления и оценивания без необходимости знать матрицу динамики системы, а также для онлайн-пополнения базы сценариев новыми, не предусмотренными на этапе проектирования, профилями возмущенного процесса, что повысит адаптивность системы к неизвестным заранее режимам внешней среды.

Решение этих задач позволит создать полностью автономные, функционально устойчивые системы управления для широкого класса робототехнических платформ.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Публикации в изданиях из списка ВАК РФ и приравненных к ним**

1. **Кабанов, А. А.** Приближенная линеаризация обратной связью на основе сингулярно возмущенного подхода / А. А. Кабанов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – № 8. – С. 515–522. **ВАК (К1)**
2. **Кабанов, А. А.** Линеаризация обратной связью непрерывных и дискретных многомерных систем / А. А. Кабанов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, № 6. – С. 363–370. **ВАК (К1)**
3. **Кабанов, А. А.** Численные методы контроля редких событий в нелинейных стохастических системах / А. А. Кабанов, С. А. Дубовик // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – Т. 22, № 6. – С. 291–297. **ВАК (К1)**
4. Дубовик, С. А. Асимптотический метод прогнозирования рисков в задачах стохастического контроля и управления / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов** // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23, № 8. – С. 395–405. **ВАК (К1)**
5. **Кабанов, А. А.** Идентификация дефектов в линейных системах на основе методов оптимального управления / А. А. Кабанов, А. В. Зуев, А. Н. Жирабок, В. Ф. Филаретов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2022. – Т. 65, № 5. – С. 335–342. **ВАК (К1)**
6. **Кабанов, А. А.** Влияние качки на точность горизонтальных смещений судна / А. А. Кабанов, В. А. Крамарь, А. В. Титов // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 1-1 (59). – С. 261–267. **ВАК (К1)**
7. **Кабанов, А. А.** Идентификация возмущений в электроприводах робототехнических систем на основе оптимального астатического наблюдателя / А. А. Кабанов, А. В. Зуев, А. А. Проценко // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 4, ч. 4. – С. 91–97. **ВАК (К1)**
8. **Кабанов, А. А.** Метод идентификации дефектов в нелинейных системах / А. А. Кабанов, А. Н. Жирабок, А. В. Зуев, В. Ф. Филаретов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2025. – Т. 68, № 8. – С. 668–679. **ВАК (К1)**
9. **Кабанов, А. А.** Синтез оптимального следящего управления на конечном интервале времени для нелинейных систем на основе SDC-метода / А. А. Кабанов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2025. – Т. 26, № 11. – С. 579–587. **ВАК (К1)**
10. Дубовик, С. А. Мониторинг и анализ опасных сближений автономных подводных аппаратов при движении в группе / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов**, И. Ю. Липко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2025. – Т. 26, № 1. – С. 12–21. **ВАК (К1)**
11. **Кабанов, А. А.** SDC методы оптимального управления нелинейными системами на конечном интервале времени / А. А. Кабанов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2026. – Т. 5, № 1. – С. 117–124. **ВАК (К1)**
12. **Кабанов, А. А.** Метод идентификации дефектов в нестационарных динамических системах / А. А. Кабанов, А. Н. Жирабок, А. В. Зуев, А. А. Проценко // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2026. – № 74. – С. 107–114. **ВАК (К1)**
13. Дубовик, С. А. Асимптотические методы синтеза алгоритмов контроля и управления для бортовых систем автономных объектов / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов** // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2026. – Т. 27, № 4. – С. 198–206. **ВАК (К1)**

14. **Кабанов, А. А.** Идентификация дефектов в приводах на основе методов оптимального управления / А. А. Кабанов, А. В. Зуев, А. Н. Жирабок, В. Ф. Филаретов, В. А. Крамарь // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 192–204. **ВАК (К2)**
15. Дубовик, С. А. Асимптотические методы в задачах супервизорного управления автономных подводных роботов / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов** // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 155–170. **ВАК (К2)**
16. **Кабанов, А. А.** Выбор параметризации матриц нелинейной системы для методов state-dependent управления / А. А. Кабанов // Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – 2023. – № 3 (23). – С. 23–37. **ВАК (К3)**
17. **Kabanov, A. A.** Design and Modeling of an Experimental ROV with Six Degrees of Freedom / A. A. Kabanov, V. A. Kramar, I. Ermakov // Drones. – 2021. – Vol. 5, № 4. – Art. 113. **Scopus (Q1)**
18. Kramar, V. Multiloop Multirate Continuous-Discrete Drone Stabilization System: An Equivalent Single-Rate Model / V. Kramar, **A. Kabanov**, V. Alchakov // Drones. – 2021. – Vol. 5, № 4. – Art. 129. **Scopus (Q1)**
19. **Kabanov, A. A.** Composite Control of Nonlinear Singularly Perturbed Systems via Approximate Feedback Linearization / A. A. Kabanov, V. V. Alchakov // International Journal of Automation and Computing. – 2020. – Vol. 17, № 4. – P. 610–620. **Scopus (Q2)**
20. **Kabanov, A. A.** Feedback Linearization of Nonlinear Singularly Perturbed Systems with State-dependent Coefficients / A. A. Kabanov // International Journal of Control, Automation, and Systems. – 2020. – Vol. 18, № 7. – P. 1743–1750. **Scopus (Q2)**
21. **Kabanov, A.** The Design of Optimal Lateral Motion Control of an UAV Using the Linear-Quadratic Optimization Method in the Complex Domain / A. Kabanov, S. Dudnikov, A. Dmitriev // International Review of Aerospace Engineering. – 2020. – Vol. 13, № 6. – P. 217–227. **Scopus (Q2)**
22. Kramar, V. A. A Mathematical Model for a Conceptual Design and Analyses of UAV Stabilization Systems / V. A. Kramar, **A. A. Kabanov**, S. Dudnikov // Fluids. – 2021. – Vol. 6, № 5. – Art. 172. **Scopus (Q2)**
23. **Kabanov, A.** Cooperative Control of Underwater Vehicle–Manipulator Systems Based on the SDC Method / A. Kabanov, V. Kramar, I. Lipko, K. Dementiev // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 13. – Art. 5038. **Scopus (Q2)**
24. Kramar, V. Autonomous Underwater Vehicle Navigation via Sensors Maximum-Ratio Combining in Absence of Bearing Angle Data / V. Kramar, **A. Kabanov**, K. Dementiev // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11, № 10. – Art. 1847. **Scopus (Q2)**
25. Kramar, V. Optimal State Estimation in Underwater Vehicle Discrete-Continuous Measurements via Augmented Hybrid Kalman Filter / V. Kramar, K. Dementiev, **A. Kabanov** // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13, № 5. – Art. 933. **Scopus (Q2)**
26. **Kabanov, A.** Leader-Follower Motion Control System for a Group of AUVs via Hybrid Measurement Sparse LBL Navigation / A. Kabanov, K. Dementiev, V. Kramar // Journal of Marine Science and Engineering. – 2026. – Vol. 14, № 4. – Art. 358. **Scopus (Q2)**

27. **Kabanov, A.A.** Fault Identification: An Approach Based on Optimal Control Methods / Kabanov A.A., Zuev A.V., Zhirabok A.N., Filaretov V.F. // Automation and Remote Control, 2023. – Vol. 84. – P.956–965 **Scopus (Q3)**

Кабанов, А.А. Метод идентификации дефектов: подход на основе методов оптимального управления / А. А. Кабанов, А. В. Зуев, А. Н. Жиравок, В. Ф. Филаретов // Автоматика и телемеханика. – 2023. – № 9. – С. 82–94.

28. Zhirabok, A. N. Method of Fault Identification in Nonlinear Systems Based on Optimal Control Methods / A. N. Zhirabok, A. V. Zuev, A. A. Kabanov, V. F. Filaretov // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2025. – Vol. 64, № 5. – P. 805–813 **Scopus (Q3)**

Жиравок, А. Н. Метод идентификации дефектов в нелинейных системах на основе методов оптимального управления / А. Н. Жиравок, А. В. Зуев, А. А. Кабанов, В. Ф. Филаретов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2025. – № 5. – С. 102–109.

29. **Kabanov, A. A.** Composite Control for Nonlinear Singularly Perturbed Systems Based on Feedback Linearization Method / A. A. Kabanov // WSEAS Transactions on Systems. – 2015. – Vol. 14. – P. 215–221. **Scopus (Q4)**

Прочие публикации в изданиях, индексируемых базой Scopus

30. **Kabanov, A. A.** Full-state Linearization of Systems via Feedback Using Similarity Transformation / A. A. Kabanov // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): proceedings. – Moscow: National Research University Higher School of Economics, 2016. – P. 1–5.

31. Dubovik, S. A. Robustness and cognition in stabilization problem of dynamical systems based on asymptotic methods / S. A. Dubovik, **A. A. Kabanov** // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 803, № 1. – Art. 012035.

32. Dubovik, S. A. Quasipotentials in Synthesis of Control Systems Based on Knowledge / S. A. Dubovik, **A. A. Kabanov** // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): proceedings. – St. Petersburg, 2017. – P. 1–5.

33. **Kabanov, A. A.** Trajectory-Tracking Control of Mobile Robot via Feedback Linearization / A. A. Kabanov, S. Stoyanov, E. N. Kabanova // Proceedings of the Second International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ИТИ’17). – Cham: Springer, 2017. – Vol. 2. – P. 32–41.

34. **Kabanov, A. A.** Feedback linearized trajectory-tracking control of a mobile robot / A. A. Kabanov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – Art. 03029.

35. Dubovik, S. A. Profiles of critical states in diagnostics of controlled processes / S. A. Dubovik, **A. A. Kabanov** // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 224. – Art. 04024.

36. **Kabanov, A. A.** Feedback linearization of singularly perturbed systems on the basis of canonical similarity transformations / A. A. Kabanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015. – Art. 032173.

37. **Kabanov, A. A.** Canonical transformation and feedback linearization of state-dependent coefficient nonlinear systems / A. A. Kabanov // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Art. 020021.

38. Dubovik, S. A. Situational Control in Stochastic Systems / S. A. Dubovik, **A. A. Kabanov**, I. U. Lipko // 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems (CTS): proceedings. – St. Petersburg, 2019. – P. 64–68.

39. **Kabanov, A. A.** SDC-method of large deviations analysis for nonlinear system / A. A. Kabanov, S. A. Dubovik // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1333, № 3. – Art. 032032.
40. **Kabanov, A. A.** Methods of modeling and probabilistic analysis of large deviations of dynamic systems / A. A. Kabanov, S. A. Dubovik // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1661, № 1. – Art. 012044.
41. **Kabanov, A. A.** The SDC Kalman Filter for Nonlinear System with Uncertainty in Initial Conditions / A. A. Kabanov, V. A. Kramar // *2020 International Russian Automation Conference: proceedings*. – Sochi, 2020. – P. 1015–1019.
42. **Kabanov, A. A.** Cooperative Control of Underwater Manipulators Based on the SDRE Method / A. A. Kabanov, V. A. Kramar // *2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon): proceedings*. – Sochi, 2021. – P. 515–520.
43. **Kabanov, A. A.** Simulation of Rare Events in Stochastic Systems / A. A. Kabanov, S. A. Dubovik // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2096. – Art. 012151.
44. **Kabanov, A. A.** Finite-Time State-Dependent Coefficient Method for Optimal Control of Nonlinear Systems / A. A. Kabanov // *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): proceedings*. – Sochi, 2022. – P. 712–717.
45. **Kabanov, A. A.** Synthesis of Diagnostic Observers for Linear Systems Based on Optimal Control Methods / A. A. Kabanov, A. V. Zuev, A. N. Zhirabok, V. F. Filaretov // *2022 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD): proceedings*. – Lisbon, 2022. – P. 1–5.
46. **Kabanov, A. A.** Modified SDRE Method for Finite-time Nonlinear Optimal Control Problem / A. A. Kabanov // *2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon): proceedings*. – Sochi, 2022. – P. 639–643.
47. **Kabanov, A. A.** Parameterization of Nonlinear System Matrices for Implementation of State-Dependent Coefficient Control Methods / A. A. Kabanov // *2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon): proceedings*. – Sochi, 2023. – P. 912–917.
48. **Kabanov, A. A.** Position-Force Control Approach for an Underwater Vehicle-Manipulator System / A. A. Kabanov, A. Dementiev // *2023 International Conference on Ocean Studies (ICOS): proceedings*. – Vladivostok, 2023. – P. 79–84.
49. Dubovik, S. A. Highly Autonomous Underwater Vehicle Control Systems Synthesis via Asymptotic Methods / S. A. Dubovik, **A. A. Kabanov** // *2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): proceedings*. – Sochi, 2023. – P. 879–884.
50. Dubovik, S. A. Situational Forecasting and Control in Multi-Agent Systems / S. A. Dubovik, **A. A. Kabanov** // *2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): proceedings*. – Sochi, 2024. – P. 729–733.
51. **Kabanov, A. A.** The Optimal Astatic Observer for the Identification of Disturbances in Electric Drives of Robotic Systems / A. A. Kabanov, A. V. Zuev, A. A. Protsenko // *2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon): proceedings*. – Sochi, 2024. – P. 601–605.
52. **Kabanov, A. A.** The Optimal Astatic Observer for the Identification of Disturbances in Nonlinear Robotic Systems / A. A. Kabanov, A. V. Zuev, A. N. Zhirabok,

A. A. Protsenko // Proceedings of the 2024 International Conference on Ocean Studies (ICOS). – Vladivostok, 2024. – P. 76–80.

53. **Kabanov, A. A.** Optimal Control Method for Disturbances Identification / A. A. Kabanov, I. A. Ermakov // 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing: proceedings. – Sochi, 2025. – P. 542–547.

Публикации в прочих изданиях

54. **Кабанов, А.А.** Приближенная линеаризация обратной связью сингулярно возмущенных систем на основе метода интегральных многообразий / А.А. Кабанов // Вестник СевГТУ. Сер. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. – Севастополь, 2014. – Вып. 154. – С. 85–90.

55. Дубовик, С. А. Композиционный синтез для бортовых систем управления летательных аппаратов / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов** // Информационные технологии и управление. – 2015. – № 1. – С. 5–15.

56. **Кабанов, А. А.** Композиционный синтез нелинейных сингулярно возмущенных систем на основе метода линеаризации обратной связью / А. А. Кабанов // Труды X Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'15. – Москва, 26–29 января 2015 г. – М.: Институт проблем управления РАН, 2015. – С. 548–556.

57. **Kabanov, A. A.** Approximate Feedback Linearization Control of Nonlinear Singular Perturbed Systems / A. A. Kabanov // International Symposium Automated Systems and Technologies AST2015: proceedings. – St. Petersburg, 25-26 May 2015. – SPb.: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2015. – P. 199–206.

58. Дубовик, С. А. Композиционный on-line синтез управлений для бортовых систем летательных аппаратов / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов** // Сборник тезисов докладов II Всероссийской научно-практической конференции «АВИАТОР». – Воронеж, 11–13 февраля 2015 г. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – С. 121–123.

59. **Кабанов, А. А.** Линеаризация обратной связью нелинейных систем на основе канонического преобразования подобия / А. А. Кабанов, В. А. Крамарь // Материалы Всероссийской конференции по проблемам управления в технических системах. – Санкт-Петербург, 26–29 октября 2015 г. – СПб.: ЛЭТИ, 2015. – С. 10–13.

60. Дубовик, С. А. Робастность и когнитивность в задачах стабилизации динамических систем на основе асимптотических методов / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов** // Перспективные системы и задачи управления: сборник материалов 11 Всероссийской научно-практической конференции. – 4–8 апреля 2016 г. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – Т. 2. – С. 107–116.

61. Дубовик, С. А. Асимптотический метод синтеза системы двухуровневой стабилизации движения / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов** // Материалы 9-й Мультиконференции по проблемам управления, конференция «Управление в морских и аэрокосмических системах». – Санкт-Петербург, 04–06 октября 2016 г. – СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 2016. – С. 86–89.

62. Дубовик, С. А. Система контроля крена судна на базе анализа больших уклонений / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов**, И. Ю. Липко // Управление и обработка информации в технических системах: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции и VIII молодежной школы-семинара. – Домбай, 4–7 апреля 2017 г. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. – С. 196–208.

63. Дубовик, С. А. Функционалы действия в качестве критериев для двухуровневых систем управления / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов**, И. Ю. Липко // Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции. – Дивноморское, Геленджик, 11–16 сентября 2017 г. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. – Т. 2. – С. 72–74.

64. Дубовик, С. А. Двухуровневые системы стабилизации движения морских измерительных средств на заданных траекториях / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов** // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Системы контроля окружающей среды (СКОС-2017)». – Севастополь, 06–09 сентября 2017 г. – Севастополь: ИПТС, 2017. – С. 36.

65. Дубовик, С. А. Ситуационное управление в стохастических системах / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов**, И. Ю. Липко // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2019. – Т. 1. – С. 69–72.

66. **Кабанов, А. А.** Разработка подхода к синтезу наблюдателей для оценки возмущений в линейных системах на основе методов оптимального управления / А. А. Кабанов, В. Ф. Филаретов, А. В. Зуев, А. Н. Жирабок // Сборник трудов 15-ой Мультиконференции по проблемам управления. – СПб., 2022. – С. 212–215.

67. Дубовик, С. А. Мониторинг относительного положения автономных подводных аппаратов в группе на основе анализа больших уклонений / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов**, И. Ю. Липко // Труды 35-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – Санкт-Петербург, 2024. – С. 150–156.

68. **Кабанов, А. А.** Идентификация возмущений в линейных системах на основе оптимального астатического наблюдателя / А. А. Кабанов, А. В. Зуев, А. А. Проценко // Экстремальная робототехника: международная научно-техническая конференция. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 307–308.

69. Жирабок, А. Н. Интервальный подход к идентификации в линейных системах на основе методов оптимального управления / А. Н. Жирабок, А. В. Зуев, А. А. Кабанов, В. Ф. Филаретов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2026. – № 5. – С. 117–124.

Монографии

70. Дубовик, С. А. Функционально устойчивые системы управления: асимптотические методы синтеза: монография / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов**. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 249 с.

Патенты и свидетельства

1. Дубовик, С. А. Система оперативного контроля крена судна на волнении: пат. 195040 U1 Рос. Федерация / С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов**, И. Ю. Липко. – 14.01.2020.

2. Лазарев, В. Б. Комплексная программа стенда имитации качки судна: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019662838 / В. Б. Лазарев, С. А. Дубовик, **А. А. Кабанов**, И. Ю. Липко, А. Е. Осадченко, А. Н. Путин, В. П. Тыщенко. – 03.10.2019.

3. **Кабанов, А. А.** Программный комплекс расчета и моделирования функционально устойчивой системы управления автономным необитаемым подводным аппаратом: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2026664443 / **А. А. Кабанов**. – 15.05.2026.