

На правах рукописи



Митин Илья Васильевич

**Разработка и исследование подводных рыбоподобных
роботов с биоморфными движителями на основе
тунниформного типа локомоции**

2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород
2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Научный руководитель, доктор физико-математических наук, доцент,
Казанцев Виктор Борисович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент
Караваяв Юрий Леонидович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Кафедра «Мехатронные системы» профессор,
г. Ижевск

кандидат технических наук, доцент
Борисов Олег Игоревич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Факультет систем управления и робототехники, доцент,
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва.

Защита состоится « 28 » февраля 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета У.2.5.4.16 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный корпус, аудитория 118).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://elib.spbstu.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан « ___ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.2.5.4.16,
кандидат технических наук, доцент



О.В. Кочнева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

За миллионы лет существования в разнообразном и часто враждебном мире гидробионты развили механизмы локомоции, зачастую превосходящие достижения современной океанологии и судостроения. Гидробионты плывут согласно отточенным эволюцией паттернам движения изгибая свои обтекаемые тела что бы использовать различные гидродинамические принципы для своей выгоды. Это позволяет им добиться необычайного ускорения и маневренности при высокой энергоэффективности.

Достоверно установлено, что пойманный на леску желтоперый тунец способен разматывать ее со скоростью не менее 74 км/ч, что позволяет судить о развиваемой рыбой скорости плавания. Рыбы, охотящиеся из засады, такие как щука или мурена не способны к длительному плаванию с большой скоростью, что вынуждает их подстерегать добычу, соответственно число встреч с жертвами у них ограничено. Однако, совершая короткие броски щука может развивать ускорение до 195 м/с^2 (20g), что позволяет ей успешно ловить добычу в 70–80% случаев. Рыбы, соседствующие с хищниками вынуждены развивать необычайную маневренность и ловкость, так они способны изменять направление движения не снижая скорость, при радиусе поворота от 0,1 до 0,3 длины их тела.

Освоение биоморфных движителей потенциально может принести огромную выгоду, однако даже сейчас проведено недостаточно работ по созданию создания рабочих прототипов рыбоподобных движителей, которые могли бы получить широкое применение в подводных аппаратах.

Степень разработанности темы исследования

Подводные рыбоподобные роботы с тунниформным типом движителя являются подмножеством более широкого класса подводных роботов использующих биоморфный тип движений. Подводные биоморфные роботы представляют современное активно развивающееся направление исследований. В качестве биологических прототипов для биоморфных роботов обычно рассматривают рыб с карангиформным и тунниформным типом локомоции (W.M. Megill, M.S. Triantafyllou). Ряд работ посвящен созданию роботов с угревидным типом локомоции (D.Floreano, J.-X. Xu) и со скатообразным типом локомоции (Y. Cao, S. Cinquemani,).

Исследователи так же рассматривают задачу по созданию рыбоподобных роботов, управляемых центральным генератором упорядоченной активности CPG (C. Rossi, Zheng Li, G. O. Koca).

Цели и задачи работы

Целью данной работы является создание подводных рыбоподобных роботов с биоморфными движителями на основе тунниформного типа

локомоции и последующее исследование их динамических характеристик для повышения энергоэффективности.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие ключевые задачи:

- Анализ и синтез механизмов, обеспечивающих биоморфное движение, и разработка конструкции прототипов подводного рыбоподобного робота.
- Создание натуральных образцов робота, разработка печатных плат, электронного оборудования и программного обеспечения для рыбоподобного робота.
- Разработка алгоритма управления движением в жидкости подводного робота на базе предложенной математической модели.
- Разработка методик эксперимента и испытательного стенда для изучения динамических характеристик рыбоподобного робота.
- Изучение динамических характеристик плавания и технических характеристик рыбоподобного робота, определение оптимальных режимов плавания.

Объектом исследования является биоморфный движитель подводного рыбоподобного робота.

Предметом исследования являются методы повышения энергоэффективности подводных рыбоподобных роботов за счёт оптимизации параметров биоморфного движителя воспроизводящего тунниформный тип локомоции.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке оригинальной конструкции робота с биоморфным движителем. Это позволило обогатить существующую научную концепцию биоморфной робототехники новыми разработками и результатами их испытаний. Из важнейших научных результатов можно выделить следующие:

1. Предложен принцип построения нового биоморфного движителя, отличающегося от известных решений применением сервопривода и двух упругих элементов для реализации тунниформного типа локомоции.
2. Предложен метод управления направлением движения подводного робота, основанный на принципах биоморфности.
3. Установлена зависимость между частотой, амплитудой взмахов хвостового плавника и скоростью биоморфного робота.
4. Предложена методика выбора параметров биоморфного плавания для повышения его энергоэффективности.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Использование биоморфных рыбоподобных движителей предлагает несколько потенциальных преимуществ относительно классических движителей таких как гребные винты и водометы.

Высокие рабочие частоты гребных винтов создают в воде множество возмущений. Это порождает акустическое загрязнение и проблему кавитационной эрозии винтов. Биоморфные движители требуют гораздо более низких рабочих частот что позволяет избежать перечисленных выше проблем.

Гребные винты и водометы активно засасывают в себя подводные препятствия и гидробионтов, тогда как биоморфные движители с колебательным принципом работы отталкивают препятствия от своего корпуса, а не запутываются в них.

Основным преимуществом биоморфных движителей по сравнению с традиционными является их потенциальная энергоэффективность. Лабораторные эксперименты показали, что энергоэффективность рыбоподобных движителей может достигать 87%, что значительно выше, чем при использовании небольших гребных винтов 40%. Гребные винты страдают от потерь энергии из-за паразитных завихрений потока воды позади винта. Особенно перспективным видится использование биоморфных движителей для автономных подводных аппаратов за счет ограничения по хранению энергии на борту.

Биоморфная робототехника может имитировать живые объекты не только в части кинематики движений, но и в части управляющих систем. Разработка биоморфных роботов позволяет получить базу для испытаний компактных и энергоэффективных нейроморфных управляющих систем на основе новой ЭКБ (мемристоров и мемристивных систем).

Методология и методы исследования

Экспериментальные исследования проводились в лабораторном бассейне с использованием системы захвата движения. Полученные фото- и видеоматериалы вводились и обрабатывались на персональном компьютере с использованием программных комплексов Python, Matlab, а также DeepLabCut. Программное обеспечение для управляющих роботами микроконтроллеров разрабатывалось на языке программирования Си++.

Положения, выносимые на защиту

1. Принцип построения нового биоморфного движителя, на основе сервопривода и двух упругих элементов, обеспечивающий тунниформный тип локомоции рыбоподобного робота.

2. Метод управления направлением движения подводного робота на основе биоморфного движителя.

3. На основании экспериментальных исследований и численного моделирования установлена зависимость между частотой, амплитудой взмахов хвостового плавника и скоростью биоморфного робота.

4. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие повышение энергоэффективности плавания при использовании предложенных методов выбора параметров движения хвостового плавника.

Степень достоверности полученных результатов

Научная обоснованность и достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается согласованностью результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными исследований кинематики плавания биоморфных роботов. Для проведения экспериментальных исследований использовались современные измерительные комплексы. Достоверность изложенных в диссертационной работе результатов подтверждается сопоставлением с результатами исследований отечественных и зарубежных авторов в данной области, а также научной экспертизой на конференциях и при публикации материалов в рецензируемой научной печати.

Публикации и апробация результатов

Результаты работы опубликованы в журналах: *Biomimetics* (2022), *Interactive Collaborative Robotics* (2022), *Робототехника и техническая кибернетика* (2023, 2024). Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 научных работах, включая 4 статьи в международных журналах и журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК, 4 статьи в трудах конференций, а так же свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основные результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях, включая: *Volga Neuroscience Meeting* (Н. Новгород, 2021, 2023), 74-я Всероссийская с международным участием школа-конференция молодых ученых «Биосистемы: организация, поведение, управление» (Н. Новгород, 2021), XXVI Нижегородская сессия молодых ученых (Н. Новгород, 2021), а также на семинарах кафедры нейротехнологий биологического факультета, Института биологии и биомедицины ННГУ.

Разработка нейроморфных управляющих систем используемых в управлении биоморфным роботом осуществляется в рамках проекта «Мемристивные оксидные наноматериалы для энергонезависимой резистивной памяти и нейроморфных устройств» (Федеральный проект «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок» национального проекта «Наука и университеты», Дополнительное соглашение к Соглашению о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) № 075-03-2022-113/8 от 08.11.2022 г., шифр FSWR-2022-0009 (НИЛ «Лаборатория мемристорной наноэлектроники»), 2022-2024 гг.), руководитель Михайлов А.Н.

Личный вклад автора

Соискателем разработаны прототипы биоморфных роботов, программное обеспечение для управления роботами; проведены натурные эксперименты и обработаны их результаты. В совместных публикациях автор принимал непосредственное участие в постановке, решении задачи и в обсуждении

результатов. Автор играл ключевую роль в получении всех данных и результатов, приведенных в статьях, кроме числового моделирования.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом специальности ВАК 2.5.4. «Роботы, мехатроника и робототехнические системы» по пунктам:

- п.2 Теория и методы создания роботов и мехатронных устройств на основе новых физических эффектов и явлений, принципы и методы их построения для различных условий и сред применения.

- п.4 Математическое и полунатурное моделирование мехатронных и робототехнических систем, включая взаимодействие со средой, анализ их характеристик, оптимизация и синтез по результатам моделирования.

- п.7 Методы экспериментального исследования, создания прототипов и экспериментальных стендов и модульных платформ для разработки роботов, робототехнических и мехатронных систем.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит 144 страницы, включая 67 рисунков, одну таблицу, 165 наименований цитируемой литературы, 8 научных публикаций по теме диссертации (из них 4 статьи в реферируемых изданиях).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность изучаемой проблемы, приводится краткий обзор научной литературы по теме диссертационной работы, формулируется цель и определяется круг решаемых задач, описывается научная новизна и научно-практическая значимость диссертационных исследований.

В первой главе рассматриваются общие принципы плавания рыб и других гидробионтов, а также особенности строения их опорно-двигательной системы. Анализируется кинематика плавания гидробионтов с точки зрения эффективности и приводятся математическое описание параметров плавания. Приводится обзор биологических приспособлений для улучшения эффективности плавания, рассматриваются энергетически выгодные паттерны движения.

Классификация типов локомоции рыб представлена на Рис. 1. Плавание всех рыб можно разделить на два больших типа локомоции, по частям тела, используемым для создания гидродинамической силы.

Локомоция при помощи хвостового плавника Рисунок 1 а) генерирует гидродинамическую силу за счет колебаний тела и хвостового плавника, а локомоция при помощи парных и непарных плавников Рисунок 1 б) генерирует гидродинамическую силу перемещая различные сочетания плавников, кроме хвостового.

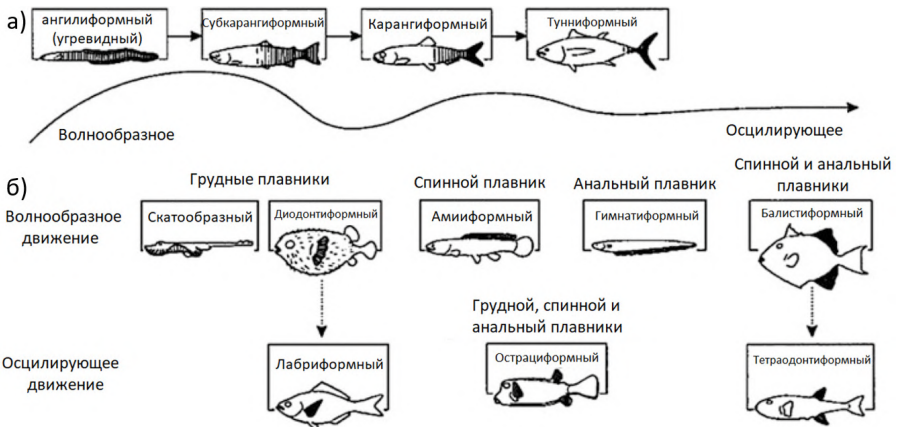


Рисунок 1 – Классификация типов локомоции рыб, цветом выделены части, участвующие в создании гидродинамической силы

Для проектирования биоморфного движителя, в качестве биологического прототипа был выбран тунниформный тип локомоции, названный в честь тунцов (*Thunnus*) характеризующийся тем, что во время движения присутствуют значительные колебания хвостового плавника и относительно небольшими боковыми колебаниями тела.

Высокую эффективность и большую тягу биоморфных и биологических движителей делают возможным параметры расположения вихрей за хвостом. Вихри становятся сильнее по мере увеличения скорости взмахов, но направление их вращения всегда совпадает с необходимым направлением тяги, создавая эффективную струю Рисунок 2.

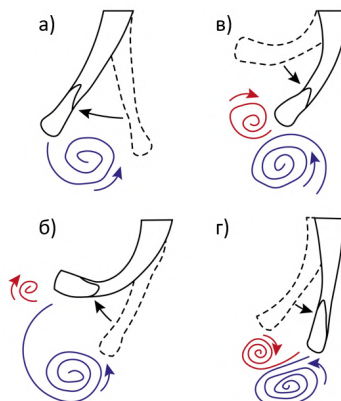


Рисунок 2 – Особенности направления вихрей, создаваемых машущим хвостом

части рыбоподобного робота, а также его биоморфного движителя. В главе приводится внутренняя компоновка робота, устройство его систем и полученные характеристики. При проектировании робота учитывались результаты численного моделирования его гидродинамики.

Разработка биоморфного движителя началась с глубокого изучения существующих наработок по биоморфному плаванию. За последние двадцать лет, в связи с развитием компонентной базы для робототехники, удешевлением и миниатюризацией микроконтроллеров, а также распространению трендов на экологичность и биоморфность по всему миру стали появляться научные группы, ставящие своей целью создание рыбоподобных роботов. В целом были проанализированы конструкции более тридцати рыбоподобных роботов. На рисунке 4 приведена их классификация в зависимости от конструкции и принципов работы.

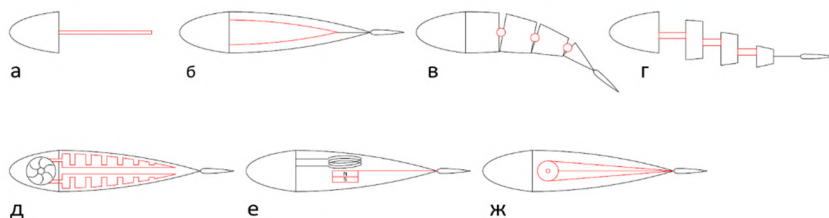


Рисунок 4 – Классификация рыбоподобных роботов в зависимости от конструкции и принципов работы

Существует большое количество рыбоподобных роботов, использующих в качестве движителя пластины из полимерных электроактивных пленок (Рисунок 4 а). Следующий тип роботов (Рисунок 4 б) использует искусственные мышцы на эффекте памяти формы. Достаточно распространенными являются многозвенные рыбоподобные роботы с несколькими приводами (Рисунок 4 в). Весьма эффективный механизм движения используют рыбоподобные роботы с многозвенным или коленчатым валом (Рисунок 4 г). Технические решения из мягкой робототехники были использованы при создании рыбоподобных роботов с гидравлическими приводами (Рисунок 4 д). Желание достичь высокой частоты взмахов хвоста привело к созданию биоморфных роботов с магнитным движителем (Рисунок 4 е). В результате изучения существующих наработок по биоморфному плаванию в качестве основы для создания биоморфного движителя способного реализовать тунниформный тип локомоции была выбрана конструкция, объединяющая одиночный привод и упругие элементы (Рисунок 4 ж). В качестве привода был выбран не двигатель постоянного тока, а сервопривод, что позволило реализовать режимы плавания с различной частотой и амплитудой взмахов хвоста, не внося изменения в конструкцию

двигателя, а только изменяя управляющий сигнал. Использование сервопривода так же позволило использовать биоморфный двигатель для выполнения поворотов при реализации ассиметричного движения. Для точной имитации тунниформного типа локомоции, который обещает снижение энергопотребления в конструкции были применены два упругих элемента. Первый выполнен в виде длинной упругой пластины, образующей «хребет» и изгибаемой тягами, идущими от сервопривода. Второй упругий элемент представляет собой подпружиненный шарнир в месте крепления хвостового плавника. Экспериментально подобранные параметры двух упругих элементов позволили с высокой точностью повторить паттерны движения биологического прототипа. Задача по реализации тунниформного типа локомоции потребовала разработки биоморфного двигателя новой конструкции, а его энергоэффективность была подтверждена дальнейшими испытаниями.

Разработанный биоморфный двигатель располагается в задней части корпуса робота (Рисунок 5). Двигатель включает в себя хвостовой плавник, прикрепленный к гибкой пластине, а также сервопривод, закрепленный на корпусе. По обоим сторонам гибкой пластины (114 мм × 13 мм × 0,4 мм) располагаются тяги, изготовленные из металлических тросиков. При вращении сервопривода тяги попеременно деформируют гибкую пластину изгибая вправо или влево. Сервопривод характеризуется большим крутящим моментом 22,6 кг/см при низкой частоте вращения порядка 1,5 об/мин передача усилия от вала сервопривода к тягам осуществлялась через маховик большого диаметра.

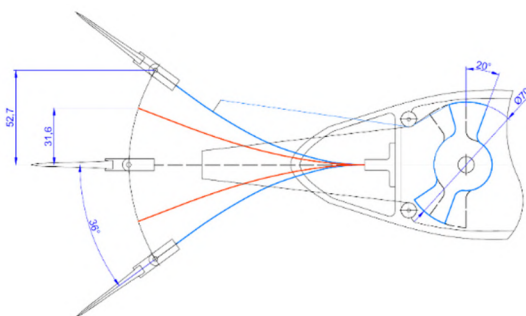


Рисунок 5 – Схема биоморфного двигателя

Применение разъемных соединений позволяет легко заменять как сам хвостовой плавник, так и упругие элементы подпружиненного шарнира, что позволяет подбирать параметры деталей для наиболее точной имитации тунниформного плавания. Данный биоморфный двигатель, способен

совершать колебательные движения хвоста с частотой 6,8 Гц и амплитудой 52,7 мм, не учитывая габариты хвостового плавника, которые могут меняться.

Корпус рыбоподобного робота проектировался на основе биологического прототипа – желтоперого тунца. По данным фотометрии гидробионта строилась первоначальная 3D-модель, которая затем корректировалась под размеры и компоновку необходимого оборудования.

Проектирование корпуса рыбоподобного робота и его внутренней компоновки строилось на двух основных принципах.

Во-первых, уменьшение габаритных размеров робота. Это было необходимо поскольку основной задачей робота является исследование на его базе гидродинамических характеристик биоморфного движителя. Располагаемый испытательный бассейн ограничен габаритами 4000x2000x800 мм, в таких условиях робот должен относительно свободно маневрировать и выходить на крейсерскую скорость плавания.

Во-вторых, отказ от герметичного корпуса с герметизацией выходящих из него ттяг, в пользу заполняемого водой негерметичного корпуса. Это позволило значительно снизить сухую массу робота за счет отсутствия в конструкции балласта, призванного компенсировать излишнюю плавучесть. Так же использование заполняемого водой корпуса повышает технологичность его изготовления, поскольку исчезает необходимость в сосудах, работающих под внешним давлением.

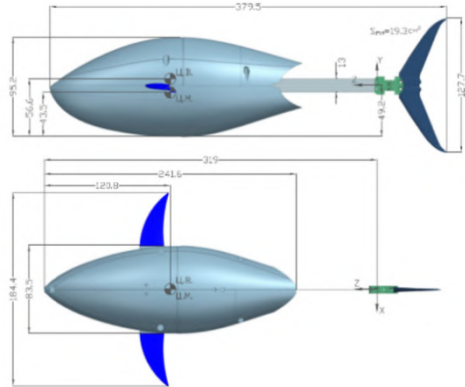


Рисунок 6 – Рыбоподобный робот, массо-габаритные характеристики

Сухая масса разработанного робота составила 780 г Рисунок 6. Момент инерции составил $J_x = 735 \text{ кг} \cdot \text{мм}^2$ $J_y = 2536 \text{ кг} \cdot \text{мм}^2$ $J_z = 2446 \text{ кг} \cdot \text{мм}^2$.

Метод управления направлением движения подводного робота на основе биоморфных приводов заключается в следующем: ориентация рыбоподобного робота относительно нормальной системы координат представлена на Рисунке 7. Робот может совершать пять типов движений: поступательное

движение, повороты относительно оси рысканья и повороты относительно оси тангажа. При этом осуществление поворотов по рысканью и тангажу возможно только одновременно с поступательным движением.

Изменение угла рысканья осуществляется путем смещения нулевой точки колебаний хвостового плавника в левую или правую зону Рисунок 7 б, в.

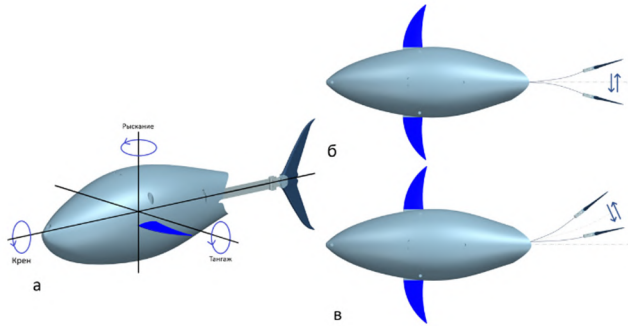


Рисунок 7 – Маневрирование рыбоподобного робота: а) ориентация б) прямолинейное движение в) изменение угла рысканья

Режимы разворотов обрабатывались в испытательном бассейне Рисунок 8. Были получены следующие данные по реализации разворотов. Минимальный радиус поворота составил 0,28 м (0,74 ДТ) при скорости плавания 0,1 м/с (0,26 ДТ/с), разворот на 360 градусов занял 17 с. Измерения наибольшей скорости поворота осложнялись габаритами испытательного бассейна. При скорости плавания 0,58 м/с (1,52 ДТ/с) рыбоподобный робот разворачивался с радиусом 1,38 м (3,63 ДТ), разворот на 360 градусов занял 15 с. Полученное значение минимального радиуса поворота 0,74 ДТ, является хорошим показателем для рыбоподобных роботов (0,63 ДТ - 2 ДТ).

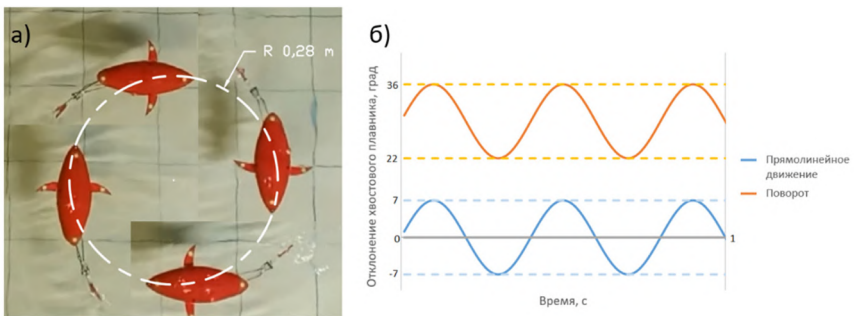


Рисунок 8 – Режимы разворотов: а) траектория рыбоподобного робота, разворачивающегося с минимальным радиусом, б) график колебаний хвостового плавника во время разворота

Изменение угла тангажа достигается путем изменения угла наклона грудных плавников Рисунок 9. При поступательном движении робота со скоростью U , угол между направлением поступательного движения и грудным плавником равен θ . При движении в стоячей воде сила, действующая на один грудной плавник, F , пропорциональна квадрату скорости грудного плавника относительно воды. При θ отличном от нуля, F имеет вертикальную составляющую F_y , которая создает крутящий момент M , изменяющий угол тангажа робота.

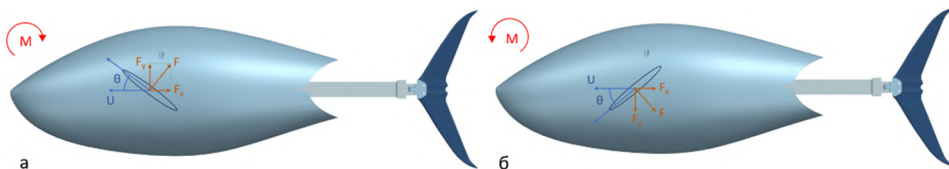


Рисунок 9 – Изменение угла тангажа: а) – всплытие б) – погружение

Для изменения угла отклонения грудных плавников (Рисунок 10) используется компактный маломощный сервопривод, усилие от которого передается при помощи цилиндрической зубчатой передачи с передаточным числом 2. Общая площадь рабочей поверхности грудных плавников 1566 мм². Грудные плавники стабилизируют плавание рыбоподобного робота в случае раскачивания вокруг оси крена.

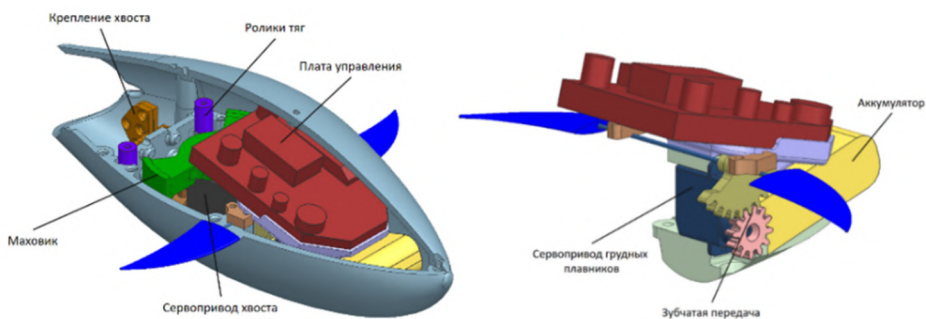


Рисунок 10 – Внутренняя компоновка робота

Взаимодействие оператора с роботом реализуется в порядке, представленном на рисунке 11. Беспроводная связь с роботом реализуется с использованием радиопередатчика, работающего на частоте 433 МГц.

Для управления роботом была создана плата оригинальной конструкции (Рисунок 12). На плате располагаются: плата микроконтроллера ATmega32u4; силовая часть, включающая импульсные понижающие преобразователи

напряжения LM2596S и HW-083; модуль приемника 4,33 МГц; разъем питания и сигнальный разъем, а также светодиоды и ультразвуковой зуммер.

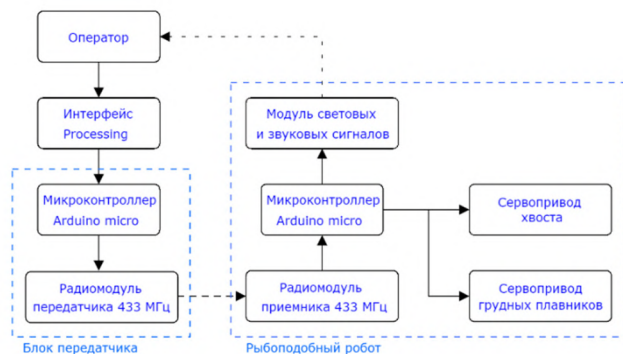


Рисунок 11 – Алгоритм управления роботом

К плате подключены сервопривод хвостового плавника, сервопривод грудных плавников и аккумулятор. В качестве сервопривода хвоста используется CLS6027HV (скоростью вращения 91 об/мин, крутящий момент 27,4 кг·см) питающийся напряжением 6В. В качестве сервопривода грудных плавников используется ES08МАП (скорость вращения 100 об/мин, крутящий момент 1,8 кг·см) питающийся напряжением 5В. Робот питается от литий-полимерного аккумулятора с напряжением 7,4 В и емкостью 900 мАч.

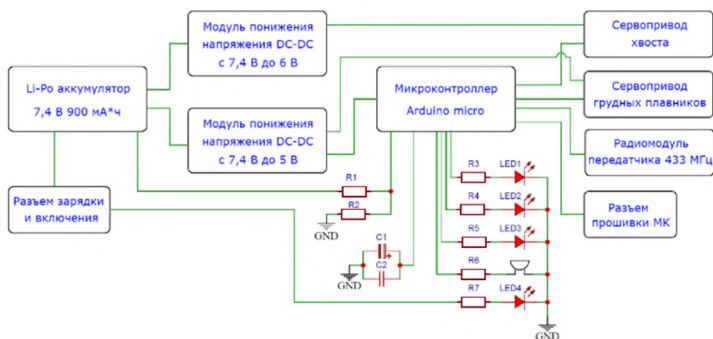


Рисунок 12 – Схема электрическая функциональная

Габариты платы управления после герметизации составили 87x54,7x19 мм при массе 87 г. Энергопотребление в режиме покоя составило 38 мА, а при плавании с максимальной скоростью 980 мА.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям кинематики плавания рыбоподобного робота. В третьей главе также представлены полученные кинематические характеристики робота, оптимальные с точки зрения энергоэффективности режимы движения и приводятся выводы о характере зависимостей между параметрами кинематики биоморфного движителя и скоростными характеристиками плавания.

Для исследования кинематики плавания рыбоподобных роботов был разработан экспериментальный стенд, показанный на Рисунке 13.

Были проведены исследования по определению наиболее эффективных режимов плавания рыбоподобного робота. Скорость движения ограничивалась максимальной скоростью сервопривода и инерцией хвостовой части. Для основной части экспериментов полученный диапазон частот взмахов хвоста разделили на три режима: 3,4 Гц, 2,5 Гц и 1,9 Гц. Диапазон амплитуд 30–105 мм был разбит на большое количество точек для дальнейшего анализа зависимости эффективности плавания от амплитуды биений хвоста.

Первая серия экспериментов включала запуски рыбоподобного робота на 44 режимах, характеризующихся различными амплитудами и частотами взмахов хвоста. Каждая итерация запуска проходила в следующей последовательности: выбирались значения амплитуды и скорости для сервопривода, робот помещался на стартовую позицию, подавалась команда начать движение, после чего робот переходил в свободное плавание. Робот двигался над координатной сеткой с ячейками 200·200 мм. Плавание робота записывалось на камеру. Обработка полученных видеозаписей проводилась следующим образом - по расстоянию и времени его прохождения определялась скорость поступательного движения робота. для каждого сочетания амплитуды и скорости движения сервопривода проводилось по десять повторений заплывов.

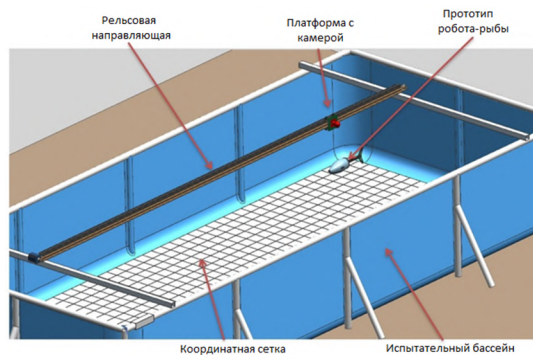


Рисунок 13 – Испытательный стенд для определения кинематических характеристик рыбоподобного робота

На Рисунке 14 представлены результаты фотометрического сравнения рыбоподобного робота и настоящего тунца. Как и у настоящего тунца, у рыбоподобного робота может быть точка перегиба средней линии в месте крепления хвостового плавника. За этот перегиб отвечает подпружиненный шарнир, соединяющий хвост с эластичной пластиной.

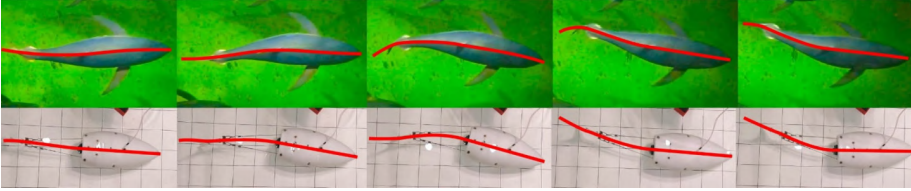


Рисунок 14 – Сравнение паттернов движения рыбоподобного робота с биологическим прототипом

Полученные значения скоростей плавания на режимах с различными значениями амплитуды и частоты взмахов хвоста представлены на Рисунке 14. Зависимости скорости от амплитуды взмахов имеют немонотонную форму, при этом группы результатов для трех частот 1,9 Гц, 2,5 Гц, 3,4 Гц имеют качественно схожие профили, соответствующие увеличению скорости плавания по мере увеличения частоты взмахов хвоста. Каждая из трех групп данных имеет два линейных тренда, с разным углом наклона. Линейная регрессия: $Speed = a \cdot Amplitude + b$. При малых значениях амплитуды взмахов коэффициент a лежит в диапазоне $[0,005; 0,008]$, а при больших значениях амплитуды коэффициент a составил $a \approx 0,001$. Перелом линий регрессии для всех трех частот происходит при амплитуде взмахов порядка 50 мм.

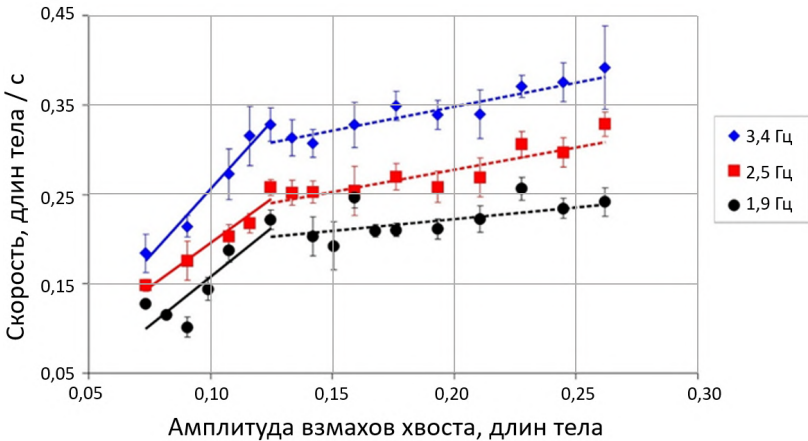


Рисунок 15 – Зависимость скорости робота от амплитуды взмахов хвоста

Была выявлена значительная чувствительность скорости плавания к конкретным условиям эксперимента. Большой разброс значений можно объяснить влиянием сигнального кабеля, полностью нивелировать которое не получилось.

количественная оценка энергоэффективности проводилась по значению стоимости транспорта (далее COT). COT , является мерой энергии необходимой для перемещения единичной массы с единичной скоростью:

$$COT = \frac{P}{v \cdot m},$$

где P (Вт) – общая электрическая мощность, потребляемая двигателем, v (м/с) – скорость плавания, а m (кг) – масса робота (0,780 кг). COT имеет единицу измерения Дж кг⁻¹ м⁻¹.

Далее была рассмотрена зависимость стоимости транспорта от амплитуды и частоты взмахов хвоста (Рисунок 16). Для трех исследуемых частот минимум COT наблюдается в зоне перелома линии регрессии скорости. На основании анализов графика скорости плавания и стоимости транспорта можно сделать вывод, что скорость рыбоподобного робота сильно зависит от амплитуды взмахов при их значении менее 50 мм, при больших значениях скорость увеличивается незначительно, с большим увеличением COT .

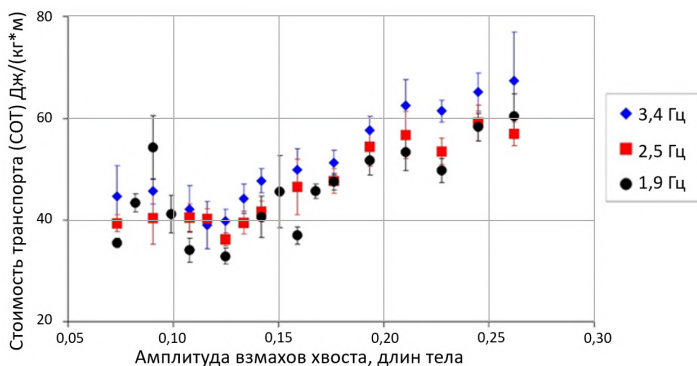


Рисунок 16 – Зависимость COT от амплитуды взмахов хвоста

Более впечатляющим является представление зависимости COT от скорости движения робота, показанное на Рисунке 17. Для частот 2,5 Гц и 3,4 Гц существует пороговая скорость, ниже которой плавание является эффективным, а при ее превышении энергозатраты значительно растут.

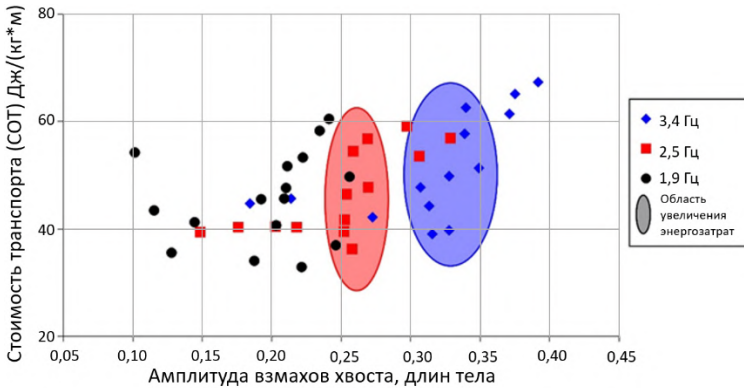


Рисунок 17 – Сводная характеристика движения робота, отмеченные области иллюстрируют пороговую скорость, выше которой увеличение скорости движения является энергетически затратным

Резюмируя результаты первой серии экспериментов, увеличение скорости плавания рыбоподобного робота, наряду с уменьшением энергозатрат характерно для режимов с высокой частотой взмахов при достаточно малой их амплитуде. При увеличении амплитуды взмахов до значений, превышающих 50 мм возникают паразитные раскачивания корпуса рыбоподобного робота вокруг оси крена.

Следующим этапом исследования гидродинамики рыбоподобного робота стало более детальное определение зависимости скорости поступательного движения от частоты взмахов хвоста при постоянной амплитуде. Конструкция робота была доработана путем исключения сигнальных проводов, которые оказывали воздействие на скорость и траекторию движения. Для облегчения работы с видеоданными и увеличения количества информации было принято решение использовать технологию компьютерного зрения Рисунок 18.

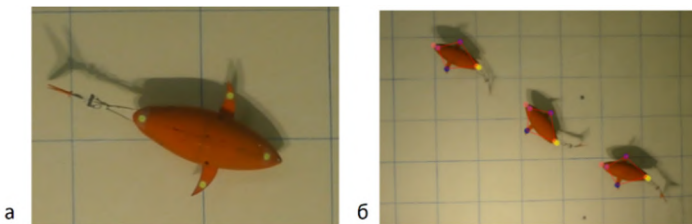


Рисунок 18 – Оцифровка движений робота

Для машинной обработки полученных видеоматериалов применялся программный пакет с открытым исходным кодом DeepLabCut. На основе нескольких видео плавания робота была обучена модель глубокого обучения,

которая отслеживала контрастные маркеры на корпусе робота и выдавала их координаты в табличном виде для каждого кадра.

После этого строилась предварительная траектория геометрического центра робота. Для фильтрации выпадающих значений строилась функция тренда – полином четвертой степени, и исключались значения, относительное отклонение которых от функции тренда было больше 2%.

Зная координаты геометрического центра робота в пикселях и время по номеру кадра данные значения переводились в координаты в миллиметрах по размеченной на дне бассейна координатной сетке и время в секундах, по количеству кадров в секунду. Затем зная приращение координат за определенный промежуток времени определялась скорость движения робота Рисунок 19.

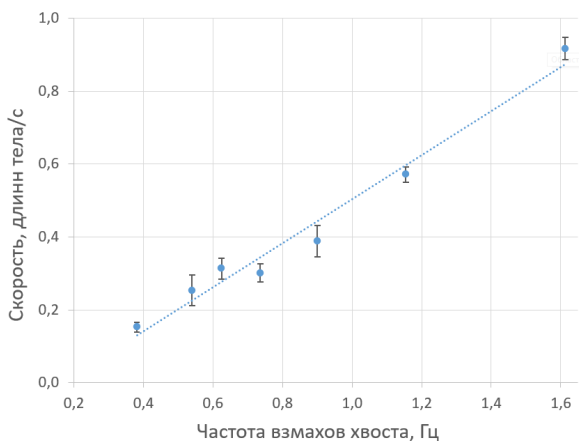


Рисунок 19 – Зависимость скорости плавания робота от частоты взмахов хвоста

Полученная зависимость между скоростью плавания рыбоподобного робота и частотой взмахов хвоста по своему характеру схожа с данными, полученными для других рыбоподобных роботов отличающейся конструкции. Можно сделать вывод о том, что связь скорости и частоты для тунниформного плавания является частным случаем общей зависимости для рыбоподобного плавания, отличаясь при этом по количественным показателям. В диапазоне малых частот взмахов хвоста, для упрощения приблизительной оценки скорости плавания считаю допустимым использовать линейную зависимость.

Энергопотребление сервопривода в документации не указано, поэтому для его оценки был проведен ряд замеров энергопотребления сервопривода рисунок 20.

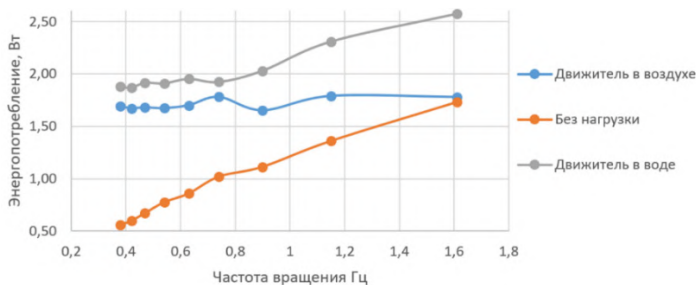


Рисунок 20 – Энергопотребление сервопривода хвоста

Максимальная скорость рыбоподобного робота составляла около 1,6 длины тела в секунду (ДТ/с), что достигалось при частоте биений хвоста 7,6 Гц и амплитуде отклонения хвоста 37,5 мм. Полученная максимальная скорость находится в верхней части диапазона 0,58–2,15 ДТ/с, показываемого другими рыбоподобными роботами.

Была проведена серия экспериментов по исследованию зависимости кинематики робота от динамических параметров двигательной установки. Было обнаружено, что скорость робота увеличивалась по мере увеличения частоты колебаний хвостового плавника. Также было выявлено, что для фиксированных частот существует интервал энергетически предпочтительных скоростей движения вплоть до пороговой скорости. Этот вывод качественно согласовывается с данными *COT*-исследований на живых тунцах.

Исходя из полученной зависимости скорости плавания от частоты взмахов хвоста конструкция двигателя была доработана путем увеличения диаметра маховика передающего усилие от выходного вала сервопривода к тягам хвоста. Увеличение диаметра маховика с $\varnothing 56$ мм до $\varnothing 70$ мм за счет сокращения угла поворота необходимого для получения требуемого смещения тяги позволило увеличить частоту взмахов на 31% (при неизменной амплитуде взмахов) что позволило увеличить скорость плавания на 48% фактически без увеличения затрат энергии. Полученные данные по зависимости энергоэффективности от частоты и амплитуды взмахов хвоста позволили предложить методику снижения энергозатрат на плавание. Кратко ее можно свести к выбору наибольшей доступной частоты взмахов при условии, что амплитуда не снижается более минимального эффективного значения. Так увеличение амплитуды взмахов с 0,077 до 0,122 длин тела позволяет увеличить дальность действия робота на 19%, а увеличение частоты взмахов с 0,5 Гц до 1,6 Гц позволяет увеличить дальность действия робота в 2,7 раза за счет снижения энергозатрат на плавание.

Энергоэффективность плавания живого тунца лежит в интервале 1–7 Дж·кг⁻¹·м⁻¹ в зависимости от скорости плавания Рисунок 21. Минимальное значение для представленного робота составило 6,22 Дж·кг⁻¹·м⁻¹ для частоты 7,6 Гц и скорости плавания 1,6 ДТ/с. Значение стоимости транспорта для

биоморфных роботов лежит в диапазоне $4,06\text{--}15,0 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ а для торпедообразных АНПА с гребным винтом $14,25 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ для сверхмалых (5 кг EcoSUBu5) и $2,86 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ для малых (30 кг Iver 2). Таким образом энергоэффективность разработанного робота можно сравнить с лучшей половиной биоморфных роботов, она сопоставима с биологическим прототипом и выше, чем у АНПА с винтовыми двигателями сопоставимых размеров. Можно с уверенностью говорить о перспективе дальнейшего снижения стоимости транспорта, поскольку последние испытания показали избыточность крутящего момента примененного в роботе сервопривода.

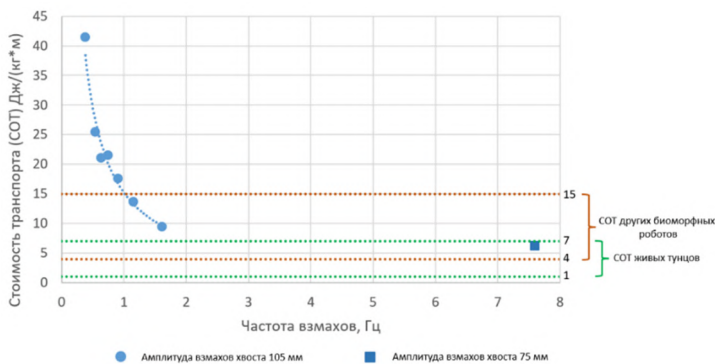


Рисунок 21 – Зависимость стоимости транспорта от частоты взмахов хвоста

Отмечу, что в данной работе изучалась зависимость эффективности плавания робота как от амплитуды, так и от частоты взмахов, в то время как для других подобных работ в большинстве своем характерно исследование только зависимости скорости плавания от частоты взмахов хвостом. Установлено, что для спроектированного биоморфного двигателя (при постоянной частоте взмахов хвоста) увеличение амплитуды колебаний приводит к увеличению скорости плавания только для определенного порога. Дальнейшее увеличение амплитуды колебаний приводит к незначительному увеличению скорости плавания, при значительном увеличении энергозатрат на работу двигателя. Объяснением этому может являться паразитное раскачивание корпуса робота вокруг оси крена возникающее при большой величине амплитуды взмахов хвоста.

Установлено, что для исследуемых частот взмахов хвоста существует интервал скоростей плавания, в которых движение является энергоэффективным. Возможно движение на более высокой скорости; однако он требует больше энергии. При выборе параметров работы биоморфного двигателя в ситуациях, когда необходимо увеличить скорость плавания рекомендуется в первую очередь наращивать частоту колебаний хвостового плавника, а не амплитуду его взмахов. Эти выводы качественно согласуются с

результатами численного моделирования тунниформного плавания. В части дальнейшего развития исследований планируется включить в системы управления колебаниями хвоста адаптивную обратную связь, которая будет компенсировать непоступательные колебания и динамически переходить к оптимальному режиму плавания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении приведены краткие выводы и сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Разработан экспериментальный образец подводного рыбоподобного робота оригинальной конструкции с биоморфным движителем. Учтены требования беспроводной подводной связи с роботом, спроектированы системы маневрирования робота в 3д пространстве. Разработана система управления роботом на основе биоморфного движителя.

Было проведено сравнение паттернов плавания робота и биологического прототипа. По результатам можно сделать вывод о том, что для робота характерен тунниформный тип локомоции.

Было обнаружено, что оптимальный режим плавания, при котором энергозатраты минимальны, а скорость максимальна наблюдается при высокой частоте взмахов хвоста и достаточно малой амплитуде (7,6 Гц 37,5 мм).

Результаты исследований могут способствовать развитию теории биоморфного плавания и быть использованы при создании рабочих прототипов биоморфных рыбоподобных движителей, которые могли бы получить широкое применение в подводных и надводных судах.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Щур Н.А. Экспериментальное исследование и численное моделирование гидродинамики рыбоподобного подводного робота / Н.А. Щур, И.В. Митин, Р.А. Коротаев, В.И. Миронов, В.Б. Казанцев // Робототехника и техническая кибернетика – 2023 – Т. 11. – № 1 – С. 40-44.

2. Митин И.В. Особенности конструкции и управления подводного биоморфного робота тунниформного типа / И.В. Митин, С.А. Любов, Н.А. Щур, А.В. Попов, В.Б. Казанцев // Робототехника и техническая кибернетика – 2024 – Т. 12. – № 1 – С. 71-80.

Публикации в изданиях, входящих в Web of Science/Scopus:

3. Mitin I. Modeling Biomorphic Robotic Fish Swimming: Simulations and Experiments / I. Mitin, R. Korotaev, N. Tschur, I. Kastalskiy, S. Gordleeva, S. Lobov & V. Kazantsev // Interactive Collaborative Robotics – 2022 – No. 13719 – P. 189–198.

4. Mitin I. Bioinspired Propulsion System for a Thunniform Robotic Fish / I. Mitin, R. Korotaev, A. Ermolaev, V. Mironov, S. Lobov, V. Kazantsev // *Biomimetics* – 2022 – Vol. 7 – No. 4 – P. 215.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

5. Митин И.В. «Программа управления рыбоподобным роботом с биоморфным двигателем на основе тунниформного принципа локомоции», свидетельство о регистрации программы ЭВМ №2024663204 от 05.06.2024.

Материалы трудов конференций и публикации РИНЦ:

6. Mitin I.V. Development of the bioinspired propulsion system for a robotic fish / I.V. Mitin, R.A. Korotaev, V.I. Mironov, S.A.Lobov, V.B. Kazantsev // *Genes & Cells* – 2023 – Vol. 18 – No. 4 – P. 870-873.

7. Митин И.В. Разработка и вычислительное моделирование биоморфного двигателя рыбоподобного робота / И.В. Митин, Р.А. Коротаев, А. А. Ермолаев, В.Б. Казанцев // XXVI Нижегородская сессия молодых ученых – 2021 – Н. Новгород, Россия. С. 29-31.

8. Митин И.В. Разработка биоморфного двигателя моделирующего движение рыб по типу осцилляций с нарастающей амплитудой / И.В. Митин, А.А. Ермолаев, Р.А. Коротаев, В.Б. Казанцев // Биосистемы: организация, поведение, управление»: 74-я Всероссийская с международным участием школа-конференция молодых ученых – 2021 – Н. Новгород, Россия. С. 146.

9. Коротаев Р.А. Вычислительное моделирование биоморфного двигателя рыбоподобного робота / Р.А. Коротаев, И.В. Митин, А.А. Ермолаев, В.Б. Казанцев // Биосистемы: организация, поведение, управление»: 74-я Всероссийская с международным участием школа-конференция молодых ученых – 2021 – Н. Новгород, Россия С. 117.