

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



На правах рукописи

ЛАЗАРЕНКО СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

МЕТОДЫ СИНТЕЗА ТРАНСПОРТНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НА
ОСНОВЕ ПОЭТАПНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
С РЕДУКЦИЕЙ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ЛАГРАНЖА

Специальность 2.3.1

Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика (технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ростов-на-Дону – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования

«Донской государственной технической университет» (ДГТУ)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Связь на железнодорожном транспорте» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Костоглотов Андрей Александрович

**Официальные
оппоненты:**

Никульчев Евгений Витальевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Цифровые технологии обработки данных» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва

Затонский Андрей Владимирович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизации технологических процессов» Березниковского филиала ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Березники

Строцев Андрей Анатольевич

доктор технических наук, доцент, заместитель начальника научно-технического комплекса по науке ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» Федерального научно-производственного центра, г. Ростов-на-Дону

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Защита состоится «25» декабря 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.398.02 при ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» по адресу 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, корп. 20, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке СКФУ по адресу 355029, г. Ставрополь, просп. Кулакова, 2 и на сайте СКФУ: <https://ncfu.ru/upload/medialibrary/28a/tegevlxn1ldxoxbyy2sdk0orsno080qc/Dis-Lazarenko-S.V..pdf>.

С авторефератом можно ознакомиться на сайте СКФУ: <https://ncfu.ru/nauka/dissertatsionnye-sovety/obyavleniya-o-zashchite-dissertatsiy/36543/>

Автореферат разослан «__» сентября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук, профессор  Т. В. Шагорова

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования связана с перспективами применения подвижных объектов, что определяется широким кругом прикладных исследований в области транспорта. Одним из требований к ним является способность функционировать в широком спектре условий, особенно при неопределенности, что может приводить к различным, порой противоречивым режимам работы. Эти режимы определяются совокупностью показателей качества, ограничениями на динамику систем и управляющие воздействия, а также характером и интенсивностью внешних возмущений и другими факторами. К примеру, для мультироторных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как перспективного вида транспорта – это режимы парирования возмущений и стабилизации по углу крена, которые могут возникать после сброса полезной нагрузки. Только после решения этих задач бортовая информационно-управляющая система (ИУС) (для мультироторных БПЛА – полетный контроллер) выведет летательный аппарат (ЛА) в соответствии с полетным заданием по реализованному в программном обеспечении (ПО) закону управления. При этом для привязного дрона стабилизация в пространстве – один из основных режимов функционирования, который при интенсивном изменении состояния подвижного объекта может требовать адаптации алгоритмов обработки измерительной информации к наблюдаемой динамике. В обеспечивающих функционирование подвижных объектов радиолокационных системах (РЛС) и комплексах – это режимы обзора и сопровождения маневрирующей цели. В соответствии с Федеральным законом от 09.02.2007 № 16-ФЗ (ред. от 31.07.2025 г.) «О транспортной безопасности» рассмотренные объекты могут быть отнесены к транспорту или транспортной инфраструктуре. Поскольку транспортная инфраструктура – понятие достаточно широкое, то исследование ограничено ее частью – интеллектуальными транспортными информационно-управляющими радиоэлектронными системами (ИТИУРЭС), совершенствование которых также соответствует основным положениям Государственной программы «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности».

При этом существующие методы синтеза ИТИУРЭС не позволяют гарантированно достичь требуемых значений разнородных частных показателей качества в многорежимных системах, которые нередко порождены целевыми функционалами оптимизационных задач. Вследствие этого нетривиально зависящий от них общий критерий эффективности ИТИУРЭС может не выполняться.

Поэтому в качестве **объекта исследования** выбраны ИТИУРЭС, обеспечивающие функционирование ЛА.

Практическая важность исследования связана с тем, что развитие ИУС является одним из приоритетов, которые обозначены в распоряжении Правительства Российской Федерации № 3363-р от 27 ноября 2021 г., касающемся транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г., а также в распоряжении Правительства Российской Федерации № 1630-р от 21 июня 2023 г. Причина появления указанных выше документов в том, что

существующие ИУС в условиях неопределенности не всегда удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям из-за **противоречий**:

а) *между условием максимальной эффективности режимов функционирования ИТИУРЭС и эффективностью полученных традиционными методами решений задач управления, оценки и идентификации для линейных математических моделей (ММ), что не позволяет приблизиться к потенциальной результативности функционирования ИУС;*

б) *между вычислительной мощностью электронных вычислительных машин и вычислительной сложностью процедур интеллектуализации, что препятствует реализации интеллектуальных алгоритмов в реальном масштабе времени и является причиной снижения автономности транспорта.*

На основе анализа современного уровня техники в диссертации во введении сформулирована **прагматическая проблема**, которая состоит в том, что эксплуатируемые ИТИУРЭС в условиях неопределенности при требовании к оперативности решения целевых задач не обеспечивают заданные показатели эффективности. В результате здоровью и жизни людей, народному хозяйству, а также обороноспособности страны может быть нанесен ущерб. В прикладном плане исследование направлено на его предотвращение. Использование величины предотвращенного ущерба в основе общего критерия эффективности ИТИУРЭС позволяет свести порожденные целевыми функционалами оптимизационных задач различные частные критерии эффективности к единой метрике.

Степень проработанности темы исследований. Одна из сложностей при использовании нечеткой логики состоит в построении нечеткой базы знаний или обучении при использовании нейронных сетей, но даже если эти трудности удастся преодолеть, то в соответствии с указанным выше противоречием применение эвристических или построенных для линейных систем алгоритмов идентификации, оценки и управления не позволяет приблизиться к максимальным значениям показателей эффективности функционирования. При этом *увеличение числа областей нечеткого фазового пространства влечет уменьшение показателей эффективности, а также сопровождается ростом вычислительных затрат, что в конечном итоге приводит не только к снижению автономности транспорта и объектов транспортной инфраструктуры, но и может стать причиной их аварии.*

Так возникает известное **противоречие** между требованием максимальной детализации ММ в целях исключения структурной неопределенности для повышения достоверности и точности оценки и требованием конструктивности, которое диктуется возможностями исследователя. При нестационарных возмущениях найти компромисс в рамках традиционного подхода – весьма трудная задача, притом что линеаризованные модели стохастических фильтров оценки состояния практически исчерпали резерв повышения точности.

В условиях справедливости гипотезы о детерминистском характере протекающих процессов с использованием получивших распространение методов теории оптимального управления необходимо решать двухточечные краевые задачи для каждого режима, что *требует разрешения противоречия между точностью решения задачи синтеза и его сложностью, а порой возможностью.*

Это связано с тем, что для нелинейных динамических систем проблема синтеза в общем случае по настоящее время не разрешена.

На основе методов теории регуляризации или инвариантного погружения получаются алгоритмы калмановской структуры, которые, как правило, требуют дальнейшей адаптации, в том числе в связи с необходимостью определения параметров ММ и синтезированных на их основе алгоритмов.

Таким образом, синтез систем управления также требует разрешения параметрической неопределенности. В зависимости от преобладающего характера протекающего процесса идентификация параметров традиционно осуществляется на основе теории статистического синтеза или оптимального управления, что определяет вид ММ динамики параметров и структуру построенного на ее основе алгоритма. Поэтому *задача идентификации требует разработки новых методов оценивания параметров, обеспечивающих разрешение аналогичного указанному выше **противоречия** между точностью оценивания, устойчивостью и вычислительной сложностью соответствующих вычислительных процедур.*

Практическая реализация алгоритмов управления, оценки и идентификации связана с разработкой ПО, метрологически значимая часть которого вносит свой вклад в повышение эффективности ИУС. Это приводит к необходимости рассмотрения не только вопросов синтеза алгоритмов, но и разработки измерительных процедур, а также аттестации ПО.

Итак, классические методы решения оптимизационных задач оценки, управления и идентификации достигли определенного предела в улучшении показателей качества бортовых и стационарных ИУС. Потому *их применение в основе процедур интеллектуализации нелинейных динамических систем не позволяет достичь потенциальной эффективности и на практике требует поиска компромисса между результативностью программно-алгоритмического обеспечения (ПАО) ИТИУРЭС и оперативностью применения по целевому назначению.*

В связи с изложенным в качестве **предмета исследования** выбраны *методы синтеза алгоритмов управления, оценки и идентификации ИТИУРЭС в условиях нестационарных возмущений в областях фазового пространства с нечеткими границами.*

В соответствии с целевым подходом системного анализа один из путей снижения сложности задач управления, оценки и идентификации может состоять в использовании процедуры поэтапной оптимизации, базирующейся на гипотезе ограниченности стохастических возмущений по сравнению с априорно неизвестными возмущениями. Тогда решение оптимизационной задачи сводится к решению последовательности экстремальных задач. В условиях априорной неопределенности характера возмущений целесообразно выделить следующую последовательность экстремальных задач – построение динамических ММ объектов наблюдения и синтез алгоритмов оценки на их основе. Задача построения динамических ММ может быть представлена как экстремальная обратная задача динамики систем, удовлетворяющих вариационным принципам. Решение такой вариационной задачи может стать основой синтеза нелинейных многорежимных законов управления лагранжевыми динамическими системами. Построенные на их

основе динамические модели могут отличаться от полученных с применением формирующего фильтра меньшей размерностью и нелинейной структурой. Это позволит снизить вычислительные затраты при применении процедур интеллектуализации, т.е. увеличить оперативность применения синтезированных алгоритмов в условиях неопределенности.

Таким образом, *цель исследования* состоит в *повышении эффективности ИТИУРЭС, динамика протекающих процессов в которых удовлетворяет уравнениям Лагранжа второго рода*. В исследовании каждому режиму функционирования ИИУС ставится в соответствие свой критерий, задаваемый функционалом с положительной подынтегральной функцией. Поэтому *эффективность понимается в смысле соответствующего режиму функционирования критерия с положительно определенной подынтегральной функцией*.

Достижение цели исследований возможно не единственным образом. Для преодоления сопутствующих получившим распространение методам решения оптимизационных задач оценки, управления и идентификации недостатков предлагается ограничиться рассмотрением динамических систем, удовлетворяющих принципам аналитической механики. Это позволяет разбивать нечеткое фазовое пространство на соответствующие режимам функционирования области на основе анализа динамических инвариантов на гиперповерхности переключения. Тогда класс исследуемых систем задается уравнениями Лагранжа второго рода и Аппеля, которые для исследуемых стационарных голономных систем эквивалентны. В частности, считая, что фазовая траектория в соответствии с принципом Гамильтона-Остроградского должна обеспечивать стационарность интеграла действия, возможно поставить задачу синтеза в нечетком фазовом пространстве с использованием свертки интеграла действия и критерия эффективности, что обеспечит редукцию задачи Лагранжа к изопериметрической задаче. Изучение приращения построенного таким образом функционала «позволяет составить определенное представление о характерных особенностях оптимальных условий. При этом, как правило, вследствие упрощающих допущений реализация подобных процедур возможна не единственным способом, что порождает множество решений». Следовательно, применение принципа взаимности в совокупности с принципами аналитической механики – источник новых постановок и решений задач синтеза стационарных голономных систем, который обеспечит реализацию конструктивного подхода системного анализа.

Таким образом, **научная проблема исследования** – *разработка методов синтеза ИТИУРЭС на множестве решений оптимизационных задач управления, оценки и идентификации для улучшения качества их функционирования в условиях нечеткости фазового пространства лагранжевых голономных систем на основе поэтапной оптимизации с редукцией экстремальных задач Лагранжа*.

Для решения сформулированной научной проблемы проведена ее декомпозиция на следующие частные научные проблемы (ЧНП):

а) разработка методов синтеза управлений удовлетворяющими уравнениям Лагранжа второго рода динамическими системами с построением на их основе нечетких алгоритмов;

б) разработка методов синтеза алгоритмов оценки и фильтров в условиях нестационарных возмущений с построением динамических ММ и синтез интеллектуальных алгоритмов оценки, обеспечивающих адаптацию к наблюдаемой динамике;

в) разработка методов и алгоритмов структурно-параметрического синтеза и идентификации лагранжевых систем;

г) выработка рекомендаций по применению методов и синтезированных на их основе алгоритмов оценки, идентификации, управления при разработке ПАО ИТИУРЭС.

Новые научные результаты, выдвигаемые для публичной защиты:

1. Постановки задач синтеза для ИТИУРЭС, динамика протекающих процессов в которых удовлетворяет ММ в форме уравнений Лагранжа второго рода.

2. Условие для асинхронной вариации для динамических систем, удовлетворяющих принципу Даламбера-Лагранжа, определяющее краевые задачи синтеза управлений для динамических систем, удовлетворяющих принципам Гаусса и Гамильтона-Остроградского.

3. Методы:

а) построения поверхности переключения как синтезирующей функции на основе фазовых траекторий и гипотезы о стационарности Гамильтониана для решения задач управления, оценки и идентификации;

б) синтеза управлений лагранжевыми и аппелевыми системами с использованием энергии ускорений и интеграла действия;

в) синтеза алгоритмов оценки в непрерывном и дискретном времени на основе построения динамических ММ с использованием поэтапной оптимизации и стесняющих краевую задачу условий;

г) структурной адаптации дискретных фильтров на основе динамических ММ;

д) идентификации параметров и структурно-параметрической идентификации лагранжевых динамических систем;

е) интеллектуализации измерительных процедур на базе использования адаптивных ММ и теории регуляризации.

4. Алгоритмы синхронизации, управления, оценки параметров процессов и динамических систем, удовлетворяющие принципу Гамильтона-Остроградского.

5. Научно обоснованные рекомендации и технические предложения по построению ПАО и устройств ИТИУРЭС, на основе которых разработаны структуры специализированных вычислителей, позволяющие реализовать интеллектуальную обработку данных в реальном масштабе времени.

Научная новизна результатов, выдвигаемых для публичной защиты, состоит в том, что

а) впервые предложены постановки задач синтеза ИТИУРЭС, отличающиеся от известных процедурой редукции к изопериметрическим задачам на основе использования уравнения Даламбера – Лагранжа, энергии ускорений Аппеля или интеграла действия для построения расширенного целевого функционала, что позволяет решать задачи управления, оценки и идентификации нелинейных динамических систем;

б) впервые получены условие для асинхронной вариации и вытекающие из него краевые задачи синтеза управлений, которые отличаются от известных ограничениями для динамических систем, удовлетворяющих принципам Гаусса и Гамильтона-Остроградского, что позволяет установить множество решений экстремальных задач;

в) разработаны методы построения поверхности переключения как синтезирующей функции, которые отличаются от известных за счет использования фазовых траекторий и гипотезы о стационарности Гамильтониана для решения задач управления, оценки и идентификации;

г) разработаны методы синтеза управлений, которые отличаются от известных способами построения обратных связей в замкнутой форме для динамических систем, что не требует решения ДТКЗ;

д) разработаны методы синтеза алгоритмов оценки в непрерывном и дискретном времени, которые отличаются от известных способами построения обратных связей в замкнутой форме за счет поэтапной оптимизации и построения динамических ММ с использованием стесняющих краевую задачу условий, что позволяет получать оценки параметров измерительных процессов при ограничениях на вычислительные затраты;

е) разработан метод структурной адаптации дискретных фильтров на основе динамических ММ, который отличается от известных способом построения обратных связей в замкнутой форме за счет поэтапной оптимизации с редукцией экстремальных задач лагранжевых систем, что позволяет получать оценки параметров измерительных процессов в условиях регулярных возмущений;

ж) разработаны методы идентификации параметров и структурно-параметрической идентификации лагранжевых динамических систем, которые отличаются от известных способами построения обратных связей в замкнутой форме за счет гипотезы о лагранжевой динамике параметров, что приводит к декомпозиции системы идентификации на подсистемы оценки состояния и оценки параметров;

з) разработан метод интеллектуализации измерительных процедур, отличающийся от известных за счет использования адаптивных ММ и теории регуляризации в совокупности с процедурой целенаправленного выбора наиболее близкой к истинному значению оценки измеряемого параметра;

и) синтезированы алгоритмы синхронизации, управления, оценки параметров процессов и динамических систем, удовлетворяющих принципу Гамильтона-Остроградского, отличающиеся от известных структурой за счет использования вариационных принципов при построении обратных связей для формирования базы правил ИТИУРЭС;

к) разработаны научно обоснованные рекомендации и технические предложения по построению ПАО и устройств ИТИУРЭС, которые отличаются от известных за счет структур специализированных вычислителей, позволяющих реализовать интеллектуальную обработку данных в реальном масштабе времени.

Новые научные положения, выдвигаемые для публичной защиты:

1. Решена научная проблема разработки методов синтеза ИТИУРЭС на множестве решений оптимизационных задач управления, оценки и идентификации

лагранжевых систем;

2. Решение оптимизационных задач лагранжевых систем с использованием интеграла действия как ограничения приводит к изопериметрической задаче отыскания условий минимума расширенного функционала;

3. Разрешение полученной двухточечной краевой задачи лагранжевых систем возможно не единственным способом, что порождает множество решений, для отдельных из них удается установить связь с известными результатами теории оптимального управления и аналитической механики;

4. Синтезированные законы управления обеспечивают построение базы правил нечетких алгоритмов управления;

5. Синтезированные динамические ММ обеспечивают синтез нечетких алгоритмов оценки и фильтров сопровождения;

6. Синтезированная измерительная процедура в условиях ориентирующего статуса результатов измерений выгодно отличается от измерительной процедуры калмановской структуры с классической переходной матрицей, поскольку позволяет уменьшить вероятность потери устойчивости малого беспилотного ЛА в полете при возникновении нештатной ситуации, вызванной отказом гироскопического датчика угловых скоростей и перемещений;

7. Использование условия максимума функции обобщенной мощности в условиях неопределенности относительно динамики протекающих процессов обеспечивает синтез алгоритмов «грубой» оценки и фильтров, которые в сравнении с фильтром Калмана (ФК) в среднем отличаются большей точностью.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии теории оптимального управления, оценивания и обработки измерительной информации в условиях неопределенности. В частности, разработаны методы синтеза ИТИУРЭС на основе поэтапной оптимизации с редукцией экстремальных задач лагранжевых систем, а также выработаны научно обоснованные рекомендации и технические предложения по построению алгоритмического базиса ИТИУРЭС, на основе которых разработаны структуры специализированных вычислителей, позволяющих реализовать интеллектуальную обработку данных в реальном масштабе времени. Полученные в исследовании новые научные результаты расширяют и углубляют представления об управляющих и информационных процессах, протекающих в контурах ИТИУРЭС.

Практическая значимость исследования заключается в том, что полученные результаты позволяют:

а) синтезировать квазиоптимальные законы управления нелинейными подвижными объектами для выполнения целевых задач, решаемых ИТИУРЭС в условиях неопределенности;

б) синтезировать алгоритмы оценки, позволяющие существенно сократить объем вычислительных затрат при обработке измерительной информации о состоянии маневрирующего ЛА при точности не хуже фильтра Калмана, что подтверждается результатами математического моделирования;

в) синтезировать фильтры сопровождения маневрирующих ЛА, отличающиеся точностью в сравнении с традиционными решениями калмановской

структуры;

г) синтезировать алгоритмы идентификации параметров микромеханических датчиков бортовых ИТИУРЭС;

д) снизить вычислительные затраты с использованием уравнений последовательной идентификации в сравнении с алгоритмами идентификации калмановской структуры;

е) строить измерительные процедуры с учетом статуса измерений бортовых ИТИУРЭС;

ж) на базе разработанных методов синтезировать интеллектуальные алгоритмы на основе решения последовательности оптимизационных задач управления, оценки и идентификации лагранжевых систем;

з) разработать специализированные вычислители, реализующие обработку измерительной информации в повторяющихся однородных вычислительных блоках в реальном масштабе времени;

и) на базе предложенных методов обеспечить оценивание параметров движения маневрирующих ЛА;

к) за счет применения разработанных на базе предложенных методов рекомендаций и технических предложений по построению ПАО ИТИУРЭС увеличить точность определения параметров движения маневрирующих ЛА в среднем на 15 – 22%.

Методология и методы исследования. Полученные результаты основаны на применении положений аналитической механики, теорий регуляризации, колебаний и управления, статистического синтеза, в частности, методов построения универсальных законов управления Матюхина В.И., построения поверхностей переключения Четаева Н.Г., негладкого анализа, инвариантного погружения, декомпозиции задачи синтеза ИИУС с использованием отражающей принцип оптимальности системного анализа теоремы Федунова Б.Е., декомпозиции стохастической задачи оценки с использованием поэтапной оптимизации, декомпозиции задач синтеза управлений лагранжевыми системами с использованием принципа декомпозиции Пятницкого Е.С. и др., методов конечно-разностной аппроксимации и нечеткой логики для доведения результатов исследования до практически реализуемой формы, параметризации неопределенностей, возникающих при структурно-параметрической идентификации лагранжевых динамических систем, статистическом моделировании, проведении экспериментов с использованием разработанных макетов СИ и ИУС (полетные контроллеры «Заря»).

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов подтверждается:

а) использованием основных принципов системного подхода, а также обоснованным выбором основных рамок исследования при постановке научной задачи и её решении;

б) корректным применением апробированных математических методов при проведении вычислений;

в) непротиворечивостью полученных результатов с известными работами ученых и специалистов в данной предметной области;

г) положительными заключениями экспертов на публикации в рецензируемых журналах перечня ВАК, наукометрических базах *Scopus* и *Web of Science*, а также совпадением результатов статистического моделирования с испытаниями и известными ранее результатами;

д) использованием результатов работы в виде составных частей фундаментальных научно-исследовательских работ (НИР) и прикладных опытно-конструкторских работ (ОКР), связанных с синтезом алгоритмов оценки параметров движения ТС.

Реализация и внедрение результатов работы. Об использовании и внедрении результатов исследования имеется 7 актов о реализации результатов научной работы из 7 организаций:

1. АО «ДОНТЕХМАШ» – в рамках НИОКР по гранту ФГП «Развитие» № 468ГРНТИС5/45570 внедрены патент и программа для ЭВМ для интеллектуального анализа дорожной сцены на базе методов структурной адаптации моделей движения (в рамках ЧНП 2).

2. АО «Горизонт» – в РЛС обзора летного поля типа «Аксай-М» применены при модернизации ПАО синтезированные на основе предложенных в [3, 4] методов алгоритмы (в рамках ЧНП 2).

3. ФГБУ «ГНМЦ» Министерства обороны России – при разработке «Пакета прикладных программ для автоматизированного сбора и поверки (калибровки) однопроводных пробников напряжения, электрических антенн, эквивалентов сети и измерительных токосъемников» реализован метод из [5] в части синтеза алгоритмов оценки динамической погрешности ПО (в рамках ЧНП 2, 4).

4. Испытательная база НИЦ Министерства обороны России – в ПАО БПЛА (с *iNav*) реализованы разработанные методы (в рамках ЧНП 2).

5. ФГБНУ «Аналитический центр» – в НИР «Научно-технические пути создания средств обнаружения неоднородностей в почве на основе технологий радиометрии» (шифр «Эврика-2023-ЭАЦ») внедрены патенты для повышения эффективности применения технологий радиометрии (в рамках ЧНП 3).

6. ПАО «Интелтех» – в СЧ НИР «Исследование возможности применения изделий и информации дистанционного зондирования Земли в задачах навигации и мониторинга флота» (шифр «Аврора») внедрены патенты для повышения эффективности ИУС на основе цифровой обработки сигналов (в рамках ЧНП 2, 3).

7. ФГБОУ ВО «ДГТУ» – в учебном процессе при подготовке обучающихся по направлению подготовки 11.04.01 «Радиотехника», профиль «Интеллектуальные алгоритмы обработки информации в радиотехнике» (в рамках ЧНП 2, 3).

Область исследования. Настоящие положения и результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика по пунктам 1, 2, 4, 7.

Публикации материалов исследования. По тематике исследования всего проиндексировано в *Elibrary* и опубликовано 229 работ, из них 51 статья в журналах из перечня ВАК по шифру специальности 2.3.1 [1 – 51], 23 статьи в других рецензируемых журналах из перечня ВАК, 6 монографий, 78 работ в сборниках статей и научных докладов, а также тезисов докладов, 71 объект

интеллектуальной собственности.

Личное участие соискателя в полученных результатах. Основные публикации, позволившие сформулировать положения и результаты, выносимые на защиту: [10] (авт. вклад состоит в анализе актуальности исследования, математической постановке задачи синтеза нечетких систем управления, которые удовлетворяют принципу Гамильтона-Остроградского, синтезе нечеткого управления); [12] (авт. вклад состоит в анализе актуальности исследования, постановке задачи синтеза ИИУС, определении направления ее решения, решении задачи синтеза, мат. моделировании и анализе его результатов); [20] (авт. вклад состоит в постановке задачи синтеза для аппелевых динамических систем, использовании энергии ускорений для получения уравнений двухточечной краевой задачи и ее решении для модельного примера с использованием функций Крылова, мат. моделировании и анализе его результатов); [52] (авт. вклад состоит в разработке процедуры редукции, исследовании приращения расширенного функционала, получении двухточечной краевой задачи и стесняющих ее условиях, процедуре квазиоптимального структурного синтеза управления); [21] (авт. вклад состоит в постановке задачи синтеза для удовлетворяющих принципу Даламбера-Лагранжа систем, применении процедуры редукции, получении условия для асинхронной вариации, установлении связи между ранее полученными на основе принципа Гаусса и Гамильтона-Остроградского краевыми задачами, синтез управления, мат. моделирование и его анализ); [37] (авт. вклад состоит в постановке задачи синтеза многорежимных регуляторов); [17] (авт. вклад состоит в постановке задачи синтеза алгоритмов «грубой» оценки, в которой использованы элементы процедуры редукции изопериметрической задачи к задаче Лагранжа); [2] (авт. вклад состоит в разработке метода построения синтезирующей функции, названного «методом фазовых траекторий», синтезе управления и мат. моделировании); [53] (авт. вклад состоит в анализе второго приращения расширенного функционала в задачах оценки, модификации метода фазовых траекторий для применения для решения задач оценки, а также синтезе, мат. моделировании уравнений сопровождения); [15] (авт. принадлежит метод синтеза управления с использованием условия максимума функции обобщенной мощности и процедура применения преобразования Лежандра к функции Гамильтона для построения поверхности переключения, а также установление связи между результатами, получаемыми с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина и на основе условия максимума функции обобщенной мощности, а также законы управления); [54] (авт. вклад состоит в разработке метода построения синтезирующей функции с использованием гипотезы о стационарности гамильтониана гиперповерхности переключения, что в отличие от ранее полученного в [15] автором результата позволило воспользоваться принципом освобождаемости для учета кинематических неголономных связей, это привело к получению уравнений сопровождения); [32] (авт. вклад состоит в модификации метода фазовых траекторий с учетом формы кинетической энергии и анализе результатов мат. моделирования); [45] (авт. на основе исследования асинхронной вариации расширенного функционала получено условие уравнения последовательной идентификации ММ динамических систем, а также метод

фазовых траекторий для задач идентификации); [44] (*авт. вклад* состоит в применении гипотезы о стационарности функции Гамильтона для построения синтезирующей функции в задаче идентификации, а также мат. моделирование); [46] (*авт. принадлежит* метод синтеза параметрического управления); [51] (*авторский вклад* состоит в анализе приращения расширенного функционала в задачах оценки, мат. моделировании и анализе его результатов); [47] (*авт. вклад* состоит в разработке метода оценки параметров движения управляемого ЛА с построением опорной траектории); [55] (*авт. вклад* состоит в разработке метода синтеза алгоритмов оценки динамической погрешности программного обеспечения измерительных систем и СИ); [56] (*авт. вклад* состоит в анализе актуальности, постановке задачи синтеза с учетом статуса результатов измерений, разработке полетного контроллера для натурного моделирования); [8] (*авт. вклад* состоит в построении дискретной динамической модели системы фазовой автоподстройки частоты на основе условия максимума функции обобщенной мощности); [34] (*авт. вклад* состоит в построении обобщенной структуры уравнений «грубой оценки»); [29] (*авт. вклад* состоит в синтезе динамической модели движения); [41] (*авт. вклад* состоит в применении метода инвариантного погружения к двухточечной краевой задаче и соответствующие уравнения фильтра сопровождения); [14] (*авт. вклад* состоит в разработке алгоритмов «грубой оценки»); [38] (*авт. вклад* состоит в разработке метода структурной адаптации дискретных алгоритмов и уравнениям и синтезе уравнений фильтра, использованных при мат. моделировании); [30] (*авт. принадлежат результаты* структурного синтеза адаптивной модели с декомпозицией по целевому функционалу); [25] (*авт. вклад* состоит в синтезе адаптивной модели состояния системы, которая используется для синтеза фильтра сопровождения); [57] (*авт. предл.* постановка задачи структурно-параметрической идентификации лагранжевых систем, разработан метод структурно-параметрической идентификации лагранжевых систем); [35] (*авт. получены* уравнения последовательной идентификации ММ динамических систем, произведена идентификация параметров системы фазовой автоподстройки частоты); [49] (*авт. вклад* состоит в разработке метода многопараметрической идентификации конструктивных параметров подвижных объектов на основе условия максимума функции обобщенной мощности); [50] (*авт. прин.* оценка эффективности использования теории регуляризации для интеллектуализации алгоритмов идентификации); [19] (*авт. вклад* состоит в разработке процедуры, реализующей многорежимность с использованием синтезированных на основе условия максимума функции обобщенной мощности управлений); [7] (*авт. принадлежит* метод квазиоптимального синтеза многорежимных систем синхронизации в условиях регулярных возмущений); [18] (*авт. прин.* метод интеллектуализации измерительных процедур на базе использования адаптивных моделей динамического процесса и теории регуляризации); [5] (*авт. вклад* состоит в синтезе интеллектуальных алгоритмов обработки информации инерциальных датчиков в условиях деградации измерительного канала и его мат. моделировании); [3] (*авт. вклад* состоит в решении задачи структурного синтеза, что приводит к уравнениям оценки калмановской структуры, для параметрической адаптации которых

разработана нечеткая стратегия); [1, 11, 16, 33, 36, 39] (*авт. вклад* состоит в синтезе алгоритма управления лагранжевой системой, мат. моделировании и анализе его результатов); [24] (*авт. вклад* состоит в построении приближенного решения уравнений идентификации и анализе результатов мат. моделирования); [43] (*авт. вклад* состоит в синтезе алгоритмов последовательной идентификации параметров измерительного преобразователя для вариационного метода); [28] (*авт. вклад* состоит в анализе прагматической ситуации и результатов мат. моделирования); [11] (*авт. вклад* состоит в решении задачи конструирования демпфера с квазиоптимальным законом подавления вибраций технологических агрегатов); [27] (*авт. вклад* состоит в анализе возможности применения структуры разработанных квазиоптимальных многорежимных законов для нелинейной коррекции известных решений, которая позволяет провести учет динамических свойств объекта управления и погрешности линеаризации исходной нелинейной модели); [26] (*авт. вклад* состоит в анализе применения законов управления, построенных на основе метода квазиоптимального синтеза с применением аппарата нечеткой логики); [6] (*авт. вклад* состоит в получении соотношений, характеризующих ошибки определения местоположения привязного дрона по данным радара об угловом положении реперной точки); [40] (*авт. вклад* состоит в анализе функционирования разработанного фильтра); [9, 13] (*авт. вклад* состоит в анализе прагматической ситуации и результатов мат. моделирования); [4, 31] (*авт. вклад* состоит в статистическом моделировании алгоритма оценки и анализе его результатов); [42] (*авт. вклад* состоит в представлении условий минимума целевого функционала задачи идентификации в обобщенной форме, мат. моделировании и анализе его результатов); [24] (*авт. вклад* состоит в аппроксимации уравнений чувствительности и анализе результатов мат. моделирования); [23, 48] (*авт. вклад* состоит в синтезе уравнений идентификации параметров и их моделировании).

Апробация результатов исследования. Работа направлена на обеспечение синтеза алгоритмов управления и оценки состояния нелинейных динамических систем в нечетком топологическом пространстве на множестве решений оптимизационных задач с использованием условий, стесняющих полученные краевые задачи, в частности, условия максимума функции обобщенной мощности. Исследование соответствует направлению из Стратегии НТР РФ, поскольку решение сформулированной проблемы непосредственно связано с повышением эффективности функционирования современных ИУС на базе перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, созданием систем обработки больших объемов данных, искусственного интеллекта для решения задач вторичной обработки информации в целях оценки параметров и состояния управляемых систем, управления движением беспилотных аппаратов, повышения эффективности функционирования навигационных, геоинформационных, космических систем.

Диссертационная работа выполнялась в рамках 15 НИР и НИОКР, в 7 из которых автор являлся руководителем.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность работы, определены объект, предмет и цель исследования. Проведен краткий анализ современного состояния предметной области и сформулированы общая и частные задачи научного исследования.

В **первой главе** выбран объект исследования. На основе его анализа установлено, что ключевым требованием к программно-алгоритмическому обеспечению ИТИУРЭС является требование обеспечения экстремальных сценариев их функционирования, которые в работе ограничиваются прагматическими задачами управления и обработки измерительной информации о состоянии подвижных объектов. В рамках системного анализа это, прежде всего, связано с построением ММ объекта исследования, что потребовало рассмотрения концептуальной модели ИТИУРЭС. В результате установлено, что разработка ИТИУРЭС не утратила своей научной актуальности. Это связано с тем, что каждую проблемную субситуацию (ПрС/С) можно представить через оптимизационную задачу определенного типа, а решение оптимизационных задач для нелинейных систем – известная неразрешенная научная проблема. Практическая необходимость ее разработки определяется анализом проблем функционирования и противоречиями в требованиях к ИТИУРЭС. В соответствии с методологией системного анализа для формализации цели исследования проведен анализ показателей и критериев эффективности функционирования ИТИУРЭС. Это позволило проанализировать альтернативы в части синтеза ИТИУРЭС и сформулировать цель исследования. Ее достижение связано с решением формализованной научной проблемы. Анализ путей ее разрешения привел к построению дерева целей и формулировкам частных научных задач исследования.

Во **второй главе** рассмотрен подход к синтезу законов управления нелинейными динамическими системами, которые характеризуются множеством $n_{PS} \in \mathbb{N}$ ($n_{PS} \geq 2$) режимов функционирования и их нечеткое фазовое пространство может быть представлено совокупностью m областей. Считая, что в каждой из областей фазовая траектория в соответствии с конкретным вариационным принципом должна обеспечивать стационарность некоторого инварианта в нечетком фазовом пространстве, возможно поставить задачу синтеза с использованием его свертки и критерия эффективности, что обеспечит редукцию задачи Лагранжа к изопериметрической задаче. Для динамических систем, удовлетворяющих принципу Даламбера-Лагранжа, когда

$$\int_{t_0}^{t_1} \sum_{j=1}^{3N} (m_j \ddot{x}_j - X_j(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})) \delta x_j dt = 0, \quad (1)$$

редукция экстремальной задачи синтеза управления типа Лагранжа к изопериметрической задаче определяется сверткой

$$J = J_1 + \lambda \int_{t_0}^{t_1} \sum_{j=1}^{3N} (m_j \ddot{x}_j - X_j) \delta x_j dt, \quad (2)$$

где $[t_0, t_1] \subset R$ – заданные интервалы времени; $\mathbf{x} \in R^l$ – вектор декартовых

координат, $l=3N$; N – число материальных точек; m_j – масса p материальной точки; X_j – проекция на i ось равнодействующей активных сил, приложенных к p материальной точке и реализующих наблюдаемое изменение состояния; тут и далее точками обозначается производная по времени; $\mathbf{u} \in \bar{G}_u$; $\bar{G}_u$ – замкнутое множество суммируемых функций; λ – множитель Лагранжа; $J_1 = \int_{t_0}^{t_1} F'(\mathbf{x}) dt$ – целевой функционал; $F'(\mathbf{x})$ – непрерывная вместе с частными производными по всей области определения знакопостоянная функция.

Таким образом, изопериметрическая задача состоит в поиске среди всех соответствующих активным силам $\mathbf{X}(\mathbf{u}, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})$ траекторий $\mathbf{x} \in R^l$, тех из них, которые доставляют функционалу (1) нулевое значение и обеспечивают минимум целевому функционалу J_1 при ограничениях на управления $\mathbf{u} \in \bar{G}_u$.

Решение такой задачи требует исследования асинхронной вариации (2), что приводит к получению условия для асинхронной вариации

$$\sum_{j=1}^{3N} \int_{t_0}^{t_1} \left[\frac{\partial F'}{\partial x_{ej}} - \lambda X_{ej}(\mathbf{u}_e, \tilde{\mathbf{x}}, \dot{\tilde{\mathbf{x}}}) \right] \delta x_j dt \geq \sum_{j=1}^{3N} \int_{t_0}^{t_1} \left[\frac{\partial F'}{\partial x_j} - \lambda X_j(\mathbf{u}, \tilde{\mathbf{x}}, \dot{\tilde{\mathbf{x}}}) \right] \delta x_j dt, \quad (3)$$

где $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} + \delta \mathbf{x}$. Изучение этого неравенства приводит к двухточечным краевым задачам (ДТКЗ). Положив принцип Гамильтона-Остроградского в основу динамики с учетом ограничений (коэффициенты матрицы кинетической энергии T непрерывно дифференцируемы, $\psi_0(\dot{q}_1^2 + \dots + \dot{q}_n^2) \leq T \leq \psi_1(\dot{q}_1^2 + \dots + \dot{q}_n^2)$, $\psi_j = \text{const}$, $\psi_j > 0$, $j = \overline{0,1}$) и свойств вариаций обобщенных координат получено (то же, что и для постановки задачи для управляемой динамической системы, описываемой уравнением Лагранжа второго рода):

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} = Q_s + \lambda^{-1} V_s, \quad q_s(t_0) = q_{s0}, \dot{q}_s(t_0) = \dot{q}_{s0}, q_s(t_1) = q_{s1}, \dot{q}_s(t_1) = \dot{q}_{s1},$$

$$\left[\lambda(A - T) + F \right] \Big|_{t_0}^{t_1} = 0, t \in [t_0, t_1], \quad \lambda = \frac{-\sum_{s=1}^n V_s}{\sum_{s=1}^n \left(-\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} + \frac{\partial T}{\partial q_s} + Q_s \right)} = \text{const}, \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^n \lambda \delta Q_s(t) \dot{q}_s(t) \leq 0, \quad t \in [t_0, t_1],$$

где $V_s = \sum_{j=1}^{3N} \frac{\partial F'}{\partial x_j} \frac{\partial x_j}{\partial q_s} = \sum_{s=1}^n \frac{\partial F(\mathbf{q})}{\partial q_s}$ – фиктивные обобщенные силы, A – работа

обобщенных сил. Разрешение (4) и построение программной экстремальной траектории является достаточно сложной задачей, которая может быть решена различными численными методами: пристрелки, итераций и т.д. – с текущим поиском максимума функции обобщенной мощности. Но вместе с этим эта система

дает возможность решения задачи квазиоптимального структурного синтеза, поскольку $Q_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = \lambda^{-1} \mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \dot{q}_s(t)$, что приводит к следующей обратной связи

$$U_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = \lambda^{-1} [\mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \dot{q}_s(t) + V_s(\mathbf{q}(t))], \quad s = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где $\mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))$ – синтезирующая функция. Использование прикладных способов учета ограничений на класс допустимых управлений позволяет записать

$$U_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = h_s \text{sat} [\lambda^{-1} \Psi_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))] = \begin{cases} h_s, & \lambda^{-1} \Psi_s > h_s, \\ \lambda^{-1} \Psi_s, & |\lambda^{-1} \Psi_s| \leq h_s, \\ -h_s, & \lambda^{-1} \Psi_s < -h_s, \end{cases} \quad (6)$$

$$\Psi_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) = \mu_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \dot{q}_s(t) + V_s(\mathbf{q}(t)); \quad h_s = \text{const.}$$

При $\lambda \rightarrow 0$ управление (6) имеет релейный характер.

В основе методов построения синтезирующей функции лежит аксиома, заключающаяся в том, что на линии переключения выполняются законы сохранения количества движения и энергии. Она позволяет установить связь синтезирующей функции с интегралами движения, мерами действия силы или кинематическими характеристиками траектории. Это дает возможность предложить структуру множества квазиоптимальных решений, полученных в форме синтеза, для рассмотренного класса задач управления.

Метод фазовых траекторий как основа структурного синтеза квазиоптимальных систем на базе закона изменения количества движения (обобщенного импульса – $\mathbf{p}$) и условия transversальности из (4) определяет следующее выражение:

$$\mu_s = -\lambda \left| \frac{dp_s}{dq_s} \right|. \quad (7)$$

Метод построения синтезирующей функции на основе гипотезы о стационарности Гамильтониана на гиперповерхности переключения позволяет получить

$$\mu_s = -|\dot{q}_s| (L_s |V_s| + \varepsilon_s)^{-1}, \quad L_s = DA_{ss} (\lambda V_{ss})^{-1}, \quad (8)$$

где L_s, ε_s – параметры. Предложена геометрическая интерпретация синтезирующей функции.

В исследовании показано, что на оптимальной траектории синтез управляющей обобщенной силы лагранжевой динамической системы может быть построен на основе условия максимума функции обобщенной мощности, с использованием которого получены известные оптимальные решения задач А. Фуллера и Л.С. Понтрягина.

Из принципа Гаусса с учетом ограничений свойств вариаций обобщенных координат из (3) следует ДТКЗ

$$\sum_{s=1}^n \left[\lambda \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial S}{\partial \ddot{q}_s} + \frac{\partial F}{\partial q_s} \right] = 0, \quad q_s(0) = q_s^0, \quad \dot{q}_s(0) = \dot{q}_s^0; \quad t = t_1, \quad q_s(t_1) = q_s^1, \quad \dot{q}_s(t_1) = \dot{q}_s^1, \quad (9)$$

где S – энергия ускорений. Развертывание этого уравнения целесообразно производить для конкретных случаев задач синтеза. Для линейных систем из (9), например, с использованием функций Крылова, получаются точные аналитические решения. Решение задачи синтеза управления динамической системой $\ddot{q}=U$, переводящего ее из начального состояния в состояние покоя из условия минимума целевого функционала быстродействия имеет вид:

$$U = \left(6A^2(q-D) + (6ABC - 2B^3) \right) \left(2A(\dot{q}-C) - (2B^2 - 6AC) \right)^{-1}, \quad (10)$$

где A, B, C, D – параметры, которые определяются из краевых условий. Это решение в точности совпадает с решением из условия максимума функции обобщенной мощности из (4), когда для лагранжевой динамической системы вводится дополнительное ограничение на управление $J_2 = \int_{t_0}^{t_1} U^2 dt \rightarrow \min$, которое

присутствует в постановке задачи для аппелевой динамической системы вследствие вида принуждения. Результаты математического моделирования позволяют утверждать, что (10) обеспечивает безударный режим изменения состояния динамической системы с минимальным объемом энергетических затрат в сравнении с решением Г.Н. Разоренова.

Следуя Черноусько Ф.Л., в новом методе синтеза терминальных управлений с использованием энергии ускорений для нелинейных систем проведена декомпозиция ММ с учетом того, что $|U_s| \leq U_s^0$ ($U_s^0 > 0$ – постоянные) $A(q) = A_* + [A(q) - A_*] = A_* + \tilde{A}(q)$, откуда (9) преобразуется к следующему виду:

$$\lambda \sum_{s=1}^n \frac{d^2 u_s}{dt^2} + \sum_{s=1}^n \frac{\partial F}{\partial q_s} = 0, q_s(0) = q_s^0, \dot{q}_s(0) = \dot{q}_s^0; t = t_1, q_s(t_1) = q_s^1, \dot{q}_s(t_1) = \dot{q}_s^1, \quad (11)$$

где $u_s = (1 - \rho_s)U_s$ – управления системой после ее декомпозиции, A_* – некоторая постоянная симметричная, положительно определенная матрица размера $n \times n$, в качестве которой может быть выбрана диагональная матрица A , если $a_{sk} = \text{const}$. Таким образом, в случае нелинейной системы задача синтеза решается в два этапа. Первый этап состоит в задании движения динамической системы в соответствии с (11). Второй этап заключается в построении управления исходя из управлений $U_s = A_{*s}\ddot{q}_s + N_s + W_s$, W_s , которые трактуются как обобщенные силы, возмущающие траекторию.

На основе ДТКЗ (4) и (9) в исследовании решены задачи синтеза управлений спутником, предложен метод синтеза ограниченных управлений лагранжевыми системами в условиях внешних неконтролируемых воздействий и метод синтеза параметрических управлений транспортных средств, предложен вариант конструирования демпфера с квазиоптимальным законом подавления вибраций технологических агрегатов, исследованы связи полученных решений с известными, синтезированы многорежимные управления. Для парирования неопределенностей применяется нечеткая логика. Конструктивность синтезированных управлений демонстрируется путем расчета частных показателей

эффективности на основе мат. моделирования, в частности, для задачи синтеза системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ или на англ. *PLL*) для режима захвата частоты

$$T \frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{d\phi}{dt} + \Omega_y F(\phi) = \omega_n + U, \phi(0) = \phi_0, \dot{\phi}(0) = \dot{\phi}_0, J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \phi^2 dt, \quad (12)$$

который является критически важным в приёмных трактах перспективных спутниковых систем БПЛА («Сфера», «OneWeb», «Starlink») (система связи – элемент транспортной инфраструктуры по 16-ФЗ). Изображенное на рис. 1

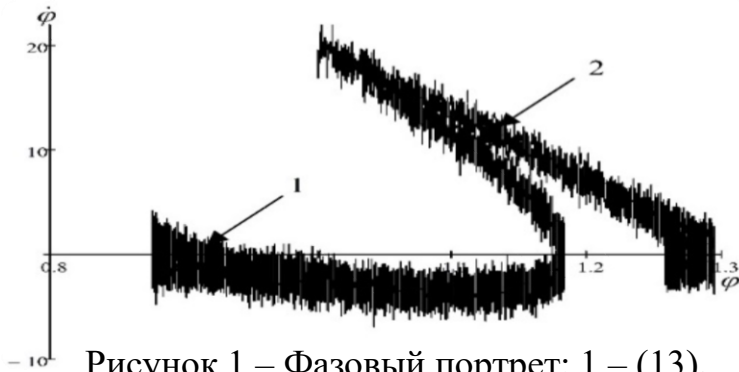


Рисунок 1 – Фазовый портрет: 1 – (13), 2 – ФАПЧ с корректирующей RC-цепью

$$U = -\Omega_y \lambda^{-1} |U| \operatorname{sign} \left(\frac{D|\dot{\phi}| \dot{\phi}}{L|\phi| + \varepsilon} \frac{T}{\Omega_y} + \phi \right), \quad (13)$$

где T – постоянная времени; $\phi(t) = \phi_c(t) - \phi_0(t)$ – разница фаз сигнала и подстраиваемого генератора; $F(\phi)$ – выход фазового дискриминатора; $\omega_n = \dot{\phi}_c(t_0) - \dot{\phi}_0(t_0)$ – разность угловых частот сигнала и подстраиваемого генератора в начальный момент времени t_0 ; Ω_y – полоса захвата.

Установлено, что система позволяет уменьшить время захвата примерно в 2 – 6 раз и увеличить примерно в 1,5 раза полосу удержания в сравнении с однозвенным RC-фильтром. В соответствии с рис. 2 при расчетном времени захвата

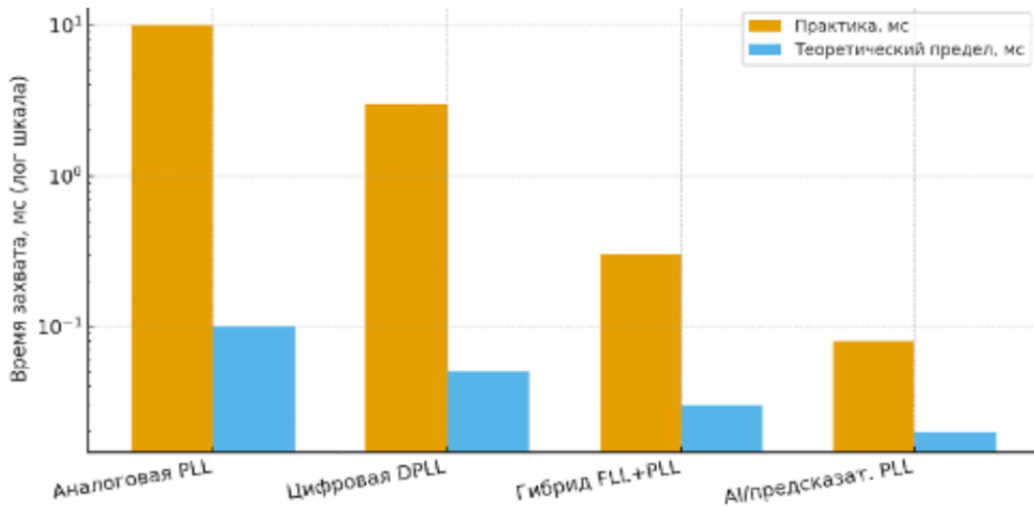


Рисунок 2 – Сравнение показателей эффективности

новой ФАПЧ 9 мс, по этому показателю ее эффективность позволяет вплотную приблизиться к показателям эффективности цифровых ФАПЧ.

В рамках проведенного исследования в среде

симуляции *GAZEBO* разработан цифровой двойник мультироторного БПЛА (рис. 3), в котором реализовано одно из новых управлений (5) с (8). Время выполнения



Рисунок 3 – Цифровой двойник БПЛА

летного задания цифровым двойником с типовым ПИД-регулятором составляет 80 с, а с алгоритмом на основе предлагаемого закона управления – 70 с (реализовано в полетном контроллере «Заря»).

В соответствии с принципом связности системного анализа полученные во второй главе результаты

могут быть положены в основу решения задач оценки в части построения динамических ММ наблюдаемых процессов, а на их основе – алгоритмов оценки, а также измерительных процедур и фильтров. Это также обеспечит реализацию принципа вариативности системного подхода.

В **третьей главе** поставлена задача синтеза адаптивных алгоритмов оценки параметров измерительных сигналов ИТИУРЭС как стохастическая задача оценки. Осуществлена ее редукция к детерминированным задачам типа оптимального управления лагранжевыми динамическими системами, регуляризация задачи оценки и ее декомпозиция на задачи обоснованного выбора структур ММ наблюдаемых процессов, оценки и адаптации синтезированных алгоритмов оценки.

Построены новые динамические ММ с общей структурой следующего вида:

$$\ddot{\tilde{x}}_s = \lambda^{-1} \left[\mu_s \left(\tilde{x}, \dot{\tilde{x}} \right) \dot{\tilde{x}}_s - R_{\xi ss}^{-1} (y_s - \tilde{x}_s) \right], \quad s = \overline{1, n}, \quad (14)$$

где R_{ss} – диагональные элементы ковариационной матрицы; y_s – наблюдения с известными локальными характеристиками; $\tilde{x}_s$ – в общем случае криволинейные неортогональные координаты.

Метод выбранных траекторий в задаче оценки при построении синтезирующей функции приводит к следующему результату:

$$\mu_s = -\lambda \left| \frac{\dot{\tilde{x}}_s}{\tilde{x}_s} \right|, \quad L_s = \frac{b_s}{a_s} = \text{const}. \quad (15)$$

Метод построения синтезирующей функции на основе гипотезы о стационарности Гамильтониана в задаче оценки приводит к следующему выражению:

$$\mu_s = - \frac{\lambda \left| \dot{\tilde{x}}_s \right|}{\left[y_s - \tilde{x}_s \right] + \sqrt{\lambda R_{\xi ss}^{-1} \varepsilon_s}}. \quad (16)$$

На основе (14), аппроксимации (15) и выражения (16) построена ММ *TS* типа *MISO*, которая по классификации некоторых авторов может быть отнесена к *2D* ММ. Показано, что при ограничениях на объем вычислительных затрат она может стать конструктивной основой синтеза алгоритмов «грубой оценки». Это демонстрируется на примерах обработки радиолокационной информации и

результатов измерений датчиков полетных контроллеров. ГОСТ Р 8.654–2015 и МИ 2955–2010 определяют процедуру метрологической аттестации программного обеспечения подобных систем. Такая аттестация может быть реализована на основе нового метода синтеза алгоритмов оценки динамической погрешности программного обеспечения измерительных систем с использованием условия максимума функции обобщенной мощности, благодаря которому получена следующая обобщенная структура алгоритмов оценки (при $n=1$)

$$\left. \begin{aligned} \hat{U}(k) &= -R_{\xi}^{-1} \lambda^{-1} (\tilde{x}(k-1) - \hat{x}(k-1)) - \lambda^{-1} \mu(\hat{x}, k-1, k-2); \\ \hat{x}(k) &= \alpha \hat{x}(k-1) - \beta \hat{x}(k-2) - R_{\xi}^{-1} \lambda^{-1} \Delta T^2 \hat{x}(k-1) - \\ &\quad - \lambda^{-1} \Delta T^2 \mu(\hat{x}, k-1, k-2), \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где $\hat{U}(k)$ – входной измерительный сигнал; $\hat{x}(k)$ – выходной измерительный сигнал; k – дискретное время; α, β – параметры; ΔT – интервал дискретизации.

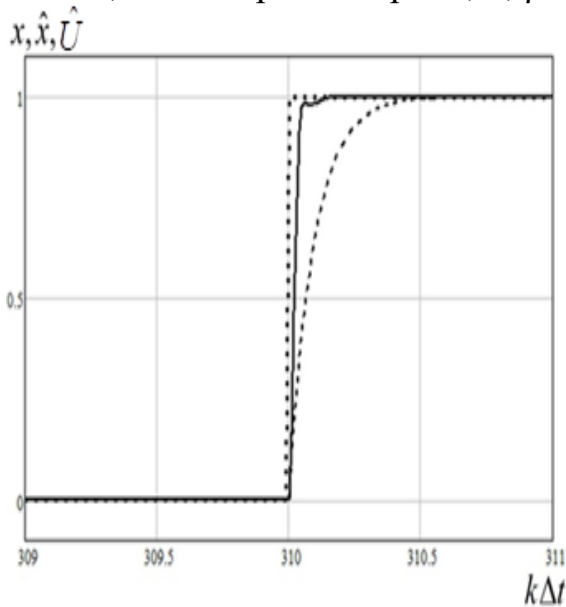


Рисунок 4 – Оценки

На рис. 4 представлены переходные характеристики, где точками обозначено входное воздействие x , сплошной кривой – его оценка $\hat{x}$ с использованием (17), а пунктирной кривой – результат преобразования входного сигнала программным модулем экспоненциального сглаживания с параметром сглаживания $\alpha = 0,1$. Предложенная вычислительная схема может быть отнесена к классу алгоритмов «грубой оценки» в дискретном времени. Она отличается оперативностью и характеризуется объёмом вычислительных затрат, пропорциональным общему числу дискретных отсчётов сигнала n .

С использованием построенных динамических моделей получена новая адаптивная модель в непрерывном времени

$$\mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}, t) = \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ -\lambda |\hat{x}_2| \hat{x}_2 (L |\hat{x}_1|)^{-1} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

а затем с применением метода формирующих фильтров – дискретные адаптивные динамические модели

$$\Phi^1(\Delta T, z) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{e^{z_1 \Delta T} - 1}{z_2} \\ 0 & e^{z_1 \Delta T} \end{bmatrix}; \quad \Phi^2(\Delta T, z) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & -\left[z \Delta T \frac{|\hat{x}_2(k)|}{|\hat{x}_1(k)|} - 1 \right] \end{bmatrix}; \quad (19)$$

$$\Phi^3(\Delta T, z_1) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{z}{\ln(1+z)} \Delta T \\ 0 & 1+z \end{bmatrix}, \quad \beta = \frac{\ln(1+z)}{\Delta T}, \quad (20)$$

где $\mathbf{z}$ – вектор параметров структурной адаптации; при $z \rightarrow 0$ по первому правилу Лопиталья $\Phi^3 \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, что соответствует матрице перехода состояний, получаемой с применением ММ движения объекта с постоянной скоростью.

Выражения (18) – (20) позволяют использовать инвариантное погружение, результат которого – фильтры. Адаптация полученных решений оптимизационных задач к неопределенностям на основе теории регуляризации и нечеткой логики приводит к интеллектуальным алгоритмам.

Метод интеллектуализации измерительных процедур на базе использования адаптивных ММ и теории регуляризации приводит к следующим уравнениям оценки (фильтру):

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\mathbf{x}}_1}{dt} + \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_1, t) &= -\mathbf{P}_1 \gamma_1^1 \mathbf{b}(\hat{\mathbf{x}}_1, t), \\ \frac{d\mathbf{P}_1}{dt} &= \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_1 \frac{\partial \mathbf{f}^T}{\partial \hat{\mathbf{x}}} + \gamma_1^1 \mathbf{P}_1 \frac{\partial \mathbf{b}(\hat{\mathbf{x}}_1, t)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \mathbf{P}_1 + \mathbf{I}, \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{d\hat{\mathbf{x}}_{k+1}}{dt} + \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}, t) &= -\mathbf{P}_{k+1} \sum_{i=1}^{k+1} \gamma_i^{k+1} \mathbf{b}(\hat{\mathbf{x}}_i, t), \\ \frac{d\mathbf{P}_{k+1}}{dt} &= \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \mathbf{P}_{k+1} + \mathbf{P}_{k+1} \frac{\partial \mathbf{f}^T}{\partial \hat{\mathbf{x}}} + \gamma_{k+1}^{k+1} \mathbf{P}_{k+1} \frac{\partial \mathbf{b}(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}, t)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \mathbf{P}_{k+1} + \mathbf{I}, \end{aligned} \tag{21}$$

которые отличаются от известных структурой вектор-функции перехода $\mathbf{f}$;
 $\gamma_i^k = \alpha_{i-1} \left[1 - \alpha_i^2 \right] \cdot \dots \cdot \left[1 - \alpha_{K-1}^2 \right], i = \overline{1, k}, \quad \alpha_i$ – положительные числа;

$$\mathbf{b}(\hat{\mathbf{x}}_i) = \mathbf{R}_{\xi}^{-1} \frac{\partial \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_i, t)^T}{\partial \hat{\mathbf{x}}_i} [\mathbf{y}(t) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_i, t)]; \quad \text{уравнения} \quad (21) \quad \text{определяют}$$

интеллектуальную измерительную процедуру, поскольку осуществляют целенаправленный выбор наиболее близкой к истинному значению оценки измеряемого параметра в условиях структурной неопределенности модели исследуемого объекта и параметрической неопределенности модели наблюдения. Первая пара уравнений (21) представляет собой расширенный ФК с адаптацией к внешним воздействиям, а каждое последующее уравнение оценки для $k+1$ использует в качестве входных параметров функции y и $\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_k$, причем по форме все уравнения идентичны, поэтому для их решения может быть использован один и тот же алгоритм расчета. В качестве условия выхода из рекурсивного расчета может быть использован известный критерий невязки. В частности, для одной итерации из (21) при $\dim y = 1$ имеем новые уравнения оценки (фильтр)

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\mathbf{x}}} &= \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{P}\mathbf{H}^T R_{\xi}^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}], \quad t_0 = 0, \quad \hat{\mathbf{x}}(0) = \hat{\mathbf{x}}^0, \\ \dot{\mathbf{P}} &= \mathbf{P} \frac{\partial \mathbf{f}^T(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \hat{\mathbf{x}}} + \frac{\partial \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \mathbf{P} + \mathbf{G} \mathbf{R}_{\eta}^{-1} \mathbf{G}^T - \mathbf{P} \mathbf{H}^T R_{\xi}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{P}, \quad \mathbf{P}(0) = \mathbf{P}^0,\end{aligned}\quad (22)$$

где $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & zR_{\xi}^{-1} \end{bmatrix}$, а начальные значения $\hat{\mathbf{x}}^0$ и $\mathbf{P}^0$ определяются по Зингеру Р.А.

Эффективность (22) оценена на основе решения задачи оценки параметров движения маневрирующего объекта по доступным наблюдениям дальности x_l , которые характеризуются ошибками наблюдений со среднеквадратическим отклонением $\sigma=750$ м. Результаты математического моделирования представлены на рис. 5, где приведены усредненные по 20 вычислительным экспериментам абсолютные ошибки $|\bar{\Delta}|$ оценок $\hat{x}_l$ сплошной линией для (22), точками для ФК с моделью Зингера (ФКЗ), красная линия – предел допускаемой погрешности ОРЛ-А (230 м или 1%, по ГОСТ Р 59971-2021 выбирается большее).

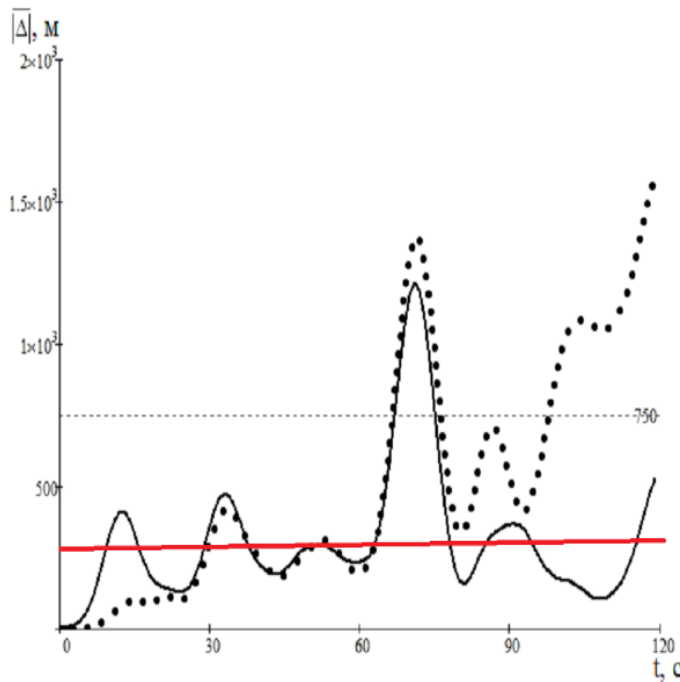


Рисунок 5 – Усредненные ошибки оценок наклонной дальности

Таблица 1 – Показатели эффективности

Показатель качества		Траектория (Tr) 1	Tr 2	Tr 3
Выигрыш (22) в % в точности оценки у	ФК	36,8	39,4	81,6
	ФКЗ	5,9	6,6	0,7

Уравнения оценки (22) позволяют в среднем на 20% снизить ошибки при эффекте повышения предела устойчивости вычислительного алгоритма в случае увеличения периодичности возмущений. Подсчет элементарных операций показывает, что их применение требует более чем на 10% меньше вычислительных затрат в классе операций сложения, вычитания, умножения, деления. Результаты сравнительного анализа по другому набору траекторий ЛА [41] сведены в табл. 1. В условиях математического моделирования, в соответствии с ГОСТ Р 59971-2021, уравнения (22) в отличие от ФКЗ при меньшем усредненном времени длительности разрывов трасс обеспечивают требуемые показатели точности к ОРЛ-А, обеспечивающему функционирование ЛА.

Разработан новый метод структурной адаптации дискретных фильтров на основе динамических ММ, уравнения оценки состояния которого имеют вид:

$$\begin{aligned}
\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) &= \Phi^l(\mathbf{z}) \hat{\mathbf{x}}(k|k), l = \overline{1,3}, \hat{\mathbf{x}}(0|0) = \mathbf{m}_x, \\
\hat{\mathbf{x}}(k|k) &= \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \mathbf{K}(k|k-1) [\mathbf{y}(k) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}|k)], \\
\mathbf{K}(k|k-1) &= \mathbf{P}(k|k-1) \frac{\partial \mathbf{h}^T}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \left[\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \mathbf{P}(k|k-1) \frac{\partial \mathbf{h}^T}{\partial \hat{\mathbf{x}}} + \mathbf{W} \right]^{-1}, \\
\mathbf{P}(k|k-1) &= \Phi^l(\mathbf{z}) \mathbf{P}(k-1|k-1) \Phi^{lT}(\mathbf{z}) + \mathbf{Q}(k), \\
\mathbf{P}(k|k) &= \mathbf{P}(k|k-1) - \\
&\quad - \mathbf{P}(k|k-1) \frac{\partial \mathbf{h}^T}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \left[\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \mathbf{P}(k|k-1) \frac{\partial \mathbf{h}^T}{\partial \hat{\mathbf{x}}} + \mathbf{W} \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \mathbf{P}(k|k-1), \mathbf{P}(0|0) = \Psi_{x_0},
\end{aligned} \tag{23}$$

где $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$ – предсказание; $\hat{\mathbf{x}}(k|k)$ – фильтрация; $\mathbf{K}(k|k-1)$ – коэффициент усиления; $\mathbf{W}$ – ковариационная матрица шумов вектора наблюдений; $\mathbf{P}(k|k)$, $\mathbf{P}(k|k-1)$ – ковариационная матрица ошибок и матрица априорной дисперсии; $\mathbf{Q} = \mathbf{G}\Psi\mathbf{G}^T$ – ковариационная матрица вектора возмущений; случайная величина $\hat{\mathbf{x}}(0|0)$ с гауссовым распределением характеризуется математическим ожиданием $\mathbf{m}_x$ и дисперсией Ψ_{x_0} . По аналогии с (23) синтезирована измерительная процедура оценки ориентации малого БПЛА в условиях изменения статуса результатов измерений бортовой ИИУС, когда

$$\mathbf{y}(k) = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \mathbf{H}(A_1, A_2) \mathbf{x}(k) + \zeta(k) = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \zeta(k), \tag{24}$$

где $y_1(k)$, $y_2(k)$ – результаты косвенных измерений угла крена ЛА и прямых измерений скорости его изменения; A_1 , A_2 – статусы результатов измерений гироскопа и акселерометра; $\zeta(k)$ – шумы наблюдения с известными локальными характеристиками. Уравнения измерительной процедуры:

$$\begin{aligned}
\hat{\mathbf{x}}(k+1|k, \mathbf{z}) &= \Phi^4(\mathbf{z}) \hat{\mathbf{x}}(k|k); \Phi^4 = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & 1 - \sqrt{z_1} \Delta T \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{x}}(k|k, \mathbf{z}) = \mathbf{m}_x; \\
\hat{\mathbf{x}}(k|k, \mathbf{z}) &= \hat{\mathbf{x}}(k|k-1, \mathbf{z}) + \mathbf{K}(k|k-1) [\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(A_1, A_2) \hat{\mathbf{x}}(k|k-1, \mathbf{z})]; \\
\mathbf{K}(k|k-1) &= \mathbf{P}(k|k-1) \mathbf{H}(A_1, A_2)^T \cdot \\
&\quad \cdot [\mathbf{H}(A_1, A_2) \mathbf{P}(k|k-1) \mathbf{H}(A_1, A_2)^T + \mathbf{W}]^{-1}; \mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 & 0 \\ 0 & w_2 \end{bmatrix} = \text{const}; \\
\mathbf{P}(k|k-1) &= \Gamma(\mathbf{z}) \Psi(\mathbf{z}) \Gamma(\mathbf{z})^T + \Phi^4(\mathbf{z}) \mathbf{P}(k-1|k-1) \Phi^{4T}(\mathbf{z}); \Gamma = \begin{bmatrix} z_1 \Delta T^2 / 2 \\ z_1 \Delta T \end{bmatrix}, \\
\mathbf{P}(k|k) &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) \mathbf{H}(A_1, A_2)] \mathbf{P}(k|k-1); \mathbf{P}(0|0) = \Psi_{x_0}; \Psi = \begin{bmatrix} z_2 \Delta T^{-1} & 0 \\ 0 & z_2 \Delta T^{-1} \end{bmatrix};
\end{aligned} \tag{25}$$

где переходная матрица Φ^4 получена аппроксимацией из (19); z_1 – параметр адаптации, связанный с режимами движения БПЛА; z_2 – параметр адаптации, связанный с интенсивностью шумов состояния. Для оценки эффективности (25) были проведены математическое моделирование и измерительный эксперимент на

разработанном стенде. С помощью стенда сформировано принятое опорное значение угла крена. В качестве источника результатов измерений служил разработанный полетный контроллер «Заря». Параметры адаптации выбирались с помощью нейронной сети (рис. 6).

Усреднённые по 50 измерительным экспериментам значения средних квадратических отклонений оценок угла крена предложенной и калмановской измерительных процедур составляют соответственно $1,2^\circ$ и $1,3^\circ$ – для подтверждённого статуса, $3,7^\circ$ и $4,4^\circ$ – для ориентирующего статуса результатов измерений угла крена. Таким образом, при изменении статуса результатов измерений гироскопа использование построенной на базе динамической ММ измерительной процедуры позволяет повысить точность оценки угла крена в сравнении с измерительной процедурой калмановской структуры в среднем на 9 % и 19 % (соответственно при подтверждённом и ориентирующем статусах результатов измерений), а в отдельных случаях на 31 % (рис. 7, на котором точки – ФК, сплошная линия – (25), пунктир – действительные ошибки). Таким образом, уменьшается риск потери устойчивости БПЛА при ориентирующем статусе результатов измерений гироскопа и выполняются требования ОДМ 218.9.017–2019 к показателю эффективности по точности.

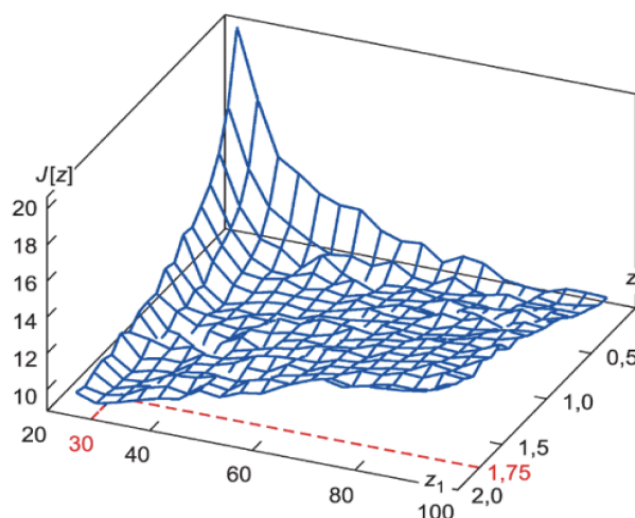


Рисунок 6 – Показатели качества обучения нейросетевого идентификатора

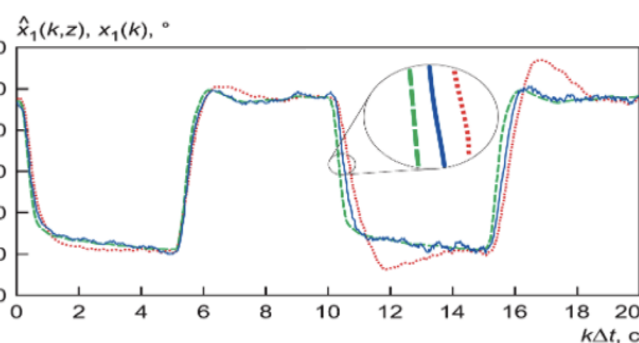


Рисунок 7 – Результаты оценивания (1 реализация)

Синтезированные управления, построенные динамические ММ и уравнения оценивания определены с точностью до параметров, что требует решения задачи идентификации лагранжевых динамических систем, которая поставлена в **четвертой главе**. Разработан метод многопараметрической идентификации конструктивных параметров на основе условия максимума функции обобщенной мощности, полученного во второй главе. Идентификация вектора параметров $\mathbf{z}$ производится в два этапа. На первом этапе из условия максимума функции обобщенной мощности вычисляется значение обобщенных сил $\hat{\mathbf{N}}$, реализующих наблюдаемое движение $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_n]^T$. На втором этапе идентификация

параметров проводится на основе закона движения $\hat{q}_s$, доставляющего минимум целевому функционалу путем сопоставления обобщенной силы $\hat{N}_s$ с истинной обобщенной силой $\hat{Q}_s$, явная зависимость которой от конструктивных параметров известна. Для этого конструктивные параметры выбирают такими, чтобы среднеквадратическая ошибка I за характерный (произвольный) отрезок времени между обобщенной силой и заданной обобщенной силой была бы минимальной

$$I[\hat{Q}_s, \hat{N}_s] = \int_{t_0}^{t_1} [\hat{Q}_s(\hat{q}, \dot{\hat{q}}, \hat{z}, t) - \hat{N}_s(\hat{q}, \dot{\hat{q}}, \hat{z}, t)]^2 dt \rightarrow \min. \quad (26)$$

Так как обобщенные координаты и наблюдения теперь известны как функции времени, то вместо минимизации функционала I отыскивается минимум функции $I(\hat{z}_j)$. При небольшом количестве неизвестных $\hat{z}_j$ и их линейном вхождении в обобщенную силу $\hat{Q}_s$ можно решать систему

$$\frac{\partial I}{\partial \hat{z}_j} = 0, j = \overline{1, m}, \quad (27)$$

а в более сложных случаях применить программу поиска экстремума.

Решение системы уравнений для идентификации конструктивных параметров связано с относительно большим объемом вычислительных затрат. Для преодоления указанного недостатка поставлена и решена оптимизационная задача для динамической идентификации параметров математических моделей лагранжевых систем, что потребовало исследования асинхронной вариации функционала, расширенного с использованием интеграла действия и его аналога для ММ динамики параметров в форме уравнения Лагранжа второго рода. В результате установлено условие максимума функции обобщенной мощности для случая параметрической неопределенности и получены с точностью до синтезирующей функции уравнения последовательной идентификации ММ динамических систем

$$\begin{aligned} \ddot{\hat{q}}_s &= \hat{f}_s - \lambda^{-1} R_{\xi ss}^{-1} [y_s - \hat{h}_s] \frac{\partial \hat{h}_s}{\partial \hat{q}_s}, \quad q_s(0) = \hat{q}_{0s}, \quad \dot{q}_s(0) = \dot{\hat{q}}_{0s}, \quad s = \overline{1, n}, \\ \ddot{\hat{z}}_k &= \lambda_2^{-1} \left(v_k \dot{\hat{z}}_k - \sum_{s=1}^n V_s G_{sk} \right), \quad \hat{z}_k(0) = \hat{z}_{0k}, \quad \dot{\hat{z}}_k(0) = \dot{\hat{z}}_{0k}, \quad k = \overline{1, m}, \\ \ddot{G}_{sk} &= \frac{\partial \hat{f}_s}{\partial \dot{\hat{q}}_s} \dot{G}_{sk} + \frac{\partial \hat{f}_s}{\partial \hat{q}_s} \dot{G}_{sk} + \frac{\partial \hat{f}_s}{\partial \hat{z}_k}, \quad G_{sk}(0) = G_{0sr}, \quad \dot{G}_{sk}(0) = \dot{G}_{0sk}, \end{aligned} \quad (28)$$

где G_{sk} – функции чувствительности; $v_k = \sum V_s G_{sk}$ – синтезирующая функция.

Метод фазовых траекторий для задачи идентификации позволяет получить

$$v_k = -\lambda \left| \frac{\partial A}{\partial \hat{z}_k} \right| \left| \dot{\hat{z}}_k^{-1} \right|. \quad (29)$$

Исследована устойчивость синтезируемых алгоритмов.

Для унификации подхода к решению задач оценки в условиях структурно-параметрической неопределенности с использованием принципа Гамильтона-Остроградского предложен метод структурно-параметрической идентификации

измерительных систем, который предполагает унификацию процедур структурно-параметрической идентификации за счет расширения пространства состояний

$$\mathbf{Q} = [U, \eta_1, \dots, \eta_m]^T, \mathbf{q} = [x, z_1, \dots, z_m]^T, \quad (30)$$

в случае если $y(t) = h(\mathbf{q}, \mathbf{z}, t) + \xi(t)$ и заданы динамика исследуемой системы и параметров как уравнения Лагранжа второго рода; здесь U – входной измерительный сигнал; η_i – возмущения, которые определяют изменения параметров. Решение соответствующей обратной измерительной задачи:

$$\hat{Q}_1(\hat{\mathbf{q}}, \dot{\hat{\mathbf{q}}}) = \lambda^{-1} \left[\mu_1(\hat{\mathbf{q}}, \dot{\hat{\mathbf{q}}}) \dot{\hat{q}}_1 - R_\xi^{-1} [y - \hat{h}] \partial \hat{h} / \partial \hat{q}_1 \right]; \quad (31)$$

$$\hat{Q}_s(\hat{\mathbf{q}}, \dot{\hat{\mathbf{q}}}) = \lambda^{-1} \left[\mu_s(\hat{\mathbf{q}}, \dot{\hat{\mathbf{q}}}) \dot{\hat{q}}_s - R_\xi^{-1} [y - \hat{h}] G_s \partial \hat{h} / \partial \hat{q}_s \right], s = \overline{2, m+1}. \quad (32)$$

Метод построения синтезирующей функции на основе гипотезы о стационарности Гамильтониана приводит к

$$\mu_s(\hat{\mathbf{q}}, \dot{\hat{\mathbf{q}}}) = -|\dot{\hat{q}}_s| / \left[L_s \left| (y - \hat{h}) \partial \hat{h} / \partial \hat{q}_1 \right| + \varepsilon_s \right], s = 1; \quad (33)$$

$$\mu_s(\hat{\mathbf{q}}, \dot{\hat{\mathbf{q}}}) = -|\dot{\hat{q}}_s| / \left[L_s |y - \hat{h}| G_s \partial \hat{h} / \partial \hat{q}_1 + \varepsilon_s \right], s = \overline{2, m+1}. \quad (34)$$

На основе разработанного метода синтезированы алгоритмы структурно-параметрической идентификации, оценена их эффективность на основе математического моделирования. Относительные погрешности идентификации параметров соответственно составили 1,1 % и 0,03 %.

В пятой главе рассмотрен частный случай ИТИУРЭС. В соответствии с методологией системного проектирования критерием эффективности ИТИУРЭС является относительное увеличение величины предотвращенного ущерба не менее чем 16,1% ($\Delta K_x(F(\mathbf{q})) \geq 16,1\%$ ($x=1 \dots 3$), вследствие п. 2 прил. №2 Пр. Минтранса России №198 от 30.05.2025 г.). Использование полученного в первой главе условия максимума функции обобщенной мощности в совокупности с приемами

ΔK_x ($x = 1 \dots 3$), %

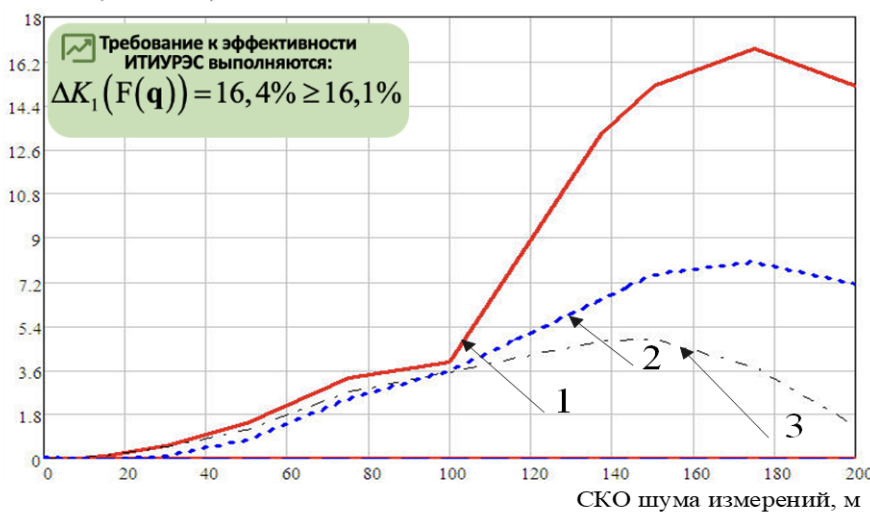


Рисунок 8 – Относительный выигрыш в эффективности ИТИУРЭС от применения впервые синтезированных алгоритмов

построения синтезирующей функции из третьей главы, ММ наблюдения и движения динамических объектов позволяет получить эффективные алгоритмы оценки параметров движения и фильтры. Они обеспечивают высокоточное и устойчивое сопровождение управляемых ЛА при относительно небольшом объеме вычислительных

затрат, а также увеличение расчетной величины предотвращенного ущерба объекту транспортной инфраструктуры (например, аэропорту), что демонстрируется рис. 8. На нем цифрами обозначены относительные выигрыши в эффективности ИТИУРЭС в сравнении с ФК от применения впервые синтезированных алгоритмов [47]: 1 – последовательный алгоритм, 2 – алгоритм оценки параметров управляемого движения, 3 – алгоритм оценки параметров возмущенного движения.

Для синтеза ИТИУРЭС на основе поэтапной оптимизации с редукцией экстремальных задач Лагранжа необходимо выполнить следующие действия:

1. Задать исходные данные: множество ПрС/С; множество известных прецедентов (правил); возможные механизмы выбора рационального решения текущей ПрС/С в виде системы правил; модель измерительной системы; модель системы обработки измерений и формирования ситуационного вектора; показатели и критерии эффективности функционирования ИТИУРЭС.
2. Определить структуру динамической системы.
3. Определить параметры динамической системы и при необходимости одновременно уточнить ее состояние (как правило, апостериорно).
4. Задать требования к оперативности решения задач оценки.
5. Оценить вычислительную мощность ЭВМ ИТИУРЭС.
6. Оценить состояние системы с использованием алгоритмов «грубой» оценки при требованиях к оперативности решения оптимизационных задач и/или с применением фильтров при достаточных вычислительных ресурсах.
7. Сформировать управляющее воздействие.
8. Определить показатель эффективности ИТИУРЭС.

Основные результаты и выводы по работе

В диссертации получены следующие *новые научные результаты*:

а) предложены постановки задач синтеза для ИТИУРЭС, *отличающиеся* от известных процедурой редукции к изопериметрическим задачам на основе использования уравнения Даламбера-Лагранжа, энергии ускорений Аппеля или интеграла действия для построения расширенного целевого функционала, что позволяет решать задачи управления, оценки и идентификации нелинейных динамических систем;

б) получены условие для асинхронной вариации и вытекающие из него краевые задачи синтеза управлений, которые *отличаются* от известных ограничениями для динамических систем, удовлетворяющих принципам Гаусса и Гамильтона-Остроградского, что позволяет установить множество решений экстремальных задач;

в) методы построения поверхности переключения как синтезирующей функции, которые *отличаются* от известных за счет использования фазовых траекторий и гипотезы о стационарности Гамильтониана для решения задач управления, оценки и идентификации;

г) методы синтеза управлений, которые *отличаются* от известных способами построения обратных связей для лагранжевых и аппелевых динамических систем;

д) методы синтеза алгоритмов оценки в непрерывном и дискретном времени, которые *отличаются* от известных способами построения обратных связей в

замкнутой форме за счет поэтапной оптимизации и построения динамических ММ с использованием стесняющих краевую задачу условий, что позволяет получать оценки параметров измерительных процессов при ограничениях на вычислительные затраты;

е) метод структурной адаптации дискретных фильтров на основе динамических ММ, который *отличается* от известных способом построения обратных связей в замкнутой форме за счет поэтапной оптимизации с редукцией экстремальных задач лагранжевых систем, что позволяет получать оценки параметров измерительных процессов в условиях регулярных возмущений;

ж) методы идентификации параметров и структурно-параметрической идентификации лагранжевых динамических систем, которые *отличаются* от известных способами построения обратных связей в замкнутой форме за счет гипотезы о лагранжевой динамике параметров, что приводит к декомпозиции системы идентификации на подсистемы оценки состояния и оценки параметров;

з) метод интеллектуализации измерительных процедур, *отличающийся* от известных за счет использования адаптивных ММ и теории регуляризации в совокупности с процедурой целенаправленного выбора наиболее близкой к истинному значению оценки измеряемого параметра;

и) алгоритмы синхронизации, управления, оценки параметров процессов и динамических систем, *отличающиеся* от известных структурой за счет использования вариационных принципов при построении обратных связей для формирования базы правил ИТИУРЭС;

к) *научно обоснованные рекомендации и технические предложения по построению ПАО и устройств ИТИУРЭС, на основе которых разработаны оригинальные структуры специализированных вычислителей, позволяющие реализовать интеллектуальную обработку данных в реальном масштабе времени.*

Применение предложенных на основе разработанных методов рекомендаций и технических предложений по построению ПАО ИТИУРЭС позволило увеличить точность определения параметров движения маневрирующих ЛА в среднем на 15 – 22%.

Результаты математического моделирования подтверждают достижение выбранных при проведении диссертационного исследования целевых показателей эффективности.

**Основные публикации по теме диссертации
в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК
при Министерстве науки и высшего образования РФ:**

1. Лазаренко, С.В. Синтез алгоритма автономного управления математическим маятником на основе объединенного принципа максимума / С.В. Лазаренко, А.А. Костоглотов, А.А. Кузнецов и др. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2010. Т. 155. – № 3. – С. 9–14. – 0,375 / авт. вклад 0,15 п.л.
2. Костоглотов, А.А. Синтез оптимальных по быстродействию систем на основе объединенного принципа максимума / А.А. Костоглотов, А.И. Костоглотов, С.В. Лазаренко // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2007. – № 12. – С. 34–40. – 0,438 / авт. вклад 0,2 п.л.
3. Лазаренко, С.В. Нечеткая стратегия настройки параметров фильтра сопровождения для автоматизации управления воздушным движением / С.В. Лазаренко // Информационно – измерительные и управляющие системы. – 2024. Т. 22. – № 1. – С. 33–43. (K2)
4. Костоглотов, А.А. Синтез интеллектуального алгоритма оценки ориентации подвижных объектов транспортной инфраструктуры на базе многопараметрического идентификатора / А.А. Костоглотов, С.В. Лазаренко, А.С. Пеньков и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. Т. 89. – № 1. – С. 144–151. – 0,5 / авт. вклад 0,15 п.л. (K2)
5. Лазаренко, С.В. Синтез интеллектуальных алгоритмов обработки информации инерциальных датчиков в условиях деградации измерительного канала / С.В. Лазаренко, Д.С. Андрашитов, А.А. Костоглотов и др. // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, – № 8. – С. 146–155. – 0,625 / авт. вклад 0,17 п.л. (K1)
6. Андрашитов, Д.С. Алгоритм стабилизации привязного дрона в пространстве / Д.С. Андрашитов, А.А. Костоглотов, С.В. Лазаренко и др. // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2024. Т. 22. – № 1. – С. 44–52. – 0,563 / авт. вклад 0,11 п.л. (K2)
7. Костоглотов, А.А., Агапов, А.А., Лазаренко, С.В. Метод квазиоптимального синтеза многорежимных систем синхронизации в условиях регулярных возмущений на основе объединенного принципа максимума // Инженерный Вестник Дона : электрон. журн. 2019. Т. 57, № 6. URL: <https://pj.ph.ras.ru/article/view5617/3143>. – Дата публикации: 26.09.2019.
8. Костоглотов, А.А., Лазаренко, С.В., Пугачев, И.В. Синтез систем фазовой автоподстройки частоты в условиях возмущений на основе модели объединенного принципа максимума и дискретного метода инвариантного погружения // Инженерный Вестник Дона : электрон. журн. 2020. Т. 72, № 12. URL: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6710>. – Дата публикации: 25.11.2020.
9. Костоглотов, А.А. Метод синтеза алгоритмов динамической оценки возмущенных измерительных процессов с использованием объединенного принципа максимума / А.А. Костоглотов, С.В. Лазаренко, Д.С. Андрашитов и др. // Информационно – измерительные и управляющие системы. – 2018. Т. 16. – № 10. – С. 30–35. – 0,375 / авт. вклад 0,125 п.л.

10. Андрашитов, Д.С. Метод синтеза интеллектуальных управлений на основе анализа поведения динамических мер на гиперповерхности переключения в областях фазового пространства с нечеткими границами / Д.С. Андрашитов, А.А. Костоглотов, С.В. Лазаренко // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2020. Т. 22, – № 1. – С. 46–54. – 0,563 / авт. вклад 0,3 п.л.

11. Костоглотов, А.А. Синтез оптимального регулятора на основе использования физических принципов / А.А. Костоглотов, А.И. Костоглотов, С.В. Лазаренко и др. // Нелинейный мир. – 2012. – № 11. – С. 819–826. – 0,5 / авт. вклад 0,17 п.л.

12. Лазаренко, С.В. Синтез интеллектуального закона управления электровозом на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче / С.В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. Т. 95. – № 3. – С. 119–129. (K2)

13. Андрашитов, Д.С. Динамическая фильтрация методом объединенного принципа максимума / Д.С. Андрашитов, А.А. Костоглотов, С.В. Лазаренко и др. // Информация и космос. – 2018. – № 3. – С. 70–74. – 0,313 / авт. вклад 0,1 п.л.

14. Костоглотов, А.А., Лазаренко, С.В., Дерябкин, И.В. и др. Метод оптимальной фильтрации на основе анализа поведения инвариантов на характеристических траекториях в фазовом пространстве // Инженерный Вестник Дона : электрон. журн. 2016. Т. 43, № 4. URL: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6710> Дата публикации: 01.04.2016.

15. Костоглотов, А.А. Синтез оптимального управления на основе объединенного принципа максимума / А.А. Костоглотов, А.И. Костоглотов, С.В. Лазаренко и др. // Известия высших учебных заведений. Северо–Кавказский регион. Технические науки. – 2010. Т. 154, – № 2. – С. 31–37. – 0,438 / авт. вклад 0,16 п.л.

16. Лазаренко, С.В., Андрашитов, Д.С., Костоглотов А.А. и др. Универсальный метод синтеза оптимальных управлений нелинейными лагранжевыми динамическими системами // Инженерный Вестник Дона : электрон. журн. 2014. Т. 28, № 1. URL: https://www.ivdon.ru/back_media/uploads/article/pdf/IVD_1_Andrashitov.pdf_2251.pdf – Дата публикации: 10.01.2014.

17. Костоглотов, А.А. Метод синтеза адаптивных алгоритмов оценки параметров динамических систем на основе принципа декомпозиции и методологии объединенного принципа максимума / А.А. Костоглотов, А.С. Пеньков, С.В. Лазаренко // Известия высших учебных заведений. Северо–кавказский регион. Естественные науки. – 2020. – № 4 (208). – С. 22–28. – 0,438 / авт. вклад 0,146 п.л.

18. Лазаренко, С.В., Костоглотов, А.А., Агапов, А.А. и др. Метод интеллектуализации измерительных процедур на базе использования адаптивных моделей динамических процессов объединенного принципа максимума и теории регуляризации // Инженерный Вестник Дона : электрон. журн. 2019. Т. 56, № 5. URL: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6710>. – Дата публикации: 10.01.2014.

19. Костоглотов, А.А. Синтез квазиоптимальных многорежимных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и условия трансверсальности / А.А. Костоглотов, С.В. Лазаренко, А.А. Агапов и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. Т. 80. – № 4. – С. 170–179. – 0,625 / авт. вклад 0,16 п.л.

20. Лазаренко, С.В. Метод синтеза оптимального управления с использованием принципа Гаусса / С.В. Лазаренко // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. Т. 11, – № 12. – С. 37–43.

21. Лазаренко, С.В. Принцип Даламбера–Лагранжа как основа синтеза управлений с использованием редукции к изопериметрической задаче / С.В. Лазаренко // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2025. Т. 23, – № 2. – С. 19–30. – 0,75 / авт. вклад 0,75 п.л. (K2)

22. Костоглотов, А.А. Синтез алгоритма автономного управления математическим маятником на основе объединенного принципа максимума / А.А. Костоглотов, А.А. Кузнецов, Д.С. Андрашитов и др. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2010. – № 3. – С. 9–14. – 0,438 / авт. вклад 0,15 п.л.

23. Андрашитов, Д.С. В. Анализ эффективности метода структурно-параметрической идентификации инерциальных навигационных систем с использованием вариационных принципов / Д.С. Андрашитов, С.В. Лазаренко // Радиотехника. – 2025. – Т. 89, – № 2. – С. 94–101. – 0,5 / авт. вклад 0,25 п.л. (K1)

24. Андрашитов, Д.С. Параметрическая идентификация модели MEMS-акселерометра с использованием численного решения уравнения чувствительности / Д.С. Андрашитов, А.А. Костоглотов, С.В. Лазаренко и др. // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2024. Т. 22, – № 1. – С. 24–32. – 0,5 / авт. вклад 0,15 п.л. (K2)

25. Андрашитов, Д.С. Метод синтеза алгоритмов сопровождения с использованием формирующего фильтра и квазиоптимальных законов управления маневрирующими объектами / Д.С. Андрашитов, А.А. Костоглотов, С.В. Лазаренко и др. // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, – № 2. – С. 93–104. – 0,75 / авт. вклад 0,19 п.л. (K1)

26. Агапов, А.А. Анализ эффективности квазиоптимальных законов управления с применением аппарата нечеткой логики в задачах интеллектуализации транспортных систем / А.А. Агапов, А.А. Костоглотов, С.В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. Т. 89. – № 1. – С. 126–135. – 0,625 / авт. вклад 0,21 п.л. (K2)

27. Лазаренко, С.В. Синтез нелинейных систем при воздействии ограниченных возмущений с использованием многорежимных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности / С.В. Лазаренко, А.А. Костоглотов, А.А. Агапов и др. // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2022. Т. 20, – № 1–2. – С. 37–47. – 0,688 / авт. вклад 0,19 п.л.

28. Агапов, А.А. Синтез квазиоптимального закона управления на основе построения линии переключения с учетом анализа пучка квадратичных форм в составе интеллектуальной транспортной системы / А.А. Агапов, А.А. Костоглотов,

С.В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. Т. 85. – № 1. – С. 177–185. – 0,562 / авт. вклад 0,16 п.л.

29. Костоглолов, А.А. Структурно–параметрический синтез фильтра сопровождения на базе декомпозиции по целевому функционалу с адаптацией к возмущениям траектории / А.А. Костоглолов, А.С. Пеньков, С.В. Лазаренко // Информационно–измерительные и управляющие системы. – 2021. Т. 19. – № 2. – С. 14–25. – 0,75 / авт. вклад 0,25 п.л.

30. Костоглолов, А.А. Структурно–параметрический синтез адаптивного фильтра оценки состояния динамических систем с использованием принципа декомпозиции / А.А. Костоглолов, А.С. Пеньков, С.В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (80). – С. 180–188. – 0,563 / авт. вклад 0,19 п.л.

31. Костоглолов, А.А. Алгоритм оценки параметров движения с учетом структуры фазового пространства и анализ эффективности его реализации в системах контроля радиоэлектронной обстановки в условиях неопределенности / А.А. Костоглолов, С.В. Лазаренко, А.А. Мурашев // Радиотехника. – 2019. – Т. 83, – № 7. – С. 103–108. – 0,375 / авт. вклад 0,12 п.л.

32. Агапов, А.А. Анализ и синтез нелинейных многорежимных законов управления с использованием объединенного принципа максимума / А.А. Агапов, А.А. Костоглолов, С.В. Лазаренко и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. Т. 73. – № 1. – С. 119–125. – 0,438 / авт. вклад 0,11 п.л.

33. Костоглолов, А.А. О синтезе многорежимных инерционных регуляторов на основе объединенного принципа максимума / А.А. Костоглолов, А.А. Агапов, С.В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. Т. 61. – № 1. – С. 152–159. – 0,5 / авт. вклад 0,16 п.л.

34. Лазаренко, С.В. Метод синтеза алгоритмов оценки при нестационарных возмущениях измерительных процессов методом объединенного принципа максимума / С.В. Лазаренко, А.А. Костоглолов, И.В. Пугачев и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. Т. 70. – № 2. – С. 148–154. – 0,438 / авт. вклад 0,125 п.л.

35. Андрашитов, Д.С. Вариационный метод идентификации адаптивных динамических систем с построением дополнительных инвариантов / Д.С. Андрашитов, А.А. Костоглолов, С.В. Лазаренко и др. // Информационно–измерительные и управляющие системы. – 2016. Т. 28, – № 12. – С. 133–142. – 0,625 / авт. вклад 0,187 п.л.

36. Костоглолов, А.А. Синтез управления с адаптацией к неконтролируемым воздействиям в неустойчивом состоянии / А.А. Костоглолов, З.В. Лященко, С.В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. Т. 61. – № 1. – С. 66–71. – 0,375 / авт. вклад 0,13 п.л.

37. Костоглолов, А.А. Синтез адаптивных многорежимных регуляторов на основе комбинированного управления объединенного принципа максимума / А.А. Костоглолов, З.В. Лященко, С.В. Лазаренко и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3 (63). – С. 124–132.

– 0,563 / авт. вклад 0,14 п.л.

38. Костоглотов, А.А. Метод структурной адаптации дискретных алгоритмов объединенного принципа максимума в задачах оценки параметров движения / А.А. Костоглотов, А.А. Кузнецов, С.В. Лазаренко и др. // Информационно–управляющие системы. 2016. Т. 85, № 6. С. 10–15. – 0,375 / авт. вклад 0,1 п.л.

39. Андрашитов, Д.С. Структурный синтез лагранжевых систем автоматического управления с использованием первых интегралов движения / Д.С. Андрашитов, А.А. Костоглотов, А.А. Кузнецов и др. // Информационно–измерительные и управляющие системы. – 2015. Т. 13, – № 12. – С. 12–18. – 0,438 / авт. вклад 0,188 п.л.

40. Костоглотов, А.А. Совмещенный синтез адаптивного к маневру фильтра сопровождения / А.А. Костоглотов, А.А. Кузнецов, С.В. Лазаренко и др. // Радиотехника. – 2015. – № 7. – С. 95–103. – 0,563 / авт. вклад 0,15 п.л.

41. Лазаренко, С.В. Синтез фильтра сопровождения со структурной адаптацией на основе объединенного принципа максимума / С.В. Лазаренко, А.А. Костоглотов, А.А. Кузнецов и др. // Информационно–управляющие системы. – 2015. Т. 77, – № 4. – С. 2–9. – 0,5 / авт. вклад 0,125 п.л.

42. Лазаренко, С.В. Метод коррекции динамической погрешности акселерометра с текущей идентификацией его параметров на основе объединенного принципа максимума / С.В. Лазаренко, Д.С. Андрашитов, И.В. Дерябкин и др. // Радиотехника. – 2014. – № 12. – С. 17–23. – 0,438 / авт. вклад 0,11 п.л.

43. Лазаренко, С.В. Анализ функционирования алгоритмов параметрической идентификации информационно–управляющих систем, удовлетворяющих принципу Гамильтона–Остроградского / С.В. Лазаренко, Д.С. Андрашитов, И.В. Дерябкин и др. // Динамика сложных систем – XXI век. – 2014. Т. 8, – № 2. – С. 90–95. – 0,375 / авт. вклад 0,1 п.л.

44. Костоглотов, А.А. Многопараметрическая вариационная идентификация динамических систем на основе объединенного принципа максимума / А.А. Костоглотов, А.И. Костоглотов, С.В. Лазаренко, и др. // Информационно – измерительные и управляющие системы. – 2012. – № 4. – С. 68–76. – 0,563 / авт. вклад 0,188 п.л.

45. Лазаренко, С.В. Метод идентификации параметров динамических систем на основе совмещенного с физическими принципами синтеза / С.В. Лазаренко, И.В. Дерябкин, А.А. Костоглотов, и др. // Нелинейный мир. – 2012. – № 11. – С. 801–809. – 0,563 / авт. вклад 0,14 п.л.

46. Андрашитов, Д.С. Совмещенный синтез параметрического управления при стабилизации динамических объектов / Д.С. Андрашитов, А.А. Костоглотов, С.В. Лазаренко и др. // Нелинейный мир. – 2012. – № 11. – С. 810–818. – 0,563 / авт. вклад 0,14 п.л.

47. Костоглотов, А.А. Метод оценки параметров движения управляемого летательного аппарата на основе объединенного принципа максимума с построением опорной траектории / А.А. Костоглотов, А.И. Костоглотов, С.В. Лазаренко и др. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – № 6. – С. 61–

66. – 0,375 / авт. вклад 0,188 п.л.

48. Лазаренко, С.В. Вариационный метод многопараметрической идентификации динамических систем на основе итерационной регуляризации / С.В. Лазаренко, А.А. Костоготов, Д.С. Андрашитов и др. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – № 6. – С. 67–72. – 0,375 / авт. вклад 0,1 п.л.

49. Костоготов, А.А., Костоготов, А.И., Лазаренко, С.В. Многопараметрическая идентификация конструктивных параметров методом объединенного принципа максимума // Инженерный Вестник Дона : электрон. журн. 2011. Т. 15, № 1. URL: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/348>. – Дата публикации: 10.01.2011.

50. Андрашитов, Д.С. Итеративные регуляризованные алгоритмы обработки измерительной информации / Д.С. Андрашитов, И.В. Дерябкин, С.В. Лазаренко и др. // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2010. Т. 77. – № 11. – С. 3–9. – 0,438 / авт. вклад 0,11 п.л.

51. Костоготов, А.А. Метод решения обратных измерительных задач с применением аппарата негладкого анализа / А.А. Костоготов, С.В. Лазаренко // Информационно–измерительные и управляющие системы. – 2009. Т. 7, – № 10. – С. 38–45. – 0,5 / авт. вклад 0,25 п.л.;

в журналах, индексируемых в базе данных RSCI:

52. Костоготов, А.А. Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием асинхронного варьирования / А.А. Костоготов, С.В. Лазаренко // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2021. – № 6. – С. 3–12. – 0,625 / авт. вклад 0,313 п.л.

53. Костоготов, А.А. Объединенный принцип максимума в задачах оценки параметров движения маневрирующего летательного аппарата / А.А. Костоготов, А.И. Костоготов, С.В. Лазаренко // Радиотехника и электроника. – 2009. Т. 54. – № 4. – С. 450–457. – 0,5 / авт. вклад 0,17 п.л.

54. Костоготов, А.А. Синтез адаптивных систем сопровождения на основе гипотезы о стационарности Гамильтониана гиперповерхности переключения / А.А. Костоготов, С.В. Лазаренко // Радиотехника и электроника. – 2017. Т. 62. – № 2. – С. 121–125. – 0,375 / авт. вклад 0,19 п.л.

55. Лазаренко, С.В. Метод синтеза алгоритмов оценки динамической погрешности программного обеспечения измерительных систем и средств измерений на основе объединенного принципа максимума / С.В. Лазаренко, А.А. Костоготов, Д.С. Андрашитов и др. // Измерительная техника. – 2019. – № 6. – С. 20–24. – 0,313 / авт. вклад 0,11 п.л.

56. Лазаренко, С.В. Синтез измерительной процедуры оценки ориентации малого беспилотного летательного аппарата в условиях изменения статуса результатов измерений // С.В. Лазаренко, А.А. Костоготов, В.О. Зехцер и др. // Измерительная техника. – 2023. – № 12. – С. 4–11. – 0,438 / авт. вклад 0,25 п.л.

57. Костоготов, А.А. Метод структурно-параметрической идентификации Лагранжевых динамических систем в задачах обработки измерительной информации // А.А. Костоготов, А.И. Костоготов, С.В. Лазаренко, и др. // Измерительная техника. – 2014. – № 2. – С. 32–36. – 0,313 / авт. вклад 0,12 п.л.

В печать 18. 09. 2026г.
Объем 2,2 усл п.л. Офсет. Формат 60х84/16
Бумага тип №3. Заказ № 18\09. Тираж 80 экз.

ООО «ДГТУ-Принт»
Адрес полиграфического предприятия:
344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.