

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки**  
**Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук**  
**(ВИНИТИ РАН)**

**КОНЦЕПЦИИ И РЕАЛИЗАЦИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ**  
**РОБОТОТЕХНИКИ**

Информационно-аналитический обзор

**Грушников В.А.**

Научный редактор – Гречиков М.И.

Москва - 2022

## РЕФЕРАТ

**Объект исследования** – системы и процессы автоматизации с эффективным и технологичным применением робототехнических устройств, отличающихся возможностями реализации специализированных и специальных свойств, позволяющих осуществлять специфические функции безопасности.

**Цель исследования** – анализ и прогнозирование тенденций развития и совершенствования концептуальных и конструктивно-технологических решений в области искусственного интеллекта, вообще, и робототехники, в частности.

В процессе подготовки обзора определен широкий круг источников общей, технической и специальной отечественной и зарубежной информации по рассматриваемой тематике, отобраны и обработаны большие массивы этой информации, проведены их анализ, упорядочение, формулирование, и представление направлений оптимизации.

По результатам проведенного аналитического исследования установлены стойкие тенденции реализации основных направлений развития и совершенствования робототехнической продукции, широко используемой в разных сферах человеческой деятельности.

**Ключевые слова:** автоматизация, робототехнические системы, робототехнические устройства, концепции, реализации: универсальные и специализированные по видам деятельности, роботы мобильные, роботы транспортные, навигация, области базирования: воздушные, наземные, водные, специальные по назначению

## **Введение**

Робототехнические системы и устройства стали полноправными участниками многих процессов: от операций хирургов до реабилитации пациентов клиник и компаньонов-сиделок, от проведения экскурсий туристов до взаимодействий с операторами сборочных производств, от обслуживания металлорежущих станков до автоматического управления автономными транспортными средствами (АТС), от упаковки комплектуемых посылок доставки заказов до манипулирования компонентами космических станций, от сбора сельскохозяйственных культур и проведения инспекций сложных технических объектов до осуществления поисково-спасательных и военных операций. Это стало возможным благодаря наделению роботов искусственным интеллектом и реализации программно-алгоритмического обеспечения для решения конкретных задач. Оставив в стороне большой класс так называемых универсальных медицинских (диагностических, терапевтических, процедурных, хирургических, реабилитационных) промышленных, технологических вспомогательных (экзоскелеты, педипуляторы), сборочных, сварочных, упаковочных и т.п. роботов, ограничимся рассмотрением функциональности специализированных роботов воздушного, наземного и водного базирования и специальных роботов, предназначенных для обслуживания атомных реакторов, эксплуатации в условиях техногенных катастроф, тушения пожаров, проведения военных операций и разминирования территорий.

### **1. Мобильные роботы воздушного базирования**

Широкий по назначению и реализации класс этих мобильных роботов принято называть беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и они могут иметь разные технические характеристики, оснащение и решаемые практические задачи, достижение которых обеспечивается конструктивно-технологической оптимизацией и использованием систем управления эффективного и безопасного функционирования за счет выбора, отслеживания и реализации траекторий перемещений с предотвращением столкновений и минимизацией затрат времени и потребляемой энергии.

В ряду возможных реализаций БПЛА - весь спектр конструкторско-технологических решений: от микро- до макромасштабных, от транспортных до разведывательных, от наземных картографических до космических. Среди эффективных реализаций этих средств большое и важное место занимают природоподобные: бионические и биомиметические БПЛА. Так, например, сотрудниками Факультета аэрокосмической и машиностроительной инженерии

Университета Южной Калифорнии в Лос-Анджелесе и Колледжа машиностроения и материаловедения Вашингтонского государственного университета (оба - США) представлена [1] многоплатформенная архитектура управления, обеспечивающая стабильный парящий полет и отслеживание траектории микролетательных аппаратов с машущими крыльями размером с насекомое. В предлагаемом подходе контроллеры полета синтезируются с использованием современных методов проектирования и применения кватернионного представления для описания динамики ориентации управляемых микрокоптеров. При синтезе регулятора номинальная устойчивость замкнутой системы анализируется и обеспечивается нелинейными методами Ляпунова. Учитывая строгие ограничения на изготовление, полезную нагрузку, размер и срабатывание в масштабе насекомых, все разработанные на сегодняшний день субграммовые микролетательные аппараты работают с несколькими ограничениями.

Это побудило разработать подход, при котором ориентация напрямую контролируется путем создания крутящих моментов по крену, тангажу и рысканию посредством асимметричного взмаха крыльев. Позиционные управляющие силы генерируются путем изменения положения летающего микроробота, чтобы выровнять его вектор аэродинамической тяги, закрепленный на теле, вдоль желаемого направления. За счет использования этой концепции предлагаемая архитектура управления наделяется желаемыми мультиплатформенными характеристиками и гибкостью, необходимыми для достижения различных целей. Функциональность, производительность и пригодность предложенного подхода к управлению экспериментально продемонстрированы с использованием двух разных микрокоптеров новой версии RoboBee: двухкрылого робота массой 75 мг, первоначально разработанного в Гарвардском университете; и робота-пчелы - четырехкрылого робота массой 95 мг, разработанного нами в Лаборатории автономных микророботных систем Университета Южной Калифорнии.

На другом полюсе этой классификации находятся робототехнические устройства космического назначения. Их специфической реализацией является, например, робот для проверки работоспособности нижних конечностей скафандра. Повышение функциональности и технологичности безопасного проведения работ космонавтами в открытом космосе эффективно обеспечивается использованием патентуемого усовершенствованного компактного робота для проверки работоспособности нижних конечностей скафандра в специальной эксплуатационной испытательной процедуре. Такой инновационный испытательный робот содержит [2] устройство поддержания давления, компонент циркуляции воздуха, блок воздушного охла-

ждения, компоненты теплоизлучающего шланга и две вставные механические ноги. Блок воздушного охлаждения соединен трубопроводом с устройством поддержания давления, узел циркуляции воздуха расположен в его камере, две механические ножные стойки установлены на устройстве поддержания давления, а компоненты теплоизлучающего шланга расположены в механических опорах. Воздух в камере поддержания давления охлаждается через блок воздушного охлаждения и подается в компоненты теплоизлучающих шлангов через узел циркуляции воздуха. Каждая механическая нога содержит бедро, компонент коленного сустава, голень, компонент голеностопного сустава и ступню, соединенные друг с другом и устройством поддержания давления шарнирно-червячными передачами сопряжения.

На этом же космическом и/или чуть более низком атмосферном горизонте призваны функционировать БПЛА с пассивными манипуляторами, предназначенными для захвата летающих целей. Сотрудниками Лаборатории систем наведения, управления и принятия решений Департамента аэрокосмической техники Индийского научного института Бангалора представлен [3] новый дизайн пассивного манипулятора с одной степенью свободы и результаты его интеграции в автономный дрон для захвата движущейся цели. Конечный исполнительный элемент спроектирован пассивным, чтобы отделить движущуюся цель от летающего БПЛА и эффективно захватить ее при наличии помех с минимальным потреблением энергии. Он также справляется с раскачиванием цели и ее вертикальными скачками вниз. Пассивный манипулятор интегрирован с БПЛА с помощью одной механической руки. Реечный механизм, встроенный в этот манипулятор, обеспечивает безопасность выдвижения за пределы корпуса дрона для захвата цели. Автономные эксперименты по захвату проведены с использованием красного шара, подвешенного как к неподвижному, так и к движущемуся БПЛА-дрону.

Несомненный интерес представляет собой системная идентификация БПЛА с приводными законцовками крыла. Целью изысканий, проведенных на Факультете машиностроения и аэрокосмической техники Алабамского университета в североамериканском Хантсвилле стало [4] исследование влияния симметричного и асимметричного срабатывания законцовок крыла на параметры устойчивости малогабаритного с неподвижным крылом, работающего при низком числе Рейнольдса ( $2,5 \times 10^5$ ). Программное обеспечение Advanced Aircraft Analysis и XFRLR5 (метод вихревой решетки) применено для аналитической и вычислительной оценки влияния размаха законцовки крыла на параметры устойчивости. Тренажерный имитатор полета X-Plane использовался для моделирования самолета с активированными законцовками

крыла и для сбора данных на основе моделирования для идентификации системы, которая проводилась для получения математических моделей. Влияние законцовок крыла на производные продольной устойчивости оказалось незначительным. Негативного влияния на производные статической и динамической устойчивости в поперечном направлении за счет срабатывания законцовки крыла не наблюдалось. Характеристики маневренности по крену улучшились за счет асимметричного срабатывания приводных законцовок крыла.

Беспилотные воздушные планеры образуют подкласс БПЛА с неподвижным крылом, которые обладают возможностью обеспечивать устойчивость полета для практических реализаций широкого спектра применений. Автономное парение позволяет этим дронам обнаруживать и использовать восходящие воздушные массы (термики) без участия дистанционного пользователя, что значительно упрощает их действия. В то время как предыдущие исследования были сосредоточены на обнаружении и использовании теплового восходящего потока, первоначальный поворот в точке входа в термик игнорировался. В этом исследовании канадских специалистов в области прикладной робототехники исследуется [5] начальное решение о развороте в момент обнаружения термика, чтобы улучшить летные характеристики за счет полета прямо в термик.

Построена высокоточная имитация серийного радиоуправляемого планера, а также модель исследования и прогнозирования погоды для реалистичной тепловой конвекции. Влияние решений о поворотах на тепловые характеристики исследовано с помощью большого пакетного моделирования в среде Matlab/Simulink. Алгоритмы термической обработки впоследствии интегрируются в полетный стек PX4 для моделирования программного обеспечения в цикле и летных испытаний с использованием полетного контроллера Pixhawk. Моделированные и экспериментальные результаты продемонстрировали важность решений по поворотам для улучшения общих характеристик парения.

В исследовании сотрудников Института робототехники Бейханского университета Пекина оценена [6] эффективность оптимизации конструкции механизма и адаптивного расчета подъемной силы малоподвижного машущего робота с гибкими планарными крыльями. Вводится в рассмотрение пространственный четырехзвенный механизм реализации маховых движений крыльев. Представлен упрощенный подход к количественному расчету подъемной силы и силы тяги незадействованной системы махового крыла. На основе результатов оптимизации по набору конкретных параметров изготовлено несколько прототипов роботов. Результаты

летных экспериментов показали, что представленный механизм передачи и подход к оптимизации теоретически возможны и практически осуществимы.

Крупномасштабное воздушное разворачивание миниатюрных датчиков в сложных условиях окружающей среды требует легкого, прочного и управляемого робототехнического устройства разворачивания. Сотрудниками Группы разработки компонентов инженерных продуктов Сингапурского университета технологий и дизайна представлен [7] новый аппарат на авторотации, способный работать в двух режимах полета: авторотации и пикирования со средним углом планирования  $28,9^\circ$  (1,81 м бокового расстояния на 1 м потери высоты). Двухнаправленный переход между двумя режимами и направленным управлением достигается за счет использования только одного исполнительного механизма. Также для минимизации угла скольжения представлена методология оптимизации конструкции прототипа с технологичным применением самовращающегося крыла, а также новая стратегия циклического управления путевым управлением самовращающимся спуском.

Динамическая модель, смоделированная в среде с шестью степенями свободы с использованием теории элементов лопасти, интегрирована с генетическим алгоритмом для получения параметров геометрии крыла, угла закрылка для авторотации и предлагаемого циклического управления. Физический прототип осуществляет авторотацию со скоростью спуска 1,43 м/с и частотой вращения 4,17 Гц и способен переходить в режим погружения со средней продолжительностью 272 мс для увеличения скорости спуска не менее чем в 17,6 раза. В любой момент погружения он может вернуться в режим авторотации в среднем за 327 мс.

Это проведенное в Национальном научном центре французского Нанта исследование посвящено полному динамическому моделированию и управлению летающей архитектурой в виде летающих параллельных роботов - БПЛА, которую можно рассматривать как дроны воздушных манипуляций. Предлагаемые подходы имеют несколько недостатков, таких как ограничение полезной нагрузки, ограничения автономности, а также возможность манипулирования, на которую влияет недостаточное срабатывание квадрокоптера, если используются стандартные квадрокоптеры с недостаточным приводом.

Для преодоления этих ограничений разработана [8] концепция динамики летающих параллельных роботов, обладающая несколькими преимуществами управления всеми возможными степенями свободы рабочего органа, распределения усилий между несколькими дронами и отсутствия дополнительных встроенных двигателей с увеличением грузоподъемности в рамках общей динамической модели независимо от топологии ветвей и количества используемых

дронов. Создана динамическая модель, которую затем можно использовать для разработки каскадного контроллера, обрабатывающего недостаточное срабатывание. Предложенный подход к моделированию, и стратегия управления были применены для проведения реальных экспериментов с экспериментальными прототипами формирования летающих параллельных роботов.

В рамках повышения эффективности функционирования комплексной транспортной системы китайскими специалистами в области искусственного интеллекта и автоматизации представлена парадигма визуальной навигации и управления посадкой БПЛА для посадки на движущееся наземное и надводное АТС. В нем адаптивное обучающее правило навигации с многоуровневым вложенным наведением предназначено [9] для точного определения положения АТС, а также для направления и управления БПЛА для выполнения горизонтального отслеживания и вертикального снижения в узкой зоне приземления АТС посредством просто обратной связи относительного положения. Для обеспечения реализуемости предложенного закона управления выводятся асимптотические условия устойчивости на основе теории устойчивости по Ляпунову. Проведенные эксперименты свидетельствуют о высокой результативности точного функционирования комплекса взлета-полета-посадки системы БПЛА-АТС, состоящей из БПЛА М-100 и трехметрового АТС собственной разработки HUSTER-30, на озеро.

Автономная посадка квадрокоптера на движущуюся платформу с использованием согласованного управления на основе технического зрения продемонстрировала свою сверхэффективность. Проведенное на Кафедре мехатроники Факультета машиностроения Технологического университета им. К. Н. Туси Тегерана исследование посвящено автономному маневру посадки квадрокоптерного БПЛА на беспилотное наземное АТС с несвязанными системами совместного управления. Таким образом поставлена задача разработки замкнутой системы управления на основе технического зрения для квадрокоптерного БПЛА, выполняющего автономные посадочные маневры за возможно минимальное время, несмотря на силу возмущения, вызванную ветром [10]. Для такой нелинейной недовозбужденной системы квадрокоптера разработан и в ней применен нечеткий пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор дробного порядка.

Кроме того, в закон управления включен член линеаризации обратной связи для компенсации нелинейности модели. Алгоритм диспетчерского управления предлагается в качестве автономного генератора траектории для выполнения быстрой, плавной и точной посадки.



А составной реперный маркер AprilTag использован в качестве цели системы визуального позиционирования, обеспечивая высокоточное относительное позиционирование в диапазоне от 10 до 350 см по высоте. На платформе операционной системы Windows реализован испытательный стенд программного моделирования в цикле взлета-полета-посадки БПЛА. Проведено численное моделирование с предложенной системой управления квадрокоптером, подвергающимся воздействию различных возмущения, и проанализирована динамика актуатора с насыщенной выходной тягой.

Несомненный интерес представляет собой адаптивная система автономной посадки винтокрылых БПЛА, которые сами по себе могут быть дополнительно оптимизированы в качестве инструментов на борту водных судов и военных кораблей с развитием недостающей инфраструктуры, такой как успокоители их качки в море. Современные технологии сосредоточены на системах технического зрения, мало учитывающих движение судна или корабля. Новая автономная техника посадки Университета Далхаузи канадского Галифакса проходит [11] экспериментальные испытания с акустическим позиционированием, позволяющим приземляться в более широком диапазоне условий и уменьшать зависимость от специально разработанных посадочных целей.

Планировщик траектории потенциальных полей в ней используется для адаптации к движению судна или корабля и обеспечения уклонения от препятствий и естественного отклонения от вздымающейся палубы. Предиктор состояния моря используется для компенсации более суровых морских условий и движения судна или корабля, позволяя БПЛА искать подходящие окна для посадки в более высоких состояниях волнующегося моря.

В прикладном смысле эксплуатации БПЛА, наряду с бортовым перемещением разных объектов, повышенного внимания заслуживают системы подвесной доставки грузов, в том числе позволяющие в режиме реального времени проводить совместную оценку параметров неоднородной полезной нагрузки нескольких квадрокоптеров комплекса БПЛА.

Сотрудниками Колледжа машиностроения Тегеранского университета в углубленном исследовании рассмотрена проблема переноса неизвестной неоднородной полезной нагрузки несколькими квадрокоптерами, нагрузка на которые моделируется как твердое тело с неизвестной массой и положением центра тяжести агентов и включается в их динамические уравнения движения. Предполагается [12], что агенты и нагрузка связаны друг с другом натянутыми канатами или тросами. Уравнение Удвадиа-Калабы использовано для расчета ограничивающих

сил на канатах, действующих на каждый квадрокоптер. Представлены контроллеры внутреннего и внешнего контура для управления положением и ориентацией каждого квадрокоптера. Для внешнего контура используется алгоритм оценки, основанный на инвариантности и адаптивном управлении высотой полета, для оценки неизвестных физических параметров полезной нагрузки, включая массу и положение центра тяжести, без использования многоосевых датчиков силы/момента с использованием адаптивного контроллера. Результаты моделирования для двух и четырех агентов-квадрокоптеров, несущих неоднородную стержневую и кубическую полезную нагрузку, показали эффективность предложенного алгоритма. Также проанализировано влияние расположения квадрокоптера на продолжительность полета совместной воздушной группы, несущей неоднородную полезную нагрузку.

Использование БПЛА в виде квадрокоптеров для воздушных перевозок может быть экономически эффективным при оптимизации реальных и импровизированных погрузочно-разгрузочных работ. Однако такие приложения ограничены в основном из-за необходимости использования бортовых датчиков локализации и связанных с ними вычислений. Сотрудниками Лаборатории робототехники, ориентированной на человека, Индийского технологического института в Ахмадабаде представлен [13] управляемый человеком способ успешного выполнения спонтанного полета квадрокоптера на открытом воздухе с полезной нагрузкой, подвешенной на тросе. Стабильность полетов достигнута за счет бортовой интеграции специальной сенсорной системы и контроллера для минимизации колебаний полезной нагрузки. Осуществимость предлагаемого метода продемонстрирована в проведенных экспериментах на открытом воздухе и тематическом исследовании в неструктурированной среде.

Насколько разнообразны приложения возможностей БПЛА можно судить по реализациям как обычных и даже специфических транспортных систем, так и таких необычных и даже экзотических, как воздушные гонки дронов, например. Сотрудниками Кафедры нейроинформатики Департамента информатики Цюрихского университета Швейцарии представлена [14] инновационная система проведения автономных гонок дронов на основе машинного зрения, сочетающая абстракцию изученных данных, нелинейную фильтрацию и планирование траектории с оптимальным временем. Система была успешно развернута на первом чемпионате мира по автономным гонкам на дронах: AlphaPilot Challenge. В отличие от традиционных систем гонок дронов, которые обнаруживают только следующие ворота, инновационный подход использует любые видимые ворота и использует преимущества одновременного обнаружения нескольких ворот, чтобы компенсировать дрейф в оценке состояния и построить глобальную

карту ворот. Глобальная карта и оценка состояния с компенсацией сноса позволяют дрону перемещаться по трассе гонки, даже если ворота не видны сразу, а также позволяют планировать почти оптимальный по времени путь по трассе гонки в режиме реального времени на основе приблизительной динамики дрона. Продемонстрировано, что предлагаемая система успешно направляет дрон на узких гоночных трассах, достигая скорости до 8 м/с, что позволило БПЛА-дрону с ней занять второе место в AlphaPilot Challenge 2019 г.

Безопасность целевого использования наиболее распространенных БПЛА – квадрокоптеров эффективно осуществляется планированием в режиме реального времени и реализацией траектории их перемещений на основе алгоритмов управления с той или иной степенью жесткостью ограничений контролируемых параметров. Об этом наглядно свидетельствуют данные экспериментальных и практических реализаций возможностей оптимизации систем управления БПЛА.

Так, например, по результатам углубленного тематического исследования тщательно изучено с точки зрения безопасности, плавности и динамической осуществимости планирования траектории полета квадрокоптера сотрудниками Колледжа компьютерных наук и технологий Чжэцзянского технологического университета китайского Ханчжоу предложено [15] несколько методов оптимизации эффективности дальней навигации. Квадрокоптер часто имеет высокую вычислительную сложность при выполнении задач, в которых задействовано как минимум несколько вычислительных модулей определения местоположения, картографирования, планирования и т.д. Установлено, что повышение эффективности планирования и безопасности полета может сэкономить вычислительные ресурсы и повысить эффективность транспортировки для выполнения большего количества задач.

Представлен метод планирования траектории в реальном времени, который может обеспечить навигацию на большие расстояния с меньшим количеством планирования и временем расчета, при этом значительно сокращая время полета для быстрого достижения целевой точки. Новый метод основан на жестких ограничениях, таких как безопасное расстояние, коридоры полета в свободном пространстве, и ограничения гладкости, которые могут обеспечить высокое качество прохождения траектории. Для каждого сценария улучшенный алгоритм Theta\* может позволить получить кратчайшую начальную траекторию с несколькими ключевыми путевыми точками. Затем сегменты начальной траектории низкого качества отбираются и оптимизируются с помощью обнаружения локального перепланирования и оптимизации на

основе коридора полета, соответственно. Эффективность полета, непрерывность и динамическая осуществимость значительно повышаются за счет метода распределенного распределения времени. Результаты экспериментов показали, что время полета на основе этого модифицированного улучшенного метода на 22...56% меньше, чем у современных методов с жесткими ограничениями при полете около 50 м, а общее время расчета меньше на 19...84%. что связано с уменьшением планового числа онлайн-расчетов отобранных оптимизированных вариантов возможных сценариев.

Сотрудниками Кафедры электротехники и вычислительной техники Факультета естественных наук и технологий Университета китайского Макао и Института систем и робототехники Университета Лиссабона предлагается решение задачи следования по траектории БПЛА-квадрокоптера с неизвестными параметрами аппарата (массой и моментом инерции) и внешними возмущениями. Используя технику обратного шага, предлагаемая стратегия адаптивного управления гарантирует [16] следующее: квадрокоптер глобально направляется и удерживается в пределах произвольно малой окрестности желаемого гладкого пути, достигая глобальной равномерной конечной ограниченности; по сравнению с отслеживанием траектории достигается более плавная сходимость, т.к. сигналы срабатывания управления (сила тяги и крутящий момент) ограничены по отношению к погрешности положения, а разработанный закон времени обеспечивает начало движения по желаемой траектории только тогда, когда транспортное средство приближается к желаемой траектории пути. А единый адаптивный закон управления может использоваться для точного управления движением летательных аппаратов с широким диапазоном инерционных свойств без необходимости перенастройки коэффициентов усиления управления или других параметров. Кроме того, контроллер также устойчив к внешним постоянным и медленно меняющимся во времени возмущениям за счет разработки устройств оценки возмущений. Представлены и проанализированы результаты моделирования и эксперимента, демонстрирующие эффективность и производительность предлагаемых стратегий управления.

Снижение потребляемой мощности робототехнической системой и/или устройством играет важную роль в повышении ее энергоэффективности и должно учитываться в процессе ее проектирования. Это тематическое исследование сотрудников Факультета машиностроения Технологического университета иранского Баболя посвящено [17] динамическому моделированию и оптимизации энергопотребления машины-авиаимитатора с четырьмя степенями свободы. Кабина тренажера испытательной машины подвержена рысканиям, тангажу, крену и

качке, создаваемыми параллельным манипулятором. Аппаратными возможностями метода Эйлера-Лагранжа выведено динамическое уравнение в замкнутой форме для манипуляционного робота с четырьмя степенями свободы перемещений, а его энергопотребление рассчитывается на всей рабочей области. Результаты экспериментов верифицированы на числовых примерах.

Если в большинстве обычно небольших голономных БПЛА используется как минимум четыре мощных толкающих привода, что приводит к увеличению массы, инерции и потребления энергии, то в исследовательской работе сотрудников Инженерно-механического колледжа и Колледжа мехатроники Национального технического университета Афин разработана [18] новая конструкция БПЛА, использующая только три мощных толкающих привода. Динамика наведения высокоскоростных мотор-винтовых сборок проанализирована современными аппаратными возможностями исследовательских инструментов моделирования и виртуального эксперимента, в результате чего выявлена колебательная гироскопическая динамика. Она изучена для оценки частоты векторных колебаний, важных при выборе исполнительных механизмов. Разработана геометрическая структура управления без сингулярностей, состоящая из новой схемы распределения управления и нового векторного контроллера. Учтены доказательства стабильности и рассмотрена надежность контроллера. Предоставлены результаты математических имитаций в среде комбинированного программно-вычислительного пакета MATLAB/GAZEBO, продемонстрировавшие эффективность разработанной системы проектирования и управления; БПЛА с независимой регулировкой положения/отношения (полное управление положением) с использованием только трех приводов тяги. Проанализированы инерциальная система отсчета с энергетическим потенциалом до 3 кДж, масса тела до 3 кг, его инерция в 3 кгм<sup>2</sup>, относительная угловая скорость тела до 3 рад<sup>-1</sup> постоянной плотности воздуха, сила тяжести тела, возмущающий момент ветра и другие параметры внешних воздействий в тех же абсолютных диапазонах величин 0...3 ед.

Генерация траектории является фундаментальной проблемой для любого типа робота. В большинстве приложений роботы должны достигать своих целей за минимально возможное время. Генерация оптимальной по времени траектории позволяет решить эту проблему благодаря новым приложениям в транспортных, доставочных и поисково-спасательных миссиях, а также в других приложениях в спорте и развлечениях, таких как гонки дронов. Текущее состояние техники в значительной степени основано на полиномиальных методах, и большинство

методов выбирают консервативный подход при ограничении скорости или ускорения как способ учета нелинейностей и гарантии выполнимости, что ограничивает оптимальность времени и скорость траектории. Сотрудники Лаборатории исследований в области информатики Университета Парижа-Сакле попытались [19] преодолеть это ограничение, предлагая новую формулу для генерации траекторий мультироторов, которая учитывает такие нелинейности, как гравитация и аэродинамическое сопротивление. Это позволяет предоставлять более оптимальные по времени решения на основе инновационного алгоритма с использованием новой формулировки для генерации почти оптимальной по времени траектории БПЛА с учетом препятствий/ограничений пути. Эффективность этого подхода успешно верифицирована с помощью современного имитатора-тренажера в сравнении с другими методами генерации оптимальной по времени траектории.

Эффективным методом обеспечения безопасности БПЛА является технологичная реализация модификаций способа интеллектуального совместного предотвращения их столкновений с подвижными и неподвижными объектами и субъектами разными аппаратными и программно-вычислительными средствами, среди которых выделяется алгоритм нечетких потенциальных полей. Сотрудниками Кафедры аэрокосмической техники и инженерной механики Университета североамериканского Цинциннати, например, разработан и предлагается [20] для практических реализаций интеллектуальный совместный подход к предотвращению столкновений, сочетающий расширенное потенциальное поле с системой нечеткого вывода для устранения локальных минимумов и целей, недостижимых с препятствиями поблизости, и обеспечения почти оптимальной траектории без столкновений. Генетический алгоритм используется для оптимизации параметров функции принадлежности и базы правил системы нечеткого вывода. для обучения используется единый сценарий, содержащий набор всех проблем и возможных взаимодействий между БПЛА. Для верификации производительности рассмотрены два сценария, содержащие препятствия разной формы и несколько БПЛА в небольшом воздушном пространстве. Многочисленные результаты моделирования показали, что предлагаемый подход статистически превосходит традиционный подход расширенного потенциального поля.

Сотрудниками Факультета электроники Университета алжирской Батны в этом тематическом исследовании рассматривается эффективная реализация возможностей надежного синергетического контроллера планирования оптимальной траектории и управления квадроко-

птером в сложных условиях. Метод кривой Безье введен [21] для планирования пути квадрокоптера, где контрольные точки будут генерироваться автоматически, чтобы избежать столкновения с чем-либо, сохраняя высокую точность для обнаружения препятствий. Кроме того, кривые В-сплайна генерируются для сравнения характеристик предлагаемого подхода. Синтезирован синергетический контроллер для управления ориентацией квадрокоптера и формально установлен анализ устойчивости предлагаемого метода. Численное моделирование представлено для того, чтобы показать эффективность предлагаемого контроллера. Экспериментальная проверка на испытательном стенде квадрокоптера проведена для подтверждения заявленных теоретических результатов.

На кафедре машиностроения Университета Лексингтона (шт. Кентукки, США) разработан инновационный интегрированный метод наведения и управления для автономного предотвращения столкновений и навигации в не нанесенной на карту среде с отказом от средств и возможностей GPS-навигации, содержащей неизвестные препятствия. Алгоритм реализован [22] на экспериментальном кастомном квадрокоптере, который использует встроенное зондирование сканерного технического зрения, например, Intel RealSense R200 для определения положения препятствий. Все измерения возможностями системы обратной связи получены в натуральных экспериментах от бортовых датчиков. Новый алгоритм наведения и управления использует нелинейный контроллер ориентации с внутренним контуром; нелинейный регулятор скорости среднего контура; и алгоритм управления внешним контуром с эллипсоидальным потенциальным полем для предотвращения столкновений и поиска пункта назначения в угловом диапазоне  $\pm 90^\circ$ , обеспечивая локально экспоненциально устойчивое равновесие замкнутой динамики ориентации.

В настоящее время безопасность и кибербезопасность являются одними из наиболее важных вопросов, связанных с развитием операций беспилотных авиационных систем. В целях безопасности законодатели и авиационные власти прилагают немало усилий для установления адекватного уровня безопасности полетов в рамках существующей системы воздушного пространства. Одним из них является методология оценки конкретных эксплуатационных рисков, разработанная Объединенными органами по нормотворчеству в отношении беспилотных летательных аппаратов. Эта методология представляет собой руководство по проведению оценки рисков для беспилотных полетов в рамках конкретной категории. Однако, эта методология поддерживает только некоторые проблемы, связанные с безопасностью. В рамках ее совершенствования французскими специалистами в этой сфере деятельности разработан и представлен

[23] инновационный подход к распространению общей методологии на кибербезопасность. Ее реализация проиллюстрирована охватом проблемы конфиденциальности, связанной с кибербезопасностью. Кроме того, представлен вспомогательный инструмент в виде веб-приложения, помогающий пользователям проводить автоматическую оценку рисков.

## **2. Мобильные роботы наземного базирования**

В этом классе роботов – широкий набор подвижных устройств: от ползающих и лазающих до шагающих и катящихся, т. е. колесных, самые массовые из которых – автомобильные АТС. Определяющими их надежную и уверенную эксплуатацию, как и в других классах, являются факторы безопасности и локализации на траектории движения с предотвращением столкновений. Эта и другие утилитарные функции высокотехнологично полуавтоматически, т.е. с участием оператора (водителя, например), и на разном уровне автоматизации реализуются выполняющими роль роботов электронными интеллектуальными системами управления.

Как в любой сфере человеческой деятельности, в робототехнике проявляются эффекты взаимосвязи, взаимопроникновения и комбинации принципов и стилей реализации возможностей роботов во всех их конструктивно-технологических и управленческих решениях. Одним из ярких примеров таких технических комплексов является использование роботов сразу в нескольких средах «обитания».

Так, китайскими специалистами в области искусственного интеллекта и многофункциональной робототехники из Ключевой лаборатории теории механизмов и оборудования Университета и производственной компании реализации креативных робототехнических технологий Тяньцзиня описывается конструкция инновационного прототипа нового трансформируемого наземно-воздушного робота, способный к наземному и воздушному передвижению. Необычно в этом роботе то, что он может по желанию переключаться между двумя режимами передвижения с помощью трансформируемого механизма, что позволяет [24] роботу двойного гражданского и военного назначения преодолевать большие препятствия в своей миссии.

Колесный механизм робота используется как для наземного, так и для воздушного передвижения, вместо простого добавления квадрокоптера к колесному мобильному роботу. Созданы кинематическая и динамическая модели рассматриваемого трансформируемого робота с усовершенствованной конструкцией ведущих колес и трансформируемого механизма. С физическим прототипом была проведена серия экспериментов по энергетическому анализу и пе-



реходу от режима воздушного движения к режиму наземного передвижения; результаты которых подтвердили правильность нового дизайна и теоретического анализа, который помогает оптимизировать ключевые параметры конструкции - прототипа летающего автомобиля.

Способность мобильных роботов определять свое местоположение является одним из наиболее важных их свойств, позволяющих получать информацию об окружающей среде и постоянно отслеживать свое положение и направление перемещения. Среди алгоритмов локализации алгоритм адаптивной локализации Монте-Карло чаще всего применяется для локализации роботов, системы вероятностной локализации двумерной среды для решения таких проблем, как высокая вычислительная сложность и потеря мобильных роботов, которые существуют в традиционном методе Монте-Карло. Предлагаемый сотрудниками Национального Тайбэйского технологического университета Тайваня метод основан [25] на двумерной лазерной информации, информации дальномера и алгоритма Монте-Карло для решения задачи локализации. Кроме того, этот алгоритм оптимизирован для повышения точности локализации на местности, которую легко не определить, с появлением возможности успешно определять местонахождение при возникновении ошибки локализации. Результаты экспериментов показали, что улучшенный алгоритм адаптивной локализации Монте-Карло может эффективно повысить точность позиционирования робота, что более практично, чем при реализации исходного алгоритма.

Чтобы выполнить одновременную локализацию и картографирование на основе радара, такую информацию об эго-движении независимого перемещения робота, как его угол поворота и скорость, следует учитывать вместе с данными датчика радара. Для решения этой задачи специалистами в области навигации из Корейского Института новых медиа и коммуникаций и Корейского аэрокосмического университета предлагается [26] использовать метод оценки эго-движения робота с применением только радиолокационного датчика без каких-либо других устройств. Для оценки угла поворота робота в таком случае используется распределение обнаруженных точек на двумерной плоскости. Распределения обнаруженных точек в последовательные моменты времени коррелируют друг с другом, и на основе этой корреляции оценивается угол поворота. Скорость движения робота оценивается по линии тренда, образованной обнаруженными точками на плоскости. Для оценки эффективности предлагаемого метода информация об эго-движении робота, полученная от электродвигателя робота, сравнена с информацией, оцененной по данным радиолокационного датчика. Сравнение скорости рыскания, по-

лученной каждым методом, показало, что предложенный метод позволяет оценить угол поворота робота с погрешностью  $3^\circ$ , а его-скорость оснащенного радаром робота - с погрешностью 0,073 м/с.

По результатам проведенного на Инженерном факультете управления и автоматизации Стамбульского технического университета Маслак предлагается новый отслеживатель пути для автономных роботов путем перепроектирования классического алгоритма избегания препятствий «Follow the Gap Method (FGM)». До сих пор такой или подобный ему алгоритм не использовался для динамического отслеживания глобального плана последовательных путевых точек. Но, это очень фундаментальное требование для автономных роботов. Чтобы использовать его возможности в качестве динамического средства отслеживания, предлагаемая методология заимствует «упреждающее расстояние» из методов геометрического отслеживания пути и адаптирует его к локальному планировщику. Упреждение определяется [27] как расстояние от робота до желаемой путевой точки на отслеживаемом пути.

В предлагаемом решении определяется динамический и оптимизированный алгоритм реализации возможностей локального планировщика, который автоматически регулируется скоростью робота. Динамическая функция модифицированного алгоритма оптимизирована для увеличения возможностей отслеживания, уклонения и комфорта. Это исследование является первым, в котором упреждение расстояния используется вместе с глобальным планировщиком как часть целой автономной системы. Оптимизация алгоритма выполняется с различными весовыми коэффициентами в функции стоимости. Для сравнения влияния весовых коэффициентов на оптимизацию используются три метрики.

Эти показатели представляют собой среднеквадратичные значения «расстояния до пути», «расстояния до препятствия» и «величины общего ускорения». Например, согласно результатам экспериментов, когда коэффициент отслеживания удваивается при оптимизации, показатель расстояния до пути составляет от 0,424 м до 1,23 м, что указывает на то, что робот отслеживает лучше. Аналогичные эффекты на другие показатели наблюдаются при изменении соответствующих коэффициентов. Помимо моделирования, на реальной автономной платформе для инвалидных колясок проведены эксперименты в реальных условиях эксплуатации мобильных роботов, показавшие эффективность предлагаемого подхода в режиме реального времени.

Для повышения точности одновременной локализации и картирования (SLAM) мобильных роботов в сложных внутренних условиях сотрудниками Колледжа электроники и информации Университета науки и технологий Цзянсу китайского Чжэньцзяна предлагается [28] использовать метод SLAM с несколькими фильтрами Бернулли, сбалансированный по мощности, для нескольких роботов (MR-CBMber-SLAM). Прежде всего, этот метод вводит мультифильтр Бернулли, основанный на теории случайных конечных множеств, для решения сложной проблемы ассоциации данных. Этот метод направлен на преодоление проблемы, заключающейся в том, что комбинированный фильтр с несколькими отдельными фильтрами Бернулли будет переоценивать аспект оценки характеристик карты SLAM, и сочетает стратегию балансировки кардинальности с фильтром с несколькими фильтрами Бернулли. Более того, для дальнейшего повышения точности и эффективности работы SLAM предлагается стратегия с несколькими роботами и метод слияния гауссовой информации с несколькими роботами. В эксперименте реализация метода MR-CBMber-SLAM была сравнена по результативности и эффективности с реализацией традиционного метода SLAM плотности гипотезы вероятности для нескольких автономных, т.е. беспилотных автомобильных колесных транспортных средств. Результаты оценок данных экспериментов показали, что метод MR-CBMber-SLAM лучше традиционного по оперативной адаптации к сложной внутренней среде региональной системы эксплуатации.

Наряду с комплексностью решения проблем управления, использование комбинированных принципов реализации перемещений оказывается еще и более эффективным в практической робототехнике.

Так, например, лидарное световое обнаружение и определение дальности широко используются для наблюдения с воздуха и автономного вождения АТС. Возможности робототехники или даже микроробототехники могут быть значительно улучшены, если они оснащены лидаром, но из-за массовых и габаритных ограничений необходимо использовать очень легкие и маленькие их конструктивные исполнения. Микророботы имеют размеры, близкие к птицам или насекомым, и почти все существующие лидары слишком тяжелы и слишком велики для них. В совместной тематической исследовательской работе североамериканских и китайских специалистов в области прикладной информации и электроники предлагается и демонстрируется [29] новый микроэлектромеханический системный (МЭМС) лидар с оптическим сканером, отделенным от основания. Головку сканера несет движущийся микроробот, а основание

лидара закреплено на земной поверхности. Они соединены друг с другом тонким гибким опто-электрическим кабелем.

Головка сканера состоит из МЭМС-зеркала и стержневой линзы, которая весит всего 10 г и имеет длину менее 4 см. Зеркало МЭМС-сканера имеет апертуру  $1,2 \text{ мм} \times 1,4 \text{ мм}$  и может сканировать достаточно широкое поле зрения. В головку сканера встроен инерциальный измерительный блок для отслеживания движения. Разработан алгоритм для реконструкции истинных облаков точек, позволяющий инновационному лидару с подвижной головкой получать 400 точек в секунду и обнаруживать цели на расстоянии до 35 см.

Наиболее распространенными, не считая шагающих и ползающих антропометрических и биоподобных, и промышленных сборочных, сварочных и упаковочных универсальных технологических роботов, в классе специальных наземных роботов являются их мобильные представители в виде колесных АТС.

В реализации возможностей улучшенных систем управления выделяется модифицированный метод отслеживания пути колесных мобильных роботов в виде АТС с использованием векторного поля навигации на основе онлайн-оптимизации. В рамках реализации этой проблемной оптимизации китайскими, гонконгскими и израильскими специалистами в области искусственного интеллекта исследованы [30] способы эффективного решения задачи следования по траектории движения колесного мобильного робота с неголономными ограничениями. Задача одометрического отслеживания пути представлена в виде поля вектора наведения, для которого используется онлайн-процедура оптимизации для оценки ошибки пути. Используя принцип сжатия на основе матричных мер, теоретически гарантируется свойство сходимости разработанного векторного поля по отношению к пути. Разработан нелинейный контроллер для отслеживания заданного наведения таким образом, чтобы управляемый мобильный робот – АТС следовал заданному пути при наличии неизвестных возмущений, включая несмоделированную динамику и поверхностное трение. Проанализированы свойства устойчивости замкнутой системы и показано, что ошибка пути в конечном итоге сходится к остаточному множеству, которое может быть уменьшено за счет увеличения коэффициента усиления интенсивности управления.

Сотрудниками Боннского университета Германии для автоматического управления автомобильными АТС предлагается [31] использовать модифицированную сиамскую сеть OverlapNet для оценки сходства между парами лидарных сканирований с целью реализации процедур замыкания информационной петли и локализации и отображения местоположения

активного автомобиля, являющихся ключевыми способностями автономных систем на интеллектуальной дорожно-транспортной сети. Это возможности предлагается использовать как для закрытия цикла SLAM - реализации метода, используемого в мобильных роботах, для построения электронной карты в неизвестном пространстве или для ее обновления в заранее известном пространстве с одновременным контролем текущего местоположения и пройденного пути, а также и для глобальной локализации.

В модифицированном подходе используется глубокая нейронная сеть, использующая различные сигналы, полученные из данных лидарных сканеров. Она оценивает сходство между парами сканов, используя концепцию перекрытия изображений, обобщенную для изображений диапазона, и, кроме того, обеспечивает оценку относительного угла рыскания. Основываясь на таких прогнозах, появляется способность обнаруживать замыкания цикла в системе SLAM или глобально локализоваться на заданной электронной карте. Для обнаружения замыкания петли используется прогноз перекрытия в качестве измерения подобия, чтобы найти кандидатов на замыкание цикла и интегрировать выбор кандидатов в существующую систему SLAM для улучшения производительности сопоставления.

Для глобальной локализации предлагается новая модель наблюдения, использующая прогнозы, предоставленные OverlapNet, и интегрирующая их в структуру локализации Монте-Карло. Экспериментальные результаты оценки эффективности этого модифицированного подхода на нескольких наборах данных, собранных с помощью разных лидарных сканеров в различных средах, показали, что появляется возможность эффективного обнаружения замыкания информационной петли, превосходя эффективность обнаружения современных методов, и что он хорошо обобщается для различных сред. Кроме того, установлено, что этот метод надежно локализует транспортное средство, в т.ч. и в первую очередь, автономное в типичной городской среде по всему миру, используя данные лидарных сканеров, собранные в разные сезоны года.

Навигация в неизвестной среде без какой-либо ранее существовавшей инфраструктуры позиционирования всегда была сложной задачей для мобильных роботов. В исследовании сотрудниками Университета итальянского Тренто представлена [32] сверхширокополосная инфраструктура UWB - беспроводная технология связи на малых расстояниях при низких затратах энергии, использующая в качестве несущей сверхширокополосные сигналы с крайне низкой спектральной плотностью мощности, которую можно развертывать самостоятельно мобильными агентами, что позволяет динамически размещать и расширять во время выполнения

инфраструктурных привязок, пока робот исследует новую среду. Представлен подробный анализ неопределенности системы позиционирования по мере роста инфраструктуры UWB. Разработан генетический алгоритм, который сводит к минимуму развертывание новых потерь, экономя энергию и ресурсы мобильного робота и максимально увеличивая время выполнения миссии. Хотя представленный подход является общим для любого класса мобильных систем, проведены виртуальные имитации и натурные эксперименты с комнатными дронами.

Специалистами в области искусственного интеллекта из Массачусетского технологического института США представлены экспериментальные апробации модификаций быстрых методов без выборки для оценки риска для траекторий АТС, когда вероятностные прогнозы будущего других агентов транспортных потоков генерируются глубокими нейронными сетями. Они эффективно реализуются [33] в широком спектре неопределенных прогнозов, включая как гауссовские, так и негауссовские смешанные модели, для прогнозирования как позиций агентов, так и управляющих входных данных в зависимости от контекста ситуации. Показано, что проблема оценки риска при изучении гауссовских смешанных моделей позиций агентов может быть решена быстро с произвольным уровнем точности с помощью существующих численных методов. Для решения проблемы оценки риска для негауссовых смешанных моделей положения агента предлагается нахождение верхних границ риска с использованием нелинейного уравнения Чебышева. Программирование неравенства и суммы квадратов представляют интерес, поскольку первый метод преобразования информации намного быстрее, а второй может быть сколь угодно плотным.

Эти подходы требуют только статистических моментов более высокого порядка позиций агентов для определения верхних границ риска. Для адекватной реальным эксплуатационным ситуациям оценки риска еще на стадии изучения модели входных данных управления агентом, а не для позиций, моменты неопределенных входных данных управления распространяются через нелинейную динамику движения, чтобы получить точные моменты неопределенного положения на горизонте планирования. Построены детерминированные линейные динамические системы, которые управляют точным изменением во времени моментов неопределенного положения при наличии неопределенных управляющих воздействий.

Китайскими специалистами в области прикладных информационных технологий предлагается надежная и точная схема локализации для беспилотных наземных АТС в средах, где отсутствует и недоступна система глобального позиционирования формата GPS с помощью подхода слияния нескольких датчиков. Схему локализации предлагается [34] проводить под

доступной картой облака точек. Инициализация в модуле локализации предназначена для расчета начального положения беспилотника на карте с использованием подхода гауссовой проекции и получения преобразования кадра между трехмерным лидаром и инерциальным измерительным блоком. Таким образом достигается наилучшее выравнивание между каждым кадром сканирования и доступной подкартой, и вычисляется положение транспортного средства относительно начала карты. Точное положение беспилотника хорошо предсказывается путем интеграции данных трехмерного лидара и инерциального измерительного блока. Для визуальной верификации предложенной схемы локализации движение АТС спроектирован модуль визуализации с предварительной обработкой необработанных данных сканирования.

Применение мобильных роботов, схожих со среднеразмерными, чаще всего компактными, автомобилями, используемыми на внутренних и региональных дорогах общего пользования становится все шире и шире. Для достижения цели стабильного и эффективного, в том числе смешанного, автомобильного дорожного движения с участием таких компактных АТС сотрудниками Государственной ключевой лаборатории механических трансмиссий Колледжа машиностроения и автомобилестроения Чунцинского университета Китая предлагается [35] алгоритм планирования движения на основе модели гибридного потенциального поля. В нем для создания безопасного и беспрепятственного начального пути, который соответствует дорожным ограничениям, используется модель искусственного потенциального поля, улучшенная с помощью модели машинного зрения. Такие ограничения пути, как кривизна траектории движения и препятствия преобразуются в неограниченную взвешенную целевую функцию.

Эффективный алгоритм слияния методом наименьших квадратов и квазиньютона используется для оптимизации начального пути для получения так называемой гладкой кривой пути, подходящей для АТС - мобильного робота. Ограничения скорости преобразуются во взвешенную целевую функцию на основе кривой пути, чтобы получить наилучший профиль скорости. Результаты численного моделирования и практических экспериментов с прототипами в различных дорожных условиях для проверки работоспособности предложенного алгоритма показали, что перепланированные траектории могут удовлетворять ограничениям пути и ограничениям скорости. Период перепланирования в реальном времени составил 184 мс, что демонстрирует высокую эффективность и практическую реализуемость предлагаемого подхода.

Для эффективной навигации АТС должны адекватно, точно и оперативно воспринимать окружающую среду, такую как препятствия, полосы движения и свободное пространство, для

обеспечения безопасности. Достигнутые решения этой проблемы основаны на методе глубокого обучения по отдельности, что зачастую приводит к повторному использованию ресурсов. Устранение этого недостатка сотрудниками Кафедры автоматизации Университета науки и технологий и Института искусственного интеллекта Комплексного национального научного центра китайского Хэфэя предлагается [36] достигать технологичным использованием унифицированной сети совместного обнаружения полос движения и препятствий, ULODNet с возможностью дополнительного создания зоны беспрепятственного движения для мобильных роботов или других автономных транспортных средств.

Чтобы лучше координировать обучение ULODNet, создан новый набор данных на основе широко используемого набора данных CULane. Новый набор данных содержит как метки дорожной разметки, так и метки препятствий, которых нет в исходном наборе данных. Для построения интегрированной схемы автономного вождения вводится парадигма пересечения площадей для генерации команд управления путем расчета доли площади препятствий в управляемых областях. Результаты хорошо спланированных сравнительных экспериментов подтвердили эффективность и действенность нового алгоритма.

Одновременная локализация и картографирование (SLAM) широко изучались в последние годы для оптимальной реализации в АТС. SLAM достигает своей цели, создавая карту неизвестной среды, отслеживая местоположение. Основная проблема, которая имеет первостепенное значение при разработке систем SLAM, заключается в эффективном использовании бортовых датчиков для восприятия окружающей среды. Наиболее широко применяемыми алгоритмами являются SLAM на основе камеры и SLAM на основе оптической системы LiDAR. Ранее проведенные исследования были сосредоточены на объединении платформ на основе камер и LiDAR, которые показывают многообещающие результаты. В этом тематическом исследовании сотрудников Университета Парижа-Сакле основное внимание уделено [37] широко используемым датчикам и фундаментальным теориям, лежащим в основе алгоритмов SLAM.

Представлены аппаратные архитектуры, используемые для обработки этих алгоритмов, и достигнутая производительность. Выделены самые современные методологии в каждой области модальности и в мультимодальной структуре. Предоставлена информация о возможных подходах к слиянию, которые могут повысить надежность и точность современных алгоритмов SLAM; следовательно, допускается совместная разработка аппаратных и программных



средств встроенных систем с учетом алгоритмической сложности, встроенных архитектур и ограничений в реальном времени.

АТС уже серийно оснащаются радарными, камерными и лидарными из-за их дополнительных возможностей восприятия окружающей среды. Тем не менее, точное отслеживание траектории движущегося впереди транспортного средства становится критически важной задачей, когда на ведущем, т.е. движущемся спереди, транспортном средстве выходит из строя лидар, например, в особенности, в сложных условиях освещения. В этом случае сотрудниками Техасского университета в североамериканском Остине и Колледжа машиностроения Юго-восточного университета китайского Нанкина для решения этой критической проблемы предлагается [38] комплексное решение, основанное на обучении. Оно состоит в комбинации из Q- модели смеси Гаусса на основе обучения для кластеризации плотных радиолокационных данных, метода весового планирования для ассоциации радиолокационных данных и переключаемой рекуррентной нейронной сети с ячейками двухуровневой долговременной кратковременной памяти для отслеживания траектории движения.

Взаимосвязь и комбинация принципов управления с применением возможностей пространственной лидарной системы интеллектуальной навигации оказывается эффективной не только в наземных, но и в водных, а также комплексных наземных/водных робототехнических устройствах. По результатам углубленных исследований сотрудников Колледжа автоматизации Юго-Восточного университета Нанкина и Колледжа мехатронной инженерии и автоматизации Шанхайского университета (оба - Китай) разработана [39] предназначенная для использования на открытом пространстве высокодинамичная и подверженная шумовым наводкам инновационная онлайн-система 3D LIDAR интеллектуальной навигации наземных/водных беспилотных АТС с функцией одометрии во внешнем интерфейсе и функцией закрытия цикла во внутреннем интерфейсе.

Некоторые реализации метода используются в беспилотных автомобилях, летательных аппаратах, автономных подводных аппаратах, планетоходах. Линейная интерполяция используется в нем для устранения искажения движения, вызванного движениями робота на этапе предварительной обработки данных. Функцию одометрии реализуют два узла: узел локализации объединяет улучшенный комплект базы данных Super4PCS со стандартным спектрометрическим модулем ввода-вывода данных для реализации согласования сканирования от грубого к точному и выводит информацию о местоположении робота с частотой 5 Гц; узел кор-

рекции представляет на дисплее интерфейса локальную карту с динамической структурой хранения сетки вокселей. Это может ускорить процесс сопоставления нормальной дистрибутивной трансформации между ключевыми кадрами и локальной картой, а затем исправляет узел локализации на частоте для получения более точной информации о местоположении. В функции замыкания контура вводится подход к обнаружению контуров на основе местоположения, и частота перекрытия облаков точек используется для проверки контуров, так что глобальная оптимизация может быть выполнена для получения высокоточных оценок траектории и карты.

Предлагаемый метод был тщательно протестирован на тесте одометрии с набором задач с машинным или техническим (компьютерным) зрением, созданный с использованием платформы для автономного вождения с данными объектов, включая монокулярные изображения и ограничивающие рамки, с 7481 обучающими изображениями, помеченными трехмерными ограничивающими рамками, а также испытан в реальных условиях кампуса и гавани. Результаты показали, что данный метод имеет низкую зависимость от реализаций GPS-навигации, высокую точность позиционирования (глобальный дрейф - менее 1%) и хорошую экологическую устойчивость.

### **3. Мобильные роботы водного базирования**

Как и в случаях посадки БПЛА на водные платформы и суда [11], а также управления наземными/водными робототехническими системами [39], весьма показательная реализация комбинированных систем навигационного управления утилитарными АТС в виде колесно-плавающих амфибий.

Исследование метода совместного управления несколькими роботами имеет широкую перспективу применения и значение в области робототехники. Для адаптации к различным рабочим средам и повышения эффективности в этом совместном исследовании китайских специалистов в области практических приложений теории управления к сложным системам из Тяньцзиньского технологического университета Китая и интеллектуальных механических систем - из Университета Кагава японского Такамацу разработана [40] автономная система совместного управления несколькими сферическими мультироботами-амфибиями.

Предложена стратегия формирования сферического мультиробота-амфибии и использован алгоритм линейно-квадратичного регулятора для корректировки траектории перемещения каждого такого отдельного робота с эффективным использованием беспроводной связи XBee с превосходными коммуникационными характеристиками в условиях низкого коэффициента шума для полного обмена информацией мультироботов в режиме реального времени.

Результаты экспериментов показали, что сферический мультиробот-амфибия может точно осуществлять совместное управление в различных условиях в соответствии с заранее определенной траекторией.

С развитием интеллектуальных бионических роботов и совершенствованием гражданских и военных технологий в рамках их двойного применения один и тот же робот не может соответствовать требованиям задач современной эпохи. Более сложные задачи требуют не только того, чтобы робот мог проходить через полевые барьеры и амфибийную среду, но и того, чтобы робот мог взаимодействовать в общей системе с несколькими роботами. Следовательно, исследования многороботной системы управления сферическими амфибийными роботами очень важны. В настоящее время основное исследование роботов-амфибий заключается в улучшении функций одного робота при отсутствии изучения системы управления несколькими роботами. Существующие системы в основном используют методологию централизованного управления. Хотя перенос центрального узла может быть достигнут, все еще существует проблема т.н. византийской отказоустойчивости в военных приложениях, т.е. когда десантная система с несколькими роботами захвачена противником. Центральный узел может не только не выполнить поставленную задачу, но и потерять контроль над другими роботами с тяжелыми последствиями. Для решения вышеперечисленных проблем специалистами Тяньцзиньской ключевой лаборатории теории управления и приложений в сложных системах и Лаборатории интеллектуальных роботов Тяньцзиньского технологического университета Китая и Инженерного факультета интеллектуальных механических систем Университета японской Кагавы предложен децентрализованный метод управления мультироботами сферической амфибии на основе технологии блокчейн. Была создана [41] информационная сеть «точка-точка», основанная на технологии дальней радиосвязи маломощной глобальной сети. Разработана система блокчейна для среды встроенных приложений и децентрализованная аппаратно-программная архитектура системы управления несколькими роботами. На этой основе для достижения децентрализации были разработаны консенсусный плагин, смарт-контракт и децентрализованный алгоритм управления несколькими роботами.

Взаимопроникновение и комбинация принципов действия устройств, наделенных возможностями искусственного интеллекта, реально эффективны и для роботов водного и подводного базирования, технологично реализующих способности наиболее продвинутых, в том числе и главным образом, автомобильных навигационных систем.

Так, например, сотрудниками Колледжа электротехники и компьютерных наук Королевского технологического института Стокгольма, автомобильной компании Saab и также шведского производителя телекоммуникационного оборудования Ericsson, и Центра автономных морских операций и систем Норвежского университета науки и технологий в Тронхейме исследованы [42] различные возможные решения задачи совместного сопровождения подводной цели с помощью автономных надводных аппаратов. В качестве оптимального решения рассматривается управление формацией на основе расстояния с потенциальной функцией предотвращения столкновений. Протокол управления формацией разработан и применен к задаче отслеживания формации. С этим протоколом АТС образуют желаемый строй вокруг движущейся цели, чтобы непрерывно оценивать ее положение, в то время как центр масс строя отслеживает цель. Практически глобальная устойчивость доказана для случая с тремя агентами слежения. Для реализации производных алгоритмов была построена полностью рабочая платформа с четырьмя ведомыми подводными роботами. Один из них использовалась для имитации цели, а остальные - для формирования вокруг нее треугольной формации.

В ряду чисто адаптивно-ориентированных по «среде обитания» роботов выделяются автономные подводные аппараты, выполняющие командную задачу, оснащаются разряжающимися и требующими подзарядки бортовыми источниками энергии. По результатам проведенной исследовательской работы сотрудниками Факультета инженерной механики, транспорта и аэронавтики Рижского технического университета предлагается [43] метод рекуперации энергии из окружающей среды. Этот эффект изучен для движения привода двойного действия, который получает энергию из жидкости. Понятно, что хлопающий или вибрирующий исполнительный механизм может использоваться для явления извлечения энергии помимо нетрадиционной движущей силы. Подробно проанализирована эффективность использования простого привода с двумя откидными створками, который может переключаться между простой сплошной и перфорированной пластиной в крайних конечных положениях (углах) с помощью эффективного мехатронного механизма, который помогает в преодолении вязких сил рабочей среды.

Основной целью данной разработки стало создание нового подхода к получению энергии и перезарядке блока питания бортовых источников из окружающей среды, а также роботизированной рыбы, способной работать автономно, используя нетрадиционный двигатель наряду с возможностью восстановления энергии с помощью двойного вибрационного привода с переменным сечением. Во время перезарядки робот-рыба выдвигает свой хвост (привод) из

воды и использует окружающую среду (воздух) для сбора энергии. Все уравнения, описывающие процесс, составлены по классическим законам механики.

Наряду с конструктивно-технологической оптимизацией, для роботов водного базирования, также как и для других их типов, важным является алгоритмическое оснащение их программного обеспечения. В этом плане несомненный интерес представляет собой модифицированное решение задачи коммивояжера на траектории Дубинса перемещения геологоразведывательного автономного подводного аппарата. Оно состоит [44] в том, чтобы спланировать минимальный по времени маршрут для инспектирования нескольких целей на дуге окружности плоскости. Эта же проблема возникает при подводной минной охоте, когда цели представляют собой миноподобные объекты на морском дне, которые проверяются подводным аппаратом, оборудованным гидролокатором. Каждая орбита имеет заданный угол, так что акустический отклик цели измеряется по различным относительным геометриям классифицируемой цели и контрольного гидроакустического датчика.

Задача оптимизации состоит в том, чтобы разделить набор целей на орбиты Дубинса и определить положение, радиус, направление и угол входа подводного аппарата для каждой из них. Целевые алгоритмы представлены сотрудниками Факультета машиностроения и инженерных наук Университета шт. Северная Каролина в Шарлотте и Отделения физической акустики Лаборатории военно-морских исследований Вашингтона, округ Колумбия (оба - США) для ограниченного случая, когда каждая траекторная орбита проверяет только одну цель, и общего случая с проверкой нескольких целей.

Подход облегчается аналитическими условиями, которые идентифицируют допустимые кластеры целей как клики дискового графа. Область применения расширена для рассмотрения планирования пути при наличии постоянного равномерного тока. Построение переходов основано на теореме Дубинса, которая говорит о том, что для тела с заданным минимальным радиусом поворота переход из одного положения на плоскости в другое можно построить оптимальным образом максимум из трех сегментов - левого поворота, прямого и правого поворота в определенном порядке. Инновационный алгоритм был реализован в среде Matlab.

Роботы могут помогать и дополнять людей в исследовании враждебной среды, в том числе под водой. Например, системы подводных автономных аппаратов-манипуляторов исследованы и применялись в подводных операциях. В связи с необходимостью сбора морских организмов, культивируемых на мелководных аквафермах, сотрудниками Государственной клю-

чевой лаборатории управления и контроля сложных систем Института автоматизации Китайской академии наук исследован легкий и портативный автономный подводный аппарат, приводимый в движение гибкими плавниками (названными, а не типичными гребными винтами или реактивными двигательными установками). С этой целью впервые представлена [45] интеграционная мехатронная конструкция привода, включающая шесть флипперных движителей для создания тяги машущим образом, рычаг с четырьмя степенями свободы для захвата и определенное количество бортовых датчиков для восприятия окружающей среды. Создана платформа для измерения тяги и мощности для оценки соотношения тяги и мощности для ласт разного размера и жесткости.

Сотрудниками Колледжа автоматизации и информационной инженерии Сианьского технологического университета Китая для расчета силы дополнительной массы, сопротивления воды и силы удара потока воды на манипулятор при движении двухшарнирного подводного манипулятора использованы [46] теория срезов и уравнение Морисона. На основе традиционной модели динамики манипулятора создана полная динамическая модель двухшарнирного подводного манипулятора. На основе полученной динамической модели подводного манипулятора предложена стратегия управления скользящим режимом реализации радиальных базисных функций (Radial basis functions - RBF), представляющих собой набор методов жесткой интерполяции. Множественные нейронные сети RBF используются для аппроксимации неопределенных членов в динамической модели подводного манипулятора в блоках, а функция насыщения используется для улучшения контроля реализации оптимального функционирования. Оценена устойчивость такой системы управления и проведено сравнительное верификационно-испытательное моделирование. Его результаты показали, что алгоритм разработанной системы управления лучше, чем реализации традиционного управления скользящим режимом и обычный алгоритм управления скользящим режимом RBF. Алгоритм, предложенный в данной работе, позволяет сократить время совместного срабатывания подводного манипулятора до 1 с, уменьшить среднюю установившуюся ошибку до  $3 \times 10^{-6}$  рад, а также ослабить бафтинговый эффект системы управления, удовлетворяя требованиям к современному подводному манипулятору

Нельзя не отметить роль подводных роботов в поддержании экологической безопасности с эффективными мероприятиями по охране окружающей среды, среди которых выделяется реализация проекта очистки морского дна от мусора.

В рамках кооперативного проекта SeaClear (финансируется ЕС) консорциум из восьми научных и проектных организаций из пяти стран разработал и провел [47] первые практические испытания уникальной установки, которая состоит из двух подводных роботов, надводного судна и дронов. Один из роботов вместе с дронами обнаруживает, локализует и идентифицирует мусор, второй робот захватывает его специальным грейфером. Испытания на Средиземном море вблизи г. Дубровник (Хорватия) закончились успешно. Работы по проекту продолжаются (срок завершения - декабрь 2023 г.)

### **Заключение**

Приведенные примеры исследований, разработок и практических реализаций возможностей специализированных и специальных робототехнических устройств, систем и комплексов свидетельствуют о большом их разнообразии и эффективности использования в самых разных сферах человеческой деятельности: от помощника человека-оператора использующегося для самых целей разведки, слежения и сопровождения автономного транспортного средства до инспектора работоспособности таких технических систем как трубопровод, ядерный реактор и скафандр космонавта.

### **Список использованных источников**

1. Bena R.M., Nguyen X.-T., Yang X., Ariel C.A., Chen Y., Nestor P.-A. O. A Multiplatform Position Control Scheme for Flying Robotic Insects// Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications.- 2022, Vol. 105, № 1.- P. 108-112.
2. Liu J., Chi H., Li Z., Wang T., Chen K., Sun Q., Xiao L., Sun H., Liu X., Tong C. Robot for testing lower limb performance of spacesuit – Патент США № 11241803. Оpubл. 08.02.2022 (Заяв. 19.12.2018 № 16/956582).
3. Vidyadhara B. V., Tony L. A., Gadde M. S., Jana S., Varun V. P., Bhise A. A., Sundaram S., Ghose D. Design and integration of a drone based passive manipulator for capturing flying targets. - С. 2349 - 2364. - англ. // Robotica, 2022, Том 40, № 7.
4. Sai B.R., Chatterjee A., Konstantinos K. System Identification of an Unmanned Aerial Vehicle with Actuated Wingtips// Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications.- 2022, Vol. 105, № 1.- P. 107-115.
5. Tin F.E., Borowczyk A., Sharf I., Nahon M. Turn Decisions for Autonomous Thermalling of Unmanned Aerial Gliders// Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications.- 2022, Vol. 104, № 2.- P. 21-27.

6. Sun W., Yu J., He G., Cai Y. Study on Transmission Mechanism and Flexible Flapping Wings of an Underactuated Flapping Wing Robot// *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications.*- 2022, Vol. 104, № 2. - P. 115-119.
7. Win S. K. H., Win L. S. T., Sufiyan D., Soh G. S., Foong S. An Agile Samara-Inspired Single-Actuator Aerial Robot Capable of Autorotation and Diving// *IEEE Transactions on Robotics.*- 2022, Vol. 38, № 2.- P. 1033-1046.
8. Six D., Briot S., Chriette A., Martinet P. Dynamic modelling and control of flying parallel robots// *Control Engineering Practice.*- 2021, Vol. 117.- P. 104-113.
9. Zhang H.-T., Hu B.-B., Xu Z., Cai Z., Liu B., Wang X., Geng T., Zhong S., Zhao J. / Visual Navigation and Landing Control of an Unmanned Aerial Vehicle on a Moving Autonomous Surface Vehicle via Adaptive Learning// *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems.*- 2021, Vol. 32, № 12.- P. 5345-5355.
10. Ghasemi A., Parivash F., Ebrahimian S. Autonomous landing of a quadrotor on a moving platform using vision-based FOFPID control// *Robotica.*- 2022, Vol. 40, № 5.- P. 1431-1449.
11. Ross J., Seto M., Johnston C. Autonomous Landing of Rotary Wing Unmanned Aerial Vehicles on Underway Ships in a Sea State// *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications.*- 2022, Vol. 104, № 1.- P. 85-92.
12. Arab F., Shirazi F.A., Hairi Y.M.R. Cooperative parameter estimation of a nonuniform payload by multiple quadrotors// *Robotica.*- 2022, Vol. 40, № 5.- P. 1587-1606.
13. Prajapati Pratik, Parekh Sagar, Vashista Vineet / On-board cable attitude measurement and controller for outdoor aerial transportation. - C. 1650 - 1664. // *Robotica*, 2022, Tom 40, № 5.
14. Foehn P., Brescianini D., Kaufmann E., Cieslewski T., Gehrig M., Muglikar M., Davide S. AlphaPilot: autonomous drone racing// *Autonomous Robots.*- 2022, Vol. 46, № 1.- P. 307-320.
15. Chen P., Jiang Y., Dang Y., Yu T., Liang R. Real-Time Efficient Trajectory Planning for Quadrotor Based on Hard Constraints// *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications.*- 2022, Vol. 105, № 3.- P. 103-111.
16. Xie W., Cabecinhas D., Cunha R., Silvestre C. / Adaptive Backstepping Control of a Quadcopter With Uncertain Vehicle Mass, Moment of Inertia, and Disturbances// *IEEE Transactions on Industrial Electronics.*- 2022, Vol. 69, № 1.- P. 549–559.
17. Soheil Z. Dynamic modeling and power optimization of a 4RPSP+PS parallel flight simulator machine// *Robotica.*- 2022, Vol. 40, № 3.- P. 646-671.



18. Michalis R., Papadopoulos E. On Modeling and Control of a Holonomic Tricopter// Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications.- 2022, Vol. 105, № 3.- P. 84-95.
19. Toumieh C., Lambert A. Near Time-Optimal Trajectory Generation for Multirotors using Numerical Optimization and Safe Corridors// Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications.- 2022, Vol. 105, № 1.- P. 63-72.
20. Choi D., Chhabra A., Kim D. Intelligent cooperative collision avoidance via fuzzy potential fields// Robotica.- 2022, Vol. 40, № 6.- P. 1919-1938.
21. Chara K., Abdessemed Y., Srairi F., Mokhtari K. A robust synergetic controller for Quadrotor obstacle avoidance using Bézier curve versus B-spline trajectory generation// Intelligent Service Robotics.- 2022, Vol. 15, № 1.- P. 143-152.
22. Kirven T., Hoagg J.B. Autonomous quadrotor collision avoidance and destination seeking in a GPS-denied environment// Autonomous Robots.- 2021, Vol. 45, № 1.- P. 99-118.
23. Tran T.D., Jean-Marc T., Marchand N., Mrabti A.E. A Cybersecurity Risk Framework for Unmanned Aircraft Systems under Specific Category// Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications- 2022, Vol. 104, № 1.- P. 55-64.
24. Song Y., Hao C., Yue W., Sun T., Lian B., Yung Z. Kinematic analysis and design of a novel transformable wheeled-legged mobile robot //Tianjin daxue xuebao.- 2022, Vol. 55, № 2.- P. 111-112.
25. Chung M.-A., Lin C.-W. An Improved Localization of Mobile Robotic System Based on AMCL Algorithm// IEEE Sensors Journal.- 2022, Vol. 22, № 1.- P. 900-908.
26. Lim S., Jung J., Kim S.-C., Lee S. / Radar-Based Ego-Motion Estimation of Autonomous Robot for Simultaneous Localization and Mapping// IEEE Sensors Journal, 2021, Том 21, № 19.- P. 21791-21797.
27. Sezer V. An Optimized Path Tracking Approach Considering Obstacle Avoidance and Comfort// Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications.- 2022, Vol. 105, № 1.- P. 18-25.
28. Zhang Z., Zhang F., Ji C. Multi-robot cardinality-balanced multi-Bernoulli filter simultaneous localization and mapping method// Measurement Science and Technology.- 2022, Vol. 33, № 3.- P. 35-41.
29. Wang D., Xie H., Thomas L., Koppal S. J. A Miniature LiDAR With a Detached MEMS Scanner for Micro-Robotics// IEEE Sensors Journal.- 2021, Vol. 21, № 19.- P. 21941-21946.

30. Chen J., Wu C., Yu G., Narang D., Wang Y. Path Following of Wheeled Mobile Robots Using Online-Optimization-Based Guidance Vector Field// IEEE/ASME Transactions on Mechatronics.- 2021, Vol. 26, № 4.- P. 1737-1744.
31. Chen X., Läbe T., Milioto A., Timo R., Behley J., Stachniss C. OverlapNet: a siamese network for computing LiDAR scan similarity with applications to loop closing and localization// Autonomous Robots.- 2022, Vol. 46, № 1.- P. 61-81.
32. Santoro L., Brunelli D., Fontanelli D. On-Line Optimal Ranging Sensor Deployment for Robotic Exploration// IEEE Sensors Journal.- 2022, Vol. 22, № 6.- P. 5417-5426.
33. Jasour A., Huang X., Wang A., Williams B. C. Fast nonlinear risk assessment for autonomous vehicles using learned conditional probabilistic models of agent futures// Autonomous Robots.- 2022, Vol. 46, № 1.- P. 269-282.
34. Wu Y., Li Y., Li W., Li H., Lu R. Robust Lidar-Based Localization Scheme for Unmanned Ground Vehicle via Multisensor Fusion// IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems.- 2021, Vol. 32, № 12.- P. 5633-5643.
35. Chen X., Huang Z., Sun Y., Zhong Y., Gu R., Bai L. Online on-Road Motion Planning Based on Hybrid Potential Field Model for Car-Like Robot// Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications.- 2022, Vol. 105, № 1.- P. 152-164.
36. Zhang Z., Jiahu Q., Shuai W., Yu K., Liu Q. ULODNet: A Unified Lane and Obstacle Detection Network Towards Drivable Area Understanding in Autonomous Navigation// Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications.- 2022, Vol. 105, №1.- P. 128-139.
37. Mohammed Chghaf, Rodriguez Sergio, Ouardi Abdelhafid El / Camera, LiDAR and Multi-modal SLAM Systems for Autonomous Ground Vehicles: a Survey// Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications.- 2022, Vol. 105, № 1.- P. 181-200.
38. Cao M., Wang R., Chen N., Wang J. / A Learning-Based Vehicle Trajectory-Tracking Approach for Autonomous Vehicles With LiDAR Failure Under Various Lighting Conditions// IEEE/ASME Transactions on Mechatronics.- 2022, Vol. 27, № 2.- P. 1011-1022.
39. Zhou B., He Y., Qian K., Ma X., Li X. S4-SLAM: A real-time 3D LIDAR SLAM system for ground/watersurface multi-scene outdoor applications// Autonomous Robots.- 2021, Vol. 45, № 1.- P. 77-98.
40. Guo J., Li C., Guo S. Study on the Autonomous Multirobot Collaborative Control System Based on Spherical Amphibious Robots// IEEE Systems Journal.- 2021, Vol. 15, № 4.- P. 4950-4957.

41. Guo S., Cao S., Guo J. Study on Decentralization of Spherical Amphibious multi-robot Control System used on Smart Contact and Blockchain// Journal of Bionic Engineering.- 2021, Vol. 18, № 6.- P. 131-137.
42. Ringbäck R., Wei J., Erstorp E. S., Kutteneuler J., Johansen T. A., Johansson K. H. Multi-Agent Formation Tracking for Autonomous Surface Vehicles// IEEE Transactions on Control Systems Technology.- 2021, Vol. 29, № 6.- P. 2287-2298.
43. Tipans I., Viba J., Irbe M., Vutukuru S.K. Investigation of dual varying area flapping actuator of a robotic fish with energy recovery// Agronomy Research.- 2020, Vol. 18. Spec. Issue 1.- P. 1046-1048.
44. Wolek A., McMahon J., Dzikowicz B.R., Houston B.H. The Orbiting Dubins Traveling Salesman Problem: planning inspection tours for a minehunting AUV// Autonomous Robots.- 2021, Vol. 45, № 1.- C. 31-49.
45. Wang Y., Cai M., Wang S., Bai X., Wang R., Tan M. Development and Control of an Underwater Vehicle-Manipulator System Propelled by Flexible Flippers for Grasping Marine Organisms// IEEE Transactions on Industrial Electronics.- 2022, Vol. 69, № 4.- P. 3898-3908.
46. Zhao W., Zhang X., Yang S. Research on RBF sliding mode control algorithm for underwater manipulator based on partitioned approximation of dynamic model// Xi'an ligong daxue xuebao.- 2021, Vol. 37, № 4.- P. 555-570.
47. Erfolgreicher Praxistest: Roboter sammelt Unterwassermüll// Schiff und Hafen: International Publication for Shipping, Offshore and Marine Technology.- 2022, Vol. 74, № 1-2.- S. 41.