

КОНОПЛИН Александр Юрьевич

**МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕОБИТАЕМЫМИ
ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО
ВЫПОЛНЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ ОПЕРАЦИЙ**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в лаборатории подводных манипуляционных комплексов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты: **Французова Галина Александровна**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета,
г. Новосибирск

Пшихопов Вячеслав Хасанович
доктор технических наук, профессор, директор
НИИ робототехники и процессов управления
Южного федерального университета, г. Таганрог

Серков Дмитрий Александрович
доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник отдела динамических систем
ФГБУН Институт математики и механики
им. Н.Н. Красовского УрО РАН, г. Екатеринбург

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
научное учреждение «Центральный научно-
исследовательский и опытно-конструкторский
институт робототехники и технической
кибернетики» (ЦНИИ РТК), г. Санкт-Петербург

Защита состоится « » июня 2025г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.027.01 на базе Института автоматике и процессов управления ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАПУ ДВО РАН и на сайте <http://www.iacr.dvo.ru/diss/dis4>

Автореферат разослан « » 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 24.1.027.01

Петрунько Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы. Повышение эффективности выполнения манипуляционных операций в глубинах Мирового океана с помощью необитаемых подводных аппаратов (НПА), оснащаемых многозвенными манипуляторами (ММ), является очень актуальной задачей. Для обследования больших полигонов, обнаружения объектов и выполнения с ними рабочих действий целесообразно использовать автономные или гибридные НПА. Работа таких аппаратов-роботов не требует использования специализированных обеспечивающих судов, многочисленного обслуживающего персонала, их перемещения не ограничены длиной кабель-троса, и они способны преодолевать десятки километров в поисках целевых объектов. Манипуляторы значительно расширяют функциональные возможности НПА, обеспечивая забор грунта с определенных участков, сбор морских организмов, установку маячков и различного оборудования, а также их очистку и обслуживание. Эти операции во многих случаях требуется выполнять быстро в режиме зависания НПА над или вблизи объекта работ, так как время подводных работ часто ограничено, а их стоимость очень высока.

На сегодняшний день уже существует значительный задел в области проектирования и создания систем управления (СУ) НПА с установленными на них ММ, большой вклад в который внесли отечественные и зарубежные ученые В.В. Вельтищев, В.В. Костенко, В.Ф. Филаретов, G. Antonelli, J. Yuh и др.

Однако имеющийся задел в этой области науки все еще не позволяет обеспечить качественное выполнение НПА распространенных подводных манипуляционных операций в автономном режиме. Причиной этому являются нерешенные проблемы управления этими сложными динамическими объектами в экстремальных и неопределенных морских условиях, когда невозможно точно определить параметры воздействия вязкой среды на НПА и ММ, а навигационная информация поступает от бортовых сенсоров и систем технического зрения (СТЗ) с неизбежными ошибками и задержками. При этом крайне затруднено распознавание окружающей подводной обстановки и идентификация целевых объектов работ, которые в агрессивной среде подвержены заиливанию, обрастанию, коррозии и деформации.

Также следует отметить, что при выполнении особенно ответственных операций без участия человека-оператора невозможно распознать сложные объекты, а также точно определять места пробоотбора и параметры траекторий движения ММ. В этих случаях применяются телеуправляемые НПА (ТНПА), однако утомительное ручное управление ММ должно быть заменено эффективным формированием целеуказаний в супервизорном режиме.

Поэтому для повышения эффективности и расширения области использования НПА с ММ требуется разработка новых методов и СУ, обладающих улучшенными функциональными возможностями.

Цель диссертации – разработка и исследование комплекса новых методов и СУ НПА с ММ, согласованная работа которых обеспечит в неопределенных условиях морской среды распознавание окружающей обстановки и объектов работ, формирование целевых программных сигналов и управление перемещениями НПА и рабочих инструментов (РИ) ММ для автономного выполнения манипуляционных операций в режиме стабилизируемого зависания НПА в заданной точке пространства.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**.

Разработка метода синтеза комбинированной автоматической системы стабилизации НПА в режиме зависания в заданной точке пространства в процессе работы ММ.

Разработка методов синтеза СУ подводными ММ, обеспечивающих выполнение манипуляционных операций с требуемыми точностью и скоростью движения РИ.

Разработка методов формирования программных сигналов управления НПА и ММ для автономного выполнения операций с заранее неизвестными поверхностями объектов в неопределенных условиях окружающей среды.

Разработка метода идентификации известных объектов работ на основе облаков точек, получаемых от бортовых СТЗ, с последующим построением траекторий движения РИ ММ по поверхностям этих объектов с учетом их заиливания, обрастания и деформации.

Разработка системы информационной поддержки деятельности операторов ТНПА, обеспечивающей согласованное управление глубоководным робототехническим комплексом в условиях сложного рельефа дна, а также супервизорное выполнение наиболее ответственных манипуляционных операций под контролем оператора.

Программно-аппаратная реализация разрабатываемых СУ и исследование особенностей их функционирования с помощью численного моделирования, натурных экспериментов, а также морских экспедиционных работ.

Методы исследования. Были использованы методы теории автоматического управления, теории дифференциальных уравнений, компьютерной графики, теоретической механики, численного моделирования разработанных систем управления, а также методы проведения аэродинамических и гидродинамических экспериментов.

Научная новизна заключается в создании следующих новых методов.

1. Метод синтеза комбинированной автоматической системы стабилизации НПА в режиме зависания, включающей в себя разомкнутый контур, обеспечивающий подачу на двигатели НПА сигналов, пропорциональных вычисленному силовому и моментному воздействию со стороны работающего ММ, и следящую систему, компенсирующую неточности указанных вычислений. Эти вычисления выполняются алгоритмом решения обратной задачи динамики (ОЗД), учитывающим линейную и квадратичную

зависимости силовых воздействий вязкой среды на звенья ММ от скорости движения этих звеньев. При этом предложен подход к экспериментальному определению параметров воздействия вязкой среды на звенья ММ.

2. Методы синтеза СУ подводными ММ, которые за счет введения самонастраивающихся корректирующих устройств электроприводов ММ компенсируют негативные влияния вязкой среды на точность его работы, при этом за счет введения дополнительных контуров управления программными сигналами обеспечивается корректирование конфигурации ММ, компенсирующее влияние ошибок системы стабилизации НПА на положение и ориентацию РИ ММ, а также достигается увеличение скорости движения этого инструмента с сохранением требуемой точности обработки траекторий.

3. Методы формирования программных (целевых) сигналов управления НПА, обеспечивающие оценку пригодности рельефа дна в зоне работ, подход к донной поверхности в удобном для манипулирования положении, а также точное управление перемещениями аппарата, имеющего нежелательные крен и (или) дифферент под воздействием захваченных манипулятором объектов, посредством коррекции тяг движителей НПА.

4. Метод формирования желаемых траекторий движения и желаемой ориентации РИ подводного ММ по заранее неизвестным рабочим поверхностям, позволяющий учитывать взаимное расположение этих поверхностей и имеющей сложную форму рабочей зоны манипулятора, в которой его РИ может подойти к объекту работ с требуемым углом сервиса.

5. Метод идентификации объектов работ известной формы, обеспечивающий выделение целевого объекта из облака точек, получаемого от СТЗ НПА, и проверку достоверности выполненной идентификации путем проецирования проверочной траектории на триангуляционные поверхности отсканированного объекта и совмещенной с ним эталонной модели. При этом желаемые траектории движения РИ ММ, изначально построенные для эталонной модели объекта, переносятся на триангуляционную поверхность реального объекта, подверженного различным деформациям в морской среде.

6. Система информационной поддержки деятельности операторов ТНПА, которая на основе обработки данных от всех подсистем робототехнического комплекса, а также алгоритма согласованного управления перемещениями судна-носителя, аппарата и его блока-заглубителя в условиях сложного рельефа донной поверхности, выдает предупреждения и рекомендации операторам. Кроме того, система формирует целеуказания ММ в супервизорном режиме посредством наведения управляемой оператором телекамеры, изменяющей пространственную ориентацию оптической оси.

Положения, представляемые к защите.

1. Метод синтеза комбинированной системы автоматической стабилизации НПА в режиме зависания в процессе работы ММ.

2. Методы синтеза СУ подводными ММ, обеспечивающие выполнение

операций с требуемыми точностью и скоростью движения РИ.

3. Методы формирования программных сигналов управления НПА, обеспечивающих автоматическое выполнение манипуляционных операций в условиях неопределенности окружающей среды.

4. Метод формирования желаемых траекторий движения и ориентации РИ ММ по заранее неизвестным поверхностям объектов с учетом кинематических особенностей ММ и требований к выполнению операций.

5. Метод идентификации объектов работ, имеющих заранее известную форму, и построения траекторий движения РИ ММ по поверхностям этих объектов с учетом их заливания, обрастания и деформации.

6. Система информационной поддержки деятельности операторов ТНПА, обеспечивающая согласованное управление глубоководным робототехническим комплексом в условиях сложного рельефа дна, а также супервизорное выполнение наиболее ответственных манипуляционных операций под контролем оператора.

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечивается корректным применением использованных в работе теоретических методов и подтверждается полученными в диссертации результатами численных и экспериментальных исследований.

Теоретическая и практическая значимость, реализация результатов работы. На основе разработанных методов могут быть синтезированы эффективные СУ НПА, позволяющие не только добиться качественного решения существующих на сегодняшний день манипуляционных задач, но и значительно расширить круг работ, выполняемых НПА, оснащенными ММ. Для внедрения в реальные образцы НПА разработанные СУ были реализованы в виде программно-аппаратных средств. Работоспособность и высокое качество работы этих систем подтверждены результатами численного и полунатурного моделирования, а также натурных бассейновых испытаний с использованием АНПА ММТ-3500, оснащенного ММ. Кроме того, реализованная СУ была использована для информационной поддержки операторов ТНПА рабочего класса Comanche-18 в 6-и глубоководных научно-исследовательских экспедициях ННЦМБ ДВО РАН на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в Японском, Беринговом и Охотском морях, а также Тихом океане в 2016-2021гг. Эффективность системы была подтверждена при обследовании протяженных полигонов и выполнении манипуляционных операций в условиях сложного рельефа донной поверхности. При этом было отмечено трехкратное повышение скорости выполнения некоторых подводных работ.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 7-й научно-техн. конф. «Мехатроника, автоматизация, управление» (С.-Петербург, 2010), XII Всеросс. совещ. по проблемам управления (Москва, 2014), Всеросс. мультikonф. по проблемам управления (С.-Петербург, 2014, Геленджик, 2017), 2nd RSI Int. Conf. on Robotics and Mechatronics (Tehran Iran, 2014), DAAAM Int.

Symp. on Intelligent Manufacturing and Automation (Vienna Austria, 2014, Zadar Croatia, 2015, 2016, 2017, 2020), Int. IEEE Conf. on Computer, Control, Informatics and Its Applications (Bandung Indonesia, 2015), Int. IEEE Conf. OCEANS (Shanghai China, 2016), Всеросс. научно-техн. конф. «Робототехника и искусственный интеллект» (Красноярск, 2016, Железногорск, 2018, 2020, 2021), IEEE 2017 Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (С.-Петербург, 2017, 2019), Int. IEEE Conf. on Ocean Studies (Владивосток, 2022, 2023, 2024), Int. IEEE Russian Automation Conference (Сочи, 2023, 2024), Int. IEEE Ural Conference on Electrical Power Engineering (Магнитогорск, 2021, 2023), Междунар. семинаре «Навигация и управление движением» (Владивосток, 2023), Всеросс. научно-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана» (Владивосток, 2017, 2019), Междунар. научно-практ. конф. «Прогресс транспортных средств и систем-2018» (Волгоград, 2018), Междунар. научной конф. «Far East Con» (Владивосток, 2018, 2020), Всеросс. научно-практ. конф. «Перспективные системы и задачи управления» (п. Домбай, 2022, 2023), Всеросс. научно-техн. конф. «Экстремальная робототехника» (С.-Петербург, 2012, 2014, 2015, 2020, 2024) и др.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 98 научных работ, в том числе 21 статья в журналах из списка ВАК РФ; 6 статей в иностранных журналах WoS/Scopus (из них 3 статьи Q1 и 2 – Q2); 23 доклада на конференциях WoS/Scopus; глава в монографии; 9 патентов РФ на изобретения.

Личный вклад автора. Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. В работах [1-6, 8, 11, 16, 21, 23, 27 – 31, 33, 34, 37 – 43, 45, 48, 49, 52, 54] автором созданы методы обработки сенсорной информации, формирования программных траекторий и режимов движения НПА и ММ, динамической стабилизации НПА и управления перемещениями РИ ММ, а также дано обоснование этих методов, выполнено численное моделирование и натурные эксперименты. В работах [14, 17, 19, 20, 22, 26, 35, 36, 50, 53, 56 – 59, 61, 62] сделан вклад в разработку и исследования согласованно функционирующих СУ НПА с ММ для автономного выполнения операций. В работах [7, 10, 25, 44, 47] создана и экспериментально исследована система поддержки деятельности операторов НПА, в работах [9, 15, 24, 32, 46, 51] разработан и исследован метод супервизорного выполнения операций ММ по целеуказаниям оператора. В работах [12, 13, 18, 55, 60] описана технология использования НПА различных типов для выполнения глубоководных исследований, разработанная совместно с коллективами ННЦМБ ДВО РАН и ИПМТ ДВО РАН, эксплуатирующими НПА в морских экспедициях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 304 наименования. Основное содержание работы изложено на 302 страницах машинописного текста. Работа содержит 102 рисунка, 5 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность разработки СУ НПА, позволяющих повысить эффективность, а также полностью автоматизировать выполнение подводных манипуляционных операций в режиме стабилизируемого зависания НПА вблизи объектов работ. Сформулированы цели исследования, дано общее содержание, характеристика и результативность выполненных исследований.

В первой главе рассмотрены особенности подводных исследовательских и технологических операций, выполняемых НПА различного типа, оснащенными ММ. Сформулированы проблемы и технологические барьеры, возникающие в процессе решения манипуляционных задач. Приведены результаты анализа существующих методов динамического позиционирования и навигации НПА в пространстве, управления движением как НПА, так и установленными на них ММ, а также обработки сенсорной информации. При этом выявлено, что для успешного выполнения большинства операций НПА должен стабилизироваться в режиме зависания вблизи объекта работ с помощью тяг его движителей, обеспечивающих управление его перемещениями по шести степеням свободы. Также показано, что уже имеются предпосылки для автоматизации процесса выполнения НПА достаточно сложных манипуляционных операций. Но в то же время были выявлены особенности и недостатки известных подходов и методов, ограничивающие их эффективное применение. В первую очередь точное управление перемещениями НПА с ММ вблизи объектов затруднено сложными определяемыми воздействиями вязкой среды на движущиеся в ней объекты, а также неизбежными задержками и ограниченной точностью измерений бортовыми сенсорами и СТЗ. При этом неопределенность окружающей обстановки осложняет идентификацию целевых объектов, которые в агрессивной водной среде быстро обрастают, заиливаются и деформируются.

По результатам проведенного анализа окончательно были сформулированы и обоснованы цель и задачи исследования, результатом которого должны стать новые методы и СУ НПА, оснащенными ММ, обеспечивающие быстрое и точное выполнение манипуляционных операций вблизи или над морскими объектами как в полностью автоматическом режиме, так и в особенно ответственных случаях под контролем человека-оператора.

Первая группа методов предназначена для динамического управления НПА и установленными на них ММ с целью обеспечения стабилизации аппаратов в режиме зависания и отработки РИ ММ заданных траекторий с требуемой точностью и скоростью движения инструмента. Причем для определения особенностей воздействия вязкой среды на движущиеся с высокой скоростью ММ необходима разработка алгоритма решения ОЗД, а для точной идентификации параметров этого воздействия предлагается подход к экспериментальному определению коэффициентов вязкого трения, входящих в

указанный алгоритм.

Вторая группа методов предназначена для обработки сенсорной информации и формирования программных (целевых) сигналов управления НПА и ММ в процессе автономного выполнения манипуляционных операций в условиях неопределенности окружающей морской среды. В первую очередь эти методы должны обеспечивать оценку пригодности рельефа дна в зоне работ, подход НПА к донной поверхности в удобном для манипулирования положении, а также точное управление перемещениями аппарата с захваченными манипулятором объектами или пробами.

Для построения желаемых траекторий движения РИ ММ рассматриваются два типа операций: с заранее неизвестными поверхностями (отбор проб грунта и бактериальных матов со дна, очистка конструкций от обрастаний и др.), а также с целевыми объектами, форма которых известна. Для каждого из этих случаев необходимо создание методов идентификации объектов работ на основе поступающей от оптических СТЗ информации, и формирования траекторий движения РИ ММ с требуемой ориентацией с учетом взаимного расположения рабочей зоны манипулятора и поверхности объекта, которая может быть подвержена заиливанию, обрастаниям и деформации.

Поскольку наиболее сложные технологические операции выполняются ТНПА под управлением операторов, испытывающих значительные психофизиологические нагрузки, в главе обосновывается необходимость создания системы информационной поддержки деятельности операторов ТНПА, обеспечивающей согласованное управление глубоководным робототехническим комплексом в условиях сложного рельефа дна, а также супервизорное выполнение наиболее ответственных манипуляционных операций под контролем оператора.

В этой же главе отмечается, что помимо программно-аппаратной реализации и всесторонних испытаний предложенных методов и СУ, важно отработать технологию использования НПА различных типов для выполнения глубоководных экспедиционных работ. Эта технология, затрагивающая вопросы планирования миссий, подготовки программного обеспечения, управления НПА и ММ, а также организации погружений и взаимодействий с экипажем судна-носителя, позволит успешно применять в реальных условиях разработанные в диссертации СУ НПА с ММ для эффективного выполнения подводных манипуляционных работ.

Во второй главе для расчета негативных динамических воздействий работающего ММ на НПА разработан рекуррентный алгоритм решения ОЗД для ММ, перемещающегося в водной среде с высокой скоростью. При этом учитывалось, что каждая элементарная часть длиной δh_i^* звена i ММ, имеющего n степеней подвижности, может иметь различную поперечную скорость движения относительно покоящейся жидкости не только по величине,

но и по направлению. Кроме того, сила, действующая на эту элементарную часть со стороны вязкой среды, может иметь линейную или квадратичную зависимости от величины скорости движения этой части. Поэтому каждое звено i ММ разбивалось на N указанных частей, а суммарная сила, действующая на звено, определялась как сумма сил, приложенных к каждой элементарной части j этого звена ($j = \overline{1, N}$).

В результате модификация алгоритма решения ОЗД для ММ имеет вид

$$\omega_i = A_i^{i-1} \cdot \omega_{i-1} + e_i \cdot \dot{q}_i \cdot \bar{\sigma}_i, \omega_0 = \omega_0^*, i = \overline{1, n};$$

$$\dot{\omega}_i = A_i^{i-1} \cdot \dot{\omega}_{i-1} + [(A_i^{i-1} \cdot \omega_{i-1}) \times e_i \cdot \dot{q}_i + e_i \cdot \ddot{q}_i] \cdot \bar{\sigma}_i, \dot{\omega}_0 = \dot{\omega}_0^*, i = \overline{1, n};$$

$$\ddot{P}_i = A_i^{i-1} \cdot (\ddot{P}_{i-1} + \delta_{i-1} \cdot p_{i-1}^*) + (2\dot{q}_i \cdot \omega_i \times e_i + \ddot{q}_i \cdot e_i) \cdot \bar{\sigma}_i, \ddot{P}_0 = P_0^*, i = \overline{1, n};$$

$$\ddot{r}_{mi} = \ddot{P}_i + \delta_i \cdot r_i^*, i = \overline{1, n};$$

$$v_i = A_i^{i-1} \cdot (v_{i-1} + \omega_{i-1} \times p_{i-1}^*), v_1 = v_0, i = \overline{2, n};$$

$$v_{Ai} = v_i + \omega_i \times r_i^*, \psi_i = \arccos \frac{v_{Ai} \cdot p_i^*}{|v_{Ai}| \cdot |p_i^*|}, i = \overline{1, n};$$

$$\alpha_i^* = \arccos \frac{v_i \cdot p_i^*}{|v_i| \cdot |p_i^*|}, \beta_i^* = \arccos \frac{\omega_i \cdot p_i^*}{|\omega_i| \cdot |p_i^*|}, i = \overline{1, n};$$

$$r_{pi} = r_i^* + K_{Ai} \cdot v_{Ai}, i = \overline{1, n};$$

$$v_j^* = v_i + \omega_i \times h_j^*, \omega_{Li} = |\omega_i| e_{Li} \cos \beta_i^*, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, N};$$

$$v_{Li}^* = |v_i| e_{Li} \cos \alpha_i^*, v_{pj}^* = v_j^* - v_{Li}^*, i = \overline{2, n}, j = \overline{1, N};$$

$$Re_{Li} = \frac{\rho v_{Li}^* l_i}{\eta}, i = \overline{n, 1};$$

$$\text{если } Re_{Li} \leq 10^3, \text{ то } F_{RLi} = k_{Li} \eta v_{Li}^*, i = \overline{n, 1};$$

$$\text{если } Re_{Li} > 10^3, \text{ то } F_{RLi} = \frac{1}{2} \rho k_{Li} s_i v_{Li}^{*2}, i = \overline{n, 1};$$

$$Re_{pj} = \frac{2 \rho v_{pj}^* r_i}{\eta}, i = \overline{n, 1}, j = \overline{1, N};$$

$$\text{если } Re_{pj} \leq 10^3, \text{ то } F_{Rpj} = k_i^* \eta v_{pj}^*, i = \overline{n, 1}, j = \overline{1, N};$$

$$\text{если } Re_{pj} > 10^3, \text{ то } F_{Rpj} = \frac{1}{2} \rho k_i^* r_i \delta h_i^* v_{pj}^{*2}, i = \overline{n, 1}, j = \overline{1, N};$$

$$F_{Rpi} = \sum_{j=1}^N F_{Rpj}, i = \overline{n, 1}, j = \overline{1, N};$$

$$M_{Rpi} = h_j^* \times F_{Rpi}, j = \overline{1, N};$$

$$M_{Rpi} = \sum_{j=1}^N M_{Rpj}, i = \overline{n,1}, j = \overline{1,N};$$

$$M_{Li} = k_{Li}^* \eta r_i \omega_{Li}, i = \overline{n,1};$$

$$F_i = A_i^{i+1} \cdot F_{i+1} + (m_i + \Pi_{mi}) \cdot \ddot{r}_{mi} + F_{RLi} + F_{Rpi}, F_{n+1} = 0, i = \overline{n,1}; \quad (1)$$

$$M_i = A_i^{i+1} \cdot M_{i+1} + p_i^* \times (A_i^{i+1} \cdot F_{i+1}) + r_i^* \times (m_i \cdot \ddot{r}_{mi}) + r_{pi} \times (\Pi_{mi} \cdot \ddot{r}_{mi}) + (\tau_i + T_i) \cdot \dot{\omega}_i + \\ + \omega_i \times ((\tau_i + T_i) \cdot \omega_i) + M_{Rpi} + M_{Li}, M_{n+1} = 0, i = \overline{n,1};$$

$$\text{где } \delta_i = \begin{bmatrix} -(\omega_{i(2)}^2 + \omega_{i(3)}^2) & \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(2)} - \dot{\omega}_{i(3)} & \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(3)} + \dot{\omega}_{i(2)} \\ \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(2)} + \dot{\omega}_{i(3)} & -(\omega_{i(1)}^2 + \omega_{i(3)}^2) & \omega_{i(2)} \cdot \omega_{i(3)} - \dot{\omega}_{i(1)} \\ \omega_{i(1)} \cdot \omega_{i(3)} - \dot{\omega}_{i(2)} & \omega_{i(2)} \cdot \omega_{i(3)} + \dot{\omega}_{i(1)} & -(\omega_{i(1)}^2 + \omega_{i(2)}^2) \end{bmatrix} \quad (\text{нижние индексы -}$$

номера элементов в соответствующих векторах); $v_i \in R^3$ – линейная скорость движения шарнира i ; $\omega_i \in R^3$ – угловая скорость вращения звена i ; $p_i^* \in R^3$ – вектор, совпадающий с продольной осью звена i , определяющий положение шарнира $(i + 1)$ относительно шарнира i ; $e_{Li} \in R^3$ – единичный вектор, направленный вдоль продольной оси звена i ; $h_j^* \in R^3$ – вектор, определяющий центр масс элементарной части j звена i длиной δh_i^* относительно шарнира i ; l_i и r_i – длина и радиус звена i ; A_i^{i-1} – матрица перевода векторов из $(i-1)$ -й в i -ю систему координат (СК); $e_i = (0 \ 0 \ 1)^T$ – единичный вектор, направленный вдоль оси шарнира i ; $v_0 \in R^3$ – линейная скорость точки крепления ММ к НПА; $\omega_0^* \in R^3$ – угловая скорость вращения НПА; q_i – обобщенная координата i ММ; $v_j^* \in R^3$ – вектор линейной скорости движения центра масс каждого элемента j звена i ; $v_{Li}^* \in R^3$ и $v_{pj}^* \in R^3$ – продольная и поперечная составляющие вектора v_j^* ; Re_{Li} и Re_{pj} – числа Рейнольдса при движении звеньев ММ параллельно и перпендикулярно их продольным осям; ρ и η – плотность и вязкость жидкости; k_i^* , k_{Li}^* и k_{Li} – экспериментально определяемые коэффициенты; $s_i = \pi r_i^2$ – площадь основания цилиндрического звена i ; $F_{Rpi} \in R^3$ – составляющая силы вязкого трения, действующая на соответствующую элементарную часть j звена i , направленная перпендикулярно продольной оси этого звена; $F_{RLi} \in R^3$ – составляющая силы вязкого трения, направленная вдоль продольной оси звена i ММ; $M_{Rpi} \in R^3$ – момент, создаваемый силой F_{Rpi} ; $F_{Rpi} \in R^3$ – суммарная сила, создаваемая силами F_{Rpi} ; $M_{Rpi} \in R^3$ – момент, создаваемый силой F_{Rpi} ; $v_{Ai} \in R^3$ – линейная скорость центра величины звена i ; $\sigma_i = 1$, если шарнир i поступательный и $\sigma_i = 0$, если он вращательный ($\bar{\sigma}_i = 1 - \sigma_i$); m_i – масса звена i ; $\dot{\omega}_i \in R^3$ – угловое ускорение звена i ; $\omega_{Li} \in R^3$ – составляющая угловой скорости

ω_i , параллельная продольной оси звена i ; $M_{Li} \in R^3$ – момент, создаваемый вращением звена i со скоростью ω_{Li} ; Π_{mi} – присоединенные к звену i массы жидкости; $\ddot{r}_{mi} \in R^3$ – линейное ускорение центра масс звена i ; $r_{pi} \in R^3$ – вектор, задающий положение центра массы Π_{mi} относительно шарнира i ; $r_i^* \in R^3$ – вектор, задающий положение центра масс звена относительно шарнира i ; K_{Ai} – параметр, зависящий от $|v_{Ai}|$ и угла ψ_i ; $\tau_i \in R^{3 \times 3}$ – тензор инерции звена i относительно его центра масс; $T_i \in R^{3 \times 3}$ – тензор инерции массы жидкости, присоединенной к звену i ; $F_i, M_i \in R^3$ – сила и момент этой силы, действующие в шарнире i ; $P_0^* = -g + \ddot{P}_{ПА}$, если центры масс всех звеньев ММ не совпадают с их центрами величины, а если совпадают, то $P_0^* = g \left(\frac{w_i}{m_i} - 1 \right) + \ddot{P}_{ПА}$; $\ddot{P}_{ПА} \in R^3$ – линейное ускорение основания ММ; g – ускорение свободного падения тела; w_i – масса жидкости, вытесненной звеном; где (\times) и (\cdot) – векторное и скалярное произведения векторов соответственно.

Для точного определения коэффициентов вязкого трения k^* , возникающих при поступательном перемещении звеньев ММ в водной среде, предложен подход, основанный на продувке звена в аэродинамической трубе. Таким образом, модифицированный алгоритм (1) позволяет вычислить силу F_1 и момент M_1 , с которыми движущийся ММ воздействует на НПА в точке его крепления к аппарату. Указанные сила и момент должны быть скомпенсированы соответствующими упорами движителей НПА.

В этой же главе описан метод синтеза комбинированной системы автоматической стабилизации положения и ориентации НПА в заданной точке пространства. Схема расположения движителей НПА, обеспечивающая его движение по шести степеням свободы, показана на рис. 1а. На этом рисунке введены обозначения: $P_i (i = \overline{1,6})$ – тяги движителей НПА, направления которых совпадают с продольными осями соответствующих движителей; l, h, k, d – геометрические параметры НПА и компоновки движителей. Первый поворотный шарнир ММ установлен в точке O , в которой на НПА со стороны работающего в водной среде ММ действуют рассчитываемые с помощью описанного выше алгоритма (1) векторы силы F_1 и момента M_1 . Пространственные перемещения НПА происходят в абсолютной СК XYZ .

Требуемые для компенсации векторов F_1 и M_1 значения тяг каждого движителя НПА рассчитываются в СК $X_C Y_C Z_C$ с помощью выражений:

$$P_1 = -\frac{F_{x1}}{2} - \frac{M_{z1} + dF_{y1}}{2l}, \quad P_2 = -\frac{F_{x1}}{2} + \frac{M_{z1} + dF_{y1}}{2l}, \quad P_3 = -\frac{F_{z1}}{2} + \frac{-M_{y1} + dF_{z1}}{2k},$$

$P_4 = -\frac{F_{z1}}{2} + \frac{M_{y1} - dF_{z1}}{2k}$, $P_5 = -\frac{F_{y1}}{2} + \frac{M_{x1}}{2h}$, $P_6 = -\frac{F_{y1}}{2} - \frac{M_{x1}}{2h}$. Реальное положение и ориентация НПА в абсолютной СК XYZ задается вектором $\hat{\eta} = [x, y, z, \gamma, \alpha, \beta]^T \in R^6$, где x, y, z – координаты положения точки С НПА; γ, α, β – углы его крена, дифферента и рысканья; $x_0, y_0, z_0, \gamma_0, \alpha_0, \beta_0$ – значения элементов вектора $\hat{\eta}$, которые необходимо стабилизировать.

Для принятой схемы установки движителей НПА (см. рис. 1а) управление линейной x и угловой β координатами вектора η обеспечивается тягами P_1 и P_2 , управление координатами z и α – тягами P_3 и P_4 , а координатами y и γ – тягами P_5 и P_6 . В связи с этим замкнутая система автоматической стабилизации НПА должна состоять из трех аналогичных одновременно работающих подсистем, каждая из которых управляет одной из трех пар соответствующих движителей.

В СК $X_C Y_C Z_C$ со стороны движителей на НПА действуют результирующая сила $T_c = [T_{xc}, T_{yc}, T_{zc}]^T \in R^3$, где $T_{xc} = P_1 + P_2$, $T_{yc} = P_5 + P_6$, $T_{zc} = P_3 + P_4$, и момент $M_c = [M_{xc}, M_{yc}, M_{zc}]^T \in R^3$, где $M_{xc} = (P_6 - P_5)h$; $M_{yc} = (P_3 - P_4)k$; $M_{zc} = (P_1 - P_2)l$, с помощью которых осуществляется стабилизация НПА.

На рис. 1б показана блок-схема одной из трех подсистем, стабилизирующей НПА по линейной x и угловой β координатам вектора $\hat{\eta}$ с помощью пары движителей Д1 и Д2, создающих тяги P_1 и P_2 соответственно. На этом рисунке R_x и R_β – синтезированные в диссертации регуляторы в цепях стабилизации линейного и углового перемещений НПА; P_{0x} и $P_{0\beta}$ – желаемые значения тяг, необходимых для управления линейной x и угловой β координатами перемещения НПА. Схемы построения остальных двух подсистем аналогичны.

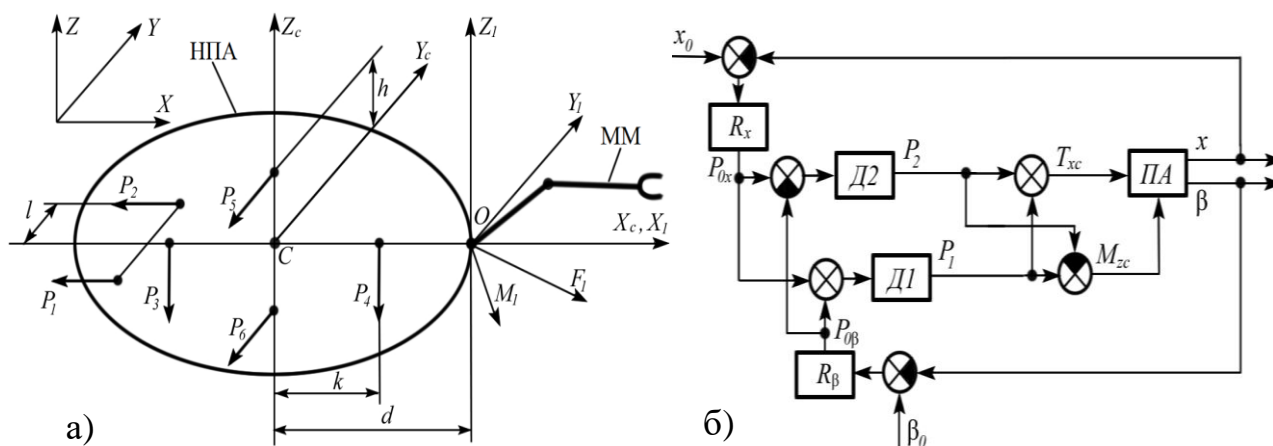


Рис. 1 – Схема расположения движителей НПА (а) и блок-схема подсистемы автоматической системы стабилизации НПА по двум координатам (б)

Для исследования работы системы было выполнено численное моделирование режима стабилизации НПА в заданной точке пространства при работающем ММ типа PUMA. В начальный момент времени оси СК XYZ и $X_cY_cZ_c$ совпадали. Процессы изменения всех линейных и угловых координат НПА при линейном движении РИ ММ, описываемом в СК XYZ уравнениями $\dot{x}^* = 0.5/\sqrt{3}$, $y^* = x^* - 1$, $z^* = x^*$, с постоянной скоростью $0.5 \text{ м/с} = \text{const}$ показаны на рис. 2. На этих же рисунках, помимо смещений НПА, показана евклидова норма $\|\varepsilon(t)\|$ вектора динамической ошибки отслеживания РИ ММ указанной выше желаемой траектории. При этом на рис. 2а показаны $\|\varepsilon(t)\|$ и отклонения НПА при использовании только замкнутой автоматической системы стабилизации, на рис. 2б – с использованием только разомкнутого контура стабилизации, а на рис. 2в – с использованием разработанной комбинированной системы стабилизации.

Следует отметить, что без использования систем стабилизации НПА в процессе работы ММ он опрокидывается, и выполнение манипуляционных операций становится невозможным. Из рис. 2в видно, что синтезированная комбинированная система стабилизации НПА позволяет добиться его точного удержания, достаточного для выполнения манипуляционных операций.

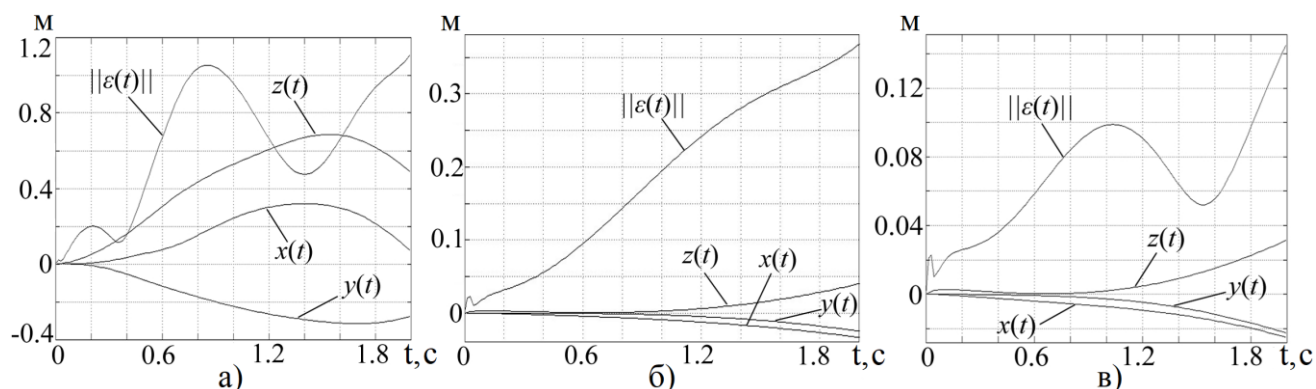


Рис. 2 – Результаты моделирования работы системы стабилизации НПА

Кроме того, результаты моделирования показали, что при стабилизации НПА с помощью разомкнутой системы в процессе движения ММ по указанной выше прямолинейной траектории с той же скоростью и погрешностях расчета силовых и моментных воздействий ММ на НПА, не превышающих 10%, величина $\|\varepsilon(t)\|$ увеличивается на 35%. При использовании комбинированной системы стабилизации НПА, тех же законах движения ММ и 10% погрешностях вычисления его силовых и моментных воздействий на НПА величина $\|\varepsilon(t)\|$ возрастает на 17%. Это подтверждает необходимость обязательного использования именно комбинированной системы стабилизации.

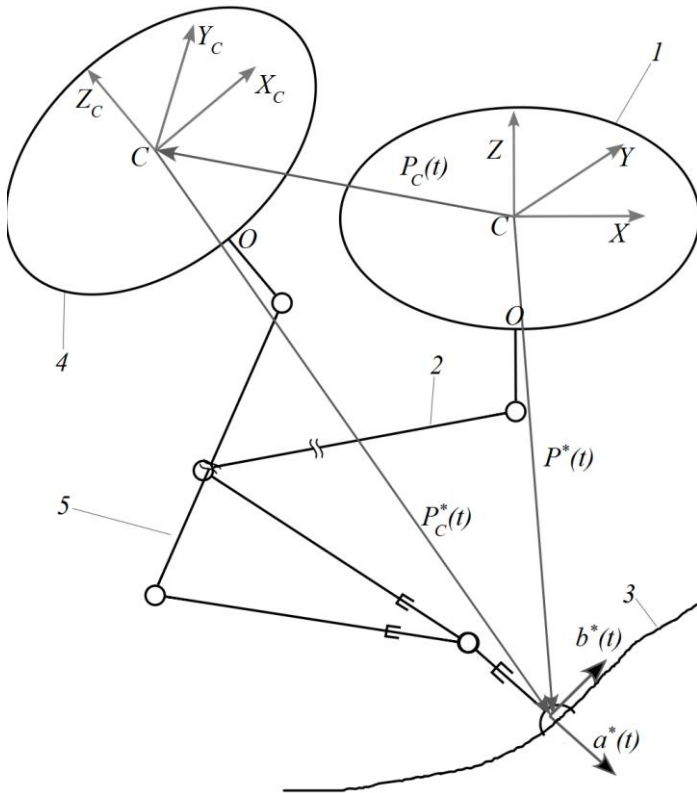


Рис. 3 – НПА и схема расположения СК

положении; 2 – исходное положение ММ, РИ которого находится на заданной пространственной траектории 3; 4 – НПА в положении, смещенном относительно исходного; 5 – новое положение ММ, обеспечивающее точное прохождение его РИ по заданной траектории 3. В исходном положении 1 с центром величины C НПА совмещены начала СК XYZ и $X_c Y_c Z_c$, оси которых в этом положении аппарата совпадают.

Вектор $P_C(t) \in R^3$ задает смещение точки C в СК XYZ , а вектор $P_C^*(t) \in R^3$ – текущее желаемое положение характерной точки РИ ММ в СК $X_c Y_c Z_c$, в которой он работает, и рассчитывается по формуле

$$P_C^*(t) = R^T (P^*(t) - P_C(t)), \quad (2)$$

где $R = \begin{bmatrix} C\alpha C\beta & S\alpha C\beta S\gamma - S\beta C\gamma & S\beta S\gamma + S\alpha C\beta C\gamma \\ C\alpha S\beta & C\beta C\gamma + S\alpha S\beta S\gamma & S\alpha S\beta C\gamma - C\beta S\gamma \\ -S\alpha & C\alpha S\gamma & C\alpha C\gamma \end{bmatrix}$ – матрица поворотов СК

$X_c Y_c Z_c$ относительно СК XYZ , $S\alpha = \sin \alpha$; $C\alpha = \cos \alpha$. Поскольку линейные смещения НПА не будут влиять на единичные векторы $a(t)$ и $b(t)$, задающие желаемую ориентацию РИ, значения элементов этих векторов в СК $X_c Y_c Z_c$ будут вычисляться с помощью выражений $a^*(t) = R^T a(t)$, $b^*(t) = R^T b(t)$. Очевидно, что при использовании непрерывно рассчитываемых векторов $P_C^*(t)$,

В третьей главе для повышения точности работы ММ в условиях неизбежных смещений НПА относительно объекта работ разработаны методы синтеза СУ подводными ММ, обеспечивающих выполнение манипуляционных операций с требуемыми точностью и скоростью движения РИ. Это достигается за счет дополнительных перемещений РИ ММ и изменения его ориентации на основе информации о реальных угловых и линейных смещениях НПА относительно его исходного положения стабилизации (как показано на рис. 3). На этом рисунке введены следующие обозначения: 1 – НПА в исходном

$a^*(t)$ и $b^*(t)$ в СУ ММ его РИ будет перемещаться по заданной пространственной траектории 3 с требуемой ориентацией даже в условиях незапланированных смещений НПА от исходного положения 1 .

Для компенсации негативных влияний вязкой среды на точность работы ММ вычисляемые с помощью алгоритма решения ОЗД (1) составляющие внешних моментов M_{zi}^* , действующие на выходные валы электроприводов в степенях подвижности ММ, предложено компенсировать с помощью самонастраивающихся корректирующих устройств, синтезированных с помощью подхода, основанного на стабилизации параметров дифференциальных уравнений, описывающих электроприводы ММ. Учитывая, что в современных электроприводах ММ электрическая постоянная времени обычно пренебрежимо мала, желаемый закон управления, который обеспечит заданное стабильное качество работы каждого электропривода подводного ММ, рассчитывается по формуле:

$$u_i = \frac{1}{k_{yi}k_{mi}} [k_{ei}R_i\dot{\alpha}_i + R_i(M_{zi}^*) + M_{cmpi}R_i] + \hat{u}_i, \quad (3)$$

где \hat{u}_i – сигнал управления, поступающий на вход корректирующего устройства; $\dot{\alpha}_i$ – скорость вращения ротора электродвигателя; k_{mi}, k_{yi} – коэффициенты крутящего момента и усиления усилителя; k_{ei} – номинальный коэффициент вязкого трения; M_{cmpi} – номинальный момент сухого трения электродвигателя и редуктора; R_i – активное сопротивление цепи якоря. Результаты численного моделирования (приведены в описании пятой главы) показали многократное повышение точности выполнения различных операций с использованием сигналов управления (3) приводами ММ.

В этой же главе разработан метод, который автоматически снижает скорость движения РИ по предписанной траектории в моменты времени, когда электроприводы ММ обрабатывают дополнительные сигналы управления с неизбежными динамическими ошибками. При этом указанная скорость автоматически увеличивается на тех участках траекторий, при движении по которым СУ приводами ММ и система стабилизации НПА способны обеспечивать желаемую точность движения РИ. Этот метод автоматически формирует максимально возможную переменную скорость движения РИ ММ, гарантируя выполнение неравенства:

$$\varepsilon_m(t) \leq \varepsilon_{m\max}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_m(t)$ – евклидова норма вектора динамической ошибки движения РИ по заданной траектории; $\varepsilon_{m\max}$ – ее максимально допустимое значение.

Обобщенная схема синтезированной на основе предложенных методов

СУ представлена на рис. 4. На этой схеме введены обозначения: $v^*(t)$ – модуль вектора желаемой скорости движения инструмента вдоль заданной траектории; R_g – регулятор желаемой величины $v^*(t)$; БФТ – блок формирования траектории; БКТО – блок коррекции траектории и ориентации РИ, вычисляющий векторы $P_c^*(t)$, $a^*(t)$ и $b^*(t)$ (2); НС – навигационная система НПА на базе СТЗ; Г – гироскопические датчики НПА; $\varepsilon_{mon} = \text{const}$ ($\varepsilon_{mon} \leq \varepsilon_{m\max}$) – величина, обеспечивающая выполнение условия (4); $P_c(t), \tilde{a}(t), \tilde{b}(t) \in R^3$ – векторы реального положения и ориентации РИ ММ соответственно.

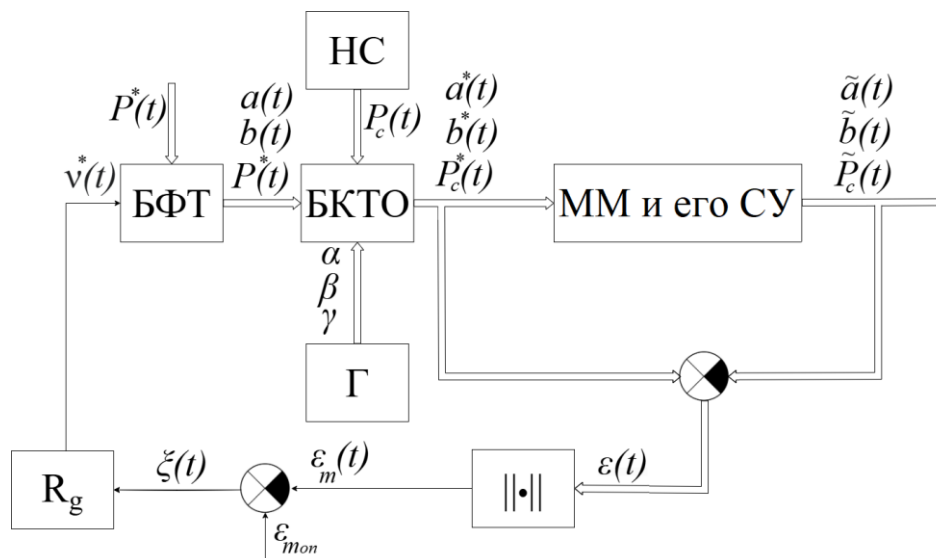


Рис. 4 – Структурная схема СУ подводными ММ

Неизменяемая часть системы, являющаяся объектом управления для регулятора R_g , описывается передаточной функцией

$$W(s) = \frac{\varepsilon_m(s)}{v^*(s)} = 3\tilde{k}_{FD}\tilde{k}_m \frac{\Phi_{\varepsilon m}(s)}{s} \sum_{i=1}^n |k_{vi}| \quad (5)$$

где $\Phi_{\varepsilon m}(s)$ – передаточная функция по ошибке, описывающая динамику i -го привода степени подвижности m ММ, замкнутого единичной отрицательной обратной связью, работающего в самых неблагоприятных условиях эксплуатации; $\tilde{k}_{FD}, \tilde{k}_m, \tilde{k}_{vi}$ ($i = \overline{1, n}$) – коэффициенты, значения которых могут варьироваться и выбираются такими, чтобы регулятор R_g , синтезированный для объекта управления (5), работал с заданным качеством для всех возможных вариаций упомянутых коэффициентов. Результаты моделирования синтезированной системы полностью подтвердили эффективность ее работы при выборе режимов перемещения РИ ММ с заданной динамической точностью по произвольным пространственным траекториям.

В четвертой главе разработан метод формирования программных (целевых) сигналов управления НПА для автономного выполнения

манипуляционных операций, которые начинаются со сближения аппарата с донной поверхностью и оценки ее рельефа в зоне работ. Для этого получаемый от доплеровского лага массив точек аппроксимируется и представляется в виде виртуальной плоскости, имитирующей дно. При сближении НПА с дном область его поверхности, охватываемая лучами лага, уменьшается, и коэффициенты уравнения виртуальной плоскости, обновляемые с каждым измерением лага, также изменяются с уменьшением этой области. Поэтому были экспериментально определены критерии изменения ориентации плоскости дна относительно приближающегося к ней НПА, на основе которых принимается решение о пригодности рельефа для безопасной работы.

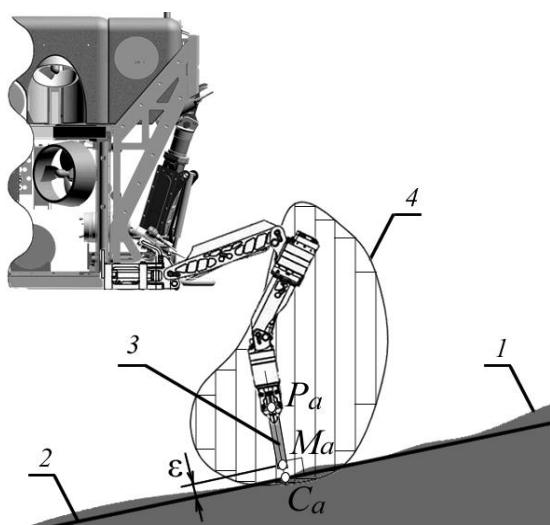


Рис. 5 – Формирование траекторий движения ММ для сбора грунта

Затем определяется место подхода НПА с ориентацией ММ, СТЗ, фонарей и других сенсоров на объект с учетом рельефа дна, который непрерывно уточняется по мере приближения аппарата к дну. При этом место зависания и автоматической стабилизации НПА выбирается таким, чтобы рабочая зона ММ позволяла ему правильно выполнять требуемые операции, но избегать столкновений с грунтом и не приводить к взмучиванию придонного слоя (см. рис. 5). Для автоматического взятия проб грунта и образцов геологических пород рабочая зона ММ представляется в виде конечного числа вписанных в нее сегментов,

имеющих форму параллелепипедов с одинаковыми основаниями. При этом вычисляется, в каких сегментах ММ быстро и безопасно может взять пробы, оказывая при этом минимальные силовые и моментные воздействия на аппарат. На рис. 5 введены следующие обозначения: 1 – реальная поверхность дна; 2 – аппроксимирующая дно плоскость; P_a – точка подхода схвата ММ, из которой начинается погружение пробоотборника 3 в грунт перпендикулярно плоскости 2 до точки M_a ; C_a – точка пересечения вертикальной оси сегмента и донной поверхности; 4 – рабочая зона ММ. Точка P_a формируется с учетом величины ϵ (см. рис. 5), исключающей возможный контакт пробоотборника с поверхностью дна при переходе схвата из исходного положения в эту точку.

Полунатурное моделирование выполнялось в глубоководной экспедиции в процессе погружений с забором грунта ТНПА Comanche-18, который оснащен доплеровским лагом и ММ. Система точно определяла возможность выполнения манипуляционной операции и обеспечивала требуемую ориентацию аппарата.

В этой же главе разработан метод автоматической коррекции сигналов

управления линейными перемещениями НПА, который за счет динамических воздействий со стороны объекта, захваченного ММ, или других внешних факторов в общем случае может иметь произвольные угловые смещения по крену γ и дифференту α , измеряемые бортовыми гироскопами.

Вектор тяги НПА $\tau^*(t) = [\tau_x^*, \tau_y^*, \tau_z^*]^T$ всегда формируется в СК $X_C Y_C Z_C$, поскольку продольные оси его движителей, создающих соответствующие тяги, жестко связаны с этой СК. Желаемый программный вектор тяги $\tau(t) = [\tau_x, \tau_y, \tau_z]^T$ формируется в абсолютной СК XYZ и определяет требуемое направление перемещения НПА. При появлении ненулевых значений γ и (или) α векторы $\tau^*(t)$ и $\tau(t)$ перестают совпадать. Для сохранения заданного направления движения НПА разработанный метод, учитывая текущие значения углов γ и (или) α , изменяет тяги соответствующих движителей НПА и формирует в СК $X_C Y_C Z_C$ вместо вектора $\tau^*(t)$ новый вектор $\tau_p(t) = [\tau_{px}, \tau_{py}, \tau_{pz}]^T$, совпадающий в пространстве с вектором $\tau(t)$. Координаты нового вектора $\tau_p(t)$ определяются по формуле

$$\tau_p(t) = \begin{bmatrix} \tau_x C\alpha - \tau_z S\alpha \\ \tau_x S\alpha S\gamma + \tau_y C\gamma + \tau_z C\alpha S\gamma \\ \tau_x S\alpha C\gamma - \tau_y S\gamma + \tau_z C\alpha C\gamma \end{bmatrix}. \text{ В результате использование предложенной}$$

коррекции позволяет управлять желаемым вектором тяги $\tau(t)$, не учитывая появление у НПА произвольных углов α и γ . Однако даже при использовании скорректированного вектора тяги возможны незначительные смещения НПА от заданного направления из-за несимметричности этого аппарата, а также различных значений присоединенных масс жидкости и коэффициентов вязкого трения при его перемещении по разным степеням свободы.

Для устранения этих смещений выполняется дополнительная коррекция вектора тяги движителей НПА, использующая информацию о текущем направлении вектора скорости $v(t)$ НПА, определяемом доплеровским лагом в СК XYZ . При смещении реального направления движения НПА, имеющего ненулевые углы α и γ , от направления, задаваемого в СК $X_C Y_C Z_C$ вектором $\tau_p(t)$, между векторами $v(t)$ и $\tau_p(t)$ возникает ненулевой угол

$$\varphi = \arccos \left(\frac{\tau_p(t) v(t)}{\|\tau_p(t)\| \|v(t)\|} \right). \text{ Для движения НПА в направлении, определяемом}$$

вектором $\tau_p(t)$, разработанный метод обеспечивает обнуление угла φ ,

формируя дополнительный вектор тяги $\tau_k(t) = k \frac{\mu(t)}{\|\mu(t)\|} \in R^3$, перпендикулярный

вектору $\tau_p(t)$, лежащий в одной плоскости с векторами $\tau_p(t)$, $v(t)$ и

направленный в сторону компенсации угла φ ; k – положительный коэффициент, значение которого выбирается экспериментально с учетом конструкции НПА, $\mu(t) = \tau_l(t) - v(t) \in R^3$ – вектор, определяющий направление вектора $\tau_k(t)$;

$$\tau_l(t) = \frac{\tau_p(t)}{\|\tau_p(t)\|} \|v(t)\| \cos \varphi. \text{ Результаты численного моделирования подтвердили}$$

работоспособность и высокую эффективность предложенного метода.

Для работы с заранее неизвестными сложными поверхностями дна или объектов разработанный метод формирования желаемых траекторий движения и ориентации РИ подводного ММ позволяет наложить эти траектории на триангуляционные модели поверхностей, построенные на основе облаков точек, получаемых от СТЗ НПА. Каждый k -й треугольник триангуляции задается координатами трех вершин V_{k0}, V_{k1}, V_{k2} (где $k = \overline{1, g}$, g – количество треугольников) в прямоугольной СК $Oxyz$, жестко связанной с корпусом НПА.

Исходные траектории задаются точками B_i ($i = \overline{1, s}$), принадлежащими рабочей зоне ММ и лежащими в плоскости, параллельной плоскости Oxy . В зависимости от сложности операции может задаваться любое количество s точек B_i , достаточное для описания траекторий РИ ММ. Чтобы спроецировать траекторию на триангуляционную поверхность (см. рис. ба), с использованием алгоритма Моллера-Трумбора вычисляются координаты точек A_i пересечения лучей, выходящих из точек B_i в направлении, противоположном направлению единичного вектора \vec{z} , параллельного оси Oz СК $Oxyz$:

$$A_i = B_i - \frac{((B_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0})}{((- \vec{z}) \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \vec{z}. \quad (6)$$

Для построения траектории движения ММ, проходящей через все полученные точки A_i (6), эта траектория представляется в виде последовательности разрезов триангуляционной поверхности, которые являются вертикальными профилями частей этой поверхности между соседними целевыми точками. Указанные профили можно представить в виде множества точек пересечения ребер треугольников триангуляции и плоскости, образованной вектором $\overrightarrow{A_i A_{i+1}}$, соединяющим соседние целевые точки, и единичным вектором \vec{z} (см. рис. ба).

При определении факта пересечения ребра треугольника k указанной плоскостью для каждой пары его вершин сравниваются знаки расстояний p_{ikh} от h -й вершины ($h = 0, 1, 2$) до этой плоскости, а сами величины p_{ikh}

вычисляются по формуле $p_{ikh} = \vec{r}_i \cdot \overrightarrow{A_i V_{kh}}$, $\vec{r}_i = \frac{\overrightarrow{A_i A_{i+1}} \times \vec{z}}{\|\overrightarrow{A_i A_{i+1}} \times \vec{z}\|}$. Если для любой пары

вершин треугольника k соответствующие им величины p_{ikh} имеют одинаковые

знаки ($p_{ik_0}p_{ik_1} > 0$ и $p_{ik_0}p_{ik_2} > 0$ или $p_{ik_0}p_{ik_1} < 0$ и $p_{ik_0}p_{ik_2} < 0$), то плоскость не пересекает k -й треугольник. Если же p_{ikh} имеют разные знаки ($p_{ik_0}p_{ik_1} > 0$ и $p_{ik_0}p_{ik_2} < 0$ или $p_{ik_0}p_{ik_1} < 0$ и $p_{ik_0}p_{ik_2} > 0$), то на ребре треугольника k , образованном этой парой вершин, лежит точка T_{ike} ($e=1,2$), через которую должен пройти рабочий инструмент ММ. Координаты точки T_{ike} для ребра, образованного вершинами V_{k_0} и V_{k_1} , определяются по формуле $T_{ike} = V_{k_0} + t_{ike} \frac{\overrightarrow{V_{k_0}V_{k_1}}}{\|\overrightarrow{V_{k_0}V_{k_1}}\|}$, где $t_{ike} = \frac{-(\vec{r}_i \cdot \overrightarrow{OV_{k_0}} + |\overrightarrow{OA_i} \cdot \vec{r}_i|)}{\vec{r}_i \cdot \overrightarrow{V_{k_0}V_{k_1}}}$. Координаты второй точки T_{ike} на одном из двух оставшихся ребер k -го треугольника вычисляются аналогично. Если же справедливо равенство $p_{ikh} = 0$, то h -я вершина k -го треугольника лежит на указанной плоскости. В этом случае $T_{ike} = V_{kh}$.

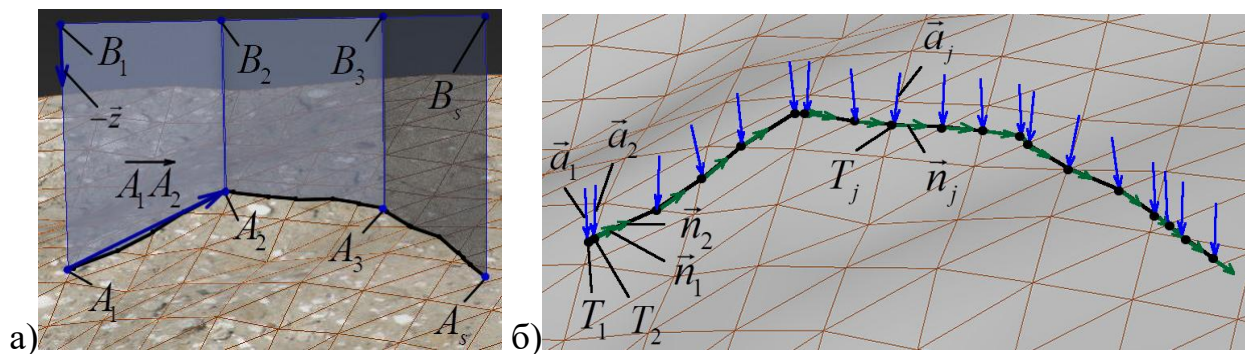


Рис. 6 – Триангуляционная модель поверхности дна (а) и сормированная траектория движения РИ ММ (б)

Для построения траектории движения РИ ММ полученное множество точек T_{ike} сортируется в последовательность точек T_j , расположенных между соседними целевыми точками A_i и A_{i+1} , где j – порядковый номер точки в последовательности перемещения ММ. Каждой точке T_j соответствуют единичные вектора \vec{a}_j и \vec{n}_j , определяющие желаемую ориентацию РИ ММ при переходе между соседними точками траектории (см. рис. 6б). Для плавного перемещения ММ полученные траектории могут быть сглажены В-сплайнами.

В пятой главе разработан метод, позволяющий с высокой точностью идентифицировать объекты, форма которых заранее известна. Чтобы выделить известный объект из облака точек, получаемого от СТЗ НПА, предложено использовать трехмерную модель этого объекта, предварительно обработанную и преобразованную в облако точек, заданное в СК $Oxyz$ точками K_q ($q = \overline{1, m}$). Для совмещения этих двух облаков применяется итеративный алгоритм Iterative Closest Point (ICP). Повышение точности совмещения облаков достигается путем их предварительного виртуального сближения на основе информации о местоположении реального объекта, выделяющегося из

окружения. Кроме того, после первых итераций алгоритма ИСР из облака точек K_q модели объекта удаляются точки, невидимые СТЗ из-за однонаправленного характера сканирования. Затем снова облака совмещаются алгоритмом ИСР, и определяются вектор $\vec{p}_k \in R^3$ и матрица $M_k \in R^{3 \times 3}$, описывающие линейное смещение и поворот облака точек K_q относительно осей СК $Oxyz$. В результате координаты точек D_q совмещенного облака модели объекта будут определяться согласно выражению:

$$D_q = H_k + M_k \vec{n}_q + \vec{p}_k, \quad (7)$$

где $H_k = \frac{1}{m} \sum_{q=1}^m K_q$ – центр масс облака исходных точек K_q , $\vec{n}_q = (K_q - H_k)$ – вектор, определяющий положение любой точки K_q относительно точки H_k этого облака.

Чтобы проверить достоверность выполненного совмещения, предлагается сравнивать две проекции одной проверочной траектории – проекцию на триангуляционную поверхность отсканированного объекта с проекцией этой траектории на триангуляционную поверхность совмещенной модели объекта. Для этого облако точек D_q триангулируется числом w треугольников, заданных вершинами $V_{h0}, V_{h1}, V_{h2}, (h = \overline{1, w})$. Направление проецирующих лучей задается единичным вектором $\vec{o} = (H_D - S) / \|H_D - S\|$, соединяющим начало СК СТЗ с центром масс $H_D = \frac{1}{m} \sum_{q=1}^m D_q$ облака точек модели объекта (см. рис. 7а).

Проверочная траектория должна лежать в плоскости, перпендикулярной вектору \vec{o} , ее вид может быть выбран в зависимости от известных размеров и формы объекта. На рис. 7а показан пример траектории, заданной в виде n лежащих на одной прямой точек c_i ($i = \overline{1, n}$). Пересечения лучей, выходящих из этих точек в направлении вектора \vec{o} , с обеими триангуляционными поверхностями образуют наборы точек C_i и C'_i (см. рис. 7б):

$$\begin{aligned} C_i &= c_i + \frac{((c_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0})}{(\vec{o} \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \vec{o}, \\ C'_i &= c_i + \frac{((c_i - V_{h0}) \times (V_{h1} - V_{h0})) \cdot (V_{h2} - V_{h0})}{(\vec{o} \times (V_{h2} - V_{h0})) \cdot (V_{h1} - V_{h0})} \vec{o}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для проверки правильности выполненного совмещения предложен критерий – среднее квадратичное отклонение координат точек спроецированных траекторий $Q = \sqrt{\sum_{i=1}^n \|\vec{E}_i\|^2}$, $\vec{E}_i = C_i - C'_i$, пороговое значение

которого подбирается экспериментально и зависит от размеров объекта и разрешающей способности СТЗ.

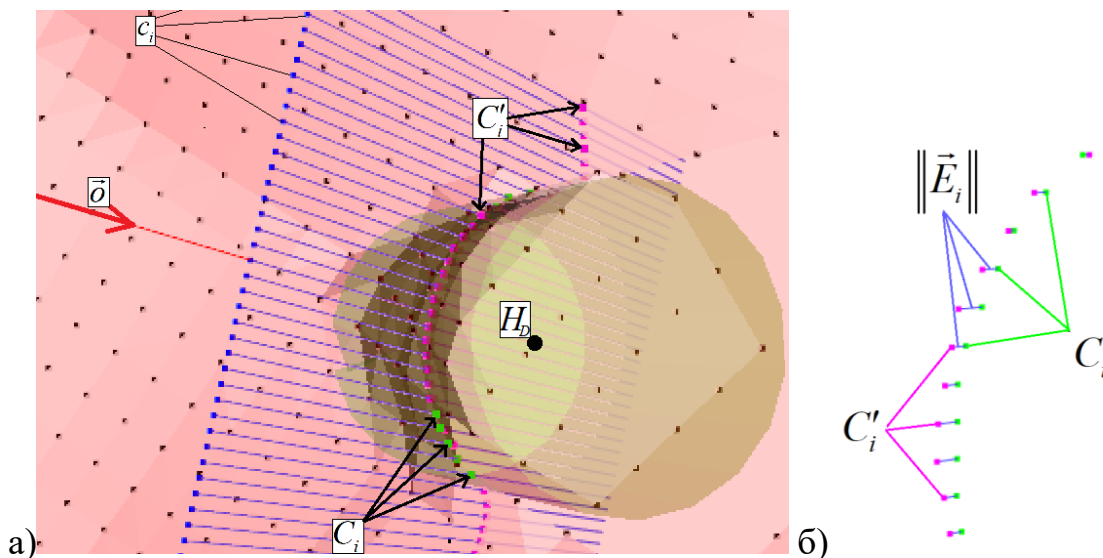


Рис. 7 – Совмещение облаков точек (а) и точки пересечения проверочной траектории с триангуляционными поверхностями (б)

Когда выполненная проверка показала, что облака точно совмещены, построенная на исходной модели объекта траектория движения РИ ММ может быть перенесена на реальный объект. Эта траектория может быть изначально задана как в аналитическом виде, так и последовательностью точек X'_j ($j = \overline{1, s}$, s – количество точек) с соответствующими единичными векторами ориентации инструмента \vec{a}'_j и \vec{b}'_j . С учетом (7) желаемую траекторию, перенесенную на реальный объект, можно представить в виде:

$$X_j = H_D + M_{r2}M_{r1}(X'_j - H_K), \vec{a}_j = M_{r2}M_{r1}\vec{a}'_j, \vec{b}_j = M_{r2}M_{r1}\vec{b}'_j, \quad (9)$$

где X_j – точки, задающие желаемые положения рабочего инструмента на поверхности объекта, с соответствующими векторами ориентации \vec{a}_j и \vec{b}_j ,

$H_K = \frac{1}{m} \sum_{q=1}^m K_q$ – центр масс облака исходных точек K_q модели объекта.

В случаях, когда точная форма объекта не может быть известна заранее, или велика вероятность его деформации, обрастания или заиливания, желаемая траектория РИ ММ (9) может быть дополнительно спроецирована на построенную с помощью СТЗ триангуляционную поверхность этого объекта. Для этого аналогично (8) выполняется проецирование точек X_j в положительном и отрицательном направлениях вектора \vec{o} , поскольку эти точки могут находиться как снаружи, так и внутри триангуляционной поверхности объекта. В результате формируется последовательность точек T_j , которые будут лежать на поверхности реального объекта. Для плавного движения РИ по

траектории последовательности точек X_j или T_j сглаживаются параметрическими В-сплайнами третьего порядка.

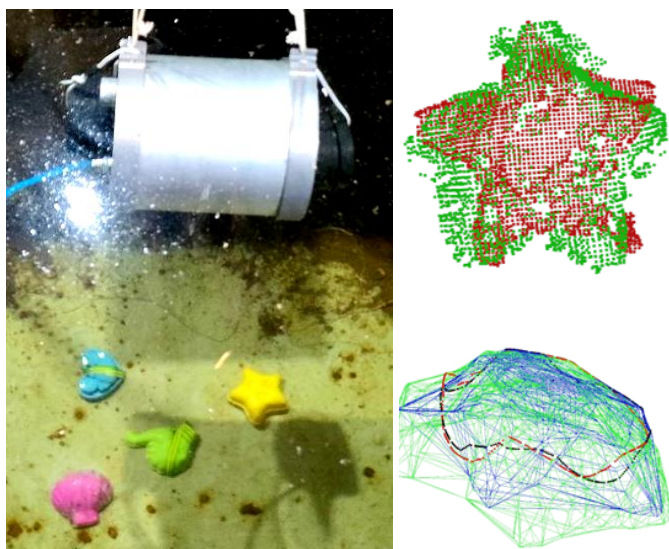


Рис. 8 – Экспериментальная установка и результаты эксперимента

В этой же главе представлены результаты экспериментальных исследований предложенного метода, реализованного на C++ на компьютере NVIDIA Jetson TX2, который был размещен в боксе (см. рис. 8) вместе со стереокамерой Zed2, откалиброванной в водной среде. На основе облаков точек сканируемой сцены, включающей различные объекты, успешно идентифицировался целевой объект – морская звезда (см. рис. 8). Для проверки правильности совмещения на объект

проецировалась проверочная траектория в форме окружности, показанная на рис. 8. При этом ошибка определения расположения объекта не превышала 5 мм при его нахождении на расстоянии 1 м от СТЗ.

Также проведен эксперимент по идентификации в водной среде бочки (см. рис. 9а) с последующим наложением на ее поверхность синусоидальной траектории с амплитудой 0.2 м (см. рис. 9б), имитирующей операцию лазерной очистки. Поле распознавания объекта эта траектория проецировалась на его реальную триангуляционную поверхность и отправлялась в Matlab/Simulink для отработки динамической моделью ММ, установленного на НПА. Для этой модели на основе разработанных методов была синтезирована СУ для автономного выполнения манипуляционных операций в режиме стабилизации НПА. Чтобы визуализировать движение ММ по поверхности объекта работ, получаемые в процессе моделирования данные от динамической модели НПА с ММ отправлялись из Matlab/Simulink в CoppeliaSim через протокол UDP. К этим данным относятся изменения реальных обобщенных координат ММ, а также линейные и угловые смещения НПА относительно исходной точки его стабилизации. Также в CoppeliaSim отправлялись данные от системы обработки сенсорной информации и формирования траекторий ММ, за счет чего достигалась наглядная визуализация выполнения технологической манипуляционной операции 3D моделью НПА с ММ (см. рис. 9в).

В процессе моделирования РИ ММ двигался с постоянной скоростью 0.3 м/с по заданной траектории. Было принято, что в начальный момент времени начала абсолютной СК и СК $O_{хуз}$ совпадали. На рис. 10а кривой 1 показана Евклидова норма $\|\vec{r}\|$ вектора \vec{r} линейного смещения НПА от начальной точки

при движении РИ ММ по заданной траектории без комбинированной системы стабилизации, а кривой 2 – эта же величина с использованием указанной системы. Из этого рисунка видно, что введение системы стабилизации позволяет точно удерживать НПА в заданном положении вблизи объекта, уменьшая нежелательные смещения НПА с 65 мм до 7 мм. При этом величины отклонений угловых координат НПА без использования системы стабилизации достигают 0.05 рад., а с ее использованием – не превышают 0.015 рад.

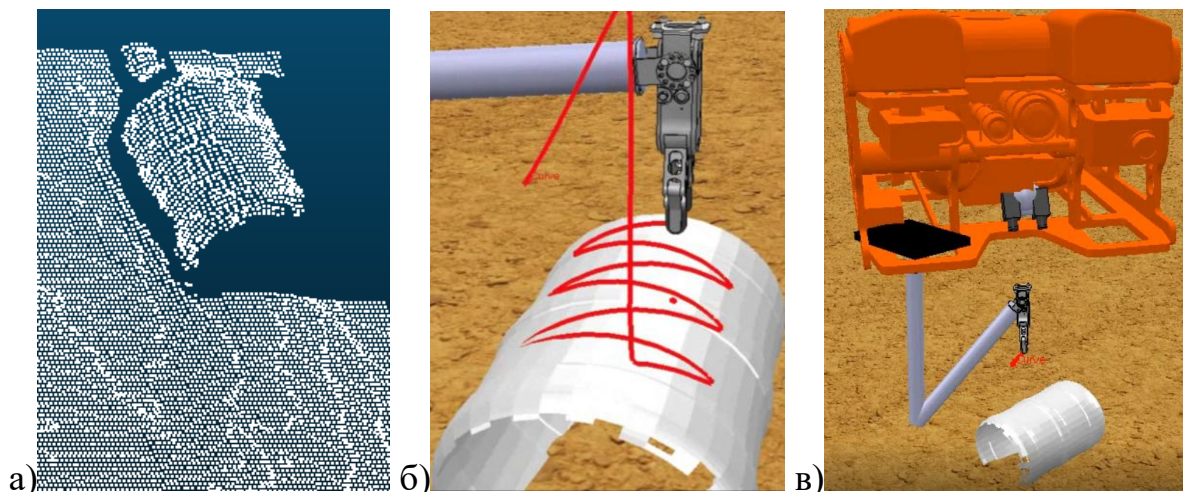


Рис. 9 – Облако точек объекта (а), наложенная траектория (б), визуализация процесса выполнения манипуляционной операции (в)

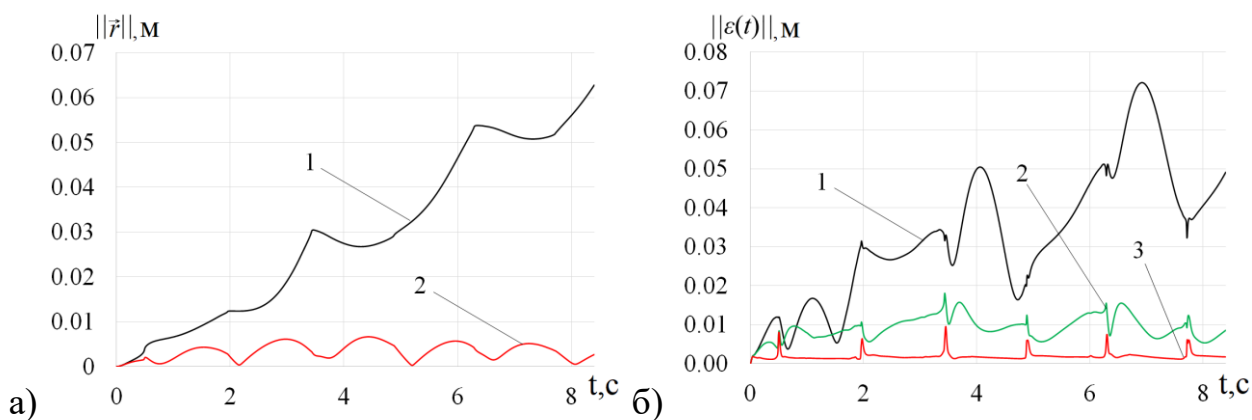


Рис. 10 – Результаты численного моделирования работы синтезированной СУ

На рис. 10б представлены графики изменения евклидовой нормы $\|\varepsilon(t)\|$ вектора динамической ошибки отслеживания РИ ММ программной точки в абсолютной СК для трех случаев моделирования: без использования системы стабилизации НПА (кривая 1), с использованием системы стабилизации (кривая 2) и с использованием систем стабилизации НПА и коррекции программных траекторий ММ (кривая 3). В первом случае (рис. 10б, кривая 1) величина ε достигает 7 см, а при введении системы стабилизации НПА значения ε не превышают 2 см (рис. 10б, кривая 2). Использование дополнительной коррекции траекторий ММ (рис. 10б, кривая 3) до 10 раз снижает отклонения РИ ММ на большинстве участков траектории. При этом на криволинейных

участках, где меняется характер движения звеньев ММ, ε кратковременно достигает 1 см, что обусловлено возрастанием динамической ошибкой слежения РИ по траектории, которая за счет введения самонастраивающихся корректирующих устройств (2) приводов ММ не превышает 9 мм в его СК.

При выполнении различных операций с другими объектами предложенная СУ обеспечивала качественную идентификацию объектов с последующей обработкой манипулятором НПА построенных траекторий.

В этой же главе приведены результаты успешных бассейновых испытаний предложенных СУ, внедренных в АНПА ММТ-3500 (см. рис. 11) производства ИПМТ ДВО РАН, оснащенный ММ и СТЗ.

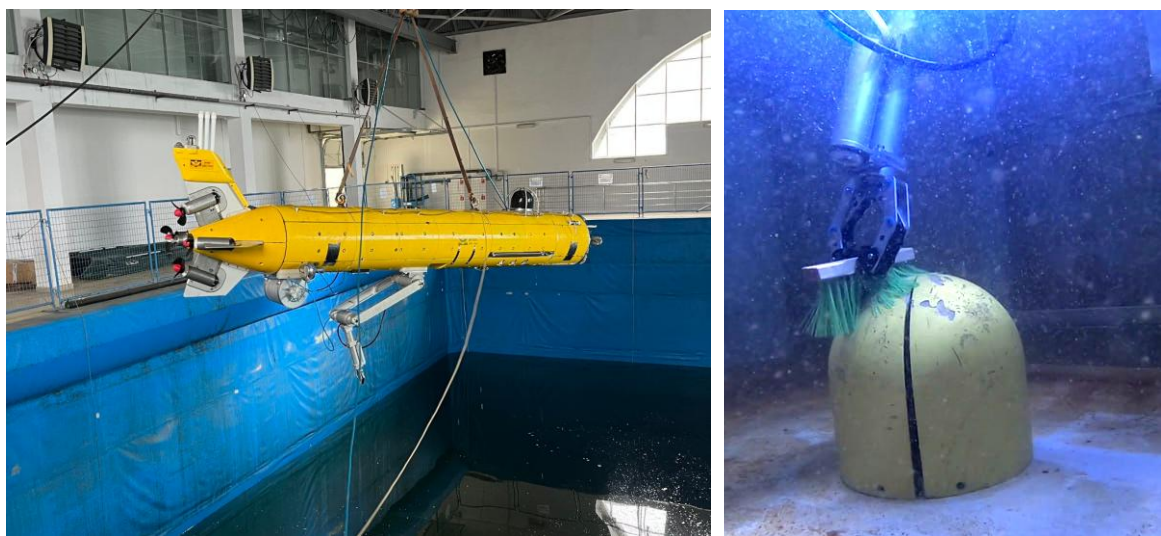


Рис. 11 – Испытания АНПА ММТ-3500, оснащенного ММ и разработанной СУ

В пределах рабочей зоны ММ местоположение объектов определялось с погрешностью до 1% расстояния от СТЗ до этих объектов. За счет проецирования проверочных траекторий удалось определять деформированные участки сканируемых объектов и выполнять операции с требуемой точностью с использованием автоматической коррекции программных траекторий движения РИ ММ. Таким образом, результаты моделирования и экспериментов подтвердили работоспособность и эффективность синтезированных СУ.

В шестой главе разработана система информационной поддержки операторов ТНПА, предназначенная для точного и безопасного управления согласованными перемещениями судна-носителя, ТНПА и его блока-заглубителя в условиях сложного рельефа дна. Гидроакустическая навигационная система с ультракороткой базой определяет текущие координаты x_v , y_v и z_v ТНПА и x_d , y_d и z_d заглубителя в правой прямоугольной СК $X_c Y_c Z_c$, жестко связанной с судном (см. рис. 12).

Работа ТНПА с целевым объектом возможна только при его нахождении в рабочей зоне, размеры которой определяются длиной q гибкого кабеля (см. рис. 11), а ее расположение в пространстве – местоположением заглубителя, удерживаемого жестким кабель-тросом.

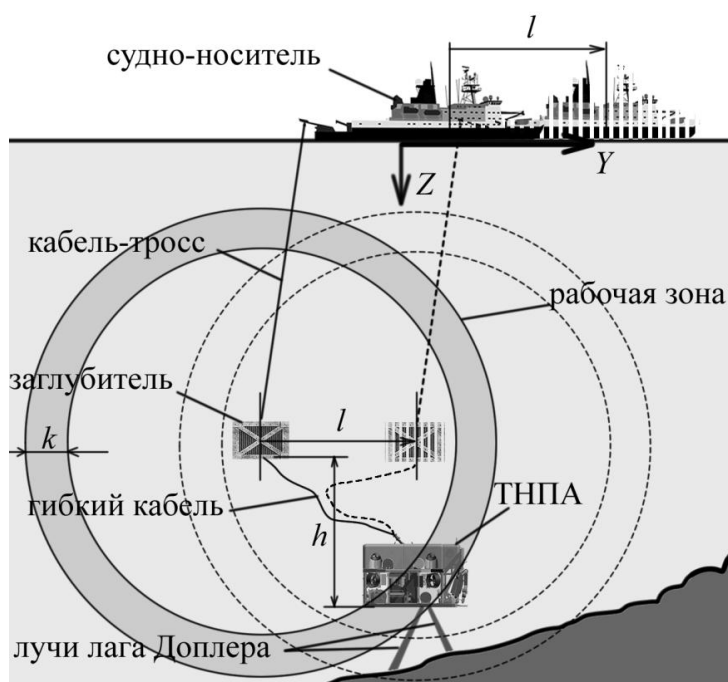


Рис. 12 – Комплекс, включающий ТНПА

Для эффективной работы ТНПА и исключения ситуаций, в которых заглубитель и гибкий кабель связи касаются дна, этот блок должен удерживаться выше аппарата на задаваемом оператором расстоянии h (см. рис. 12), которое определяется рельефом дна, а также на основе опытных данных и экспертных знаний. С целью сохранения желаемой величины h необходимо изменять текущую длину p выданного спускоподъемным

устройством армированного кабель-троса на величину $m = \frac{((z_v - z_d) - h)p}{z_d}$,

учитывающую различные значения величин p и z_d , поскольку под воздействием вязкой среды на кабель-трос и заглубитель этот кабель опускается не вертикально, а отклоняется в вертикальной плоскости по дуге. При достижении m порогового значения подается сигнал о необходимости очередного изменения длины кабель-троса.

Если судно оснащено системой динамического позиционирования, то при подходе ТНПА к целевой точке и одновременно – к границам его рабочей зоны на экспериментально определяемое расстояние k (см. рис. 12) заглубитель необходимо перемещать в сторону аппарата. При выполнении условия

$\sqrt{(x_v - x_d)^2 + (y_v - y_d)^2 + (z_v - z_d)^2} \geq (q - k)$ вычисляется величина смещения судна $l = \sqrt{(x_v - x_d)^2 + (y_v - y_d)^2}$ в направлении желаемого угла курса:

$$\beta = \beta_0 + \arccos \frac{y_v - y_d}{l}, \quad \text{если } (x_v - x_d) \geq 0, \quad \beta = \beta_0 - \arccos \frac{y_v - y_d}{l},$$

если $(x_v - x_d) \leq 0$, где β_0 – текущий угол курса судна. Информация о текущих значениях m , l и β позволяет операторам эффективно управлять перемещениями подводного комплекса по заданным маршрутам.

Если обеспечивающее судно не оснащено точной системой его динамического позиционирования, то задаются желаемые направление и скорость движения этого судна, и ТНПА перемещается вслед за ним таким образом, чтобы аппарат всегда находился в передней полусфере своей рабочей зоны перед заглубителем. Это дает возможность аппарату остановиться вблизи

обнаруживаемых объектов и успевать выполнять манипуляционные операции. Кроме того, при движениях вверх по склону указанное расположение НПА позволяет избежать запутывания кабеля и соударений заглубителя с дном.

Если ТНПА находится в желаемом сегменте его рабочей зоны, то в СК $X_c Y_c$ угол между единичным вектором $b(t)=[\sin(\beta_r), \cos(\beta_r)]^T$, определяющим текущее направление движения судна, и вектором $c(t)=[(x_v-x_d), (y_v-y_d)]^T$, соединяющим ТНПА с его заглубителем, не превышает 90° . При этом если не выполняется условие $\arccos \frac{b(t)c(t)}{\|b(t)\|\|c(t)\|} \leq \frac{\pi}{2}$, то необходимо срочное перемещение ТНПА в желаемый сегмент его рабочей зоны.

Для обеспечения операторов наглядными рекомендациями и предупреждениями предложена архитектура системы информационной поддержки деятельности операторов ТНПА, изображенная на рис. 13. Вычисление величин m , l , β и h , определяющих желаемое взаиморасположение динамических объектов, реализуется в блоке принятия решений. Этот блок сопоставляет текущие данные, получаемые от датчиков и внешних устройств, с данными базы формализованных представлений безопасности: аварийное натяжение гибкого кабеля, сложный рельеф дна, возможный контакт блока-заглубителя с дном или ТНПА, выход аппарата из желаемого сегмента его рабочей зоны и др. При этом выявляется возможность возникновения аварийных ситуаций, а также формируются рекомендации для операторов.

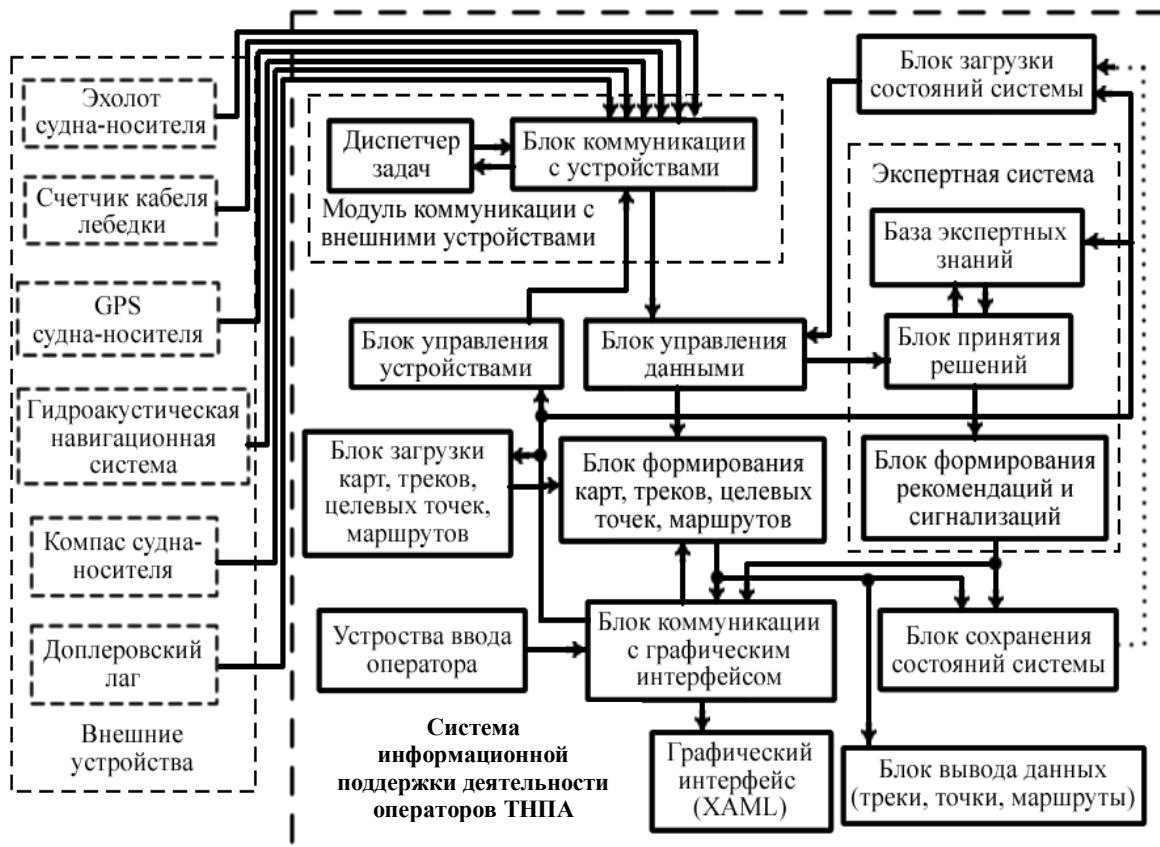


Рис. 13 – Обобщенная структурная схема системы

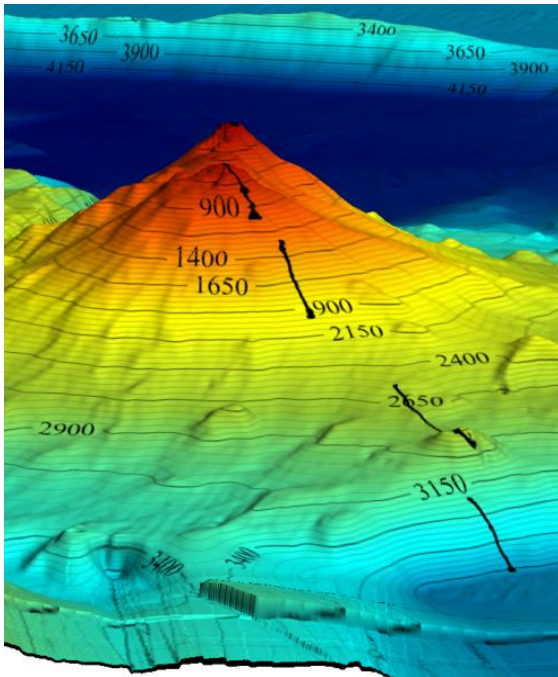


Рис. 14 – Перемещения ТНПА по склонам вулкана Пийпа

Реализованная в среде .Net Framework система была использована для информационной поддержки операторов ТНПА рабочего класса Comanche-18 в 6-и глубоководных научно-исследовательских экспедициях ННЦМБ ДВО РАН на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в Японском, Беринговом и Охотском морях, а также Тихом океане в 2016-2021 гг. Ее возможность планировать маршруты перемещений ТНПА с учетом непрерывно изменяющейся рабочей зоны позволила за одно погружение преодолевать более 6 км в процессе выполнения поисковых и исследовательских операций. При этом генерируемые системой предупреждения и рекомендации позволили в **3** раза повысить

скорость выполнения некоторых работ, упростить построение треков ТНПА (см. рис. 14) и вести постоянный учет обнаруживаемых объектов, отображая всю необходимую информацию с помощью графического интерфейса.

Для супервизорного выполнения наиболее ответственных манипуляционных операций под контролем оператора разработан метод, позволяющий оператору посредством наведения оптической оси телекамеры ТНПА, установленной на поворотной платформе, задавать траектории движения РИ ММ по поверхностям объектов. Для этого аналогично выражению (5) вычисляются точки пересечения оптической оси камеры с триангуляционной поверхностью объекта, после чего с использованием предложенных в диссертации методов формируются программные сигналы управления ММ и обрабатываются в автоматическом режиме. Результаты моделирования показали, что разработанный метод позволяет выполнять различные манипуляционные операции, требуя от оператора ММ только целеуказаний. При этом траектории движения РИ ММ формируются в реальном времени и отображаются разработанным графическим интерфейсом, что упрощает контроль выполнения работы оператором. Программная реализация предложенного метода не вызывает принципиальных затруднений.

В этой же главе описана технология использования НПА различных типов, включающая особенности планирования подводных работ, управления НПА, организации погружений и взаимодействий с экипажем судна-носителя. Результаты научно-исследовательских экспедиций в Южном и Тихом океанах в 2019-2021гг. показали, что предложенная технология позволяет НПА успешно обследовать большие глубоководные полигоны, обеспечивая возможность выполнения манипуляционных операций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан метод синтеза высокоточной комбинированной автоматической системы стабилизации НПА в заданной точке пространства при работающем в вязкой среде ММ.

2. Разработан рекуррентный алгоритм решения ОЗД для ММ, перемещающегося с высокой скоростью в водной среде, который позволяет точно учитывать особенности взаимодействия звеньев этого ММ с водной средой. Параметры указанного взаимодействия определены экспериментально.

3. Разработан метод автоматической коррекции программных траекторий движения и желаемой ориентации РИ ММ, установленного на НПА. Предложенный метод позволяет за счет изменения конфигурации ММ компенсировать незначительные линейные и угловые смещения НПА от исходного положения в пространстве.

4. Разработан метод синтеза СУ подводными ММ, который за счет введения самонастраивающихся корректирующих устройств электроприводов ММ компенсируют негативные влияния вязкой среды на точность его работы, при этом за счет введения дополнительного контура управления программными сигналами достигается увеличение скорости движения РИ ММ.

5. Разработаны методы формирования программных сигналов управления НПА, обеспечивающие оценку пригодности рельефа дна в зоне работ, подход к донной поверхности в удобном для манипулирования положении, а также точное управление перемещениями аппарата, имеющего нежелательные крен и (или) дифферент под воздействием захваченных манипулятором объектов.

6. Разработан метод построения желаемых траекторий движения и ориентации РИ подводного ММ по заранее неизвестным рабочим поверхностям, позволяющий учитывать взаимное расположение этих поверхностей и имеющей сложную форму рабочей зоны манипулятора, в которой его РИ может подойти к объекту работ с требуемым углом сервиса.

7. Разработан метод идентификации известных объектов работ и построения траекторий движения РИ ММ по поверхностям этих объектов с учетом их заиливания, обрастания и деформации.

8. Разработана система информационной поддержки деятельности операторов ТНПА, обеспечивающая согласованное управление глубоководным робототехническим комплексом в условиях сложного рельефа дна, а также супервизорное выполнение наиболее ответственных манипуляционных операций под контролем оператора.

9. Предложенные методы и СУ реализованы в виде программно-аппаратных средств, особенности их функционирования исследованы в реальных условиях эксплуатации. Результаты исследований полностью подтвердили эффективность разработанных методов и СУ по сравнению с существующими аналогами.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

1. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. №6. С. 47-54.

2. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической коррекции программной траектории движения многозвенного манипулятора, установленного на подводном аппарате // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 1. С. 40-45.

3. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. №6. С. 53-56.

4. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. №7. С. 29-34.

5. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Метод синтеза систем автоматической коррекции линейных перемещений подводных аппаратов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т15.№3.С.204-209.

6. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Гетьман А.В. Экспериментальное определение коэффициентов вязкого трения для расчета силового воздействия на перемещающиеся звенья подводных манипуляторов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т 16. №11. С. 738-743.

7. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Подход к разработке информационно-управляющей системы для телеуправляемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 1(23). С. 44-49.

8. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. №8. Т. 18. С. 543-549.

9. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Метод супервизорного управления манипулятором подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. №2. С. 95–99.

10. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Разработка и натурные испытания системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА//Подводные исследования и робототехника. 2018. №2. С. 12-20.

11. Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю., Шувалов Б.В. Подход к выполнению АНПА технологических манипуляционных операций с

различными подводными объектами // Подводные исследования и робототехника. 2019. №1. С. 31-37.

12. Коноплин А.Ю., Денисов В.А., Даутова Т.Н., Кузнецов А.Л., Московцева А.В. Технология использования ТНПА для комплексного исследования глубоководных экосистем // Подводные исследования и робототехника. 2019. №4. С. 4-12.

13. Бабаев Р.А., Боловин Д.А., Борейко А.А., Боровик А.И., Ваулин Ю.В., Коноплин А.Ю., Трегубенко Д.И., Михайлов Д.Н., Щербатюк А.Ф. Технология использования АНПА для исследования глубоководных экосистем Атлантического сектора Антарктики // Подводные исследования и робототехника. 2020. №2. С. 13-21.

14. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Зуев А.В., Красавин Н.А. Метод синтеза систем высокоточного управления перемещениями подводных манипуляторов // Подводные исследования и робототехника. 2020. №4. С.31-37.

15. Коноплин А.Ю., Юрманов А.П. Система поддержки деятельности операторов манипуляторов, установленных на подводных аппаратах // Подводные исследования и робототехника. 2021. №2. С. 18-27.

16. Коноплин А.Ю., Юрманов А.П. Красавин Н.А., Пятавин П.А. Разработка, программная реализация и исследование системы управления многозвенными манипуляторами необитаемых подводных аппаратов при динамическом позиционировании над морскими объектами // Подводные исследования и робототехника. 2021. №3. С. 4-15.

17. Коноплин А.Ю., Красавин Н.А. Система управления скоростью движения манипуляторов, установленных на необитаемых подводных аппаратах // Подводные исследования и робототехника. 2022. №. 2. С.29-38.

18. Боровик А.И., Рыбакова Е.И., Галкин С.В., Михайлов Д.Н., Коноплин А.Ю. Опыт использования автономного необитаемого подводного аппарата «ММТ-3000» для исследований бентосных сообществ Антарктики// Океанология. 2022. Т.62. №5. С. 1-14.

19. Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Юрманов А.П., Пятавин П.А., Кацурин А.А. Система позиционно-силового управления подводными аппаратами с многозвенными манипуляторами для выполнения контактных манипуляционных операций // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 4. С. 40-52.

20. Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Василенко Р.П. Система стабилизации АНПА, оснащаемого дополнительным движителем для компенсации динамических воздействий со стороны многозвенного манипулятора // Подводные исследования и робототехника. 2023. № 3. С. 20-29.

21. Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Копылов Д.В. Метод формирования программных сигналов управления многозвенными манипуляторами необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2025. № 1. С. 63-74.

Статьи в иностранных журналах, индексируемых Scopus и Web of Science

22. Konoplin, A., Krasavin, N., Yurmanov, A., Piatavin, P., Vasilenko, R., & Panchuk, M. Development of a Control System for Underwater Vehicles with Multilink Manipulators Performing Contact Manipulation Operations // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. 12(7): 1126. **(Q1 WoS)**.

23. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P. Development of a Control System for Multilink Manipulators on Unmanned Underwater Vehicles Dynamically Positioned Over Seafloor Objectse // Applied Sciences. 2022. 12(3):1666. **(Q2 WoS)**.

24. Konoplin A.Yu., Filaretov V.F., Yurmanov A.P. A Method for Supervisory Control of Manipulator of Underwater Vehicle // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. 9(7). 740. **(Q1 WoS)**.

25. Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu., Yurmanov A.P. Development and Field Testing of a Smart Support System for ROV Operators // (Journal of Marine Science and Engineering. 2022. 10(10). 1439. **(Q1 WoS)**.

26. Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Zuev A. V., Krasavin N. A. A method to synthesize high-precision motion control systems for underwater manipulator // International Journal of Simulation Modelling. 2021. Vol.20. №.4. **(Q2 WoS)**.

27. Filaretov V.F., Konoplin N.Yu., Konoplin A.Yu. System for automatic soil sampling by AUV equipped with multilink manipulator // International Journal of Energy Technology and Policy. 2019. Vol.15. No.2/3. P. 208-223.

Патенты на изобретения

28. Патент РФ на изобретение № 2462745. Система коррекции траектории движения манипулятора // В.Ф. Филаретов, А.Ю. Коноплин. Бюл. № 27 от 27.09.2012.

29. Патент РФ на изобретение № 2475799. Способ управления подводным манипулятором в режиме зависания подводного аппарата // В.Ф. Филаретов, А.Ю. Коноплин. Бюл. № 5 от 20.02.2013.

30. Патент РФ на изобретение № 2487008. Электропривод манипулятора // В.Ф. Филаретов, А.Ю. Коноплин. Бюл. № 19 от 10.07.2013.

31. Патент РФ на изобретение № 2547039. Способ стабилизации подводного аппарата в режиме зависания // В.Ф. Филаретов, А.Ю. Коноплин. Бюл. № 10 от 10.04.2015.

32. Патент РФ на изобретение № 2556441. Способ автоматического наведения телекамеры // В.Ф. Филаретов, А.Ю. Коноплин. Бюл. № 19 от 10.07.2015.

33. Патент РФ на изобретение № 2626778. Способ управления подводным аппаратом // В.Ф. Филаретов, А.Ю. Коноплин, Н.Ю. Коноплин. Бюл. № 22 от 01.08.2017.

34. Патент РФ на изобретение №2781926. Способ управления многозвенным манипулятором необитаемого подводного аппарата для

выполнения манипуляционных операций с подводными объектами // Коноплин А.Ю., Юрманов А.П. Красавин Н.А., Пятавин П.А. Бюл. № 30 от 21.10.2022.

35. Патент РФ на изобретение №2789510. Способ позиционно-силового управления подводным аппаратом с многозвенным манипулятором для выполнения контактных манипуляционных операций с подводными объектами // Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Юрманов А.П., Пятавин П.А. Бюл. № 4 от 06.02.2023 г.

36. Патент РФ на изобретение № 2814354. Способ стабилизации автономного необитаемого подводного аппарата в режиме зависания при выполнении установленным на нем многозвенным манипулятором контактных операций с подводными объектами // Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Василенко Р.П. Бюл. № 7 от 28.02.2024 г.

Полные тексты докладов на Межд. конф. в базах Scopus и/или Web of Science

37. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. System of Automatically Correction of Program Trajectory of Motion of Multilink Manipulator Installed on Underwater Vehicle // Procedia Engineering. Vol 100. 2015. P. 1441-1449.

38. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu. Method of Synthesis of Automatic Correction Systems of Underwater Vehicles Linear Displacements // Procedia Engineering. Vol 100. 2015. P. 1434-1440.

39. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Konoplin A.Yu. Synthesis of System for Automatic Formation of Multilink Manipulator Velocity// The Second RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM 2014). International IEEE Conference. Tehran IRAN. 2014. P. 785-790.

40. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. System of Automatic Stabilization of Underwater Vehicle in Hang Mode with Working Multilink Manipulator // 2015 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA). Bandung, Indonesia. International IEEE Conference. 2015. P. 132-137.

41. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. Experimental Definition of the Viscous Friction Coefficients for Moving Links of Multilink Underwater Manipulator // Proc. of the 26th DAAAM International Symposium. Vienna, Austria. 2015. P. 0762-0767.

42. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. Development of Control Systems for Implementation of Manipulative Operations in Hovering Mode of Underwater Vehicle // OCEANS 2016. Shanghai, China. International IEEE Conf. 2016. P. 1-5.

43. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu., Gorbachev G.V. Control system for underwater vehicle with multilink manipulator for automatic manipulation operations // Proc. of the 27th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.). Vienna, Austria. 2016. P. 714-720.

44. Filaretov V.F., Konoplin N.Yu., Konoplin A.Yu. Approach to Creation of Information Control System of Underwater Vehicles // Proceedings of 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk, Russia. May 16-19, 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2017.

45. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu., Gorbachev G.V. Technology for automatic soil sampling by manipulators mounted on underwater vehicles // Proceedings of the 28th DAAAM International Symp. Zadar, Croatia. 2017. P. 0679-0684.
46. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu., Subudhi B. Method for supervisory implementation of manipulation operations by underwater vehicles // Proc. of the 28th DAAAM International Symp. Zadar, Croatia. 2017. P. 0506-0512.
47. Filaretov V.F., Konoplin A. Yu., Konoplin N.Yu., System for cooperative movements of ROV and its supporting vessel // Proceedings of the 28th DAAAM International Symp. Zadar, Croatia. 2017. P. 0513-0516.
48. Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu. System for automatic soil sampling by underwater vehicle // Proceedings of 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). S.-Petersburg, Russia. May 16-19. 2017. P. 1-5.
49. Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu., Shuvalov B.V. Technology for Implementation of Manipulation Operations with Different Underwater Objects by AUV // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2019. P. 1-5.
50. Filaretov V.F., Konoplin A. Yu., Zuev A. V., Krasavin N. A. System of High-Precision Movements Control of Underwater Manipulator // Annals of DAAAM & Proceedings. 2020. Vol. 7. №. 1. P. 752-757.
51. Konoplin A.Y., Yurmanov A.P. Method of Supervisory Control of Manipulator Mounted on Underwater Vehicle // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2021. Vol. 666. №. 4. P. 042082.
52. Konoplin A.Y., Pyatavin P.A. Method of Autonomous Implementation of Manipulation Operations with Underwater Objects Having Predetermined Shape // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2021. Vol. 666. №. 4. P. 042083.
53. Konoplin A.Yu., Krasavin N.A. Automatic Speed Control System for Manipulator Mounted on Underwater Vehicle // Proc. of IEEE 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi. 2022. P. 205-209.
54. Konoplin A.Yu., Yurmanov A.P., Krasavin N.A., Pyatavin P.A., Panchuk M.O., Vasilenko R.P. System for Identifying Target Objects to Perform Manipulative Operations by Unmanned Underwater Vehicles // IEEE International Conference on Ocean Studies. Vladivostok. 2022. P. 055-059.
55. Konoplin A.Yu, Denisov V.A., Dautova T.N., Kuznetsov A.L., Konoplina A.V. A ROV-Based Technology for Integrated Study of Deep-Sea Ecosystems // IEEE International Conference on Ocean Studies. Vladivostok. 2022. P. 105-108.
56. Konoplin A.Yu, Krasavin N.A. Position/force control system for unmanned underwater vehicles with manipulators in the hovering mode // IEEE International Conference on Ocean Studies. Vladivostok. 2022. P. 031-034.

57. Konoplin A.Yu., Krasavin N.A. Approach to perform contact manipulation operations by AUV with multilink manipulators // IEEE International Conference on Ocean Studies. Vladivostok. 2023. P. 065-068.

58. Konoplin A.Yu., Krasavin N.A., Vasilenko R.P. AUV With Additional Thruster Stabilization System to Perform Contact Manipulation Operations // IEEE International Conference on Ocean Studies. Vladivostok. 2023. P. 085-089.

59. Konoplin A.Yu., Krasavin N.A., Vasilenko R.P. Stabilization System of AUV for Implementation of Contact Manipulation Operations // IEEE International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi. 2023. P. 335-339.

Глава в монографии

60. Konoplin A., Borovik A., Mikhailov D., Vaulin Y., Scherbatyuk A., Boreiko A., Babaev R., Bolovin D., Tregubenko D. Application of Autonomous Underwater Vehicles for Research of Ecosystems in the Southern Ocean // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean: Oceanography and Ecology (Advances in Polar Ecology, 6) / Springer; 1st ed. 2021 edition (December 2, 2021) / ISBN-13: 978-3030789268.

Статьи в рецензируемых журналах

61. Филаретов В.Ф., Климчик А.С., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю., Зуев А.В. Интеллектуальные подводные робототехнические комплексы для выполнения осмотровых и технологических операций на морских газопроводах и добычных комплексах // Газовая промышленность. 2020. № 8 (804). С. 30-38.

62. Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Юрманов А.П., Пятавин П.А., Костенко В.В., Быканова А.Ю. Разработка комплекса методов для автономного выполнения технологических операций манипуляционными подводными аппаратами // Вестник ДВО РАН. 2024. № 1. С. 54-71.

Коноплин Александр Юрьевич

Методы и системы управления необитаемыми подводными аппаратами для автономного выполнения манипуляционных операций

Автореферат

Подписано к печати

Усл. п. л. 2.0.

Формат 60×84/16.

Тираж 135.

Заказ 1.

Издано ИПМТ ДВО РАН, 690091, г. Владивосток, Суханова, 5а.

Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН.