

Проектирование рыбоподобного биоморфного ДВИЖИТЕЛЯ

Д. С. Горюнов¹, Т. И. Каримов¹, А. И. Каримов¹, В. Г. Рыбин², Г. Ю. Колев²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

²Молодежный научно-исследовательский институт Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
vgrybin@etu.ru

Аннотация. Одной из важнейших направлений робототехники является поиск новых решений по созданию биоморфных роботов. Эта статья посвящена проектированию движителя для подводного робота в форм-факторе рыбы, основанного на принципах мягкой робототехники. Биомиметический робот разработан с использованием гибкого туловища и колеблющегося хвоста, управление в котором осуществляется за счет двигателя постоянного тока, оптимизированного по скорости за счет численных и экспериментальных вычислений, и сервомотора, позволяющего задавать направление движения. Применение двигателя постоянного тока для привода робота снижает потери по сравнению с другими колебательными двигательными установками, которые приводятся в движение одним или несколькими серводвигателями.

Ключевые слова: Мягкая робототехника; энергоэффективность; проектирование САПР; двигатель «рыбий хвост»; колебательный двигатель

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведутся активные попытки разработки биомиметических роботов. Роботы, основанные на таких принципах, призваны воспроизвести передвижения живых существ в природе [1]. Рыбоподобные плавающие роботы представляются наиболее простыми кандидатами для воспроизведения биологической механики движения в водной среде с соблюдением принципов ее управления и навигации [2].

Разработка биомиметических подводных роботов – перспективное направление современной физиологии, нейронауки, нелинейной физики и техники [3]. Повышенный интерес к подобным роботизированным системам обусловлен тем, что стандартные приводы представляют собой жесткие устройства, потребляющие значительное количество энергии, добавляющие массу, инерцию и трение в механическую систему. Так же пропеллерные системы обладают низким КПД [4]. Такие системы создают высокие зашумления в водной среде, чем могут причинить вред подводной фауне и флоре [5, 6]. Минимальное воздействие на морскую среду является важным требованием при проектировании подводных аппаратов для проведения наблюдений за морской флорой и фауной, исследований моря [7, 8]. Главной задачей при проектировании подводных биомиметических роботов является обеспечение достаточных скоростных характеристик, управляемости и энергоэффективности [9]. В отличие от настоящих рыб, которые используют особенности своего

мышечного строения для быстрого плавания и управления, рыбоподобным роботам приходится использовать комбинацию из нескольких двигателей.

На данный момент в литературе описано несколько решений в области проектирования и управления хвостом рыбоподобных роботизированных систем [1, 7, 9, 10]. Один из первых робот-миметик тунца, RoboTuna, был построен в Массачусетском технологическом институте [11, 12]. В данных работах автор описывает особенности механики биоинспирированных подводных роботов и приводит несколько примеров проектирования роботов-миметиков. Наиболее популярный подход – это применение тросовых приводов, передающих колебания на хвост рыбы. В этой статье было принято решение выбрать именно данный подход.

II. РАЗРАБАТЫВАЕМАЯ СИСТЕМА

A. Принцип работы

Описываемая в данной работе рыбоподобная роботизированная платформа принимает команды управления от оператора через кабель. Движение робота осуществляется за счет передачи поступательных движений с DC-мотора на хвост рыбы через гибкие тяги, поворот в одном из прототипов осуществляется за счет натяжения одной из тяг сервомотором. На текущем этапе проектирования производится сбор экспериментальных данных для разрабатываемой роботизированной платформы с целью предварительной оценки эффективности, принятия решений о доработке конструкции и создания алгоритмов для работы робота в автономном режиме.

B. Общая конструкция

На рисунках ниже представлена компоновка роботизированной рыбы. Большинство частей корпуса при прототипировании выполнены из PETG пластика с применением аддитивных технологий. В ходе проектирования системы были разработаны два различных прототипа хвостов. Модели каждого из прототипов представлены на рис. 1 и 2.

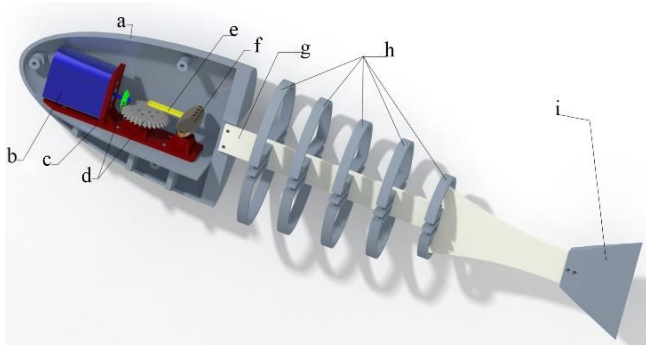


Рис. 1. Прототип с применением несущей конструкции для хвоста

Корпус головы робота-рыбы (а) состоит из двух частей, которые соединяются с помощью винтов и герметизируются. Электромотор 6-26.5V (б) приводит в движение хвост рыбы. Подставка под вставные детали (шестеренки и движитель хвоста) (в) для вращения деталей вставляются подшипники, крепится к порусу детали «с» с помощью винтов.

Ведомые и ведущие шестеренки (с) имеют по 10 и 30 зубьев соответственно (передаточное число равно 3). Изготовление шестеренок происходило с использованием послойной печати на высокоточном фотополимерном принтере. Тяга для передачи момента (е) на хвост рыбы может быть установлена в разные позиции на элементах (д) и (ф) для настройки амплитуды колебаний.

Позвоночник роборыбы (г), был вырезан из полиуретана, это обеспечивает упругость при сгибании и позволяет осуществлять волновые движения. Крепится деталь с помощью винтов к детали (а).

Ребра роборыбы (h), печатаются на 3д принтере, потом обтягиваются латексом для создания обтекаемости, крепятся к позвоночнику, детали «г» с помощью винтов. Последняя деталь имеет дополнительные отверстия для крепления тросов от детали «б», для создания волнового движения. Хвост роборыбы, крепится к позвоннику с помощью винтов. Детали «h» и «i» выполнены из пластика.

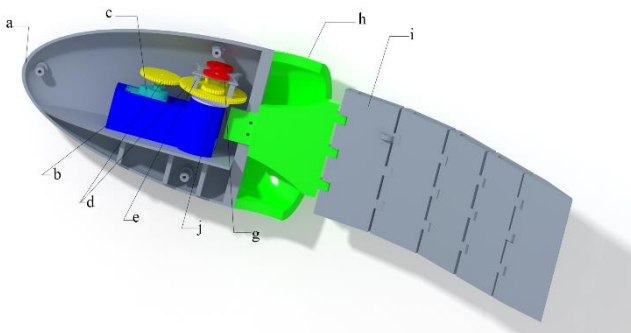


Рис. 2. Прототип с применением многосегментного хвоста

Корпус второго прототипа головы роборыбы (а), состоит из двух частей, которые соединяются с помощью винтов и герметизируются. Корпус для моторов (б), крепится к детали «а» с помощью винтов, деталь выполнена из пластика. Сервомотор mg90s (с) крепится к детали «б» с помощью винтов. Ведомые и ведущие шестеренки (д) обеспечивают передачу вращающих моментов, угол поворота и вращение

хвоста. Нижние шестеренки управляются за счет сервомотора, верхние с помощью электромотора находящегося под ними, передаточное число верхних шестеренок равняется 2.8. Шестеренки для второго прототипа также печатаются на фотополимерном принтере. Детали для крепления верхних шестерен (е) и дисков движителей (г), крепятся с помощью винтов, изготавливаются из пластика. Поворотный круг (j), обеспечивает корректное вращение шестереней за счет подшипника между кругом и деталью «б». Круги движители, приводят в движение с помощью тросов хвост роборыбы, первую деталь «i». Вставка для крепления хвоста (h), детали «i» и головы, детали «а», крепится с помощью винтов. Детали хвоста роборыбы печатаются отдельно и крепятся друг с другом с помощью прутков, вдоль деталей вставляется упругий материал, обеспечивающий волновое движение. Для регулирования угла отклонения каждой детали от другой при печати настраивается фаска с нужным углом для сгибания.

III. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОТОТИПОВ

Оба прототипа, представленные в статье, используют одинаковые электромоторы. Прототипы отличаются размерами, передаточным соотношением между оборотами и числом колебаний хвоста, а также типом хвостового плавника. На рис. 3 представлено приводное устройство без функции поворота (ПУ1). Данный тип был применен в прототипе 1 и обладает малым весом и габаритами для проведения испытаний на скорость и тягу на прямой.

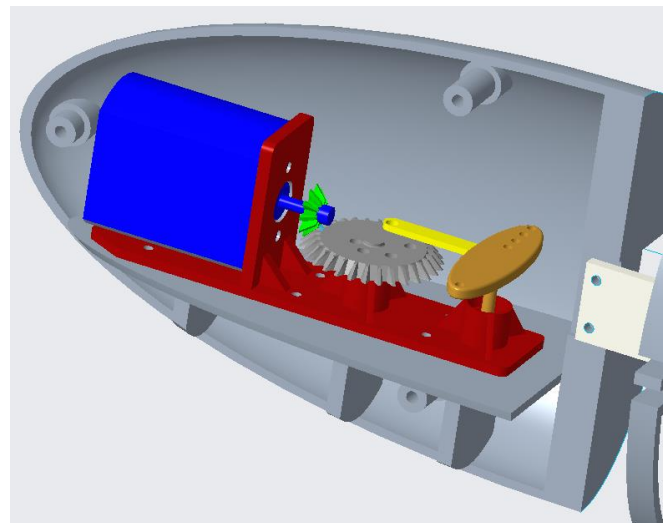


Рис. 3. Приводное устройство без функции поворота

На рис. 4 представлено приводное устройство с функцией поворота. Приводное устройство состоит из комбинации двигателя постоянного тока и серводвигателя. Аналогично первому прототипу, система шестеренок обеспечивает понижение оборотов двигателя и превращение вращательного движения в поступательное. Серводвигатель за счет натяжения одной из тяг управляет отклонением хвоста от центральной осевой линии.

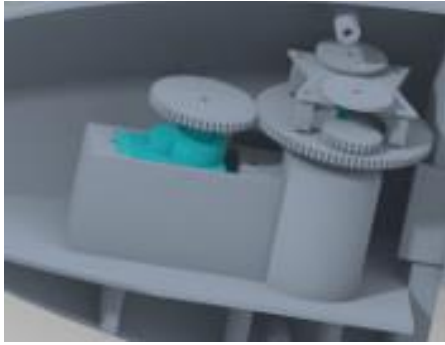


Рис. 4. Приводное устройство с функцией поворота

На рис. 5а, б представлено сравнение габаритных размеров разработанных прототипов. Конструкция обоих прототипов предусматривает возможность замены комбинаций приводящего устройства и хвоста.

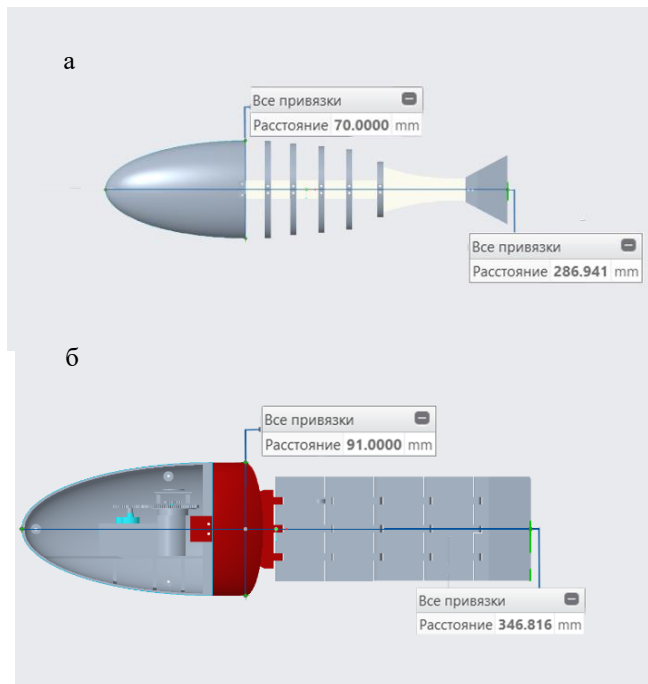


Рис. 5. Габаритные характеристики прототипов

В ходе расчетов были подобраны следующие передаточные соотношения между вращением двигателя и частотой колебания хвоста:

- Передаточное отношение ПУ1 – 3:1
- Передаточное отношение ПУ2 – 26:9

Такая небольшая разница в передаточном соотношении обусловлена тем, что, даже при напряжении близком к максимальному, обороты двигателя под нагрузкой будут значительно меньше номинальных.

Прототипы, собранные для испытаний, представлены на рис. 6а, б.



Рис. 6. Собранные прототипы

Итоговый вес готовых прототипов:

- Вес прототипа (а) с несущей конструкцией хвоста составляет 154 грамма
- Вес прототипа (б) с многосегментным хвостом составляет 120 грамм

А. Характеристики используемых электрических компонентов

На рис. 7 представлена ВАХ электромотора, пик его эффективности достигается при значении тока равном 0,3 ампера и числе оборотов 16000 оборотов в минуту, что позволяет добиться максимальной эффективности крутящего момента.

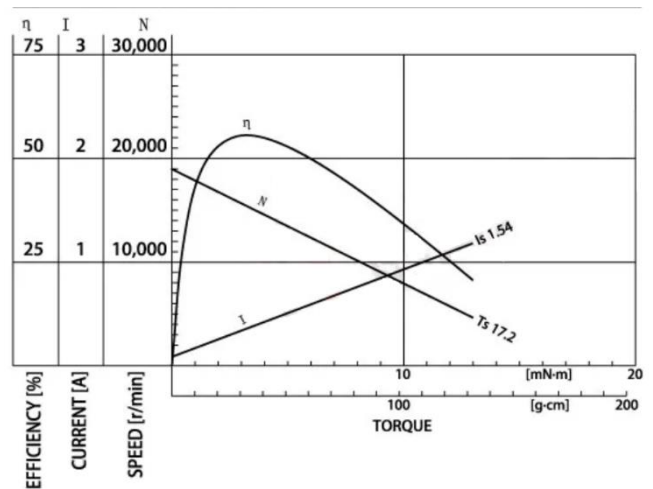


Рис. 7. ВАХ выбранного мотора [13]

Для вычисления автономной работоспособности роборыбы воспользуемся формулой (1):

$$t = C * U * \eta / P, \quad (1)$$

где C – ёмкость аккумулятора, U – напряжение, η – КПД, P – мощность подключаемого оборудования.

При использовании аккумулятора LP115181 на 5000 mAh с выходным напряжением 3.7 В автономность работы составляет около 2 часов.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе разработки было спроектировано два цифровых двойника биомиметической рыбы робота и подготовлены образцы для испытаний. Были проведены расчеты оптимальных характеристик приводящего устройства и произведен подбор материалов для составных частей робота. В дальнейшем планируется проведения полноценных испытаний с измерением скоростных и тяговых характеристик. Также возможно исполнение корпуса в большем масштабе, необходимом для дооснащения робота при использовании в автономном режиме. В будущих исследованиях планируется произвести анализ эффективности различных комбинаций с другими характеристиками форм движителя, а также планируется испытание червячной передачи взамен конических для большего понижения передаточного числа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Mitin I. et al. Bioinspired propulsion system for a thunniform robotic fish // *Biomimetics*. 2022. Т. 7. №. 4. С. 215.
- [2] Martínez-García, Edgar A., Roman Lavrenov, and Evgeni Magid. "Robot Fish Caudal Propulsive Mechanisms: A Mini-Review." (2022).
- [3] Jian, Xinyu, and Ting Zou. "A Review of Locomotion, Control, and Implementation of Robot Fish." // *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 106.2 (2022): 37.
- [4] Van Den Berg, Sander C., et al. "Biomimetic design of a soft robotic fish for high speed locomotion." *Biomimetic and Biohybrid Systems // 9th International Conference, Living Machines 2020, Freiburg, Germany, July 28–30, 2020, Proceedings 9*. Springer International Publishing, 2020.
- [5] Katzschmann Robert K., et al. "Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish." // *Science Robotics* 3.16 (2018).
- [6] Marchese Andrew D., Cagdas D. Onal, and Daniela Rus. "Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators." // *Soft robotics* 1.1 (2014): 75-87.
- [7] Tsybina Y.A. et al. Toward biomorphic robotics: A review on swimming central pattern generators // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2022. Т. 165. С. 112864.
- [8] Kastalskiy I. CPG-based control of robotic fish by setting macro-commands with transient parameters // *2022 6th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA)*. IEEE, 2022. С. 122-124.
- [9] Mitin I. et al. Modeling Biomorphic Robotic Fish Swimming: Simulations and Experiments // *Interactive Collaborative Robotics: 7th International Conference, ICR 2022, Fuzhou, China, December 16-18, 2022, Proceedings*. Cham : Springer International Publishing, 2022. С. 189-198.
- [10] Rybin V.G. et al. Estimating the Autonomy Range of the Battery-Powered Small Unmanned Surface Vehicle // *2020 Ural Smart Energy Conference (USEC)*. IEEE, 2020. С. 9-12.
- [11] Barrett, D.S. *Propulsive Efficiency of a Flexible Hull Underwater Vehicle*; Massachusetts Institute of Technology: Cambridge, MA, USA, 1996.
- [12] Barrett D.S., Triantafyllou M.S., Yue D.K.P., Grosenbaugh M.A., Wolfgang M.J. Drag reduction in fish-like locomotion. *J. Fluid Mech.* 1999, 392, 183–212.
- [13] Guangdong Chaoli Motor Co Site. Available at: <https://detail.en.china.cn/provide/p111109633.html> (Accessed March 15, 2023).