

# БИОМОРФНАЯ РОБОТ-РЫБА ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

**Г.К. Тевяшов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: gtev@ipu.ru

**Ключевые слова:** биоморфные роботы, экологический мониторинг, киберфизическая система, робот-рыба, стереозрение, датчики воды.

**Аннотация:** Современные тенденции в робототехнике обогащают ее биоморфными роботами - устройствами, сочетающими принципы биологии с инженерными решениями для воспроизведения структур и процессов живых организмов. Этот подход предлагает уникальные перспективы в повышении адаптивности, эффективности и взаимодействия с окружающей средой. В настоящем исследовании представлен обзор существующих научных исследований, посвященных биоморфным роботам-рыбам. Путем анализа выделены общие принципы, применимые к разработке подводного биоморфного робота-рыбы для целей экологического мониторинга. Кроме того, представлена математическая модель такого робота в водной среде.

## 1. Введение

Современные тренды в робототехнике приносят новое измерение, обогащая ее биоморфными роботами - устройствами, которые стремятся симбиотически сочетать принципы биологии с высокоэффективными инженерными решениями. Вместо того чтобы просто эмулировать механическую функциональность, эти инновационные роботы нацелены на воспроизведение структур и процессов, взятых из живых организмов. Данный подход предлагает уникальные перспективы в контексте повышения адаптивности, эффективности и интеракции с окружающей средой [1].

В эволюционном процессе развития робототехники заметен переход от преобладающего представления об абстрактных машинах к новому уровню сложности, представленному биоморфными роботами. Эти устройства нацелены не только на эмуляцию механической функциональности, но и на воспроизведение структур и процессов, заимствованных из мира живой природы. Такой подход открывает перспективы для создания автономных роботов, более естественных в форме и функциональности. В результате происходит переосмысление основных принципов робототехники, перенося науку и технологии в новую эру, где интеграция технологии с природой становится ключевым направлением [1,2].

### 1.1. Биоморфные роботы-рыбы

Биоморфные роботы, специально разработанные в форме рыб, привлекли значительное внимание научного сообщества в связи с их потенциалом для исследования водоемов и проведения экологического мониторинга. Эти уникальные технологические решения сочетают в себе преимущества биологического мимикрии с передовыми инженерными разработками, предоставляя мощный инструмент для изучения водных систем.

Одним из ключевых аспектов биоморфных роботов-рыб является их способность имитировать движения и поведение реальных рыб в водной среде [3,4]. Интеграция таких биомиметических подходов позволяет снизить воздействие на экосистему и обеспечивает более естественные условия для взаимодействия с водными организмами. Такие роботы обладают высокой маневренностью и способностью проникать в труднодоступные участки водоемов. Это позволяет проводить более точные и всесторонние исследования, собирая данные о качестве воды, уровне загрязнения и изменениях в экосистеме. Способность эмулировать естественное поведение рыб позволяет эффективно передвигаться в водной среде с минимальным расходом энергии, что существенно продлевает время автономной работы и обеспечивает более долгосрочные миссии [4]. Биоморфные роботы-рыбы предоставляют перспективные возможности для использования в экологическом мониторинге, охране водных ресурсов и поддержании экологического равновесия. Их высокая адаптивность, совмещенная с технологическими достижениями, делает их важными партнерами в современных усилиях по сохранению водных экосистем.

## 1.2. Примеры реализации

Проект RoboTuna (MIT) от Массачусетского технологического института представляет собой биоморфного робота, который имитирует форму и движения тунца. RoboTuna обладает гибким хвостом и маневренностью, что делает его идеальным для исследования проведения мониторинга подводных сред и экосистем. Данный робот может быть программно управляемым или работать автономно, а также оптимизирован для минимального энергопотребления при высокой производительности [5].

Робот SoFi (The Soft Robotic Fish) также от Массачусетского технологического института был создан для изучения морских организмов в их естественной среде. Он оборудован камерой и управляется удаленно, что позволяет исследователям получать детальные данные об поведении морских обитателей без их возмущения. Используя миниатюрный модуль акустической связи, дайвер может направлять рыбу, отправляя такие команды, как скорость, угол поворота и динамическое вертикальное ныряние. Экспериментальные результаты, полученные в ходе испытаний на коралловых рифах в Тихом океане, показывают, что роботизированные рыбы могут успешно перемещаться среди водных обитателей на глубинах от 0 до 18 метров. Кроме того, SoFi демонстрирует реалистичные волнообразные движения хвоста, обеспечиваемые мягкой конструкцией роботизированного привода, которая потенциально может способствовать более естественной интеграции в океанскую среду [6].

Еще один биоморфная робот-рыба с локомоцией как у тунцовых разработан в ННГУ им. Лобачевского [7]. Этот подводный биоморфный исследовательский зонд имеет существенное отличие от других подобных разработок в том, что он полностью повторяет форму настоящего тунца. Это позволяет до минимума снизить возмущение окружающей среды: изменение уровня излучений, загрязнений, температуры воды. Благодаря этому он остается абсолютно незаметным в воде не только для радаров, но и для обитателей подводного мира.

Каждый из этих биоморфных роботов-рыб представляет собой инновационное решение для определенных задач в области исследования водных ресурсов. Они продемонстрировали потенциал биомиметики в создании эффективных и экологически устойчивых технологических решений для поддержания экосистем водоемов.

## 2. Концепт биоморфного робота-рыбы

## 2.1. Общие положения

На основе изученных примеров реализации можно предложить общие положения к созданию биоморфной роботы-рыбы.

1. Для создания корпуса использовать акриловые или пластиковые листы. Для каркаса же легкие и прочные материалы, такие как алюминиевые трубы.
2. Необходимо использовать водонепроницаемые моторы с редукторами для движения плавников, которые в свою очередь производятся из мягких материалов для маневрирования и стабилизации.
3. В блок электроники можно включить микроконтроллер (Arduino или Raspberry Pi). Так как робот планируется использовать в экологическом мониторинге необходимы датчики об окружающей среде, такие как датчик давления, температуры, а также датчики положения и скорости – акселерометры и гироскопы. Для визуального наблюдения было предложено использовать стереокамеру. Необходимой частью такого робота является аккумулятор и система подзарядки (возможно с использованием солнечных панелей).
4. Для подсветки и создания эффекта подводного свечения LED-подсветку.
5. Так как планируется использование в водной среде с обитателями необходим мягкий внешний слой, изготовленный из мягких материалов для уменьшения риска повреждения окружающей среды и других морских существ.

Эти компоненты могут быть объединены с использованием технических чертежей и инженерных решений, а математическая модель и программное обеспечение обеспечат управление и координацию действий робота-рыбы.

## 2.2 Математическая модель

Создание математической модели подводного робота-рыбы с учетом параметров водной среды может быть достаточно сложной задачей, требующей учета множества факторов. Вот базовая модель, которую можно рассмотреть в качестве отправной точки. Эта модель применима к небольшим подводным роботам, имитирующим движение рыбы:

*Кинематика:*

$$\begin{aligned}x(t + 1) &= x(t) + v \cos(\theta) \Delta t, \\y(t + 1) &= y(t) + v \sin(\theta) \Delta t, \\ \theta(t + 1) &= \theta(t) + \omega \Delta t,\end{aligned}$$

где  $x, y$  – координаты робота,  $v$  – линейная скорость,  $\theta$  – угол поворота,  $\omega$  – угловая скорость,  $\Delta t$  – интервал времени.

*Динамика движения:*

$$\begin{aligned}m \frac{\partial v}{\partial t} &= -\beta v + F_{\text{тяги}}, \\ I \frac{\partial \omega}{\partial t} &= -\gamma \omega + \tau_{\text{рулевое}},\end{aligned}$$

где  $m$  – масса робота,  $I$  – момент инерции,  $\beta$  – коэффициент затухания скорости,  $F_{\text{тяги}}$  – сила тяги,  $\gamma$  – коэффициент затухания угловой скорости,  $\tau_{\text{рулевое}}$  – момент рулевого управления.

*Сила тяги:*

$$F_{\text{тяги}} = k_1 v + k_2 v^2,$$

где  $k_1, k_2$  – коэффициенты тяги.

*Момент рулевого управления:*

$$\tau_{\text{рулевое}} = k_3 \omega,$$

где  $k_3$  – коэффициент рулевого управления.

Уравнения состояния воды:

$$F_{\text{воды}} = k_4 v + k_5 v^2,$$

где  $k_4, k_5$  – коэффициенты сопротивления воды.

Эти уравнения представляют собой простую модель движения и стабилизации робота-рыбы. Реальная математическая модель может быть более сложной, учитывая дополнительные факторы, такие как взаимодействие с водой, аэродинамические и гидродинамические эффекты, и так далее. В зависимости от конкретных требований и условий задачи, математическая модель может быть дополнена и уточнена.

### 3. Заключение

В заключение можно отметить, что данная область робототехники предоставляет уникальные возможности для создания инновационных подводных устройств. На протяжении исследования были рассмотрены существующие научные работы, посвященные биоморфным роботам-рыбам, что позволило выявить общие принципы и подходы. Основываясь на анализе литературы, представлена концепция подводного биоморфного робота-рыбы, ориентированного на экологический мониторинг. Такой робот объединяет биологические принципы с инженерными решениями, обеспечивая эффективное взаимодействие с окружающей средой. Кроме того, была представлена математическая модель данного робота в водной среде, что является важным шагом в разработке и оптимизации его функциональности.

В целом, биоморфные роботы-рыбы представляют собой перспективное направление исследований, способное принести значительный вклад в области подводной робототехники и экологического мониторинга.

### Список литературы

1. Qiu G.-Y., Wu S.-H. Self-adjusting locomotion on a partially broken-down quadrupedal biomorphic robot by evolutionary algorithms // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Guangzhou, China, 2012. P. 48-53.
2. Qiu Guo-Yuan, Wu Shih-Hung. The Evolutionary Locomotion of Tripedal and Quadrupedal Biomorphic Robots // Journal of Information Science and Engineering 2011.
3. Zharinov A.I., Kurganov D.P., Potapov I.A., Khoruzhko M.A., Kazantsev V.B., Lobov S.A. Self-organizing CPGs in the control loop of a biomorphic fish robot // 2022 Fourth International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN). Kaliningrad, Russian Federation, 2022. P. 219-222.
4. Liu B., Hammond F.L. Modular Platform for the Exploration of Form-Function Relationships in Soft Swimming Robots // 2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). New Haven, CT, USA, 2020. P. 772-778.
5. Techet A., Hover F., Triantafyllou M. Separation and Turbulence Control in Biomimetic Flows // Flow, Turbulence and Combustion (formerly Applied Scientific Research). 2003. Vol. 71. P. 105-118.
6. Katzschmann R., et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish // Science Robotics.
7. Mitin I., Korotaev R., Ermolaev A., Mironov V., Lobov S.A., Kazantsev V.B. Bioinspired Propulsion System for a Thunniform Robotic Fish // Biomimetics. 2022. Vol. 7. P. 215.