

На правах рукописи

Sign

Клековкин Антон Владимирович

**Динамика и управление недеформируемыми безвинтовыми
водными роботами**

Специальность 05.02.05 —
«Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ижевск — 2020

Работа выполнена в учреждении с длинным длинным длинным длинным названием, в котором выполнялась данная диссертационная работа.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Мамаев Иван Сергеевич

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Не очень длинное название для места работы,
старший научный сотрудник
Фамилия Имя Отчество,
кандидат физико-математических наук,
Основное место работы с длинным длинным
длинным длинным названием,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования с длинным длинным длинным длинным названием

Защита состоится DD mmmmmmmm YYYY г. в XX часов на заседании диссертационного совета Д 123.456.78 при Названии учреждения по адресу: Адрес.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Название библиотеки.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: Адрес, ученому секретарю диссертационного совета Д 123.456.78.

Автореферат разослан DD mmmmmmmm YYYY года.
Телефон для справок: +7 (0000) 00-00-00.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 123.456.78,
д-р физ.-мат. наук

Sign

Фамилия Имя Отчество

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

В настоящее время, в мире ведутся активные исследования по созданию новых способов передвижения. Ведутся разработки «экзотических» транспортных средств, перспективность применения которых связана с их использованием в специфических (критических) условиях, например в условиях космоса или других планет. Максимальная степень защиты внутренних функциональных элементов и внешних рабочих органов мобильных роботов существенно повышает сложность конструкции, массо-габаритные характеристики, что негативно сказывается на маневренности, производительности и точности позиционирования мобильных робототехнических систем при реализации алгоритмов управления. Таким образом, актуальным является создание транспортных средств, в которых изначально конструкционно заложена высокая степень защиты внутреннего пространства благодаря минимальному количеству внешних рабочих органов.

Создание подобных транспортных средств невозможно без проведения базовых исследований их динамических свойств и создания соответствующей теории управления. В связи с этим актуальным является проведение как теоретических, так и прикладных работ по созданию высокоманевренных мобильных управляемых систем, реализующих новые методы передвижения в жидкости.

Безвинтовые подводные и надводные роботы – это принципиально новое направление, как в науке, так и технике. Данные роботы реализуют нетрадиционный способ передвижения в жидкости, при котором форма оболочки робота остается неизменной и отсутствуют приводные элементы, которые взаимодействуют непосредственно с жидкостью или воздухом над ее поверхностью. Движение осуществляется за счет внутренних механизмов робота, которые могут изменять положение центра масс мобильного робота или гиростатический момент.

В настоящее время водные мобильные системы (основанные на традиционном способе перемещении с помощью винтов) широко используются для мониторинга и проведения различных операций в сложных условиях эксплуатации. В частности, для мониторинга подводного рельефа и подводной геологоразведки, мониторинга обшивок подводных конструкций, проведение ремонтных работ на больших глубинах и в условиях химического или радиационного загрязнения и т.д. Использование в аналогичных приложениях безвинтовых транспортных средств имеет ряд конструкционных и эксплуатационных особенностей: изолированность рабочих узлов от жидкости, простота конструкции, гидроакустическая бесшумность, повышенная экологичность.

Одни из первых теоретических исследований в данной области представлены в работах академика РАН В.В. Козлова, доктора наук С.М. Рамоданова.

Так же можно выделить работы академика РАН Ф.Л. Черноушко, докторов наук Д.А. Онищенко, Н.Н. Болотника, С.Ф. Яцуна, В.А. Тененёва. В их работах рассмотрены модели движения с заданными законами сопротивления, проведено численное моделирование движения объекта с изменяемым центром масс в жидкости на основе совместного решения уравнений Навье-Стокса и уравнений динамики твердого тела. Из зарубежных ученых, работающих по данной тематике можно выделить S. Childress, P. Tallapragada, S. D. Kelly. S. Childress рассматривает влияние вязкости на самопродвижение твердого тела с движущейся внутри него массой. P. Tallapragada и S. D. Kelly были проведены одни из немногих экспериментальных исследований движения водного робота за счет вращения внутреннего ротора.

В диссертации [Klenov_diss] рассмотрена локомоционная мобильная платформа, перемещающаяся в жидкости за счет изменения распределения масс. Разработана математическая модель плоскопараллельного движения для идеальной жидкости и математическая модель движения с учетом внешних сил, действующих на объект со стороны жидкости. Изготовлен натурный образец и проведены экспериментальные исследования, при этом платформа движется по поверхности жидкости.

Данная работа является продолжением исследований, выполненных в [Klenov_diss]. Рассмотрено два объекта: безвинтовой подводный робот с внутренними роторами в форме эллипсоида и недеформируемый водный робот с острой кромкой. Оба объекта передвигаются за счет изменения гиростатического момента, возникающего за счет вращения роторов, расположенных внутри оболочки роботов.

Безвинтовой подводный робот может двигаться как по поверхности жидкости так и в толще воды. Для описания его движения разработана трехмерная математическая модель для идеальной жидкости. На основе этой модели подобраны режимы управления роторами для различного движения. Проведены экспериментальные исследования.

Недеформируемый водный робот с острой кромкой движется по поверхности жидкости. Разработана математическая модель описывающая плоскопараллельное движение робота, учитывающая сопротивление жидкости. На основе этой модели подобраны режимы управления роторами для различного движения. Проведены экспериментальные исследования.

В связи с изложенным выше, тема диссертационной работы представляется актуальной.

Целью данной работы является исследование механизмов, обеспечивающих движение водоплавающих роботов за счет изменения гиростатического момента, возникающего от вращения роторов, расположенных внутри оболочки объектов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Построение математической модели движения безвинтового подводного робота в форме эллипсоида в жидкости за счет изменения внутреннего кинетического момента.
2. Построение математической модели движения недеформируемого водного робота с острой кромкой в жидкости за счет изменения внутреннего кинетического момента с учетом вязкого трения.
3. **Разработка алгоритмов управления для реализации движения мобильных водоплавающих роботов.**
4. Разработка прототипов роботов: разработка конструкции водных роботов; разработка систем управления.
5. Проведение натурных экспериментов и исследования влияния режимов работы механизма на динамику роботов.
6. Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования.

Научная новизна:

1. Разработана оригинальная математическая модель движения безвинтового подводного робота в форме эллипсоида в жидкости за счет изменения внутреннего кинетического момента.
2. Разработана оригинальная математическая модель движения недеформируемого водного робота с острой кромкой в жидкости за счет изменения внутреннего кинетического момента с учетом вязкого трения.
3. **Разработан оригинальный алгоритм управления безвинтовым подводным роботом в форме эллипсоида в жидкости за счет изменения внутреннего кинетического момента.**
4. **Разработан оригинальный алгоритм управления недеформируемым водным роботом с острой кромкой в жидкости за счет изменения внутреннего кинетического момента.**
5. Разработаны оригинальные конструкции мобильных водоплавающих роботов, перемещающихся за счет изменения внутреннего кинетического момента: безвинтового подводного робота в форме эллипсоида и недеформируемого водного робота с острой кромкой.
6. Получены результаты экспериментальных исследований по оценке разработанных алгоритмов управления.

Практическая значимость Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для проектирования (усовершенствования) мобильных устройств перемещающихся в жидкости. Разработанные математические модели движения могут использоваться для определения оптимальных параметров механизмов подобных роботов, перемещающихся в жидкости и построения систем управления. Также разработанные математические модели позволяют определить управляющие воздействия для элементарных маневров, которые можно использовать для перемещения в жидкости для роботов подобной конструкции.

Безвинтовые плавающие роботы с вращающимися внутренними роторами являются примером сложных динамических систем, на основе которых можно проводить как моделирование, так и экспериментальные исследования, дополняя или упрощая существующие конструкции, что делает их наглядным лабораторным комплексом, который можно внедрять в учебный процесс.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в рамках диссертационного исследования задач использовались аналитические и численные методы решения уравнений динамики. Для вычисления коэффициентов математической модели недеформируемого рыбоподобного робота использовался метод решения уравнений Навье-Стокса. При проведении экспериментальных исследований движения роботов использовалась система захвата движения фирмы Vicon: для отслеживания движения подводного робота использовалась система, состоящая из 4 камер, предназначенная для работы под водой; для отслеживания движения на поверхности жидкости использовалась система, состоящая из 7 камер. Обработка результатов экспериментов проводилась с использованием программных комплексов Matlab, Maple. Программное обеспечение для управления роботами разрабатывалось на языке Си для микроконтроллера STM32F303K8 и микроконтроллера LPC1768 с ядром Cortex-M4 в среде Keil uVision 5.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель движения безвинтового подводного робота в форме эллипсоида в жидкости за счет изменения внутреннего кинетического момента.
2. Математическая модель движения недеформируемого водного робота с острой кромкой в жидкости за счет изменения внутреннего кинетического момента с учетом вязкого трения.
3. Алгоритм управления безвинтовым подводным роботом в форме эллипсоида в жидкости за счет изменения внутреннего кинетического момента.
4. Алгоритм управления недеформируемым водным роботом с острой кромкой в жидкости за счет изменения внутреннего кинетического момента.
5. Результаты экспериментальных исследований по оценке разработанных алгоритмов управления

Достоверность. Разработанные математические модели основываются на классических утверждениях и теоремах и не противоречат известным результатам. Для исследования и моделирования полученных уравнений используются апробированные аналитические и численные методы решения. Достоверность подтверждается согласованностью математической модели с результатами натурных экспериментов. Для проведения экспериментальных исследований использовались современные измерительные комплексы, прошедшие поверку.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на семинарах «Института компьютерных исследований» ФГБОУ ВПО «Удмуртский государственный университет», кафедры «Мехатронные системы» ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники, Университета Иннополис.

Кроме того, результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались на российских и международных конференциях:

- IV Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке». (Ижевск, 2016).
- Шестая международная конференция «Geometry, Dynamics, Integrable Systems – GDIS 2016» (Ижевск, 2016 г.)
- Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС-2018) (Москва, 2018 г.)
- International Conference "Scientific Heritage of Sergey A. Chaplygin: nonholonomic mechanics, vortex structures and hydrodynamics"(Чебоксары, 2019 г.)
- 30-я международная научно-техническая конференция "Экстремальная робототехника-2019"(Санкт-Петербург, 2019 г.)

По результатам диссертационного исследования получены авторские права на следующие результаты интеллектуальной деятельности:

1. Патент на полезную модель. №172254 РФ. Безвинтовой подводный робот // А.В. Борисов, И.С. Мамаев, А.А. Килин, А.А. Калинин, Ю.Л. Караваев, А.В. Клековкин, Е.В. Ветчанин. Заявка: 2016144812, 15.11.2016, опубл. 3.07.2017
2. № 2017613219. Программа для управления безвинтовым подводным роботом // А.В. Борисов, И.С. Мамаев, А.А. Килин, Ю.Л. Караваев, А.В. Клековкин. Заявка: 2016662663, 22.11.2016, опубл. 16.03.2017
3. № 2019612284. Программа управления безвинтовым надводным роботом с внутренним ротором // А.В. Борисов, И.С. Мамаев, А.А. Килин, А.В. Клековкин, Ю.Л. Караваев. Заявка: 2019610925, 04.02.2019, опубл. 14.02.2019

Личный вклад. Постановки задач, обсуждение результатов проводились совместно с руководителем и соавторами работ. Автором разработаны математические модели, прототипы мобильных платформ, программное обеспечение для управления и мобильными роботами и обработки результатов эксперимента, проведены натурные и численные эксперименты.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 0 печатных изданиях, 0 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. В последующих главах сначала описывается общий принцип, позволяющий ..., а потом идёт апробация на частных примерах: ... и

Первая глава посвящена ...

картинку можно добавить так:



Рис. 1 — Подпись к картинке.

Формулы в строку без номера добавляются так:

$$\lambda_{T_s} = K_x \frac{dx}{dT_s}, \quad \lambda_{q_s} = K_x \frac{dx}{dq_s},$$

Вторая глава посвящена исследованию

Третья глава посвящена исследованию

Можно сослаться на свои работы в автореферате. Для этого в файле Synopsis/setup.tex необходимо присвоить положительное значение счётчику `\setcounter{usefootcite}{1}`. В таком случае ссылки на работы других авторов будут подстрочными. Изложенные в третьей главе результаты опубликованы в [vakbib1, vakbib2]. Использование подстрочных ссылок внутри таблиц может вызывать проблемы.

В **четвертой главе** приведено описание

В **заклучении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработана математическая модель движения мобильного робота в форме эллипсоида в жидкости за счет внутреннего кинетического момента.
2. Разработана математическая модель движения недеформируемого рыбоподобного робота в жидкости за счет внутреннего кинетического момента с учетом вязкого трения и циркуляции.
3. Разработаны экспериментальные образцы и системы управления мобильных водоплавающих роботов: робота в форме эллипсоида и недеформируемого рыбоподобного робота.
4. Проведены натурные эксперименты по исследованию динамики мобильных водоплавающих роботов.

5. Проведены сравнения экспериментальных данных с результатами численного моделирования разработанных математических моделей, на основе которых сделана оценка о возможности их использования для синтеза подобных механизмов и управления мобильными водоплавающими роботами с переменным внутренним кинетическим моментом.
6. По разработанным конструкциям получены патенты на полезную модель, для разработанных программных продуктов получены свидетельства о регистрации программ ЭВМ.

При использовании пакета `biblatex` список публикаций автора по теме диссертации формируется в разделе «Публикации.» файла `common/characteristic.tex` при помощи команды `\nocite`

Клековкин Антон Владимирович

Динамика и управление недеформируемыми безвинтовыми водными роботами

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____