

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова»

На правах рукописи

Клековкин Антон Владимирович

**Динамика и управление недеформируемыми безвинтовыми
водными роботами**

Специальность 05.02.05 —

«Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

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

Ижевск — 2020

Оглавление

Стр.

Введение	5
Глава 1. Анализ механизмов движения мобильных плавающих роботов	13
1.1 Введение	13
1.2 Обзор способов перемещения роботов в жидкости	13
1.2.1 Перемещение за счет использования гребных винтов	14
1.2.2 Перемещение за счет изменения формы тела	14
1.2.3 Перемещение за счет реактивной тяги	14
1.2.4 Перемещение за счет внутренних механизмов	14
Глава 2. Математическая модель движения безвинтового подводного робота с внутренними роторами в жидкости	20
2.1 Уравнения движения	20
2.2 Исследование уравнений движения. Моделирование теоретических траекторий	25
2.3 Методика определения коэффициентов и параметров модели	25
2.4 Разработка и оценка алгоритма управления	25
Глава 3. Конструкция безвинтового подводного робота с внутренними роторами	26
3.1 Описание конструкции безвинтового подводного робота с внутренними роторами	26
3.2 Описание системы управления безвинтового подводного робота с внутренними роторами	28
Глава 4. Результаты экспериментальных исследований безвинтового подводного робота с внутренними роторами	32

4.1	Методика проведения экспериментальных исследований	32
4.2	Проведение экспериментальных исследований	32
4.3	Оценка экспериментальных данных	36
4.4	Выводы по экспериментам	39
Глава 5. Конструкция недеформируемого водного робота с острой кромкой		41
5.1	Описание конструкции недеформируемого водного робота с острой кромкой	41
5.2	Описание системы управления недеформируемого водного робота с острой кромкой	45
Глава 6. Описание математической модели движения недеформируемого водного робота с острой кромкой		48
6.1	Уравнения движения	48
6.1.1	Подходы к построению математической модели	48
6.1.2	Общий вид уравнений движения	50
6.1.3	Определение сил и моментов сопротивления с использованием уравнений Навье-Стокса	52
6.2	Разработка и оценка алгоритма управления	60
6.3	Исследование уравнений движения. Моделирование теоретических траекторий	62
6.3.1	Исследование зависимости формы траектории от характера управляющего воздействия	62
6.3.2	Исследование зависимости формы траектории от параметров модели	67
Глава 7. Экспериментальные исследования с водоплавающим недеформируемым рыбоподобным роботом		68

7.1	Методика проведения экспериментов	68
7.2	Экспериментальные исследования	69
7.2.1	Движение вдоль прямой	69
7.2.2	Движение вдоль окружности	73
7.2.3	Движение вдоль сложных траекторий	76
7.2.4	Выводы по главе	77
Заключение		79
Список литературы		81

Введение

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. Черноусько, 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 самоподвижение 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 [1] 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 [1]. 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 рыбоподоного 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. Калинкин, 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 поводились 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 7 печатных изданиях, 1 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 1 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 5 — в тезисах докладов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 82 страницы, включая 50 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 0 наименований.

Глава 1. Анализ механизмов движения мобильных плавающих роботов

1.1 Введение

В последние десятилетия активно развивается область по разработке мобильных роботов. В настоящее время уделяется существенное внимание разработке автономных мобильных роботов, предназначенных для решения определенных задач в разных средах. Появляющиеся роботы охватывают различные среды: роботы, перемещающиеся по твердой поверхности **вместо скобочек добавить ссылки** (автономные автомобили), роботы, перемещающиеся по воздуху (автономные коптеры, самолеты и т. д.), водные роботы, перемещающиеся по поверхности жидкости (автономные катера) и на глубине (автономные подводные аппараты).

Развиваются области в создании роботов использующих как более традиционные способы перемещения, так и имеющие новые принципы приведения в движение. Отдельную область составляет исследование динамики водных роботов, имитирующих способы передвижения живых существ и роботов, не имеющих внешних подвижных элементов. Передвижение таких устройств реализуется за счет движения внутренних масс и вращения роторов. Такие «экзотические» транспортные средства могут применяться в специфических (критических) условиях, например в условиях космоса или на больших глубинах.

1.2 Обзор способов перемещения роботов в жидкости

Выделим существующие способы перемещения в жидкости:

- Перемещение за счет использования гребных винтов.

- Перемещение за счет изменения формы тела.
- Перемещение за счет использования реактивного привода.
- Перемещение за счет действия внутренних механизмов.

Рассмотрим подробнее каждый из этих способов.

1.2.1 Перемещение за счет использования гребных винтов

В настоящее время для водных мобильных систем самым распространенным способом перемещения является перемещение с помощью винтов. Способ перемещения с помощью винтов называют традиционным способом. Аппараты, используемые гребные винты широко используются для мониторинга и проведения различных операций. 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.

1.2.2 Перемещение за счет изменения формы тела

1.2.3 Перемещение за счет реактивной тяги

1.2.4 Перемещение за счет внутренних механизмов

Для описания управляемого движения твердых тел в жидкости были предложены различные математические модели. Наиболее простые модели основаны построены в рамках теории идеальной жидкости и учитывают только

эффект присоединенных масс. Однако такие существенно упрощенные модели позволяют обнаружить интересные динамические эффекты и закономерности, наблюдаемые в экспериментах. Например, в работах [**Kozlov_Ramodanov_2001**, **Kozlov_Onischenko_2003**] рассматривалось продвижение твердых тел в идеальной жидкости за счет подвижных внутренних масс. Было показано, что неограниченное продвижение оказывается возможным только при наличии анизотропии присоединенных масс. Идеи работ [**Kozlov_Ramodanov_2001**, **Kozlov_Onischenko_2003**] получили развитие в [**Vetchanin_Kilin_2016**], где рассматривалось движение эллиптического профиля, содержащего два эксцентрика, вращающихся в одинаковыми по модулю и противоположными по знаку скоростями. Было показано, что такая система движется в среднем прямолинейно. Данный факт подтверждается экспериментально, см. [2]. Также отметим работу [**Jing_Kanso_2013**], где рассматривалась задача устойчивости движения эллиптического профиля за счет вращательных колебаний. Трехмерные задачи управления и стабилизации движения эллипсоидов и винтовых тел рассматривались, например, в работах [**Borisov_et_al_2017**, **Vetchanin_Mamaev_2017**, **Vetchanin_et_al_2016**, **Woolsey_Leonard_1999**].

Модель схода вихрей позволяет описать самоподвижение тела за счет колебаний внутреннего ротора, наблюдаемое в экспериментах [**Tallapragada_2015**, **Pollard_Tallapragada_2019**]. Однако, следует отметить, что сход каждого вихря приводит к увеличению размерности фазового пространства системы, что влечет определенные вычислительные трудности. Альтернативой описанной модели являются конечномерные математические модели, учитывающие вязкое трение и изменение циркуляции. Например, в работе [**Borisov_et_al_2018**] рассматривалось плоскопараллельное движение эллиптического профиля за счет колеблющегося ротора при наличии периодически изменяющейся циркуляции и вязкого трения. Подобная модель для тела с острой кромкой и циркуляцией, изменяющейся согласно условию Кутты-Чаплыгина, была предложена в работе [**Mamaev_Vetchanin_2018**] на основе результатов численных экспериментов, описанных в работе [**Mamaev_et_al_2018**]. В работе [**Kilin_et_al_2018**] была

предложена модель движения робота с двумя эксцентриками, учитывающая помимо вязкого сопротивления, качку во время движения.

Отметим, что наиболее полное описание движения тел в жидкости может быть получено на основе совместного решения уравнений движения тела и уравнений Навье-Стокса, см., например, работы [**Childress et al 2011**, **Eldredge 2006**, **Vetchanin et al 2013**]. Однако использование такого подхода затратно с вычислительной точки зрения при исследовании управляемого движения и построении гейтов. Поэтому моделирование с использованием уравнений Навье-Стокса целесообразно только при построении конечномерных моделей движения тел в жидкости, которые оказываются более удобными при анализе управляемого движения.

Рассмотрим более подробно некоторые работы.

В работе [3] рассматривается робот, состоящий из корпуса и двух подвижных внутренних масс, которые перемещаются относительно корпуса по прямолинейным направляющим (см. рисунок 1.1). Взаимодействие робота со средой осуществляется только за счет четырех опорных поплавков с изменяемым углом наклона относительно вертикали. Движение происходит за счет изменения силы трения вдоль продольной оси корпуса при повороте поплавков. В той же работе приведена математическая модель и дается численное моделирование, позволившее изучить управляемые движения робота на примере прямолинейного и вращательного движения.

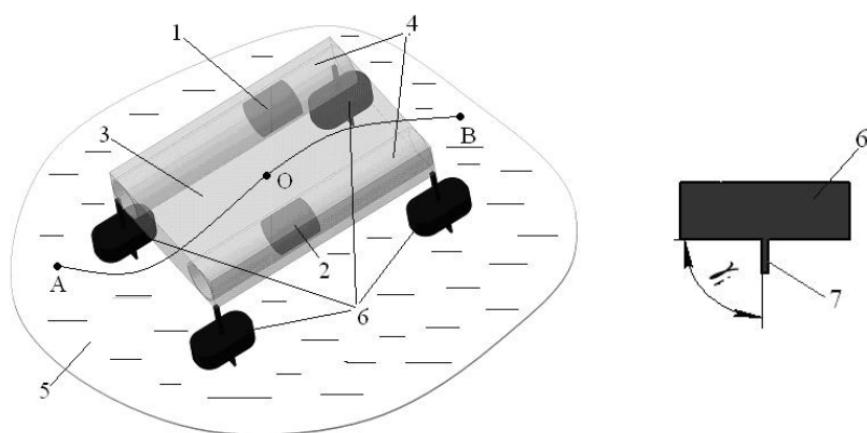


Рисунок 1.1 – Схематичное изображение плавающего робота и схема поплавка

В диссертации [1] рассмотрена локомоционная мобильная платформа, перемещающаяся в жидкости за счет изменения распределения масс (см. рисунок 1.2). 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 [4] и проведены экспериментальные исследования, при этом платформа движется по поверхности жидкости.



Рисунок 1.2 — Локомоционная мобильная платформа, перемещающаяся в жидкости за счет изменения распределения масс

В работе [Tallapragada_2015] рассмотрен водный робот, имеющий форму профиля крыла NACA 0030 (см. рисунок 1.3). Робот перемещается в жидкости за счет периодического вращения внутреннего ротора. Разработана математическая модель движения, учитывающая сход вихрей с острой кромки. Проведены экспериментальные исследования.

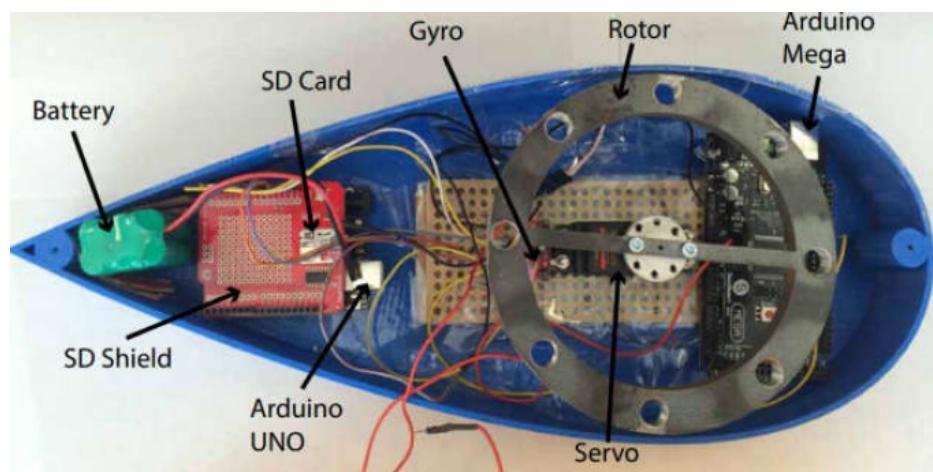


Рисунок 1.3 — Водный робот, имеющий форму профиля крыла NACA 0030

А в работе [Pollard_Tallapragada_2019] проведено сравнение маневренности вышеописанного робота при различных вариантах исполнения хвостовой части корпуса: полностью жесткий корпус, корпус со свободно вращающимся однозвенным хвостом, два варианта корпуса со свободно вращающимся двухзвенным хвостом (см. рисунок 1.4).

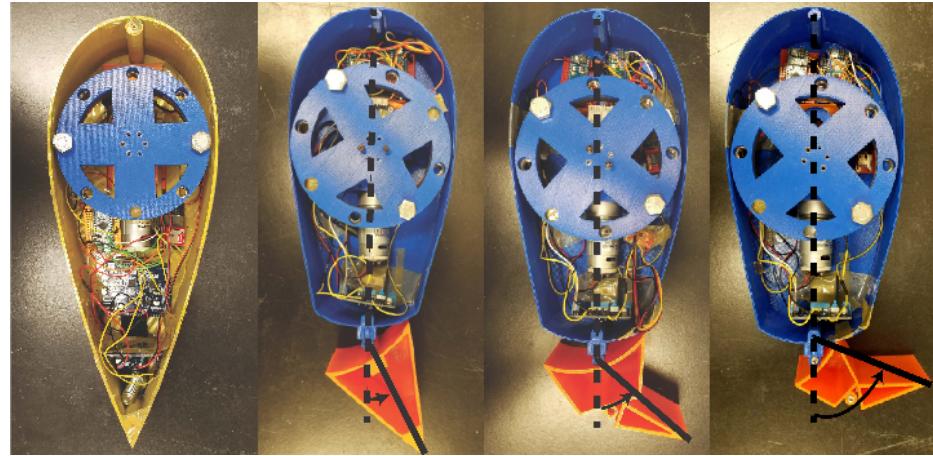


Рисунок 1.4 – Варианты исполнения водного робота со свободно вращающимся хвостом

В работе [Wang_Tan] рассмотрен рыбоподобный робот, перемещающийся за счет периодического движения хвостового плавника (см. рисунок 1.5). Представлена модель движения, проведены экспериментальные исследования. Сделаны сравнения результатов моделирования и экспериментов.

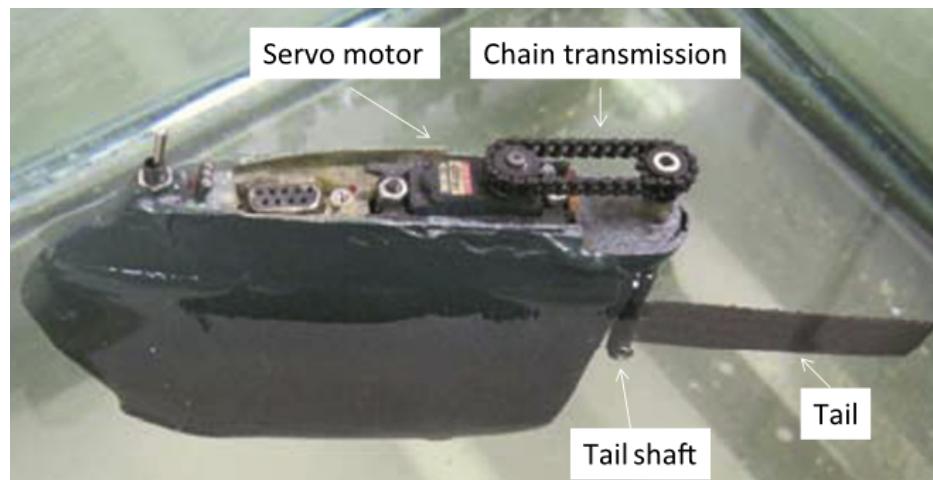


Рисунок 1.5 – Рыбоподобный робот, перемещающийся за счет периодического движения хвостового плавника

В работе [5] рассматривается задача о движении тела в вязкой жидкости, за счет перемещения внутренних масс, при котором внешняя оболочка тела остается неизменной. Приведена математическая модель, построенная на гидродинамических уравнениях Навье-Стокса. В результате численного моделирования показано существенное влияние сил и момента вязкого сопротивления на траекторию движения, выявлены отличия движения тела в вязкой жидкости по сравнению с идеальной. На основе полученных результатов в работе [6] решена задача оптимального управления движением тела по заданной траектории за счет перемещения внутренних масс, с применением гибридного генетического алгоритма. В результате получены аппроксимационные зависимости для сил, действующих на тело.

Исследование характеристик движения тела с переменным распределением массы в трехмерной вязкой жидкости проведено в работе [7], а в работе [8] рассмотрено управляемое движение при наличии циркуляции вокруг тела. В этих работах показана возможность перемещения тела в произвольном направлении, а также возможность преодоления силы тяжести телом с плавучестью близкой к нулевой.

Глава 2. Математическая модель движения безвинтового подводного робота с внутренними роторами в жидкости

2.1 Уравнения движения

Рассмотрим систему, состоящую из жесткой внешней оболочки и трех внутренних роторов (рисунок 2.1). Геометрический центр системы совпадает с центром сферической части оболочки.

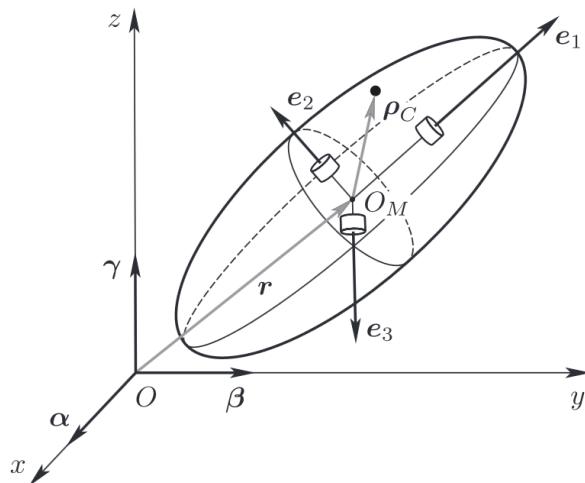


Рисунок 2.1 – Схематическая модель безвинтового подводного робота с внутренними роторами **убрать центр масс**

Будем полагать, что конструкция удовлетворяет ряду условий:

1. Оболочка является однородной, положение ее центра масс совпадает с геометрическим центром оболочки.
2. Все роторы одинаковы, осесимметричны и оси вращения совпадают с их осями симметрии, то есть вращение не изменяет распределение масс системы;
3. Оси вращения роторов взаимно перпендикулярны, а их угловые скорости являются заданными функциями времени $\omega_k(t)$, $k = 1,2,3$.

Выберем подвижную систему координат $O_1e_1e_2e_3$, жестко связанную с оболочкой, так что оси совпадают с главными осями инерции оболочки. Обозначим через \mathbf{V} и $\boldsymbol{\Omega}$ скорость центра оболочки и его угловую скорость (все векторы, если не оговорено обратное, проецируются на подвижные оси).

Определим дополнительно неподвижную систему координат $Oxyz$ и обозначим $\mathbf{r} = (x, y, z)$ – координаты геометрического центра оболочки в этих осях. Обозначим также через α, β, γ орты неподвижных осей $Oxyz$, спроектированные на подвижные оси e_1, e_2, e_3 , тогда ортогональная матрица

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{pmatrix} \in SO(3)$$

характеризует ориентацию тела, а пара (\mathbf{r}, \mathbf{Q}) однозначно определяет конфигурацию системы. Таким образом, конфигурационное пространство системы шестимерно и представляет собой $\mathbb{R}^3 \times SO(3)$.

Обозначим через m_s – массу оболочки, \mathbf{I}_s – ее центральный тензор инерции,

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \Lambda_1 & 0 \\ 0 & \Lambda_2 \end{pmatrix}$$

– матрицу коэффициентов присоединенных масс в системе $Oe_1e_2e_3$, где Λ_1 – тензор присоединенных масс, Λ_2 – тензор присоединенных моментов инерции. Тогда выражение для кинетической энергии оболочки примет вид

$$T_s = \frac{1}{2}m_s(\mathbf{V}, \mathbf{V}) + \frac{1}{2}(\mathbf{I}_s \boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}),$$

а выражение кинетической энергии жидкости

$$T_f = \frac{1}{2}(\Lambda_1 \mathbf{V}, \mathbf{V}) + \frac{1}{2}(\Lambda_2 \boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}).$$

Обозначим через m_R – массу ротора, \mathbf{I}_k – центральный тензор инерции k -го ротора, записанный в системе координат $O'e_1e_2e_3$, \mathbf{n}_k – орт оси вращения

k -го ротора неподвижный в системе $O'e_1e_2e_3$, \mathbf{r}_k – радиус-вектор центра масс k -го ротора неподвижный в системе $O'e_1e_2e_3$. Тогда кинетическая энергия k -го ротора примет вид

$$T_k = \frac{1}{2}m_R(\mathbf{V} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_k, \mathbf{V} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_k) + \frac{1}{2}\left(\mathbf{I}_k(\boldsymbol{\Omega} + \boldsymbol{\omega}_k \mathbf{n}_k), \boldsymbol{\Omega} + \boldsymbol{\omega}_k \mathbf{n}_k\right),$$

Суммарная кинетическая энергия всей системы с учетом того, что оси роторов задаются собственными векторами их тензоров инерции, то есть $\mathbf{I}_k \mathbf{n}_k = i \mathbf{n}_k$, примет вид

$$\begin{aligned} T &= T_f + T_s + \sum_{k=1}^3 T_k = \\ &= \frac{1}{2}(\mathbf{I}\boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}) + (\mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}, \mathbf{V}) + \frac{1}{2}(\mathbf{C}\mathbf{V}, \mathbf{V}) + (\boldsymbol{\Omega}, \mathbf{K}(t)) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 i\omega_k^2(t), \end{aligned} \quad (2.1)$$

где \mathbf{I} – тензор инерции всей системы вычисленный относительно геометрического центра оболочки, матрицы \mathbf{B} и \mathbf{C} зависят от распределения масс и формы оболочки, $\mathbf{K}(t) = \sum_{k=0}^3 i\omega_k(t) \mathbf{n}_k$ – вектор гиростатического момента. Матрицы \mathbf{I} , \mathbf{B} , \mathbf{C} имеют вид

$$\mathbf{I} = \mathbf{\Lambda}_2 + \mathbf{I}_s + \sum_{k=1}^3 \mathbf{I}_k + \frac{1}{2}m_R \sum_{k=1}^3 (\mathbf{r}_k^2 \mathbf{E} - \mathbf{r}_k \otimes \mathbf{r}_k),$$

$$\mathbf{C} = m\mathbf{E} + \mathbf{\Lambda}_1,$$

$$\mathbf{B} = m \begin{pmatrix} 0 & z_c & -y_c \\ -z_c & 0 & x_c \\ y_c & -x_c & 0 \end{pmatrix}$$

$$m = m_s + 3m_R,$$

где x_c , y_c , z_c – компоненты радиус-вектора \mathbf{r}_c центра масс системы.

Замечание. Общее число параметров матриц \mathbf{C} , \mathbf{B} , \mathbf{I} равно 21. С помощью подходящего выбора точки O_1 и ориентации осей $O_1e_1e_2e_3$ матрицу \mathbf{I} можно привести к диагональному виду, \mathbf{B} – к симметрическому, а общее число параметров будет равно 15 [9]. Исследования, которые будут проводиться в

дальнейшем, будут осуществляться численно, поэтому вопрос о количестве параметров не является принципиальным.

Уравнения движения рассматриваемой системы имеют вид классических уравнений Кирхгофа [9]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}} \right) + \boldsymbol{\Omega} \times \frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}} = 0, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\Omega}} \right) + \boldsymbol{\Omega} \times \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\Omega}} + \mathbf{V} \times \frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}} = 0$$

и с учетом (2.1) могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{C} \dot{\mathbf{V}} + \mathbf{B} \dot{\boldsymbol{\Omega}} &= (\mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}) \times \boldsymbol{\Omega}, \\ \mathbf{B}^T \dot{\mathbf{V}} + \mathbf{I} \dot{\boldsymbol{\Omega}} + \dot{\mathbf{K}}(t) &= (\mathbf{B}^T \mathbf{V} + \mathbf{I}\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{K}(t)) \times \boldsymbol{\Omega} + (\mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}) \times \mathbf{V} = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Данные уравнения необходимо дополнить уравнениями эволюции переменных (\mathbf{r}, \mathbf{Q}) , которые описываются уравнениями Пуассона и кинематическими соотношениями следующего вида

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}} = \boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{\Omega}, \quad \dot{\boldsymbol{\beta}} = \boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{\Omega}, \quad \dot{\boldsymbol{\gamma}} = \boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\Omega}, \quad (2.3)$$

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{Q}^T \mathbf{V}. \quad (2.4)$$

Уравнения (2.2), (2.3), (2.4) полностью описывают движение рассматриваемой системы. Однако удобней записать данные уравнения в гамильтоновой форме [10]

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{P} \times \boldsymbol{\Omega}, \quad \dot{\mathbf{M}} = \mathbf{M} \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{P} \times \mathbf{V}, \quad (2.5)$$

где $\mathbf{P} = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}}$ и $\mathbf{M} = \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\Omega}}$ имеют гидродинамический смысл и называются, соответственно, импульсивным моментом и импульсивной силой. При этом \mathbf{V} и $\boldsymbol{\Omega}$ связаны с этими векторами следующим образом

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}, \quad \mathbf{M} = \mathbf{B}^T \mathbf{V} + \mathbf{I}\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{K}(t), \\ \mathbf{V} &= \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{P} - \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}), \quad \boldsymbol{\Omega} = (\mathbf{I} - \mathbf{B}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B})^{-1}(\mathbf{M} - \mathbf{K}(t) - \mathbf{B}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{P}) \end{aligned}$$

Уравнения (2.3) допускают шесть геометрических интегралов движения:

$$\boldsymbol{\alpha}^2 = \boldsymbol{\beta}^2 = \boldsymbol{\gamma}^2 = 1, \quad (\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) = (\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\gamma}) = (\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}) = 0$$

Как указано в [11] уравнения (2.5) допускают еще шесть интегралов

$$(\boldsymbol{P}, \boldsymbol{\alpha}), (\boldsymbol{P}, \boldsymbol{\beta}), (\boldsymbol{P}, \boldsymbol{\gamma}), (\boldsymbol{M} + \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{P}, \boldsymbol{\alpha}), (\boldsymbol{M} + \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{P}, \boldsymbol{\beta}), (\boldsymbol{M} + \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{P}, \boldsymbol{\gamma}) \quad (2.6)$$

Данные интегралы движения имеют следующий смысл: при движении тела в идеальной жидкости векторы \boldsymbol{P} и $\boldsymbol{M} + \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{P}$ сохраняются в абсолютном пространстве. В случае движения из состояния покоя первые интегралы (2.6) приобретают особенно простой вид

$$\boldsymbol{P} = 0, \quad \boldsymbol{M} = 0$$

а выражения для скоростей

$$\begin{aligned} \boldsymbol{V} &= -\mathbf{C}^{-1}\mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}, \\ \boldsymbol{\Omega} &= -(\mathbf{I} - \mathbf{B}^T\mathbf{C}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\boldsymbol{K}(t) \end{aligned}$$

Таким образом при движении из состояния покоя система уравнений описывающих эволюцию ориентации и траектории движения при заданном управлении имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\alpha}} &= \tilde{\mathbf{I}}\boldsymbol{K}(t) \times \boldsymbol{\alpha}, \\ \dot{\boldsymbol{\beta}} &= \tilde{\mathbf{I}}\boldsymbol{K}(t) \times \boldsymbol{\beta}, \\ \dot{\boldsymbol{\gamma}} &= \tilde{\mathbf{I}}\boldsymbol{K}(t) \times \boldsymbol{\gamma}, \\ \dot{\boldsymbol{r}} &= \mathbf{Q}^T\mathbf{C}^{-1}\mathbf{B}\tilde{\mathbf{I}}\boldsymbol{K}(t), \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\text{где } \tilde{\mathbf{I}} = (\mathbf{I} - \mathbf{B}^T\mathbf{C}^{-1}\mathbf{B})^{-1}.$$

Решения системы уравнений (2.7) относительно $\boldsymbol{K}(t)$ позволяют находить управляющие воздействия $\omega_k(t)$ для движения вдоль заданной траектории.

2.2 Исследование уравнений движения. Моделирование теоретических траекторий

В работе [Borisov_Vetchanin_Kilin_2017] показано, что для данного объекта существуют такие управляющие воздействия с постоянной скоростью вращения роторов, при которых робот совершает элементарные маневры (движение вдоль каждой оси эллипсоида). Также описаны комбинации управляющих воздействий, которые позволяют реализовать неограниченное движение в произвольном направлении. В целом, движение тела представляет собой стационарное винтовое движение с постоянной угловой и линейной скоростями.

2.3 Методика определения коэффициентов и параметров модели

Для объекта, имеющего форму эллипсоида вращения, значения тензоров присоединенных масс и присоединенных моментов инерции можно рассчитать используя справочные материалы [12].

2.4 Разработка и оценка алгоритма управления

На основе предыдущих разделов определить управляющие воздействия.

Глава 3. Конструкция безвинтового подводного робота с внутренними роторами

3.1 Описание конструкции безвинтового подводного робота с внутренними роторами

Безвинтовой подводный робот является мобильным роботом в форме эллипсоида и представляет собой сборную конструкцию (рисунок 3.1). Основой конструкции является оболочка 1 в форме эллипсоида, составленная из двух одинаковых половин 2, присоединенных друг к другу по экваториальной плоскости с помощью дискообразной перегородки – платформы 3. Размер эллипсоида по большей оси составляет 300 мм, по меньшей – 200 мм. Толщина оболочки (3 мм) и применяемый материал обеспечивают необходимую прочность при погружении и перемещении робота. Соединение полуоболочек и платформы обеспечивает герметичность внутренней полости.

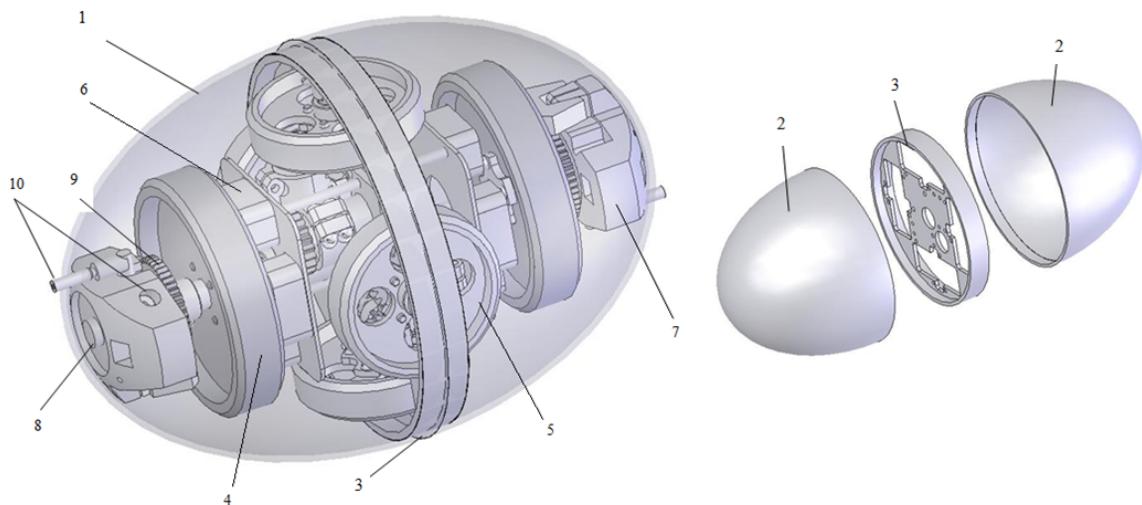


Рисунок 3.1 – Конструкция и корпусные элементы экспериментальной модели безвинтового подводного робота

Внутри корпуса робота установлены три пары роторов (далее система роторов) таким образом, что оси роторов расположены под углом 90° по отно-

шению друг к другу. Ось одной из пар роторов направлена вдоль оси вращения эллипсоида, а две другие пары расположены в экваториальной плоскости. Обеспечение точного управляющего воздействия $\omega_k(t)$ осуществляется с помощью встроенных в приводы датчиков обратной связи (энкодеров). Система роторов подводного робота включает пару роторов большего размера 4, установленных симметрично относительно платформы 3 на одной общей оси, и двух других пар роторов меньшего размера 5, расположенных (по направлениям осей) перпендикулярно первой паре и перпендикулярно друг другу в экваториальной плоскости. Оси малых роторов выполнены отдельно для каждого маховика и установлены соосно на некотором расстоянии друг от друга. Малые роторы соединены кинематически попарно с помощью промежуточных (дополнительных) осей и зубчатых пар таким образом, что их вращение происходит также, как если бы они были на одной общей оси.

Для приведения в движение системы роторов каждая из пар роторов оснащена высокомоментными мотор-редукторами, которые установлены в соответствующих опорах на платформе. В пространствах между большими и малыми роторами симметрично с двух сторон относительно платформы на панелях смонтированы модули питания 6, управления и связи. Передача данных для управления движением и получением дополнительной информации о состоянии системы может осуществляться по проводному и беспроводному вариантам связи.

Размещение узлов на платформе выполнено таким образом, чтобы в максимальной степени обеспечить симметричное расположение масс относительно геометрического центра тела, а также по возможности обеспечить минимальное отклонение центра масс от геометрического.

Для погружения робот оснащен механизмом регулировки плавучести. Он состоит из двух одинаковых модулей плавучести 7, размещенных и закрепленных внутри полуоболочек в наиболее удаленных частях относительно платформы. Модули плавучести имеют в своем составе лопастной насос 8 с приводом 9 на основе микроэлектродвигателя с редуктором. Полости насоса —

воздушная и жидкостная имеют каналы 10, соединяющие их соответственно с внутренней полостью и внешней средой.

Для контроля глубины робот оснащен двумя датчиками давления. Так же для определения ориентации робот имеет датчик MPU9250, который включает в себя трехосевой акселерометр, трехосевой гироскоп и трехосевой магнитометр.

Разработанная конструкция мобильного робота в форме эллипсоида имеет следующие характеристики: масса оболочки: 2.923 кг; момент инерции маховиков большего размера: $7.491 \cdot 10^{-4}$ кг·м; масса маховиков большего размера: 0.903 кг; момент инерции маховиков меньшего размера: $0.491 \cdot 10^{-4}$ кг·м; масса маховиков меньшего размера: 0.337 кг.

Фотографии робота в сборе и без половины оболочки представлены на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Фотографии безвинтового подводного робота

3.2 Описание системы управления безвинтового подводного робота с внутренними роторами

В полученных математических моделях управление роторами задается в виде вектора внутреннего гиростатического момента \mathbf{K} . Для управления отдельным двигателем разработана следующая схема (см. рисунок 3.3).

Структурная схема системы управления безвинтового подводного робота, представлена на рисунке 3.4.

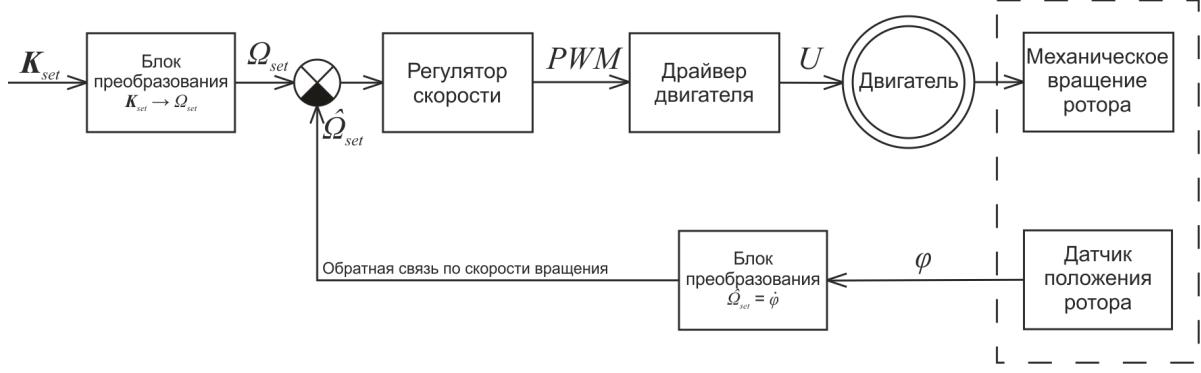


Рисунок 3.3 – Схема управления отдельным двигателем, где K_{set} – вектор внутреннего гиростатического момента; Ω_{set} – угловая скорость вращения двигателя; $\hat{\Omega}_{set}$ – фактическая скорость вращения двигателя; PWM – широтно-импульсная модуляция, рассчитанная для заданной скорости вращения; U – напряжение, подаваемое на двигатель; φ – фактическое положение ротора

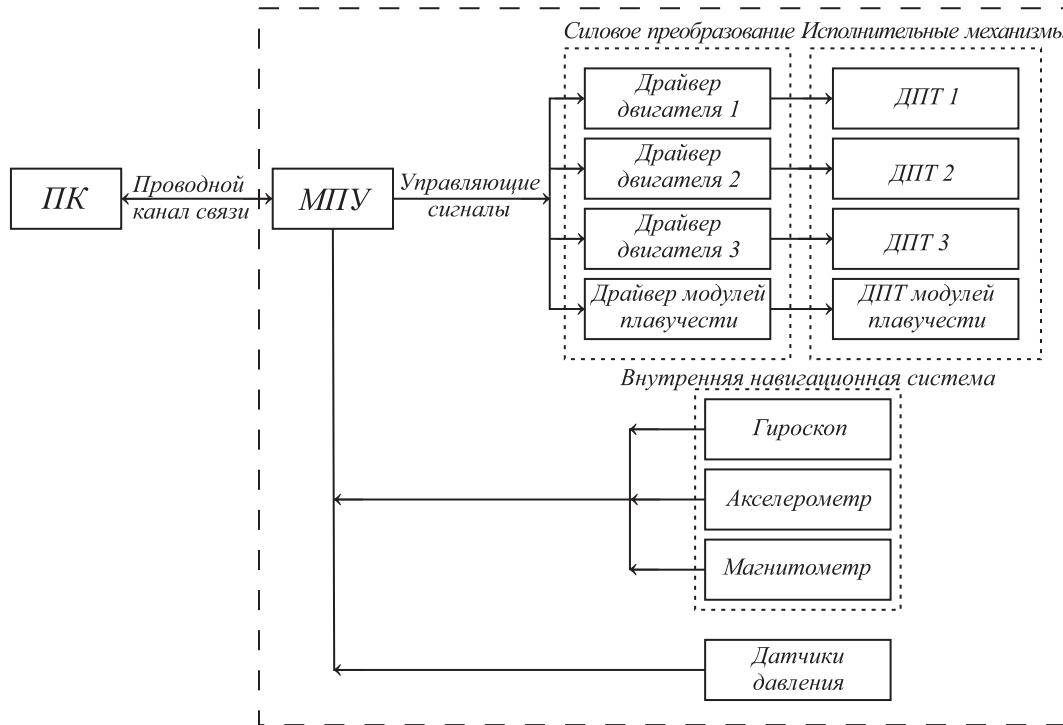


Рисунок 3.4 – Структурная схема системы управления подводным роботом

Оператор на персональном компьютере (ПК, см. рисунок 3.4) задает команды управления подводным роботом. Команды передаются на микропроцессорное устройство (МПУ) по проводному или беспроводному (если робот находится на поверхности воды) каналу связи и представляют собой закодированные скорости вращения роторов или двигателей модулей плавучести. Далее микропроцессор обрабатывает полученные данные и формирует управляющий

сигнал, подаваемый на драйверы двигателей или драйверы модулей плавучести, которые, в свою очередь, подают напряжение нужной формы и амплитуды на двигатели постоянного тока (ДПТ) или модули плавучести. Плата управления также содержит трехосевые акселерометр, гироскоп и магнитометр, которые являются внутренней навигационной системой робота и служат для определения ориентации робота. В качестве датчиков глубины погружения робота, используются датчики давления, расположенные в полюсах эллипсоида. Использование информации с данных датчиков в качестве обратной связи позволит регулировать плавучесть на заданной глубине погружения.

Система управления основана на микроконтроллере LPC1768. Плата управления с электронными компонентами, разработанная для робота представлена на рисунке 3.5

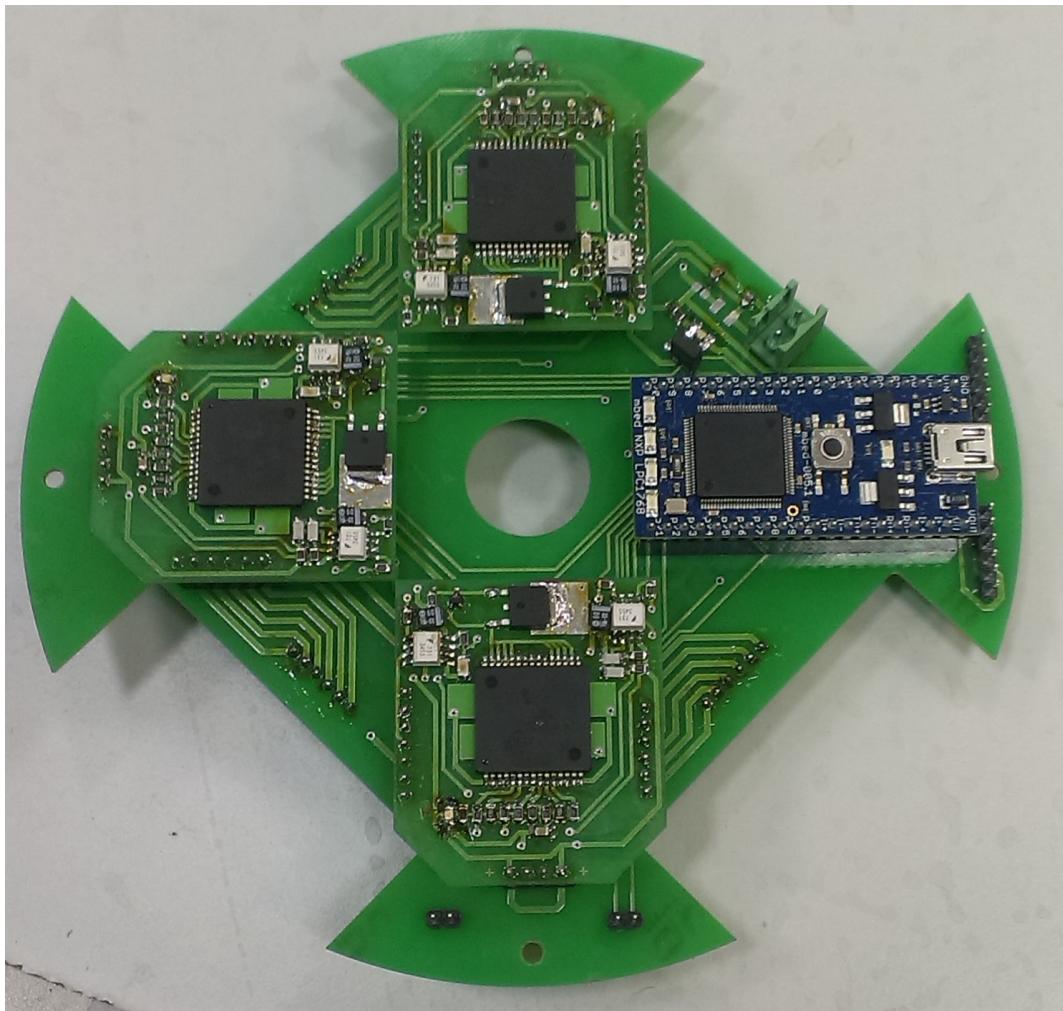


Рисунок 3.5 – Плата управления беспилотового подводного робота

Управление осуществляется с персонального компьютера (ПК), для которого было разработано специальное программное обеспечение. Для управления роботом необходимо задать направления и скорости вращения каждого из роторов, а также время разгона до заданной скорости. Отдельно осуществляется управление модулями плавучести, которые отвечают за погружение робота.

Глава 4. Результаты экспериментальных исследований безвинтового подводного робота с внутренними роторами

4.1 Методика проведения экспериментальных исследований

Эксперименты проводились в бассейне размерами 3 x 1.5 x 1.5 метра, заполненным водой. При движении робота траектория отслеживалась с помощью системы захвата движения фирмы Vicon, которая состоит из 4 камер, расположенных по периметру области съемки. Камеры предназначены для работы под водой.

Для работы с системой камер используется программное обеспечение Vicon Motus. Перед каждым экспериментом система калибруется, используя специальный калибровочный объект. Далее на отслеживаемый объект устанавливаются активные маркеры таким образом, чтобы в каждый момент времени каждый маркер был в кадре минимум двух камер. После записи и обработки видео получаем траекторию движения объекта и проекции единичных векторов, связанных с осями подвижной системы координат, расположенной на объекте на глобальную неподвижную систему координат. Данные проекции образуют матрицу поворота объекта, которая связывает неподвижную и подвижную системы координат.

4.2 Проведение экспериментальных исследований

Цель экспериментов – определение характера движения безвинтового подводного робота при различных управляющих воздействиях. В качестве управляющих воздействий выступают гиростатические моменты роторов K1, K2, K3, возникающие при их вращении. Рассмотрены три серии экспериментов:

вращение только пары больших роторов, вращение только одной пары меньших роторов и одновременное вращение пары больших и одной пары меньших роторов. В каждом эксперименте роторы разгонялись до максимальной скорости 590 об/мин.

Так как роторы 2 и 3 имеют одинаковые массо-геометрические характеристики и лежат в одной плоскости, их совместное вращение приведет к качественно аналогичному, результату, что и в случае их вращения по отдельности.

1. Вращение пары больших роторов. В качестве управляющего воздействия выступала угловая скорость пары больших роторов, ось вращения которых совпадает с большей полуосью эллипсоида. Роторы разгонялись до максимальной скорости 590 об/мин, которая поддерживалась постоянной в течение 3 секунд. Вектор внутреннего гиростатического момента, сообщенный телу после разгона роторов, $K = (2i_1\omega_{max}, 0, 0)$. Положение робота в начальный момент времени и момент времени $t = 3$ секунды после начала движения, для отдельного эксперимента представлено на рисунке 4.1.

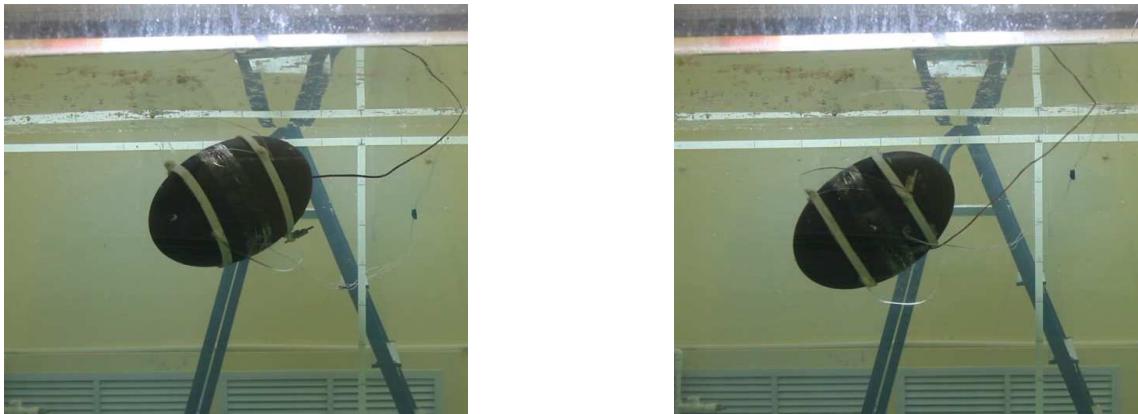


Рисунок 4.1 — Положение робота а) в начальный момент времени и б) момент времени $t=3$ секунды от начала движения при $K = (2i_1\omega_{max}, 0, 0)$

Для данных управляющих воздействий проведена серия из трех экспериментов. Среднее изменение координат геометрического центра робота и изменение углов, определяющих положение, для трех экспериментов составили:

$$\Delta x_{exp} = 0.115 \text{ м}, \Delta y_{exp} = 0.010 \text{ м}, \Delta z_{exp} = 0.055 \text{ м};$$

$$\Delta\theta_{exp} = 4^\circ, \Delta\psi_{exp} = 10^\circ, \Delta\varphi_{exp} = 120^\circ.$$

Здесь и далее $x_{exp}, y_{exp}, z_{exp}$ — координаты геометрического центра бэзинтового подводного робота, θ_{exp} — угол дифферента — угол между осью вращения эллипсоида и горизонтальной плоскостью; ψ_{exp} — угол курса — угол между осью вращения эллипсоида и вертикальной плоскостью (этот угол сходен с углом курса судна, но отсчитывается в соответствии с выбранной системой координат); φ_{exp} — угол вращения — угол, определяющий поворот робота вокруг оси вращения эллипсоида.

2. Вращение одной пары малых роторов. В качестве управляющего воздействия выступала угловая скорость одной пары малых роторов. Роторы разгонялись до максимальной скорости 590 об/мин, которая поддерживалась постоянной в течение 3 секунд. Вектор гиростатического момента, сообщенный телу после разгона роторов, $K = (0, 2i_2\omega_{max}, 0)$. Положение робота в начальный момент времени и момент времени $t = 3$ секунды после начала движения, для отдельного эксперимента представлено на рисунке 4.2.



a)

б)

Рисунок 4.2 — Положение робота а) в начальный момент времени и б) момент времени $t=3$ секунды от начала движения при $K = (0, 2i_2\omega_{max}, 0)$

Для данных управляющих воздействий проведена серия из трех экспериментов. Среднее изменение координат геометрического центра робота и изменение углов, определяющих положение, для данной серии экспериментов составили:

$$\Delta x_{exp} = 0.054 \text{ м}, \Delta y_{exp} = 0.008 \text{ м}, \Delta z_{exp} = 0.068 \text{ м},$$

$$\Delta\theta_{exp} = 61^\circ, \Delta\Psi_{exp} = 62^\circ, \Delta\varphi_{exp} = 10^\circ.$$

3. Вращение пары больших роторов и одной пары малых роторов. В качестве управляющего воздействия выступала угловая скорость одной пары малых и пары больших роторов. Роторы разгонялись до максимальной скорости 590 об/мин, которая поддерживалась постоянной в течение 3 секунд. Вектор гиростатического момента, сообщенный телу после разгона роторов, $K = (2i_1\omega_{max}, 2i_2\omega_{max}, 0)$. Положение робота в начальный момент времени и момент времени $t = 3$ секунды после начала движения, для отдельного эксперимента представлено на рисунке 4.3.



a)



б)

Рисунок 4.3 – Положение робота а) в начальный момент времени и б) момент времени $t=3$ секунды от начала движения при $K = (2i_1\omega_{max}, 2i_2\omega_{max}, 0)$

Для данных управляющих воздействий проведена серия из трех экспериментов. Среднее изменение координат геометрического центра робота и изменение углов, определяющих положение, для данной серии экспериментов составили:

$$\begin{aligned}\Delta x_{exp} &= 0.106 \text{ м}, \Delta y_{exp} = 0.050 \text{ м}, \Delta z_{exp} = 0.053 \text{ м}, \\ \Delta\theta_{exp} &= 17^\circ, \Delta\Psi_{exp} = 90^\circ, \Delta\varphi_{exp} = 51^\circ.\end{aligned}$$

Проведенные эксперименты подтвердили возможность реализации движения в жидкости за счет изменения внутреннего гиростатического момента.

4.3 Оценка экспериментальных данных

1. Вращение пары больших роторов. Траектория движения, полученная в результате численного моделирования при управляющих воздействиях, заданных в виде $\mathbf{K} = (2i_1\omega_{max}, 0, 0)$, и экспериментальная траектория движения приведены на рисунке 4.4. После движения с заданными управляющими воздействиями в течение 3 секунд линейная и угловая скорость составили $\mathbf{V}_t = (0.0916, 0, 0)$ м/с, $\Omega_t = (41.0125, 0, 0)$ об/мин. А изменение его ориентации определяется углами: $\Delta\theta_t = 0^\circ$, $\Delta\psi_t = 0^\circ$, $\Delta\varphi_t = 738.2^\circ$. При данном управляющем воздействии по результатам численного моделирования, робот проходит расстояние $|\mathbf{r}_t| = 0.275$ м, а среднее значение перемещения по экспериментальным данным $|\mathbf{r}_{exp}| = 0.128$ м.

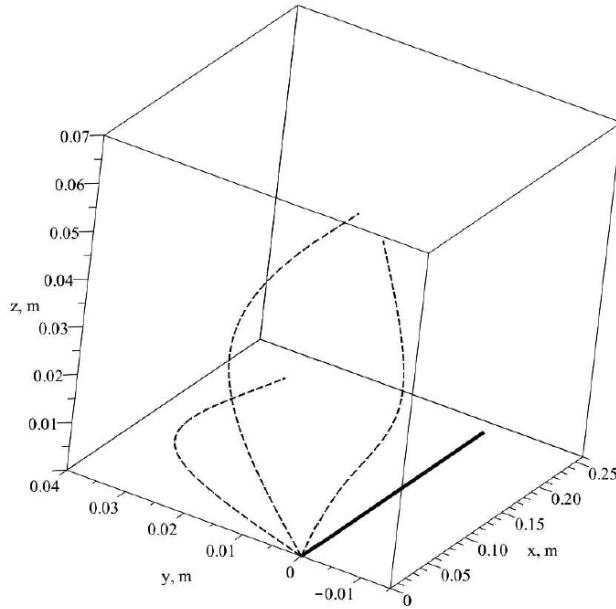


Рисунок 4.4 — Теоретическая (сплошная линия) и экспериментальные (штриховые линии) траектории движения безвинтового подводного робота при $\mathbf{K} = (2i_1\omega_{max}, 0, 0)$

2. Вращение одной пары малых роторов. Траектория движения, полученная в результате численного моделирования при управляющих воздействиях,

заданных в виде $\mathbf{K} = (0, 2i_2\omega_{max}, 0)$, и экспериментальная траектория движения, приведены на рисунке 4.5. После движения с заданными управляющими воздействиями в течение 3 секунд линейная и угловая скорость составили $\mathbf{V}_t = (0, 0.0018, 0)$ м/с, $\Omega_t = (0, 1.9436, 0)$ об/мин. А изменение его ориентации определяется углами: $\Delta\theta_t = 35^\circ$, $\Delta\psi_t = 0^\circ$, $\Delta\varphi_t = 0^\circ$. При данном управляющем воздействии по результатам численного моделирования, робот проходит расстояние $|\mathbf{r}_t| = 0.005$ м, а среднее значение перемещения по экспериментальным данным $|\mathbf{r}_{exp}| = 0.087$ м.

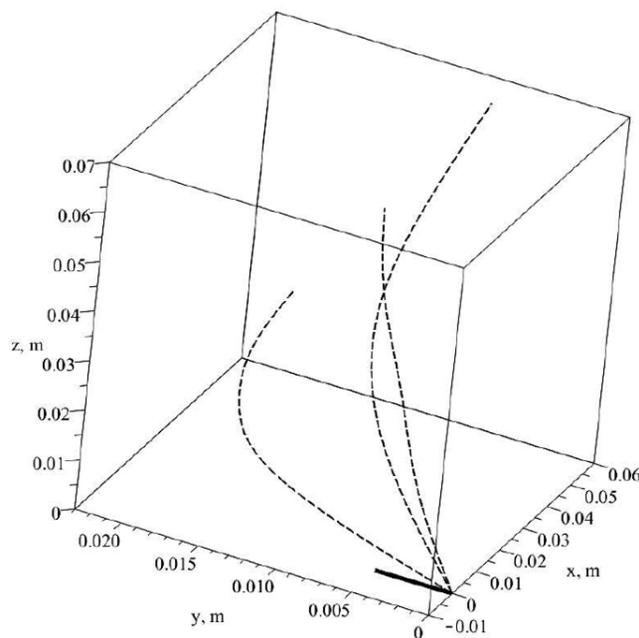


Рисунок 4.5 – Теоретическая (сплошная линия) и экспериментальные (штриховые линии) траектории движения безвинтового подводного робота при $\mathbf{K} = (0, 2i_2\omega_{max}, 0)$

3. Вращение пары больших роторов и одной пары малых роторов.

Траектория движения, полученная в результате численного моделирования при управляющих воздействиях, заданных в виде $\mathbf{K} = (2i_1\omega_{max}, 2i_2\omega_{max}, 0)$, и экспериментальная траектория движения, приведены на рисунке 4.6. После движения с заданными управляющими воздействиями в течение 3 секунд линейная и угловая скорость составили $\mathbf{V}_t = (0.0916, 0.0018, 0)$ м/с, $\Omega_t = (41.0125, 1.9436, 0)$ об/мин. А изменение его ориентации определяется углами:

$\Delta\theta_t = 35^\circ$, $\Delta\psi_t = 0^\circ$, $\Delta\varphi_t = 738.2^\circ$. При данном управляющем воздействии по результатам численного моделирования, робот проходит расстояние $|r_t| = 0.275$ м, а среднее значение перемещения по экспериментальным данным $|r_{exp}| = 0.129$ м.

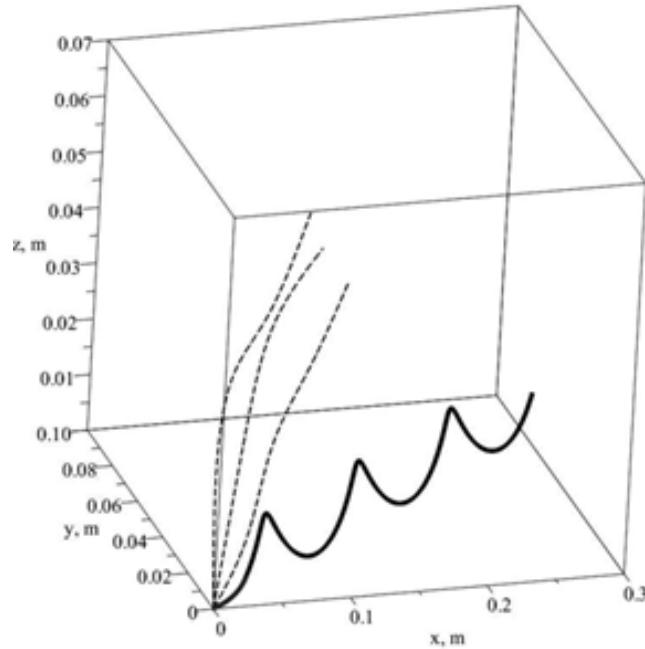


Рисунок 4.6 – Теоретическая (сплошная линия) и экспериментальные (штриховые линии) траектории движения безвинтового подводного робота

$$\mathbf{K} = (2i_1\omega_{max}, 2i_2\omega_{max}, 0)$$

Отметим, что при первых двух вариантах управляющих воздействий в рамках теоретической модели робот движется прямолинейно не изменяя своей ориентации. При проведении экспериментов такого движения добиться не удается. Так же перемещение безвинтового подводного робота на практике в два раза меньше, чем в теории. Более того в эксперименте при управляющем воздействии $\mathbf{K} = (0, 2i_2\omega_{max}, 0)$ движение робота происходит вдоль оси симметрии винтового тела (вдоль большей оси эллипсоида), а в теории робот движется перпендикулярно ей.

4.4 Выводы по экспериментам

Анализируя отклонения и характер движения безвинтового подводного робота в экспериментах, можно сделать следующие выводы:

1. Управляемое движение безвинтового подводного робота на практике продолжается до тех пор, пока обеспечивается ускоренное вращение роторов. Чем больше ускорение роторов, тем быстрее движется робот. Однако, технически, максимальная угловая скорость вращения роторов ограничена, и после ее достижения робот продолжает движение по инерции.
2. Разгон маховиков до максимальной скорости занимает определенное время (разгон большего маховика — $t = 0.9$ секунды, разгон малого маховика — $t = 0.7$ секунды), что не учитывается в теоретической модели и вносит свой вклад в траекторию движения безвинтового подводного робота.
3. Движение безвинтового подводного робота сопровождается образованием вихревых структур, что подтверждается данными, полученными с использованием системы визуализации потоков (PIV — Particle Image Velocimetry). На рисунке 4.7 изображены линии вихрей в вертикальной плоскости при движении эллипсоида в жидкости. Обеспечить безвихревое движение, как этого требует теория (см. [13, 14]) с помощью роторов крайне затруднительно. Необходимо использовать модифицированные уравнения движения, учитывающие циркуляцию вокруг тела [8].
4. В теоретической модели используется идеализированная модель вязкости, что так же вносит несоответствия теоретической и реальной траектории движения.

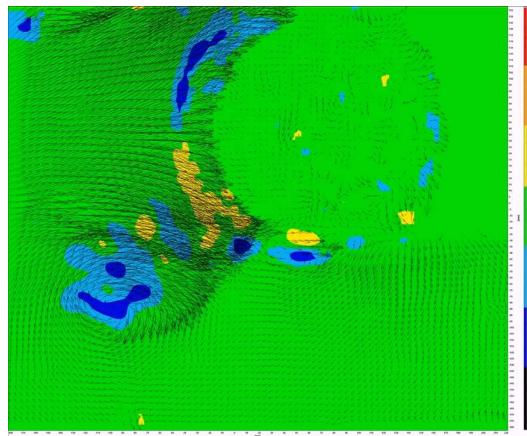


Рисунок 4.7 – Линии вихрей при движении эллипса в жидкости

5. Подобную схему и алгоритмы управления в качестве практического применения можно использовать для реализации различных маневров (например, разворот на месте) в управлении подводными роботами.
6. Модель качественно описывает движение, но на количественное согласование влияет точность определения большого количества параметров. Движение возможно, однако, его эффективность не высока.

Учитывая полученные результаты, принято решение разработать вторую модель водного робота с внутренним ротором используя следующие тезисы:

1. Использовать модель движения, учитывающую вязкое сопротивление жидкости, так как коэффициенты вязкого сопротивления существенно влияют на траекторию движения. Используя такую модель, для упрощения расчетом рассмотрим плоско-параллельное движение на поверхности жидкости.
2. Использовать ассиметричную форму оболочки робота. При движении с образованием вихревых структур необходимо выбрать такую форму оболочки робота для которой образование вихрей не будет препятствовать движению. Такой формой может быть оболочка с острой кромкой, например, в виде профиля крыла Жуковского.
3. Использовать периодическое управление. Движение робота происходит при ускоренном вращении роторов, а чтобы обеспечивать такое вращение необходимо периодически изменять направление вращения ротора.

Глава 5. Конструкция недеформируемого водного робота с острой кромкой

5.1 Описание конструкции недеформируемого водного робота с острой кромкой

Робот представляет собой полый объект, в продольном сечении имеющий форму профиля крыла NACA 0040 (см. рисунок 5.1) длиной 340 мм, шириной 134 мм. Высота робота 80 мм. Форма профиля крыла NACA 0040 задается функцией $y = \frac{T}{0.2}(a_0\sqrt{x} + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4)$, где $a_0 = 0.2969$, $a_1 = -0.126$, $a_2 = -0.3516$, $a_3 = 0.2843$, $a_4 = -0.1036$, $T = 0.4$. Точки контура профиля были рассчитаны в среде Matlab и импортированы в среду разработки Компас-3Д.

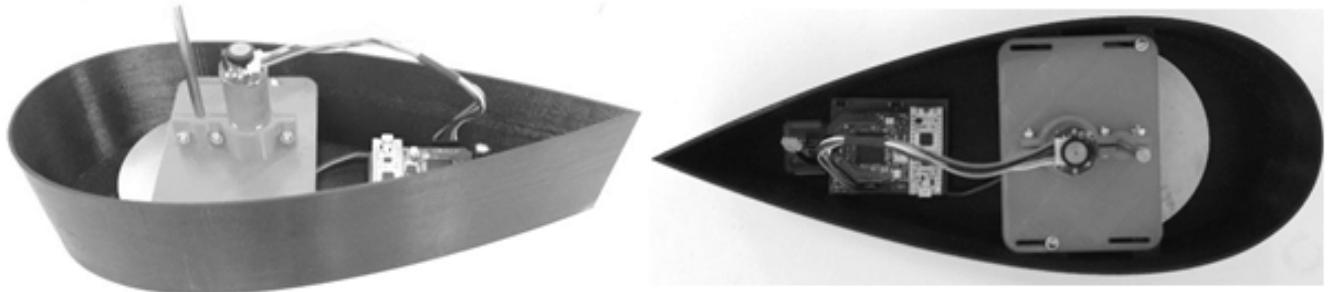


Рисунок 5.1 — Недеформируемый водный робот с острой кромкой

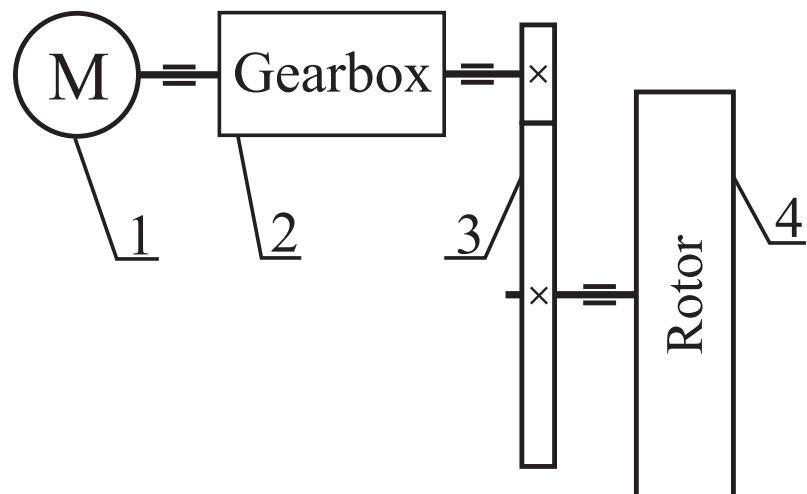


Рисунок 5.2 — Кинематическая схема передачи вращения от двигателя к ротору

Корпус изготовлен на 3Д-принтере из PLA-пластика, толщина стенки – 2 мм. Внутри корпуса закреплен ротор 4 с двигателем 1 таким образом, что центр масс всей системы находится максимально близко к нижней грани робота. В качестве двигателя использовался мотор-редуктор фирмы Pololu с энкодером. Передаточное отношение редуктора 2 составляет 47:1. Для передачи вращения с двигателя к ротору использовалась пара шестерен 3 с передаточным отношением 3.5:1. Кинематическая схема передачи вращения от двигателя к ротору представлена на рисунке 5.2.

Внутри так же располагается элемент питания и плата с микроконтроллером модели STM32F303K8T6, управляющим вращением двигателем постоянного тока. Микроконтроллер расположен на отладочной плате Nucleo-32 от фирмы STMicroelectronics. Данная плата имеет 30 выводов; содержит программатор ST-Link, с помощью которого можно программировать микроконтроллер подключив плату к персональному компьютеру по USB-кабелю; имеет кнопку сброса микроконтроллера и 3 светодиода: один пользовательский светодиод, светодиод, отображающий подачу питания на плату и светодиод сигнализирующий о передаче данных по USB-интерфейсу; может питаться как от USB-кабеля, так и от внешнего напряжения 7–15 Вольт. Данная плата поддерживает среду разработки ARM mbed, которая позволяет разрабатывать программное обеспечение для микроконтроллера используя онлайн среду программирования. Внешний вид отладочной платы Nucleo-32 представлен на рисунке 5.3. Характеристики микроконтроллера STM32F303K8T6 представлены в таблице 1.

Для управления двигателем используется драйвер двигателя постоянного тока VNH3SP30 фирмы STMicroelectronics. Данный драйвер обеспечивает выходной ток до 30 Ампер при напряжении от 5.5 до 36 Вольт. Драйвер содержит полномостовую схему силовых MOSFET-транзисторов, работающих в ключевом режиме, что позволяет управлять скоростью вращения и направлением вращения двигателя постоянного тока.

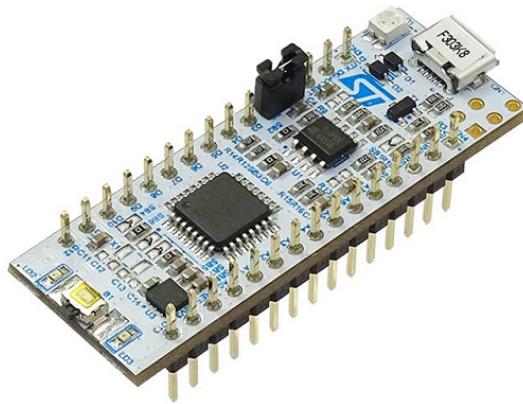


Рисунок 5.3 – Отладочная плата Nucleo-32 с микроконтроллером STM32F303K8T6

Таблица 1 – Характеристики микроконтроллера STM32F303K8T6

Производитель	STMicroelectronics (ST)
Корпус	LQFP
Тмакс	85 ° C
Тмин	-40 ° C
Оперативная память	16 КБайт
Тактовая частота	72 МГц
Flash память	64 КБайт
Архитектура ядра	Cortex-M4
Кол-во выводов	32
Разрядность	32 бита
Количество входов / выходов	25
Интерфейсы	CAN, I2C, SPI, USART
Разрешение АЦП	12 бит
Диапазон напряжений питания	2...3.6 Вольт

В качестве двигателя использовался мотор-редуктор фирмы Pololu с энкодером модели 25D Medium Power (см. рисунок 5.4). Характеристики двигателя: номинальное напряжение питания – 12 В, передаточное отношение редуктора – 47:1, момент на валу – 0.6 Нм, максимальная скорость вращения – 160 об/мин, ток холостого хода – 200 мА, пусковой ток – 2.1 А.

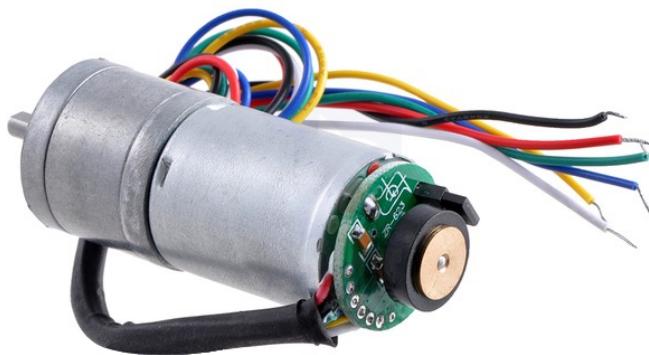


Рисунок 5.4 – Мотор-редуктор фирмы Pololu с энкодером модели 25D Medium Power

Энкодер, расположенный на валу двигателя, использовался для определения положения ротора в течение экспериментов. Данный энкодер имеет специальный магнитный диск и датчики Холла, с помощью которых формируются сигнальные импульсы. Энкодер имеет два канала со смещением сигнала в четверть периода друг относительно друга, что позволяет определять направление вращения вала двигателя. Каждый канал формирует 12 импульсов на один оборот вала двигателя. Таким образом, используя два канала, считая переходы сигнала от низкого уровня к высокому и от высокого к низкому, можно получить 48 импульсов на один оборот вала двигателя. На микроконтроллере данные с энкодера обрабатываются таймером TIM1, который имеет специальный режим работы с энкодером (Encoder Mode), что позволяет аппаратно считывать количество импульсов с двух каналов, учитывая направление вращения.

Дифференцируя данные, полученные с энкодера, можно получить угловую скорость вращения ротора.

Реальная модель робота имеет следующие характеристики: $m = 0.905 \text{ кг}$; $I_0 = 0.00844 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; Ротор изготовлен из алюминия, имеет внешний диаметр 110 мм, высоту 12 мм. Масса ротора $m_r = 0.327 \text{ кг}$; момент инерции ротора $I_r = 0.00058 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Конструкция робота позволяет смещать центр вращения ротора.

Управление осуществляется с персонального компьютера, для которого было разработано специальное программное обеспечение. Все команды роботу передаются по беспроводному каналу связи, используя Bluetooth.

5.2 Описание системы управления недеформируемого водного робота с острой кромкой

Для управления недеформируемым водным роботом с острой кромкой была разработана система управления, структурная схема которой представлена на рисунке 5.5.

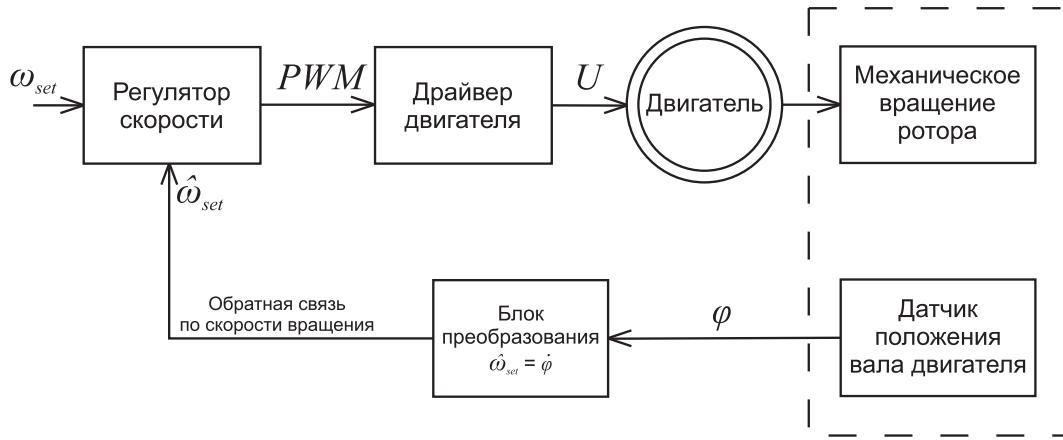


Рисунок 5.5 – Структурная схема системы управления недеформируемого водного робота с острой кромкой

На схеме ω_{set} – заданная скорость вращения ротора. Блок регулятора скорости представляет собой ПИД-регулятор, который обеспечивает поддержание значения заданной скорости ω_{set} . На выходе данного блока получаем ШИМ-сигнал необходимой скважности. Коэффициенты ПИД-регулятора подобраны экспериментально. Далее ШИМ-сигнал подается на драйвер двигателя постоянного тока, который его усиливает до необходимого напряжения и подает на обмотки двигателя. В данной работе используется драйвер двигателя постоянного тока VNH3SP30 фирмы STMicroelectronics. На валу двигателя располагается датчик положения вала (инкрементальный энкодер с 48 импульсами на оборот), с помощью которого измеряется угол поворота вала двигателя φ . Далее с помощью блока расчета угловой скорости ротора, учитывая передаточные отношения редуктора и пары шестеренок на валу двигателя и роторе, получаем значение $\hat{\omega}_{set}$ – фактическую скорость вращения ротора. Полученное значение

$\hat{\omega}_{set}$ учитывается блоком регулятора скорости при расчете управляющих сигналов, идущих на двигатель. При вращении ротора данный алгоритм должен выполняться через промежутки времени $\Delta t \rightarrow 0$. Выбранный микроконтроллер имеет максимальную частоту работы 72 МГц, что позволяет выбрать $\Delta t = 1$ мс. Значение Δt выбрано экспериментально.

Для реализации управляемого движения недеформируемого водного робота с острой кромкой было разработано программное обеспечение нижнего и верхнего уровня.

В программе нижнего уровня реализованы функции управления двигателем, на котором закреплен ротор: движение по прямой и движение по некоторому радиусу. Программа принимает и обрабатывает команды с верхнего уровня (персональный компьютер, планшет, смартфон) по беспроводному каналу связи Bluetooth. Bluetooth-модуль расположен на плате системы управления и соединен с интерфейсом USART микроконтроллера. Командами задаются значения угловой скорости ротора, время вращения ротора на заданной скорости и время перехода от одной скорости вращения к другой. Реализованы команды начала вращения ротора по установленным параметрам и его остановки.

На двигателе установлен датчик углового перемещения вала – энкодер. Программа считывает с него данные, рассчитывает текущее положение ротора, учитывая передаточное отношение редуктора и сохраняет эти данные в памяти микроконтроллера. По запросу эти данные отправляются на программное обеспечение верхнего уровня. Так же с помощью численного дифференцирования можно получить фактическую угловую скорость и угловое ускорение ротора. Значение фактической угловой скорости используется в программе для поддержания заданной скорости вращения ротора.

Программа нижнего уровня предназначена для отладочной платы Nucleo-32, на борту которой расположен микроконтроллер STM32F303K8T6. Это 32-разрядный микроконтроллер с ядром ARM Cortex-M4, работающий на частоте до 72 МГц.

Программа верхнего уровня разработана для смартфона на операционной системе Android версии не ниже 9 с помощью онлайн-сервиса MIT App Inventor. В данном сервисе используется визуальный язык программирования, который позволяет разработать приложение, используя графический интерфейс. Интерфейс программы представлен на рисунке 5.6.

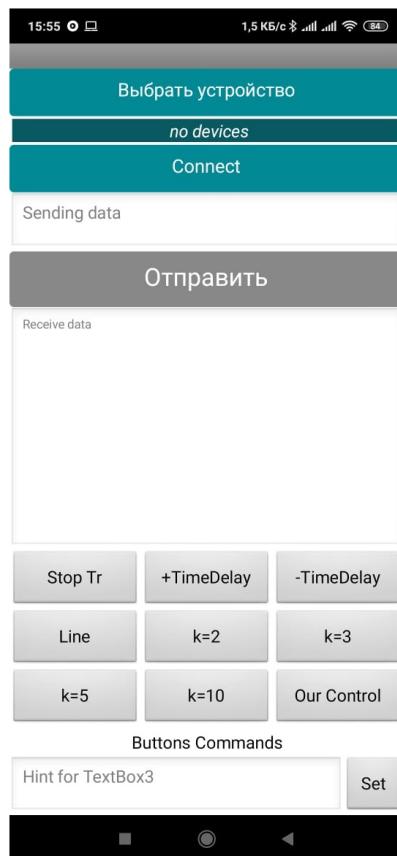


Рисунок 5.6 – Интерфейс программы управления беспроводным недеформируемым рыбоподобным надводным роботом

Данная программа позволяет подключиться к bluetooth-устройству, установленному на роботе, передавать и принимать необходимые команды. Используя поле "Sending data" можно отправить необходимую последовательность байтов роботу. В поле "Receive data" отображаются данные, принятые от робота. Программа позволяет управлять роботом, используя разные режимы движения: запуск и остановка вращения ротора для движения по прямой и по окружности, изменение периода управляющих импульсов.

Глава 6. Описание математической модели движения недеформируемого водного робота с острой кромкой

6.1 Уравнения движения

6.1.1 Подходы к построению математической модели

В представленном исследовании мы изучаем управляемую динамику надводного робота. Данный робот состоит из корпуса в форме крылового профиля NACA0040, управляющей электроники и ротора, за счет крутильных колебаний которого робот приводится в движение.

Траекторное управление движением данного робота оказывается крайне нетривиальной задачей. Так для полного математического описания динамики требуется совместное численное решение уравнений динамики твердого тела и уравнений Навье-Стокса. Это, в частности, не позволяет вычислять управляющие воздействия в реальном времени. Кроме того, в рамках математической модели крайне затруднительно учесть влияние границ, как свободных, так неподвижных, и т.п.

В связи с этим в данной работе мы рассмотрим *упрощенную конечномерную модель, качественно описывающую управляемое плоскопараллельное движение рассматриваемого робота в неограниченном объеме жидкости*. В данной модели не учитывается ряд факторов, возникающих при движении робота: ошибки в измерении скорости движение робота, его положения и ориентации, образование волн, влияние границ бассейна, наличие фоновых течений, качка и т. п.

На основе предложенной математической модели мы строим управления (*гейты*¹), позволяющие осуществлять простейшие маневры, комбинируя которые можно реализовать сложное движение робота вблизи заданной траектории. Отметим, что в силу ряда допущений математической модели гейты, полученные на ее основе, могут обеспечивать лишь качественное согласование с экспериментом. Их уточнение является задачей дальнейших экспериментальных исследований.

В данной работе для описания движения мы воспользуемся уравнениями Ньютона-Эйлера при дополнительном предположении, что силы и момент сил, действующие на тело, зависят только от его скоростей и ускорений. Так в подвижных осях, жестко связанных с телом, уравнения движения имеют вид:

$$\begin{aligned} m\dot{v}_1 &= mv_2\omega + f_1(v_1, v_2, \omega, \dot{v}_1, \dot{v}_2, \dot{\omega}), & m\dot{v}_2 &= -mv_1\omega + f_2(v_1, v_2, \omega, \dot{v}_1, \dot{v}_2, \dot{\omega}), \\ I\dot{\omega} &= g(v_1, v_2, \omega, \dot{v}_1, \dot{v}_2, \dot{\omega}), \end{aligned} \tag{6.1}$$

где m , I — масса и момент инерции робота соответственно, f_1 , f_2 — проекции силы реакции жидкости на подвижные оси, связанные с телом, g — момент силы реакции жидкости.

Если жидкость идеальная и циркуляция вокруг тела отсутствует, то гидродинамическое сопротивление описывается только эффектом присоединенных масс, а уравнения (6.1) принимают вид уравнений Кирхгофа для плоско-параллельного движения [Kirchhoff_1869]. При наличии циркуляции вокруг тела дополнительно возникают гироскопические силы (в частности подъемная сила), и получаются уравнения Чаплыгина [Borisov_Mamaev_2006, Chaplygin]. Воспользуемся в данном случае этими соображениями для построения зависимостей для сил f_1 , f_2 и момента g , и дополним их квадратичными слагаемыми, описывающими вязкое сопротивление среды.

В данной работе мы считаем, что вязкое сопротивление зависит от скорости квадратично, а коэффициент сопротивления постоянный. Наш выбор

¹Под *гейтом* мы понимаем закон вращения ротора, обеспечивающий некоторый простой маневр, например, направленное движение или разворот.

обусловлен тем, что движение робота совершается при числах Рейнольдса $Re \sim 1000$, и в аналогичной ситуации сопротивление кругового цилиндра зависит от скорости также квадратично с почти постоянным коэффициентом сопротивления [**Schlichting**].

Построенные таким образом выражения для сил f_1 , f_2 и момента g будут содержать коэффициенты присоединенных масс, присоединенного момента инерции и коэффициенты вязкого сопротивления. Для их определения мы воспользуемся моделированием движения робота на основе совместного численного решения уравнений движения тела и уравнений Навье-Стокса как по некоторым модельным траекториям, так и по траекториям, полученным экспериментально.

6.1.2 Общий вид уравнений движения

Для описания движения робота введем две системы координат: неподвижную Oxy и подвижную Cx_1x_2 жестко связанную с телом (см. рис. 6.1). Будем считать, что ось Cx_1 подвижной системы координат совпадает с осью симметрии профиля, а точка C совпадает с центром масс системы «профиль + ротор». Положение подвижной системы координат относительно неподвижной будем задавать с помощью радиус-вектора $\mathbf{r} = (x, y)$ точки C , а ее ориентацию углом φ между положительными направлениями осей Ox и Cx_1 , отсчитываемым от оси Ox .

Справедливы следующие кинематические соотношения:

$$\dot{x} = v_1 \cos \varphi - v_2 \sin \varphi, \quad \dot{y} = v_1 \sin \varphi + v_2 \cos \varphi, \quad \dot{\alpha} = \omega, \quad (6.2)$$

где v_1 , v_2 — проекции вектора поступательной скорости точки C на подвижные оси, ω — угловая скорость тела.

Движение твердого тела в идеальной жидкости при нулевой циркуляции описывается уравнениями Кирхгофа [**Kirchhoff_1869**]. Поскольку эти

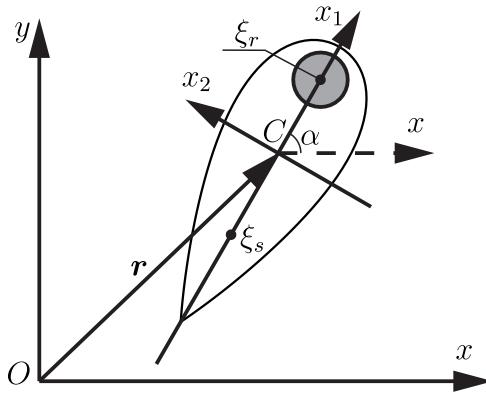


Рисунок 6.1 — Oxy — неподвижная система координат, Cx_1x_2 — подвижная система координат

уравнения учитывают только эффект присоединенных масс и моментов инерции², их необходимо дополнить слагаемыми, описывающими вязкое трение [Borisov_et_al_2016]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial v_1} &= \omega \frac{\partial T}{\partial v_2} - c_1 v_1 |v_1|, & \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial v_2} &= -\omega \frac{\partial T}{\partial v_1} - c_2 v_2 |v_2|, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \omega} &= v_2 \frac{\partial T}{\partial v_1} - v_1 \frac{\partial T}{\partial v_2} - c_3 \omega |\omega|, \end{aligned} \quad (6.3)$$

где T — кинетическая энергия системы (корпус + ротор + жидкость), c_1 , c_2 , c_3 — коэффициенты сопротивления.

Кинетическая энергия системы с точностью до некоторой функции времени имеет вид

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2}(m + \lambda_{11})v_1^2 + \frac{1}{2}(m + \lambda_{22})v_2^2 + \frac{1}{2}(I + \lambda_{33})\omega^2 + \lambda_{23}v_2\omega + \omega k(t), \\ m &= m_s + m_r, \quad I = I_s + m_s\xi_s^2 + I_r + m_r\xi_r^2, \quad k(t) = I_r\Omega(t), \end{aligned} \quad (6.4)$$

где m_s , I_s — масса и центральный момент инерции корпуса робота, m_r , I_r — масса и центральный момент инерции ротора, ξ_s — положение центра масс корпуса робота, ξ_r — положение центра масс ротора, $\Omega(t)$ — угловая скорость ротора, λ_{11} , λ_{22} — присоединенные массы, λ_{33} — присоединенный момент инерции, λ_{23} — коэффициент, возникающий вследствие смещения центра давления относительно центра масс.

²Присоединенные массы и моменты инерции — описывают реакцию среды на ускоренное движение тела и обусловлены распределением давления по поверхности тела.

Отметим, что в выражении (6.4) отсутствует слагаемое с $v_1\omega$, так как профиль является зеркально симметричным относительно оси Cx_1 . Кроме того, в силу выбора начала подвижной системы координат выполняется соотношение

$$m_s\xi_s + m_r\xi_r = 0.$$

Полная система уравнений рассматриваемой системы может быть записана в следующей форме:

$$\begin{aligned} (m + \lambda_{11})\dot{v}_1 &= (m + \lambda_{22})v_2\omega + \lambda_{23}\omega^2 - c_1v_1|v_1|, \\ (m + \lambda_{22})\dot{v}_2 + \lambda_{23}\dot{\omega} &= -(m + \lambda_{11})v_1\omega - c_2v_2|v_2|, \\ \lambda_{23}\dot{v}_2 + (I + \lambda_{33})\dot{\omega} &= (\lambda_{11} - \lambda_{22})v_1v_2 - \lambda_{23}v_1\omega - c_3\omega|\omega| - \dot{k}(t), \end{aligned} \quad (6.5a)$$

$$\dot{x} = v_1 \cos \varphi - v_2 \sin \varphi, \quad \dot{y} = v_1 \sin \varphi + v_2 \cos \varphi, \quad \dot{\varphi} = \omega. \quad (6.5b)$$

Сравнивая уравнения (6.5a) с уравнениями Ньютона-Эйлера (6.1), запишем выражения для сил f_1 , f_2 и момента g :

$$\begin{aligned} f_1 &= -\lambda_{11}\dot{v}_1 + \lambda_{22}v_2\omega + \lambda_{23}\omega^2 - c_1v_1|v_1|, \\ f_2 &= -\lambda_{22}\dot{v}_2 - \lambda_{23}\dot{\omega} - \lambda_{11}v_1\omega - c_2v_2|v_2|, \\ g &= -\lambda_{23}\dot{v}_2 - \lambda_{33}\dot{\omega} + (\lambda_{11} - \lambda_{22})v_1v_2 - \lambda_{23}v_1\omega - c_3\omega|\omega| - \dot{k}(t), \end{aligned} \quad (6.6)$$

где коэффициенты λ_{ij} и c_i подлежат определению, а $\dot{k}(t)$ – определяется управляющим воздействием на ротор.

Для определения коэффициентов, входящих в эти выражения, мы воспользуемся подходом, основанным на (численном) решении уравнений Навье-Стокса.

6.1.3 Определение сил и моментов сопротивления с использованием уравнений Навье-Стокса

Движение жидкости, окружающей профиль, будем моделировать на основе уравнений Навье-Стокса. Поскольку область, занятая жидкостью, имеет

криволинейные границы, для численного решения уравнений динамики жидкости будем использовать криволинейную ортогональную сетку (см. рис. 6.2). Уравнения Навье-Стокса, записанные относительно криволинейной системы ко-

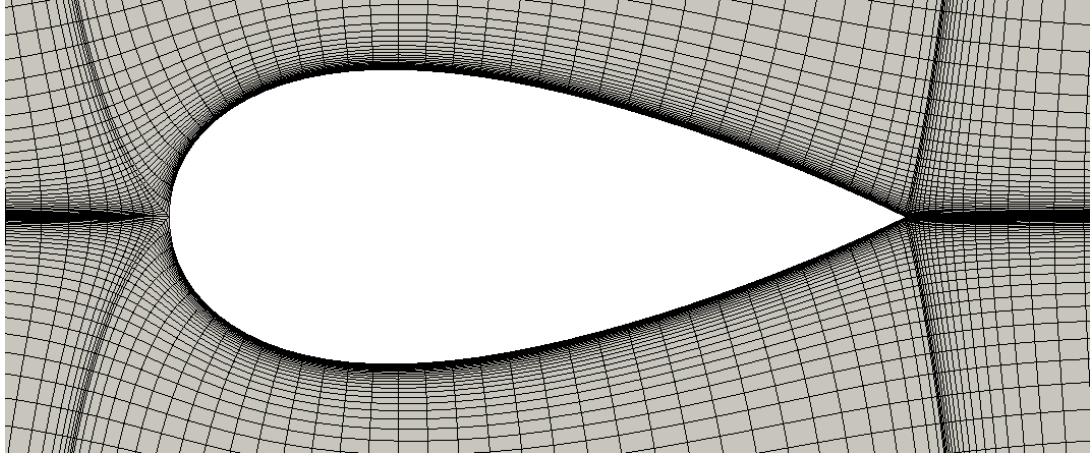


Рисунок 6.2 – Вид расчетной сетки, построенной комплексным методом граничных элементов [Hromadka_Lai_2012]

ординат \$(\xi, \eta)\$, связанной с движущимся профилем имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Du_1}{\partial \xi} + \frac{\partial Du_2}{\partial \eta} &= 0, \\ \frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{1}{D^2} \left(\frac{\partial D(u_1 - w_1)u_1}{\partial \xi} + \frac{\partial D(u_2 - w_2)u_1}{\partial \eta} \right) &= \\ = -\frac{1}{D\rho} \frac{\partial p}{\partial \xi} + \frac{\nu}{D^2} \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \eta^2} \right) + \beta_1 + 2u_2\omega & \quad (6.7) \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} + \frac{1}{D^2} \left(\frac{\partial D(u_1 - w_1)u_2}{\partial \xi} + \frac{\partial D(u_2 - w_2)u_2}{\partial \eta} \right) &= \\ = -\frac{1}{D\rho} \frac{\partial p}{\partial \eta} + \frac{1}{D^2} \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \eta^2} \right) + \beta_2 - 2u_1\omega, & \end{aligned}$$

где \$u_1, u_2\$ — проекции вектора скорости жидкости на криволинейные оси, \$p\$ — давление, \$\rho\$ — плотность жидкости, \$\nu\$ — кинематическая вязкость, \$w_1 = v_1 - \omega x_2(\xi, \eta)\$, \$w_2 = v_2 + \omega x_1(\xi, \eta)\$ — компоненты переносной скорости. Коэффициент Ламэ \$D\$ и члены \$\beta_1, \beta_2\$, возникающие вследствие искривления сеточных

линий, имеют вид:

$$\begin{aligned}
 D &= \sqrt{\left(\frac{\partial x_1}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial x_2}{\partial \xi}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial x_1}{\partial \eta}\right)^2 + \left(\frac{\partial x_2}{\partial \eta}\right)^2}, \\
 \beta_1 &= \frac{\nu}{D^3} \left(u_1 \left(\frac{\partial^2 D}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 D}{\partial \eta^2} \right) + 2 \frac{\partial u_1}{\partial \xi} \frac{\partial D}{\partial \xi} + 2 \frac{\partial u_2}{\partial \xi} \frac{\partial D}{\partial \eta} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{2u_2}{D} \frac{\partial D}{\partial \xi} \frac{\partial D}{\partial \eta} - \frac{2u_1}{D} \left(\frac{\partial D}{\partial \eta} \right)^2 \right) \\
 \beta_2 &= \frac{\nu}{D^3} \left(u_2 \left(\frac{\partial^2 D}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 D}{\partial \eta^2} \right) + 2 \frac{\partial u_1}{\partial \eta} \frac{\partial D}{\partial \xi} + 2 \frac{\partial u_2}{\partial \eta} \frac{\partial D}{\partial \eta} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{2u_1}{D} \frac{\partial D}{\partial \xi} \frac{\partial D}{\partial \eta} - \frac{2u_2}{D} \left(\frac{\partial D}{\partial \xi} \right)^2 \right)
 \end{aligned}$$

При известных распределениях u_1, u_2, p силы f_1, f_2 и момент g , действующие на тело со стороны жидкости, определяются следующими интегралами по контуру L профиля:

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \oint_L \left(p \frac{\partial x_2}{\partial \xi} + \frac{\rho \nu}{D} \frac{\partial u_1}{\partial \eta} \frac{\partial x_1}{\partial \xi} \right) d\xi, \\
 f_2 &= \oint_L \left(-p \frac{\partial x_1}{\partial \xi} + \frac{\rho \nu}{D} \frac{\partial u_1}{\partial \eta} \frac{\partial x_2}{\partial \xi} \right) d\xi, \\
 g &= \oint_L \left(x_1 \left(-p \frac{\partial x_1}{\partial \xi} + \frac{\rho \nu}{D} \frac{\partial u_1}{\partial \eta} \frac{\partial x_2}{\partial \xi} \right) - x_2 \left(p \frac{\partial x_2}{\partial \xi} + \frac{\rho \nu}{D} \frac{\partial u_1}{\partial \eta} \frac{\partial x_1}{\partial \xi} \right) \right) d\xi - \dot{k}(t).
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

Рассмотрим теперь движение профиля по заданному закону и вычислим зависимости $f_1(t), f_2(t)$ и $g(t)$, пользуясь соотношениями (6.8). Сравнивая их с соотношениями (6.6) мы подберем неизвестные коэффициенты таким образом, чтобы наиболее точно воспроизвести полученные зависимости.

Квазистационарное обтекание

В первом приближении вычислим коэффициенты присоединенных масс, присоединенного момента инерции и коэффициенты сопротивления, используя

простейшие движения профиля специального вида. Так для определения коэффициентов λ_{11} , c_1 выберем следующий закон движения:

$$v_1(t) = V_0 \Sigma_{t_1}(t), \quad v_2(t) \equiv 0, \quad \omega(t) \equiv 0, \quad (6.9)$$

где $\Sigma_{t_1}(t)$ кусочно линейная функция вида (см. рис. 6.3)

$$\Sigma_{t_1}(t) = \begin{cases} t/t_1, & 0 \leq t < t_1 \\ 1, & t_1 \leq t. \end{cases} \quad (6.10)$$

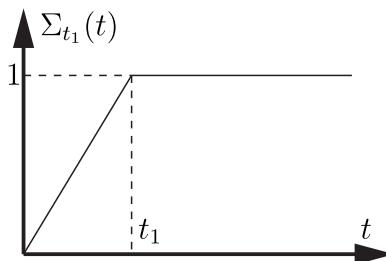


Рисунок 6.3 – Вид функции $\Sigma_{t_1}(t)$

На промежутке времени $t \in [0, t_1]$ тело движется прямолинейно равноускоренно, при этом сопротивление жидкости будет определяться преимущественно распределением давления по контуру профиля (эффект присоединенных масс), а вязкие эффекты будут пренебрежимо малы. Как показывают численные эксперименты, на данном промежутке времени сопротивление определяет только эффектом присоединенных масс. По результатам моделирования движения профиля, на данном промежутке времени вычислим присоединенную массу $\lambda_{11} = |f_1 t_1 / V_0|$.

На промежутке времени $t > t_1$ тело движется равномерно, при этом происходит существенное изменение распределения давления по контуру профиля вследствие вязкого трения, возникает лобовое сопротивление. По результатам моделирования в некоторый момент времени $t_2 > t_1$, когда течение становится квазистационарным, вычислим коэффициент сопротивления $c_1 = |f_1| / V_0^2$.

Законы движения профиля, использованные для определения различных коэффициентов модели, приведены в следующем списке:

- Коэффициенты λ_{11}, c_1 . Скорость $v_1(t) = V_0 \Sigma_{t_1}(t)$, $v_2(t) \equiv 0$, $\omega(t) \equiv 0$.
Параметры $V_0 = 0.05$, $t_1 = 0.005$
- Коэффициенты λ_{22}, c_2 . Скорость $v_2(t) = V_0 \Sigma_{t_1}(t)$, $v_1(t) \equiv 0$, $\omega(t) \equiv 0$.
Параметры $V_0 = 0.05$, $t_1 = 0.005$
- Коэффициенты λ_{33}, c_3 . Скорость $\omega(t) = \Omega_0 \Sigma_{t_1}(t)$, $v_1(t) \equiv 0$, $v_2(t) \equiv 0$.
Параметры $\Omega_0 = 1$, $t_1 = 0.1$
- Коэффициент λ_{23} . Скорость $v_2(t) = V_0 \Sigma_{t_1}(t)$, $\omega(t) = \Omega_0 \Sigma_{t_1}(t)$, $v_1(t) \equiv 0$.
Параметры $V_0 = 0.05$, $\Omega_0 = 1$

В результате обработки данных численного эксперимента получим следующие значения:

$$\begin{aligned} \lambda_{11} &\approx 13.453, & \lambda_{22} &\approx 88.338, & \lambda_{33} &\approx 0.391, & \lambda_{23} &\approx 3.495, \\ c_1 &= 53.973, & c_2 &= 690.14, & c_3 &= 0.832. \end{aligned} \quad (6.11)$$

Значения (6.11) определяют удельные силы f_1, f_2 и момент g (отнесенные к одному метру), действующие на профиль бесконечной длины. Предложенный экспериментальный образец имеет смоченную часть высотой 0.0335 м. Выполним коррекцию коэффициентов (6.11) с учетом данной высоты:

$$\begin{aligned} \lambda_{11} &\approx 0.451, & \lambda_{22} &\approx 2.959, & \lambda_{33} &\approx 0.0131, & \lambda_{23} &\approx 0.117, \\ c_1 &= 1.808, & c_2 &= 23.120, & c_3 &= 0.0279. \end{aligned} \quad (6.12)$$

Отметим, что вычисленные присоединенные массы в высокой точностью совпадают со значениями, полученными классическим путем [12]:

$$\lambda_{ij} = \oint_{\Gamma} \varphi_i \frac{\partial \varphi_j}{\partial \mathbf{n}} dl,$$

где φ_i – функции, удовлетворяющие уравнению Лапласа

$$\Delta \varphi_i = 0, \quad i = 1, 2, 3$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \varphi_1}{\partial \mathbf{n}} \right|_L &= n_1, & \left. \frac{\partial \varphi_2}{\partial \mathbf{n}} \right|_L &= n_2, & \left. \frac{\partial \varphi_3}{\partial \mathbf{n}} \right|_L &= x_1 n_2 - x_2 n_1, \\ \left. \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_1} \right|_{x_2} &= \left. \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_2} \right|_{x_1} = 0, & i &= 1, 2, 3 & \text{при} & x_1^2 + x_2^2 \rightarrow \infty \end{aligned}$$

Здесь $\mathbf{n} = (n_1, n_2)$ — внешняя нормаль к границе L профиля.

Результаты эксперимента и расчета с использованием коэффициентов (6.12) представлены на рис. 6.4, 6.5.

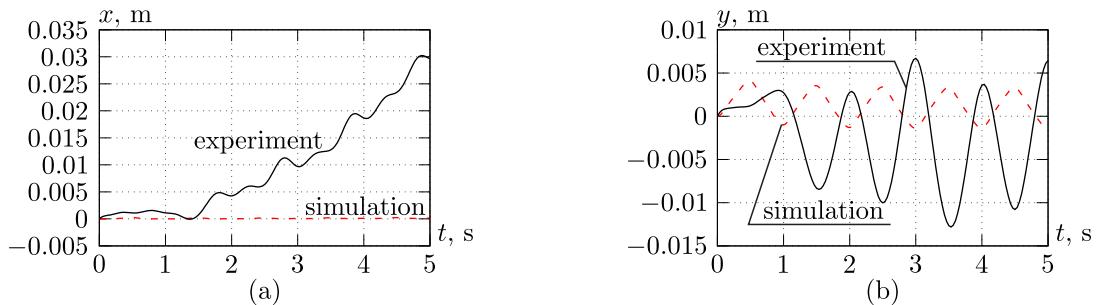


Рисунок 6.4 — Зависимости (а) $x(t)$ и (б) $y(t)$, полученные экспериментально и в результате моделирования на основе уравнений (6.1) с выражениями для сил и момента (6.8) и значениями коэффициентов (6.12)

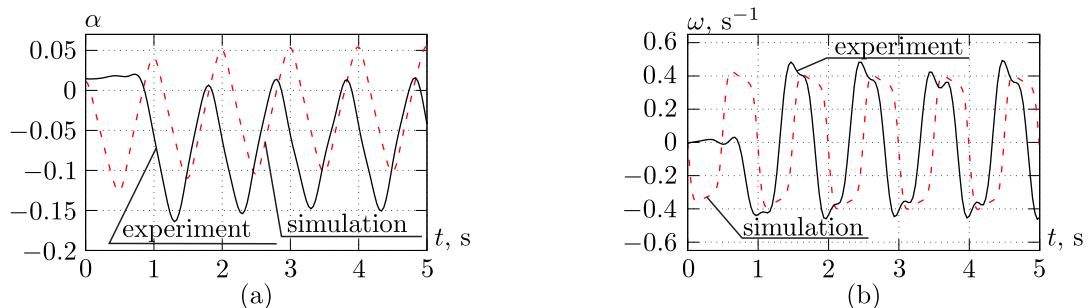


Рисунок 6.5 — Зависимости (а) $\alpha(t)$ и (б) $\omega(t)$, полученные экспериментально и в результате моделирования на основе уравнений (6.1) с выражениями для сил и момента (6.8) и значениями коэффициентов (6.12)

Из рис. 6.4б видно, что предложенная модель воспроизводит колебания координаты y . Однако амплитуда колебаний y в расчете меньше, чем в эксперименте. Из рис. 6.4а видно, что расчетные значения координаты x на несколько порядков меньше по сравнению с экспериментальными. Из рис. 6.5 видно, что расчетные зависимости угла поворота α и угловой скорости ω согласуются с экспериментальными по частоте и амплитуде. Сдвиг по фазе на рис. 6.5 обусловлен тем, что на начальной стадии эксперимента имеется переходный процесс, отсутствующий при математическом моделировании. Таким образом, предложенная модель не воспроизводит самопрдвижение робота со скоростью, наблюдавшейся в эксперименте.

Нестационарное обтекание

В предыдущем разделе было показано, что использование коэффициентов присоединенных масс, соответствующих чисто ускоренному движению, и коэффициентов сопротивления, соответствующих квазистационарному обтеканию, приводит к неудовлетворительным результатам. Поскольку движение робота является существенно нестационарным, оказывается невозможным определение коэффициентов λ_{11} , λ_{22} , λ_{33} , λ_{23} , c_1 , c_2 , c_3 по-отдельности. Таким образом данные коэффициенты должны определяться совместно с учетом нестационарности движения профиля.

Для задания граничных условий, соответствующих нестационарному движению профиля, будем использовать экспериментальные данные для прототипа, описанного в разделе 1 с периодом управляющего воздействия $T = 1$ с, которые представляют собой таблицу значений:

$$(t_i, x_i, y_i, \alpha_i), \quad i = 0, \dots, N. \quad (6.13)$$

Здесь t_i — момент времени, (x_i, y_i) — положение центра масс профиля в момент времени t_i , α_i — ориентация профиля в момент времени t_i .

Для определения поступательной и угловой скорости данные (6.13) были слажены и продифференцированы методом Савицкого-Голая (Savitzky-Golay) [Gorry_1990, Savitzky_Golay_1964]. Производные координат \dot{x}_i , \dot{y}_i были пересчитаны в подвижную систему координат:

$$v_{1,i} = \dot{x}_i \cos \alpha_i + \dot{y}_i \sin \alpha_i, \quad v_{2,i} = -\dot{x}_i \sin \alpha_i + \dot{y}_i \cos \alpha_i, \quad \omega_i = \dot{\alpha}_i. \quad (6.14)$$

Выполняя дифференцирование табличных данных $v_{1,i}$, $v_{2,i}$, ω_i , получим ускорения:

$$\dot{v}_{1,i}, \quad \dot{v}_{2,i}, \quad \dot{\omega}_i. \quad (6.15)$$

Используя, табличные зависимости v_1 , v_2 , ω от времени, смоделируем движение робота и окружающей его жидкости. В результате расчета получим таблицу

значений:

$$(\dot{v}_{1,i}, \dot{v}_{2,i}, \dot{\omega}_i, v_{1,i}, v_{2,i}, \omega_i, f_{1,i}, f_{2,i}, g_i), \quad i = 1, \dots, N \quad (6.16)$$

Согласно (6.6) силы и момент зависят линейно от следующих величин:

$$\dot{v}_1, \quad \dot{v}_2, \quad \dot{\omega}, \quad v_1\omega, \quad v_2\omega, \quad v_1v_2, \quad \omega^2, \quad v_1|v_1|, \quad v_2|v_2|, \quad \omega|\omega|. \quad (6.17)$$

Это позволяет для вычисления коэффициентов присоединенных масс и коэффициентов сопротивления из результатов численного эксперимента применить метод наименьших квадратов. Кроме того, для лучшего согласования с экспериментальными данными в данном случае необходимо отказаться от требования симметрии коэффициентов (которое вытекает из модели идеальной жидкости). Окончательно получим следующие соотношения:

$$\begin{aligned} f_1 &= -\lambda_{11}^{(1)}\dot{v}_1 + \lambda_{22}^{(1)}v_2\omega + \lambda_{23}^{(1)}\omega^2 - c_1v_1|v_1|, \\ f_2 &= -\lambda_{22}^{(2)}\dot{v}_2^{(2)} - \lambda_{23}^{(2)}\dot{\omega} - \lambda_{11}^{(2)}v_1\omega - c_2v_2|v_2|, \\ g &= -\lambda_{23,l}^{(3)}\dot{v}_2 - \lambda_{33}^{(2)}\dot{\omega} + (\lambda_{11}^{(3)} - \lambda_{22}^{(3)})v_1v_2 - \lambda_{23,r}^{(3)}v_1\omega - c_3\omega|\omega| - \dot{k}(t). \end{aligned} \quad (6.18)$$

В результате обработки результатов моделирования (для управляющего воздействия с периодом $T = 1$ с) были получены следующие значения:

$$\begin{aligned} \lambda_{11}^{(1)} &\approx 0.3087, \quad \lambda_{22}^{(1)} \approx -0.5796, \quad \lambda_{23}^{(1)} \approx 0.039085, \\ \lambda_{22}^{(2)} &\approx 2.0996, \quad \lambda_{23}^{(2)} \approx 0.17629, \quad \lambda_{11}^{(2)} \approx -7.9826, \\ \lambda_{23,l}^{(3)} &\approx 0.083474, \quad \lambda_{33}^{(2)} \approx 0.018935, \quad \lambda_{11}^{(3)} - \lambda_{22}^{(3)} \approx -4.7550, \quad \lambda_{23,r}^{(3)} \approx 1.4488, \\ c_1 &= 0.04715, \quad c_2 = 17.702, \quad c_3 = 0.092872. \end{aligned} \quad (6.19)$$

Результаты эксперимента и расчета с использованием коэффициентов (6.19) представлены на рис. 6.6, 6.7.

Из рис. 6.6, 6.7 видно, что математическая модель (6.1) с силами и моментом (6.18) и коэффициентами (6.19) воспроизводит динамику рассматриваемой системы качественно и количественно. Таким образом, *описанный в данном разделе метод определения коэффициентов математического модели обеспечивает лучшее согласование расчетных и экспериментальных данных*. Тем не

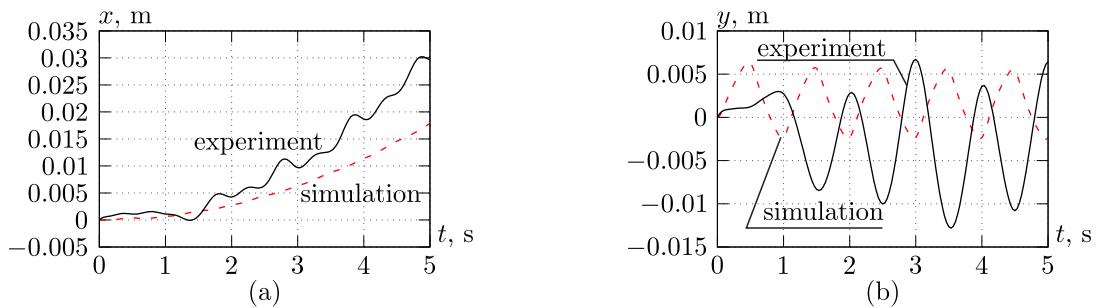


Рисунок 6.6 – Зависимости (а) $x(t)$ и (б) $y(t)$, полученные экспериментально и в результате моделирования на основе уравнений (6.1) с выражениями для сил и момента (6.18) и значениями коэффициентов (6.19)

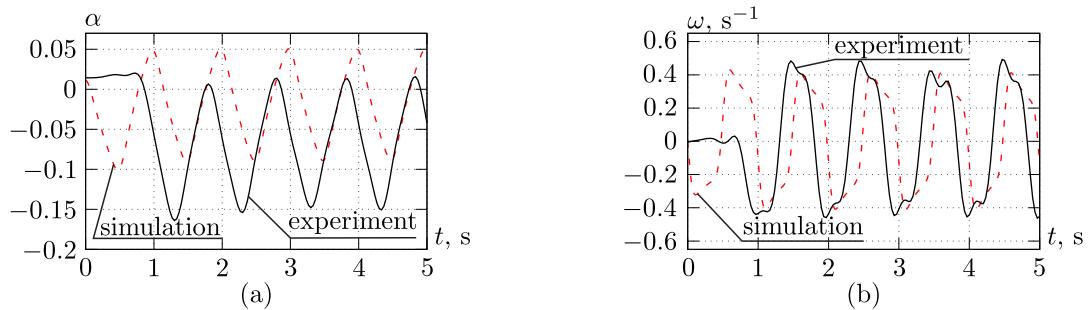


Рисунок 6.7 – Зависимости (а) $\alpha(t)$ и (б) $\omega(t)$, полученные экспериментально и в результате моделирования на основе уравнений (6.1) с выражениями для сил и момента (6.18) и значениями коэффициентов (6.19)

менее, ниже будет показано, что в ряде случаев значения коэффициентов будут нуждаться в корректировке.

6.2 Разработка и оценка алгоритма управления

Управление движением ротора $\Omega(t)$ зададим при помощи кусочно-непрерывной периодической функции следующего вида

$$\Omega(t) = \begin{cases} \Omega_1(t), & t \in [nT, nT + t_1], \\ \Omega_2(t), & t \in [nT + t_1, nT + t_1 + t_2], \\ \Omega_3(t), & t \in [nT + t_1 + t_2, nT + t_1 + t_2 + t_3], \\ \Omega_4(t), & t \in [nT + t_1 + t_2 + t_3, nT + t_1 + t_2 + t_3 + t_4] \end{cases}, \quad (6.20)$$

$$\Omega_1(t) = \omega_1, \quad \Omega_2(t) = \frac{(\omega_2 - \omega_1)(t - nT)}{t_2} - \frac{(\omega_2 - \omega_1)(t_1 + t_2)}{t_2} + \omega_2,$$

$$\Omega_3(t) = \omega_2, \quad \Omega_4(t) = \frac{(\omega_1 - \omega_2)(t - nT)}{t_4} - \frac{(\omega_1 - \omega_2)(t_1 + t_2 + t_3 + t_4)}{t_4} + \omega_1,$$

где $n \in \mathbb{N}$, T — период управляющего воздействия; t_1, t_3 — задают интервалы времени с постоянными угловыми скоростями вращения ротора ω_1, ω_2 соответственно, t_2, t_4 — интервалы равноускоренного вращения ротора. Графическая данная зависимость приведена на рис. 6.8.

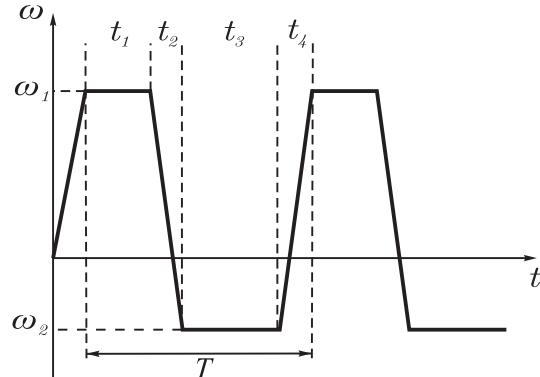


Рисунок 6.8 — График зависимости угловой скорости вращения ротора от времени в общем виде

Заметим, что на практике сделать промежутки t_2 и t_4 сколь угодно малыми невозможно. Это обусловлено инерцией ротора и ограниченностью мощности приводного двигателя, вследствие чего он не может обеспечить мгновенное изменение угловой скорости вращения ротора, тем более со сменой направления вращения.

Из физических соображений очевидно, что чем более сложной и несимметричной является функция управления $\Omega(t)$, тем более сложную траекторию должен описывать робот. Мы видим, что простейшее управление вида (6.20)

позволяет учесть два типа асимметрии, во-первых, сдвиг

$$\Omega(t) \rightarrow \omega_0 + \Omega(t), \quad (6.21)$$

во-вторых, неравенство ускорений за время одного периода управляющего воздействия. Отметим естественное следствие, которое можно сделать из соотношений (6.6). Мы видим, что уравнения движения содержат не угловую скорость ротора, а только его ускорение $\dot{\Omega}(t)$. Отсюда следует, что данная модель предполагает, в частности, что форма траектории робота не должна зависеть от сдвига ω_0 . Проверим насколько это согласуется с экспериментом.

В следующей главе рассмотрим результаты численного моделирования и экспериментальных исследований при различных соотношениях угловых скоростей вращения ротора ω_1, ω_2 , а также длительностей интервалов t_1, t_2, t_3, t_4 .

6.3 Исследование уравнений движения. Моделирование теоретических траекторий

Здесь будут различные графики траекторий, построенные по модели.

6.3.1 Исследование зависимости формы траектории от характера управляющего воздействия

Управляющее воздействие (6.20) может принимать различную форму. Рассмотрим случаи с управляющим воздействием симметричным на периоде и ассиметричным. Во всех случаях моделирования период управляющего воздействия зададим равным $T = 5$ секунд.

Управляющее воздействие симметричное на периоде. Для обеспечения симметричности должны выполняться условия: $t_1 = t_3, t_2 = t_4$. Проведем моделирование движения робота при $t_1 = t_3 = 2$ с., $t_2 = t_4 = 0.5$ с. Время

моделирования – 50 секунд. Рассчитанная траектория движения представлена на рисунке 6.9.

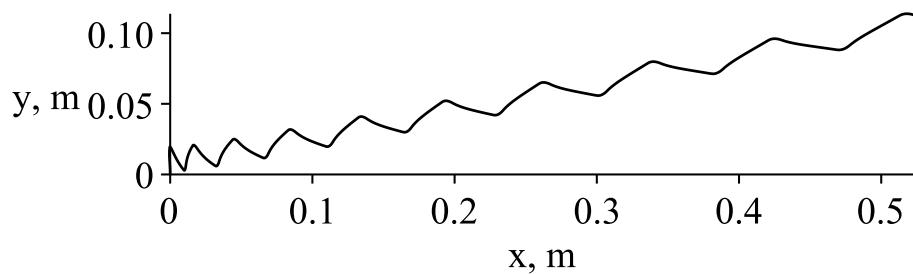


Рисунок 6.9 – Траектория движения робота

Управляющее воздействие асимметричное на периоде. Рассмотрим первый случай, когда участки равноускоренного движения ротора равны, а участки вращения с постоянной скоростью не равны – $t_1 \neq t_3$, $t_2 = t_4$. Проведем моделирование движения робота при $t_1 = 1$ с., $t_3 = 3$ с., $t_2 = t_4 = 0.5$ с. Время моделирования – 200 секунд. Рассчитанная траектория движения представлена на рисунке 6.10.

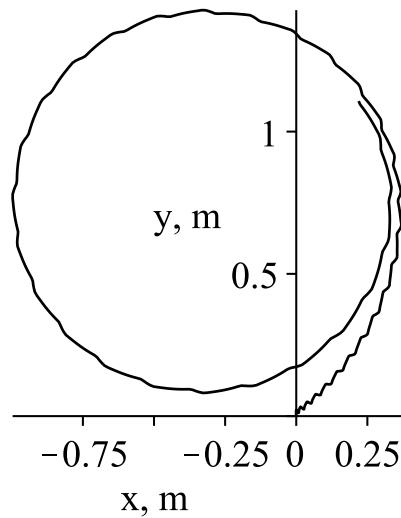


Рисунок 6.10 – Траектория движения робота

Рассмотрим второй случай с равными по времени участками вращения ротора с постоянной скоростью – $t_1 = t_3$, и не равными по времени участками равноускоренного вращения ротора $t_2 \neq t_4$. Проведем моделирование движения

робота при $t_1 = t_3 = 1$ с., $t_2 = 0.5$ с. $t_4 = 2.5$ с. Время моделирования – 200 секунд. Рассчитанная траектория движения представлена на рисунке 6.11.

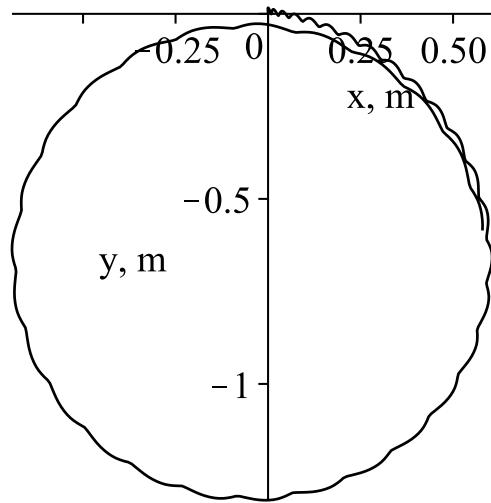


Рисунок 6.11 – Траектория движения робота

Рассмотрим третий случай с не равными по времени участками вращения ротора с постоянной скоростью – $t_1 \neq t_3$, и не равными по времени участками равноускоренного вращения ротора $t_2 \neq t_4$. Проведем моделирование движения робота при $t_1 = 1$ с., $t_3 = 2$ с., $t_2 = 0.5$ с. $t_4 = 1.5$ с. Время моделирования – 200 секунд. Рассчитанная траектория движения представлена на рисунке 6.12.

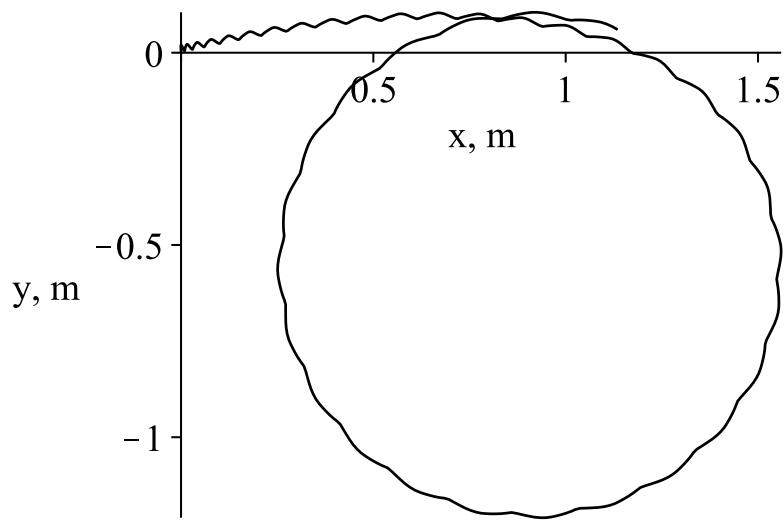


Рисунок 6.12 – Траектория движения робота

Управляющее воздействие с различной амплитудой угловой скорости ротора. Рассмотрим симметричное управляющее воздействие при $t_1 = t_3 = 2$ с., $t_2 = t_4 = 0.5$ с., но с разной амплитудой скоростей ω_1 и ω_2 . На рисунке 6.13

представлены три рассчитанные траектории движения робота: черная линия – $\omega_1 = 10$ рад/с и $\omega_2 = -10$ рад/с; красная линия – $\omega_1 = 10$ рад/с и $\omega_2 = -3$ рад/с; синяя линия – $\omega_1 = 10$ рад/с и $\omega_2 = 3$ рад/с. Время моделирования – 50 секунд.

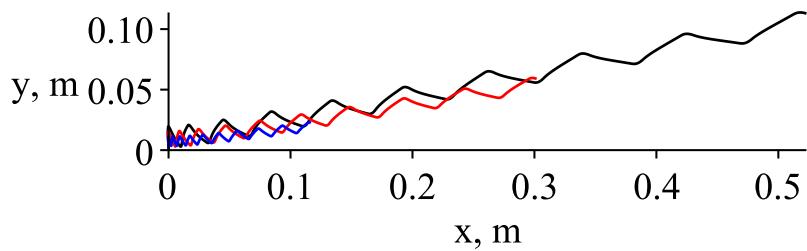


Рисунок 6.13 – Траектория движения робота **линии сделать ЧБ, может быть изменить начальный угол для наглядности**

Рассмотрим также асимметричное управляющее воздействие при $t_1 = 3$ с., $t_3 = 1$ с., $t_2 = t_4 = 0.5$ с., но с разной амплитудой скоростей ω_1 и ω_2 . На рисунке 6.14, аналогично моделированию с симметричным управляющим воздействием, представлены три рассчитанные траектории движения робота: черная линия – $\omega_1 = 10$ рад/с и $\omega_2 = -10$ рад/с; красная линия – $\omega_1 = 10$ рад/с и $\omega_2 = -3$ рад/с; синяя линия – $\omega_1 = 10$ рад/с и $\omega_2 = 3$ рад/с. Время моделирования – 200 секунд.

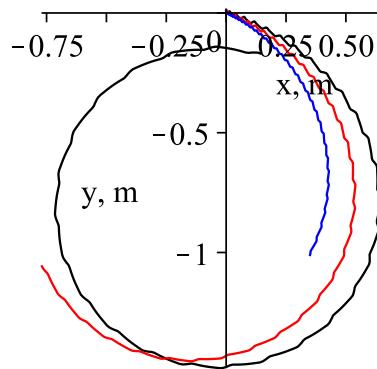


Рисунок 6.14 – Траектория движения робота **линии сделать ЧБ, может быть изменить начальный угол для наглядности**

Управляющее воздействие со смещением амплитуды угловой скорости ротора. Рассмотрим симметричное управляющее воздействие при $t_1 = t_3 = 2$ с., $t_2 = t_4 = 0.5$ с., но со смещением амплитуды угловых скоростей ω_1 и

ω_2 при этом $\omega_1 - \omega_2 = const$. На рисунке 6.15 представлена рассчитанная траектория движения робота, соответствующая трем различным управляющим воздействиям: 1: $\omega_1 = 10$ рад/с и $\omega_2 = -3$ рад/с; 2: $\omega_1 = 6.5$ рад/с и $\omega_2 = -6.5$ рад/с; 3: $\omega_1 = 3$ рад/с и $\omega_2 = -10$ рад/с. Время моделирования – 50 секунд.

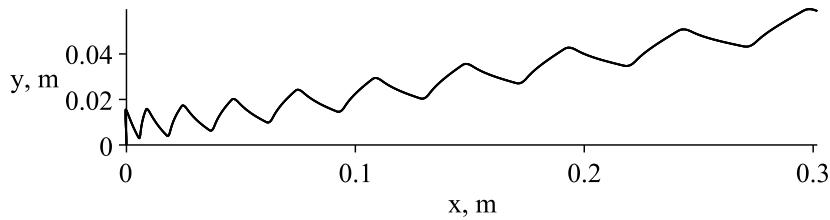


Рисунок 6.15 – Траектория движения робота

Для асимметричного управляющего воздействия смещение амплитуды угловой скорости ротора также на форму траектории не влияет. Рассмотрим моделирование при $t_1 = 3$ с., $t_3 = 1$ с., $t_2 = t_4 = 0.5$ с., и с амплитудой скоростей $\omega_1 - \omega_2 = const$. На рисунке 6.16 представлена рассчитанная траектория движения робота, соответствующая трем различным управляющим воздействиям: 1: $\omega_1 = 10$ рад/с и $\omega_2 = -3$ рад/с; 2: $\omega_1 = 6.5$ рад/с и $\omega_2 = -6.5$ рад/с; 3: $\omega_1 = 3$ рад/с и $\omega_2 = -10$ рад/с. Время моделирования – 200 секунд.

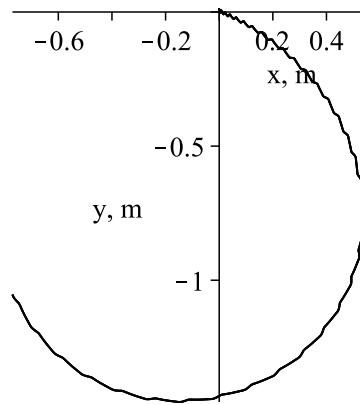


Рисунок 6.16 – Траектория движения робота

Выводы. Как видно из моделирования, при симметричном на периоде управляющем воздействии робот движется в среднем по прямой. При ассиметричном на периоде управляющем воздействии робот движется по траектории близкой к окружности при различных случаях ассиметрии. В рассмотренных

трех случаях асимметрии управляющего воздействия радиус окружности траектории движения практически не изменяется, изменяется направление движения в начальный момент времени.

6.3.2 Исследование зависимости формы траектории от параметров модели

Глава 7. Экспериментальные исследования с водоплавающим недеформируемым рыбоподобным роботом

7.1 Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились в бассейне размерами 2 x 1.2 метра. При движении робота траектория отслеживалась с помощью системы захвата движения фирмы Vicon, которая состоит из 7 камер, расположенных по периметру области съемки. С помощью этой системы получаем траекторию движения объекта и проекции единичных векторов, связанных с осями подвижной системы координат, расположенной на объекте на глобальную неподвижную систему координат. Данные проекции образуют матрицу поворота объекта, которая связывает неподвижную и подвижную системы координат.

Так как система захвата движения в проведенных экспериментах восстанавливает траекторию движения робота относительно геометрического центра фигуры, образованной маркерами, которые установлены на роботе, а моделирование проводится для центра масс робота, необходимо провести следующее преобразование:

$$\mathbf{r}_c = \mathbf{r} + Q\mathbf{r}_0,$$

где \mathbf{r}_c – вектор направленный из начала неподвижной системы координат в точку центра масс робота, Q – матрица поворота, \mathbf{r}_0 – вектор соединяющий точку отслеживания траектории и центра масс робота в подвижной системе координат.

Таким образом, для каждого проведенного эксперимента получены координаты движения центра масс робота $x(t), y(t)$, угол поворота робота вокруг вертикальной оси. Численным дифференцированием получены значения про-

дольной, поперечной скорости робота ($\dot{x}(t), \dot{y}(t)$) и угловой скорости вращения робота вокруг вертикальной оси.

Так же на приводе ротора установлен датчик углового перемещения – энкодер. С его помощью можно получить зависимость реального углового перемещения ротора от времени, а с помощью численного дифференцирования получаем зависимости угловой скорости и углового ускорения ротора.

Для исключения шумов, все данные были обработаны сглаживающим фильтром Савицкого-Голея [SGolay].

В уравнениях движения в качестве управляющего воздействия выступает гиростатический момент, а для его вычисления используется угловое ускорение ротора. Наибольший эффект можно получить при его максимальных значениях, а этого можно добиться разгоняя ротор до максимально возможной скорости за минимально возможное время, которые обеспечивает выбранный двигатель.

7.2 Экспериментальные исследования

7.2.1 Движение вдоль прямой

Проведем экспериментальные исследования со следующими параметрами, входящими в закон изменения угловой скорости вращения ротора (6.20): $t_1 = t_3$, $t_2 = t_4 \approx 0.1$ секунды (значения времени t_2 и t_4 зависят от конкретной модели двигателя, конструкции передаточных механизмов, напряжения питания и др., и определяются экспериментально), $\omega_1 = \omega_{max}$, $\omega_2 = -\omega_{max}$, где ω_{max} – максимальная угловая скорость вращения ротора для данной модели робота. Таким образом, в качестве изменяемого параметра в экспериментах движения

вдоль прямой выступает период T , а $t_1 = t_3 = 0.5(T - 2t_2)$. Тогда функция $\omega_r(t)$ примет вид представленный на рисунке 7.1.

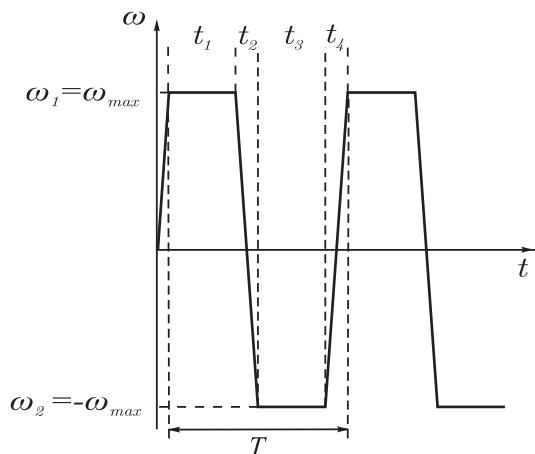


Рисунок 7.1 — Зависимость угловой скорости ротора от времени

Замечание. Фактически, на обмотки двигателя подавалось максимальное напряжение, у которого через равные промежутки времени изменялся знак на противоположный. Таким образом достигалась максимальная скорость вращения ротора с максимальным угловым ускорением для данного двигателя при имеющемся напряжении питания.

Кадр с записи движения робота в бассейне представлен на рисунке 7.2. Как видно из рисунка, при данном управляемом воздействии робот движется вдоль прямой.

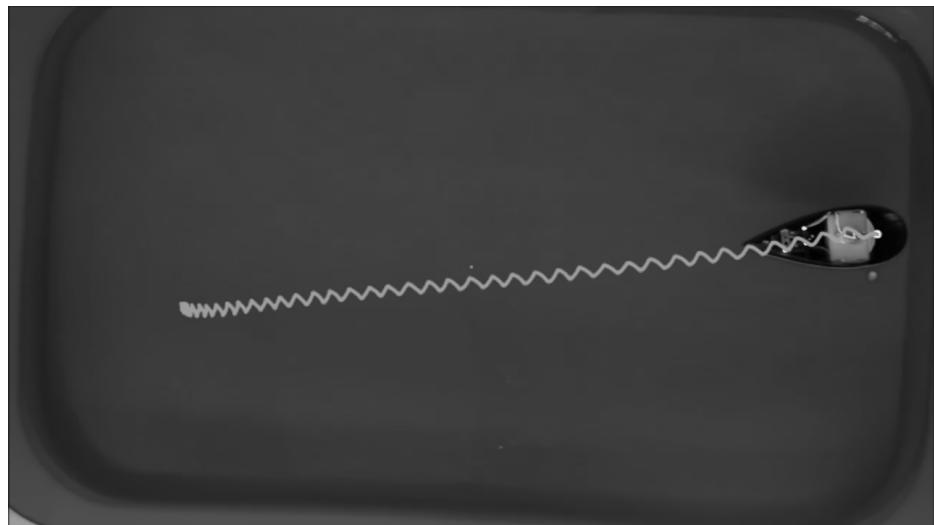


Рисунок 7.2 — Кадр с записи движения робота в бассейне

Для движения по прямой были проведены эксперименты при $T = 1, 2, 3, 4$ секунды.

На рисунке 7.3 представлены экспериментальные и расчетные траектории движения при различных управляющих воздействиях. Так же схематично обозначена ориентация робота в начальный и конечный моменты времени. Время моделирования и экспериментов для всех тестов составило 40 секунд (вследствие ограниченного размера бассейна).

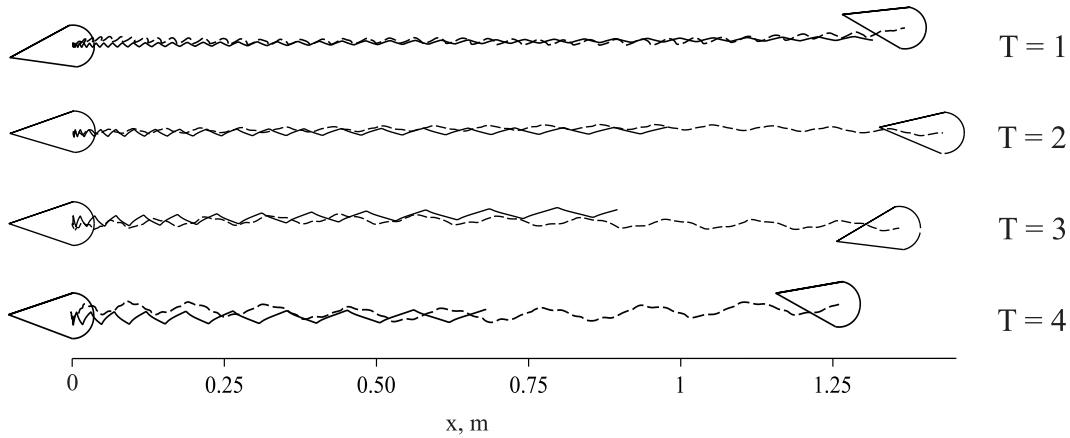


Рисунок 7.3 – Траектории движения робота при $\omega_1 = \omega_{max}$, $\omega_2 = -\omega_{max}$ и различных управляющих воздействиях. Пунктирной линией обозначены траектории, полученные по результатам численного моделирования, сплошной – экспериментальные траектории.

Зависимость скорости движения робота от периода управляющего воздействия в рамках данных исследований не очевидна, возможно из-за ограниченных размеров бассейна. Наилучшее количественное согласование результатов моделирования с экспериментом получено при $T = 1$ с. Именно по этим экспериментальным данным проводилось вычисление коэффициентов в главе 6. Отклонение результатов моделирования от экспериментальных данных для других значений периода управляющего воздействия возможно минимизировать при уточнении значений коэффициентов модели для соответствующих условий эксперимента.

Для несимметричных управляющих воздействий, например при смещении угловой скорости на величину ω_0 (см. рис. 7.4а), и сохранении равенств интервалов $t_1 = t_3$, $t_2 = t_4$ робот также движется вдоль прямой. Для наглядности

сравнения экспериментов влияния смещения на характер траектории соотношение угловых скоростей оставалось постоянным $\omega_1 - \omega_2 = const$. На рис. 7.4б приведены соответствующие траектории движения робота, из которых видно что робот двигался в среднем прямолинейно, но в различных направлениях. Причем изменение направления происходит в начале движения, а угол поворота зависит от сдвига управления ω_0 .

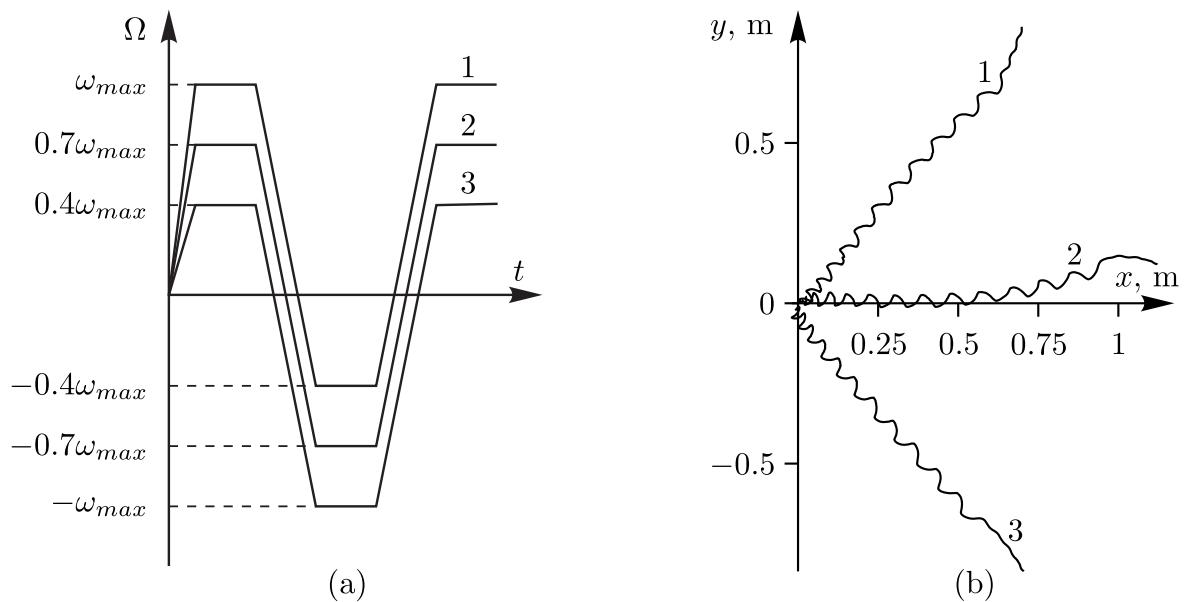


Рисунок 7.4 – Несимметричные управляемые воздействия при $\omega_1 - \omega_2 = const$, $t_2 = t_4 = 0.1$, $t_1 = t_3 = 0.9$, $T = 2$ (а) и соответствующие им траектории движения водного робота (б).

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

- Рассматриваемая теоретическая модель управляемого движения водного робота качественно правильно описывает его движение вдоль прямой, которое реализуется симметричным управляемым воздействием.
- Сдвиг управляемого воздействия $\Omega(t) \rightarrow \omega_0 + \Omega(t)$ не влияет на форму траектории, она остается прямой, но меняется направление движения.
- Количественного согласования результатов моделирования и экспериментов можно достичь для конкретных тестов, проводя перерасчет коэффициентов под конкретные экспериментальные данные.

7.2.2 Движение вдоль окружности

Движение робота по траектории по форме близкой к окружности оказывается возможным, если в управляющем воздействии (6.20) положить $t_1 \neq t_3$ и $t_2 = t_4$. То есть длительности вращения ротора в направлениях по часовой стрелке и против часовой стрелки различны. Типовая траектория движения робота при

$$t_3 = 10t_1, \quad \omega_1 = \omega_{max}, \quad \omega_2 = -\omega_{max}, \quad t_2 = t_4 = 0.1 \text{ с}, \quad T = 3 \text{ с} \quad (7.1)$$

и результаты моделирования приведены на рис. 7.5а. На рис. 7.5б приведена графическая зависимость радиуса окружности, аппроксимирующей траекторию, от соотношения длительностей рассматриваемых интервалов $k_1 = t_3/t_1$. Для построения аппроксимаций расчетных и экспериментальных данных использовался метод наименьших квадратов.

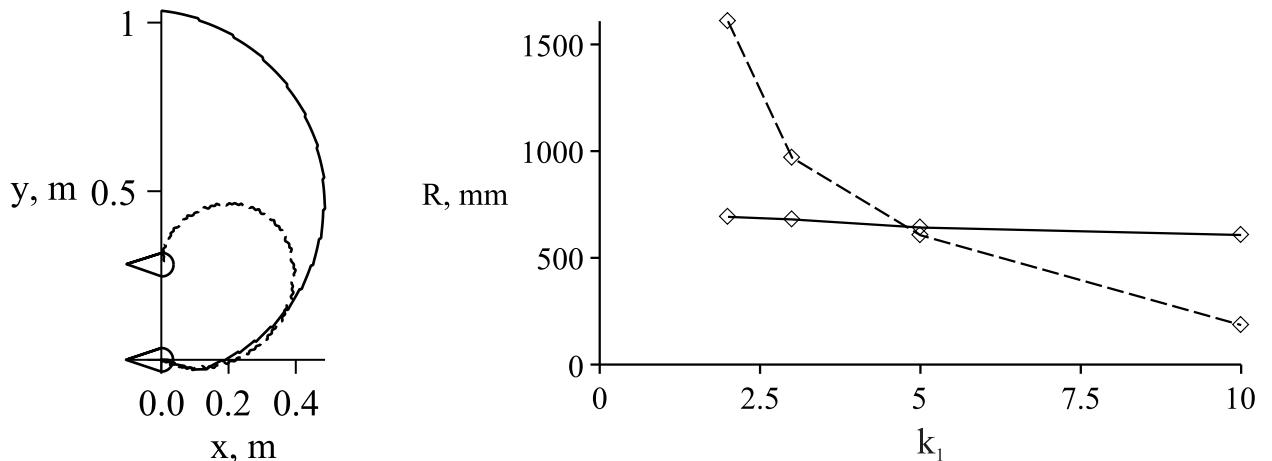


Рисунок 7.5 – а) Траектория движения робота по окружности при эксперименте (штриховая линия) и моделировании (сплошная линия) б) Зависимость радиуса траектории движения робота от $k_1 = \frac{t_3}{t_1}$ при эксперименте (штриховая линия) и моделировании (сплошная линия) построенная по экспериментам при $k_1 = 2, 3, 5, 10$

Форма расчетной и экспериментальной траектории качественно совпадают, но радиус окружности вдоль которой плывет робот при моделировании

примерно в 2 – 2.5 раза больше радиуса окружности, полученной в экспериментах.

Из рис. 7.5б видно, что радиус траекторий, полученных при моделировании, незначительно уменьшается при увеличении k_1 . Для траекторий, полученных в эксперименте, при увеличении k_1 в 4 раза, радиус траектории уменьшается более чем в 4 раза.

При данном управлении на практике минимальный радиус окружности, вдоль которой происходит движение, ограничен и определяется минимальным значением t_3 (или t_1 при движении вдоль окружности по часовой стрелке), которое определяется моменто-инерционными характеристиками системы "двигатель -ротор". Для рассматриваемой нами модели робота минимальное значение радиуса окружности составило 185 мм.

Движения водного робота вдоль окружности меньшего радиуса поворота, а также более быстрого движения вдоль траектории можно добиться при изменении интервалов времени, соответствующих разгону и торможению, задаваемых величинами t_2, t_4 и определяющих угловое ускорение вращения ротора. Графическое представление типового управления при $t_2 \neq t_4$ приведено на рис. 7.6а. На рис. 7.6б представлены экспериментальная и расчетная траектории движения робота при данном управляющем воздействии для следующих значений

$$T = 5, \quad t_4 = 0.1, \quad t_2 = 3, \quad \omega_1 = \omega_{max}, \quad \omega_2 = -\omega_{max}. \quad (7.2)$$

На рис. 7.7 приведены экспериментальная и расчетная зависимости радиуса траектории движения робота от коэффициента $k_2 = t_2/t_4$. Эксперименты проводились для $k_2 = 10, 20, 30, 40$.

Качественно при увеличении неравенства продолжительности интервалов t_2, t_4 радиус окружности, вдоль которой движется робот, уменьшается, однако, в эксперименте данная зависимость имеет нелинейный и более выраженный характер.

При $k_2 = 20$ радиусы окружностей, вдоль которой плывет робот, полученные при моделировании и в эксперименте совпадают. Это объясняется тем,

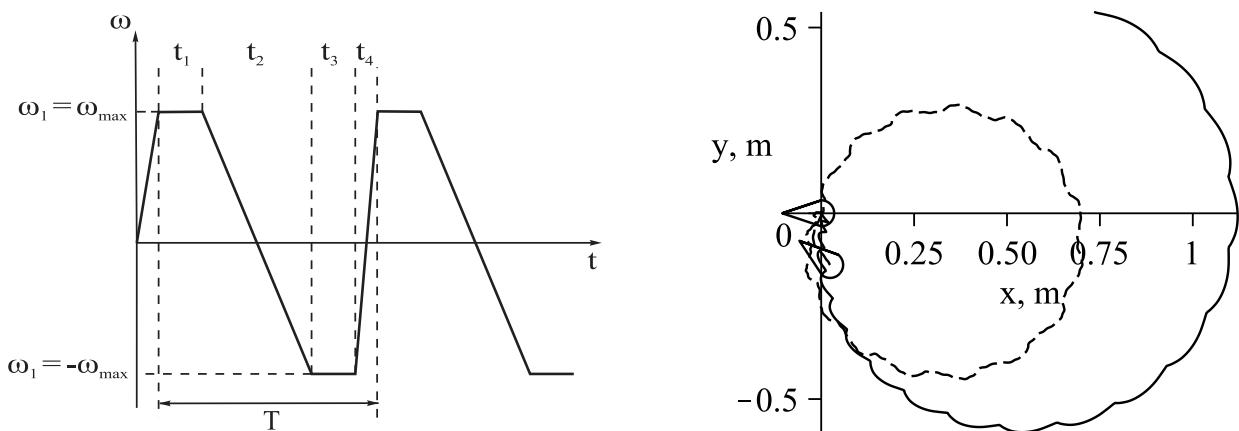


Рисунок 7.6 – а) зависимость угловой скорости вращения ротора от времени при $t_2 \neq t_4$, б) типовая траектория движения робота вдоль окружности при $T = 5$, $t_1 = t_3 = 0.95$, $t_2 = 3$, $t_4 = 0.1$, $\omega_1 = \omega_{max}$, $\omega_2 = -\omega_{max}$ в эксперименте (штриховая линия) и моделировании (сплошная линия)

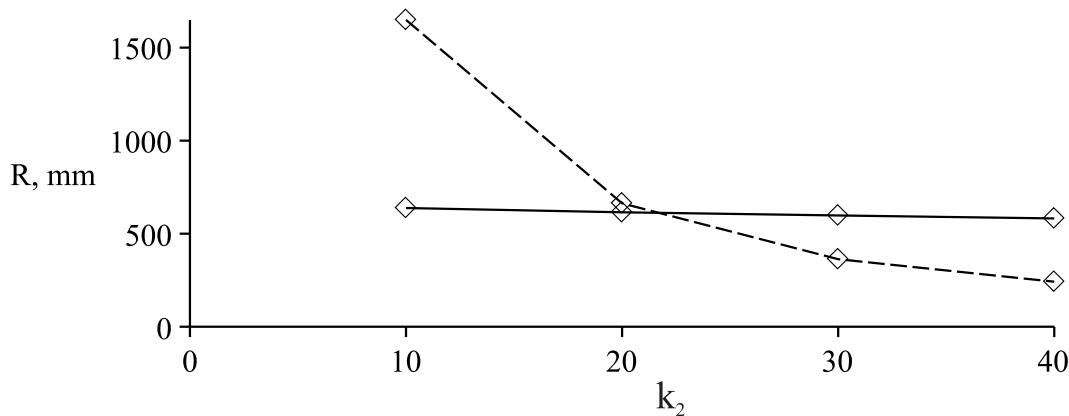


Рисунок 7.7 – Теоретическая (сплошная линия) и экспериментальная (штриховая линия) зависимости радиуса траектории движения робота от k_2 при $\omega_1 = \omega_{max}$; $\omega_2 = -\omega_{max}$; $t_1 = t_3$; $t_4 = 0.1$ секунды; $T = 5$ секунд

что при моделировании использовались значения коэффициентов, полученные из экспериментальных данных, соответствующих движению вдоль прямой.

Выделим основные результаты данной серии экспериментальных исследований.

- Рассматриваемая теоретическая модель управляемого движения водного робота качественно правильно описывает его движение вдоль окружности, которое реализуется асимметричным на периоде управляющим воздействием.

- На размер и форму траектории движения влияет асимметрия управляющего воздействия на его периоде. Изменение направления движения – поворот, может быть реализован либо при изменении продолжительности интервала вращения с постоянной угловой скоростью, либо вращением ротора по и против часовой стрелки с различными угловыми ускорениями.
- Количественного согласования результатов моделирования и экспериментов, как и в при движении вдоль прямой, можно достичь для конкретных тестов, проводя пересчет коэффициентов под конкретные экспериментальные данные, полученные при движении вдоль окружности.

7.2.3 Движение вдоль сложных траекторий

При комбинировании рассматриваемых управлений, обеспечивающих движение вдоль прямой и окружности, можно реализовать движение вдоль сложных траекторий. На рис. 7.8а приведен пример управляющего воздействия с тремя характерными управлениями: движение вдоль прямой, поворот направо, поворот налево. Траектории полученные в эксперименте и моделировании приведены на рис. 7.8б.

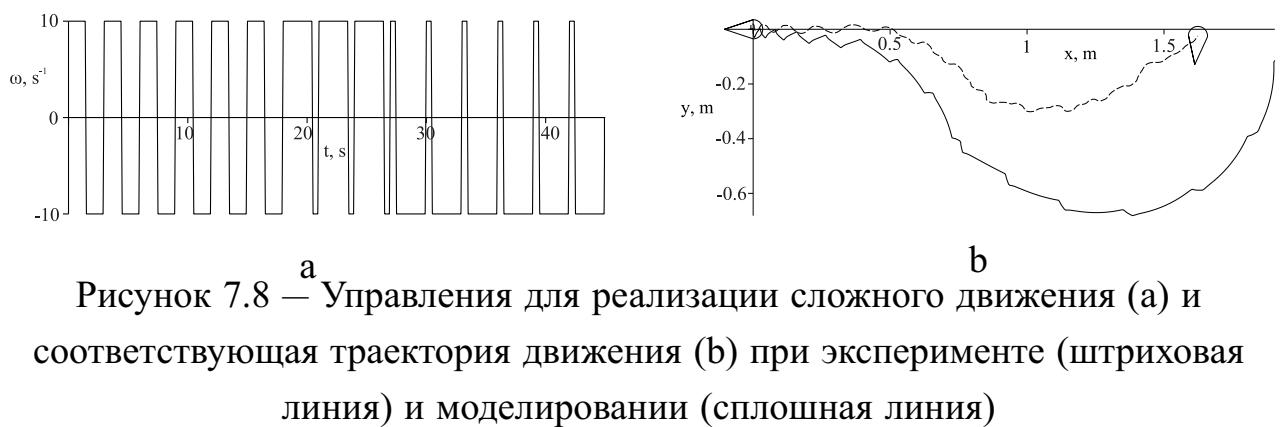


Рисунок 7.8 – Управления для реализации сложного движения (а) и соответствующая траектория движения (б) при эксперименте (штриховая линия) и моделировании (сплошная линия)

Полученные результаты также подтверждают возможность теоретической модели качественно описать движение водного робота, а также возможность формирования управления вдоль сложных криволинейных траектории, разбивая их на характерные участки, для которых можно сформировать базовые управлений – гейты.

7.2.4 Выводы по главе

Одной из причин отклонения результатов численного моделирования от результатов натурных экспериментов является то, что при моделировании для всех серий экспериментов использовались коэффициенты сопротивления и присоединенных масс, рассчитанные на основании экспериментальных данных, полученных при симметричном управляющем воздействии с $T = 1$ с. При других параметрах управления характер движения меняется существенно, что требует уточнения значений данных коэффициентов. Пользуясь экспериментальным подбором коэффициентов для различных гейтов, можно существенно улучшить получаемые результаты.

Еще одной причиной несогласованности теории и эксперимента является не точное совпадение формы углового ускорения в моделировании и при эксперименте. На рис. 7.9 для сравнения приведены аналитические (используемые при моделировании) и экспериментальные графики угловой скорости и углового ускорения ротора при $T = 1$ с. Видно, что графики для моделирования не полностью повторяют реальные зависимости, что приводит к неточностям в расчетах траектории.

Данную причину возможно устраниТЬ при использовании более моментных двигателей, более дорогих и точных в исполнении механических передач, исключающих люфт, а также более точных датчиков обратной связи.

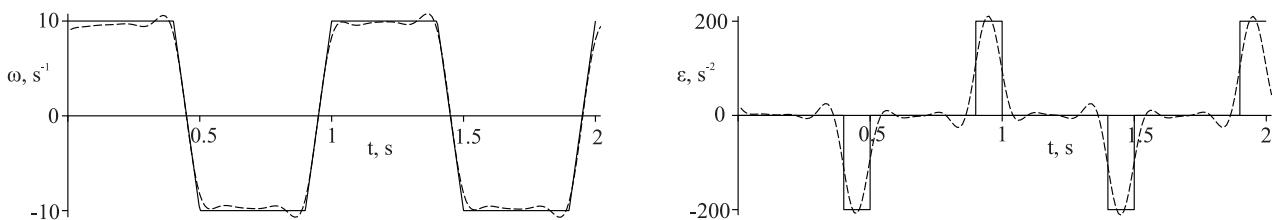


Рисунок 7.9 — Зависимость угловой скорости ротора (а) и углового ускорения ротора (б) от времени при эксперименте (штриховая линия) и моделировании (сплошная линия)

Кроме того, повысить маневренность и управляемость движения водного робота можно добиться при модификации управляющего воздействия, обеспечив на интервалах t_2, t_4 вращение ротора с разными ускорениями после смены направления вращения (см. рисунок 7.10).

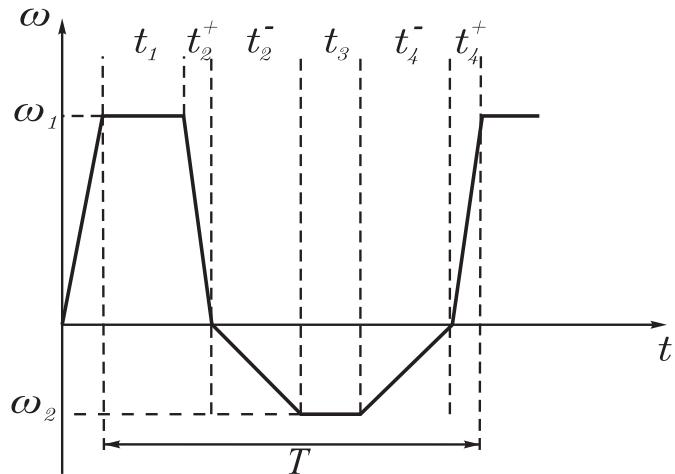


Рисунок 7.10 — Общий вид управляющего воздействия при различных ускорениях разгона и торможения

Заключение

Основные результаты работы 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 синтезирования 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.

И какая-нибудь заключающая фраза.

Последний параграф может включать благодарности. В заключение автор выражает благодарность и большую признательность научному руководителю Иванову И. И. за поддержку, помошь, обсуждение результатов и научное руководство. Также автор благодарит Сидорова А. А. и Петрова Б. Б. за помошь в работе с образцами, Рабиновича В. В. за предоставленные образцы

и обсуждение результатов, Занудягину Г. Г. и авторов шаблона *Russian-Phd-LaTeX-Dissertation-Template* за помощь в оформлении диссертации. Автор также благодарит много разных людей и всех, кто сделал настоящую работу автора возможной.

Список литературы

- [1] Анатолий Игоревич Кленов. — «Динамический синтез и анализ механизма, реализующего движение локомоционной мобильной платформы в жидкости». защищена 08.10.19 : утв. ???.???.?? — дис. док. Москва: ИМАШ РАН, 2019. — 137 с.
- [2] A.I. Klenov и A.A. Kilin. — «Influence of Vortex Structures on the Controlled Motion of an Above-water Screwless Robot». — в: *Regular and Chaotic Dynamics* 21.7-8 (2016), с. 927—938.
- [3] Л. Ю. Волкова и С. Ф. Яцун. — «Управление движением трехмассового робота, перемещающегося в жидкой среде». — в: *Нелинейная динамика* 7.4 (2011), с. 845—857.
- [4] А. В. Борисов. — «Безвинтовой надводный робот». — 153711. — заявитель и патентообладатель - ФГБОУ ВПО "ИжГТУ имени М.Т. Калашникова".
- [5] С. М. Рамоданов и В. А Тененев. — «Движение тела с переменной геометрией масс в безграничной вязкой жидкости». — в: *Нелинейная динамика* 7.3 (2011), с. 635—647.
- [6] Е. В. Ветчинин и В. А. Тененёв. — «Моделирование управления движением в вязкой жидкости тела с переменной геометрией масс». — в: *Компьютерные исследования и моделирование* 3.4 (2011), с. 371—381.
- [7] Е. В. Ветчинин, И. С. Мамаев и В. А. Тененёв. — «Движение тела с переменной геометрией масс в вязкой жидкости». — в: *Нелинейная динамика* 8.4 (2012), с. 815—836.
- [8] Е. В. Ветчинин и А. А. Килин. — «Свободное и управляемое движение в жидкости тела с подвижной внутренней массой при наличии циркуляции вокруг тела». — в: *Докл. АН* 466.3 (2016), с. 293—297.

- [9] А. В. Борисов и И. С. Мамаев. — *Динамика твердого тела*. — М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. — 576 с.
- [10] A. Clebsch. — «Über die Bewegung eines Körpers in einer Flüssigkeit». — в: *Math. Annalen* 3 (1871), с. 238–262.
- [11] В. В. Козлов и С. М. Рамоданов. — «О движении изменяемого тела в идеальной жидкости». — в: *ПММ* 65. Вер. 4 (2001), с. 592–601.
- [12] А. И. Короткин. — *Присоединенные массы судостроительных конструкций*. — СПб. : Мор. Вест, 2007.
- [13] E. V. Vetchanin, I. S. Mamaev и V. A. Tenenev. — «The Self-propulsion of a Body with Moving Internal Masses in a Viscous Fluid». — в: *Regular and Chaotic Dynamics* 18.1-2 (2013), с. 100–117.
- [14] S. M. Ramodanov, V. A. Tenenev и D. V. Treschev. — «Self-propulsion of a Body with Rigid Surface and Variable Coefficient of Lift in a Perfect Fluid». — в: *Regular and Chaotic Dynamics* 17.6 (2012), с. 547–558.