

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПЛАВНИКОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ ГИДРОБИОНТА

С. Цыфанский¹⁾, Я. Виба²⁾, В. Якушевич³⁾, Мааря Круусмаа⁴⁾,
Виллиам Мегилл⁵⁾

¹⁻³ Рижский Технический Университет, Латвия, ⁴⁾ Таллиннский Технический
Университет, Эстония, ⁵⁾ Басс Университет, Англия

Аннотация. Целью данной работы является внедрение методов теории колебаний в механику и разработка новых типов плавниковых движителей.

Излагается начальный этап работы, в случае плавника, установленного на надводном плавающем средстве.

Исследована сильно упрощенная система с одной степенью свободы. При этом принято, что масса и момент инерции корпуса на порядок больше массы и момента инерции плавника. Это позволяет в упрощенной системе получить приближённые обзоримые результаты и рекомендации.

Ключевые слова: Биологические аспекты, гидромеханика плавания, кинематика движений гидробионтов.

Введение

За многие миллионы лет естественного отбора природа создала много уникальных подводных животных, функционирующих надежно, экономично, точно, целесообразно. Гармоничность живых существ, их способность адаптироваться к изменениям многочисленных факторов внешней среды, разнообразие приспособительных реакций – все это представляет собой богатейший комплекс живых примеров для создаваемых технических систем.

Поэтому наибольший успех в разработке технических систем может быть достигнут в рамках бионики. Можно сохранить много времени и сил, если использовать то, что природа отобрала в результате естественного длительного отбора. При этом, конечно, не следует полностью слепо подражать природе, отрицая возможности человеческого разума в улучшении ее решений.

Создаваемые подводные роботы, использующие принципы передвижения подводных гидробионтов, могли бы решить следующие (как гражданские, так и военные) задачи:

- Проверка качества воды и поиск источников ее загрязнения.
- Проверка целостности подводных топливных трубопроводов.
- Обнаружение крупных скоплений рыб и наведение на них промысловых судов.
- Осмотр подводной части кораблей без спуска водолазов, обнаружение наслоений, повреждений корпуса.
- Измерение скорости морских течений на различных глубинах.
- Поиск полезных ископаемых на дне морей и океанов.
- Поиск затонувших кораблей, затонувших и установленных мин.
- Проход сквозь противолодочные сети в акватории портов с целью проведения разведки и многое другое.

Чтобы выполнять подобные задачи робот, выполненный, например, в виде рыбы должен состоять из следующих частей:

- прочного несущего герметичного корпуса,
- двигателя,
- источника энергии,
- органов стабилизации и системы управления,
- датчиков различных типов,
- устройств подсветки, фотографирования и т.д.

Робот должен обладать искусственным интеллектом в виде бортового компьютера. Его функции: запоминание информации, хранение программы движения, выдача сигналов на корректировку движения, программное маневрирование и т.д.

2. Обзор выполненных работ

Поиски бионических аналогов, начиная с 60-х годов XX века, становятся регулярными, систематическими и приобретают широкий размах. Экспериментальные подводные аппараты с плавниковыми движителями создавались и исследовались в 1970 – 80-х годах на кафедре самоходных подводных аппаратов в Ленинградском кораблестроительном институте [1]. К числу наиболее известных зарубежных проектов можно отнести [2] следующие: «Trans Phibian» (США), подводный робот «Щука-Рика», созданная в Массачусетском технологическом институте; робот - рыба МТ1, созданная в Великобритании и др.(рис.1-4). Наиболее интенсивно работы по созданию роботов - рыб ведутся в Великобритании, Японии, Китае, Таиланде [3-8]. Ранние очерки биологической аэро - и гидродинамики можно найти в монографии [9]. В последнее время в связи бурным ростом вычислительной техники и систем управления имеются много интересных изобретений в области подводных и надводных роботов.

Так, например, модель плавающего робота (рыбы) рассмотрен в работе [10]. Она имеет двухсекционный хвостовой плавник (рис.1), дистанционное управление от микро ЭВМ. Сенсорное устройство позволяет роботу обходить препятствия.

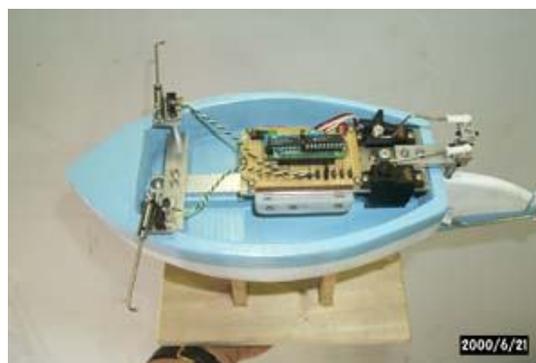
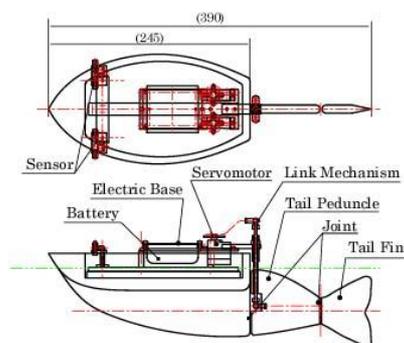


Рис. 1. Схема и общий вид модели плавающего робота (рыбы) с двухсекционным хвостовым плавником. (Автор: 2000. - Koichi Hirata Tokio, Japana, National Maritime Research Institute) [10].

Пример более сложного подводного робота (рыбы) показан на рис. 2 [11]. Робот изготовлен в Вашингтонском Университете и имеет так же двухсекционный хвостовой плавник (рис.2).

Робот имеет полное автономное управление от источника питания и микро ЭВМ, расположенных внутри.

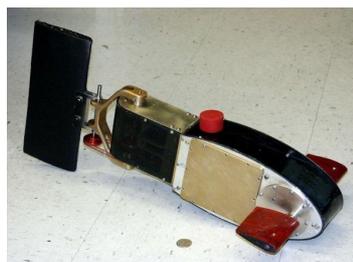
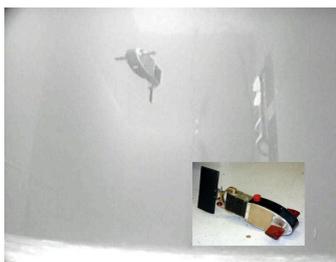


Рис. 2. Робот Вашингтонского Университета. Робот имеет двухсекционный хвостовой плавник и полное автономное управление (Copyright © 2008 Microsoft Corporation).

Пример подводного робота (рыбы) с пневматическим приводом показан на рис. 3 [12]. Эта разработка выполнена в фирме „Festo”.

(Electronics and pneumatics are hidden within its waterproof head and control the S-shaped movements of the tail fin via two fluidic muscles. Two further muscles are used for steering. The fin consists of an alternating traction and pressure edge, which are connected via frames. If an edge is pressurized, the geometrical structure curves automatically against the direction of the influencing force. It sounds complicated, but it is actually a simple principle, with which the fish can display the full swinging power of its fins in the water)

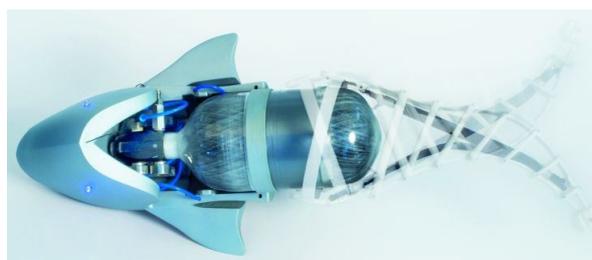


Рис. 3. Робот – рыба с пневматическим приводом фирмы „Festo”.

Важные работы в последнее время выполнены в Великобритании, в Эссекс Университете ([The Robotic Fish Project at Essex](http://www.roboticfishproject.com)) [12].

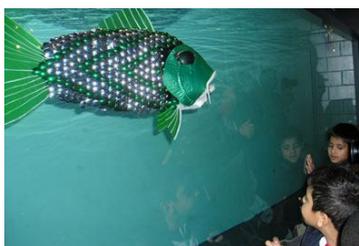


Рис. 4. Примеры роботов – рыб (карпов) с автономным управлением. Эссекс Университет (G1 – G8: проекты финансированы Лондонским аквариумом).

Биологические аспекты, гидромеханика плавания, кинематика движений гидробионтов и другие вопросы освещены в [9]. Там же имеется обширный обзор российских и зарубежных авторов, посвятивших свои работы изучению плавания

гидробионтов.

Силы, действующие на хвостовой плавник

Вначале будут рассмотрены силы и моменты, действующие на хвостовой плавник в неподвижной воде.

При этом используются следующие допущения:

- корпус 1 неподвижный и соединён с плавником 2 через шарнир А (рис. 4, 5);
- в шарнире имеется упругий восстанавливающий момент (пружина) и момент от привода, размещенного на корпусе, для возбуждения колебаний (рис. 6, 7);
- хвостовой плавник представляет собой жесткую тонкую прямоугольную пластину;
- силы взаимодействия плавника с водой зависят от квадрата скорости в локальной точке (рис. 6);
- вихревое движение воды не учитывается;
- движение происходит в горизонтальной плоскости;

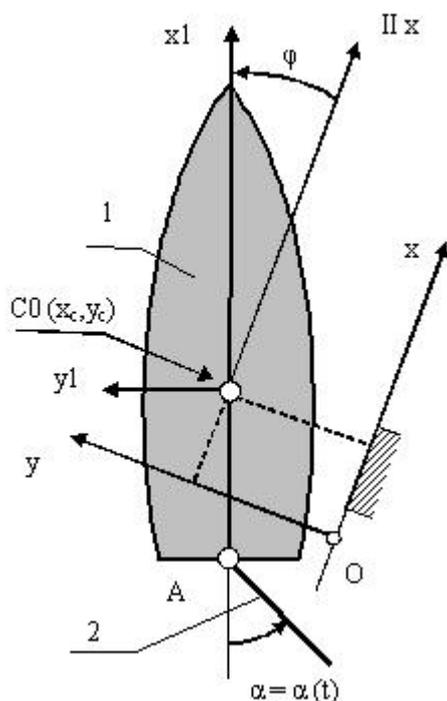


Рис. 5. Схема системы двух твёрдых тел: корпуса (1) и плавника (2). В плоском движении система имеет четыре степени свободы, т.е., движение центра C_0 корпуса (x_c , y_c), вращение вокруг центра как изменение угла φ и вращение плавника $\alpha = \alpha(t)$.

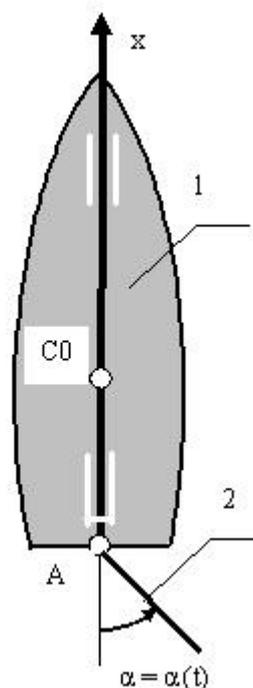


Рис. 6. Сильно упрощенная схема с одной степенью свободы. Принято, что масса и момент инерции корпуса 1 на порядок больше массы и момента инерции плавника 2.

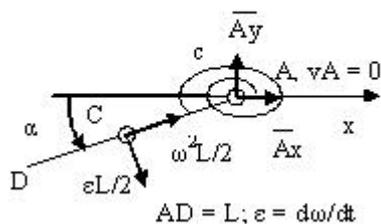


Рис. 7. Реакции A_x и A_y в шарнире А и крутильная жёсткость c . Положение центра масс C плавника, его длина L , компоненты ускорений центра C , угловая скорость (ω) и ускорение (ϵ) плавника.

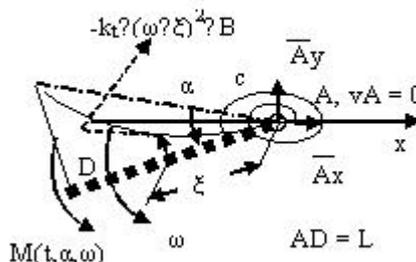


Рис. 8. Распределение сил сопротивления воды от расстояния ξ . Момент от корпуса для возбуждения колебаний $M(t, \alpha, \omega)$.

Уравнение движения плавника

Дифференциальное уравнение движения плавника вокруг оси z , проходящей через точку А, имеет вид (1):

$$J_A \ddot{\alpha} = M(t, \alpha, \dot{\alpha}) - c \cdot \alpha - b \cdot \dot{\alpha} - k_t \cdot B \cdot \text{sign}(\dot{\alpha} \cdot \alpha) \cdot \int_0^L (\dot{\alpha} \cdot \xi)^2 \cdot \xi \cdot d\xi. \quad (1)$$

Здесь

J_A – момент инерции плавника относительно оси z , проходящей через точку А; $\ddot{\alpha}$ – угловое ускорение плавника; $\int_0^L (\dot{\alpha} \cdot \xi)^2 \cdot \xi \cdot d\xi$ – интеграл для определения момента сил сопротивления воды; L – длина плавника; c, b, k_t, B – постоянные параметры.

Из теоремы о движении центра масс m плавника вдоль оси Ax следует (2):

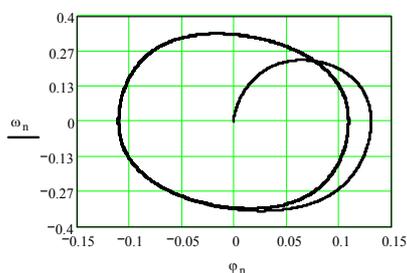
$$m \cdot \left(\dot{\alpha}^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos \alpha + \ddot{\alpha} \cdot \frac{L}{2} \cdot \sin \alpha \right) = Ax - k_t \cdot B \cdot \sin(\alpha) \cdot \text{sign}(\alpha \cdot \dot{\alpha}) \cdot \left(\int_0^L (\dot{\alpha} \cdot \xi)^2 \cdot d\xi \right) \quad (2)$$

После упрощения из (1, 2) получаем (3, 4):

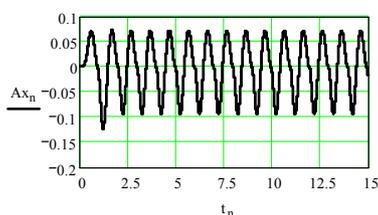
$$\ddot{\alpha} = \frac{1}{J_A} \cdot \left[M(t, \alpha, \dot{\alpha}) - c \cdot \alpha - b \cdot \dot{\alpha} - k_t \cdot B \cdot \text{sign}(\dot{\alpha}) \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \frac{L^4}{4} \right]. \quad (3)$$

$$Ax = m \cdot \left\{ \dot{\alpha}^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{J_A} \cdot \left[M(t, \alpha, \dot{\alpha}) - c \cdot \alpha - b \cdot \dot{\alpha} - k_t \cdot B \cdot \text{sign}(\dot{\alpha}) \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \frac{L^4}{4} \right] \cdot \frac{L}{2} \cdot \sin(\alpha) + k_t \cdot B \cdot \sin(\alpha) \cdot \text{sign}(\alpha \cdot \dot{\alpha}) \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \frac{L^3}{3} \right\}. \quad (4)$$

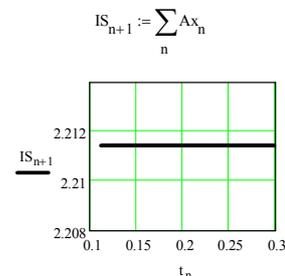
Таким образом, уравнения (3) и (4) позволяют приближённо оценить воздействие плавника 2 на корпус 1 (см. рис. 5 – 8). Так, например, если среднее значение реакции в стационарном режиме отрицательное ($A_x < 0$), то плавник в среднем будет тянуть корпус назад. Наоборот, если $A_x > 0$, то плавник в среднем будет толкать корпус вперёд. Примеры моделирования показаны на рис. 9. – 11.



Движение плавника на фазовой плоскости.

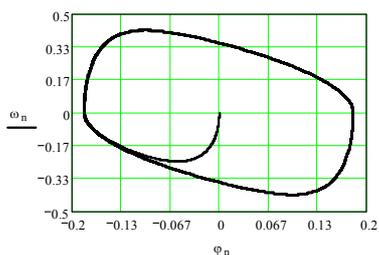


Значение реакции A_x во времени.

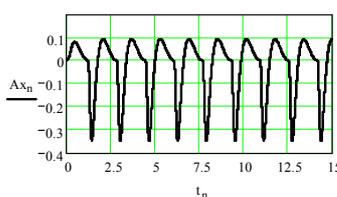


Средний импульс реакции.

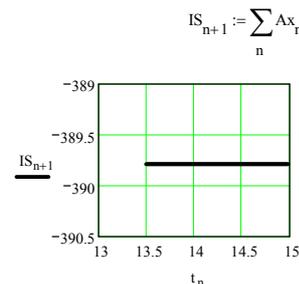
Рис. 9. Пример движения плавника при гармоническом воздействии: $M(t, \alpha, \omega) = M_0 \cdot \sin(k \cdot t)$, где M_0, k – постоянные; t – время.



Движение плавника на фазовой плоскости.

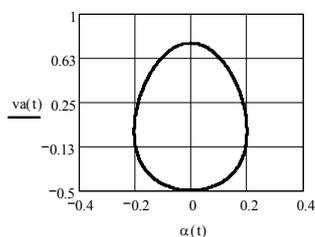


Изменение реакции A_x во времени.

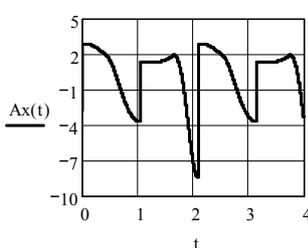


Средний импульс реакции.

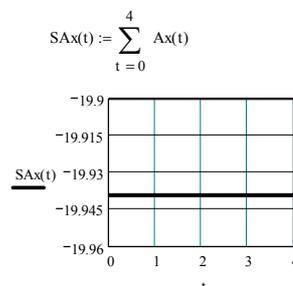
Рис. 10. Пример движения плавника при адаптивном воздействии: $M(t, \alpha, \omega) = M_0 \cdot \text{sign}(\dot{\alpha})$.



Движение плавника на фазовой плоскости.



Изменение реакции A_x во времени.



Средний импульс реакции.

Рис. 11. Пример движения плавника при кинематическом возбуждении от кулисного

механизма:

$$\alpha(t) := \operatorname{atan}\left(\frac{r}{A - r \cdot \cos(k \cdot t)} \cdot \sin(k \cdot t)\right)$$

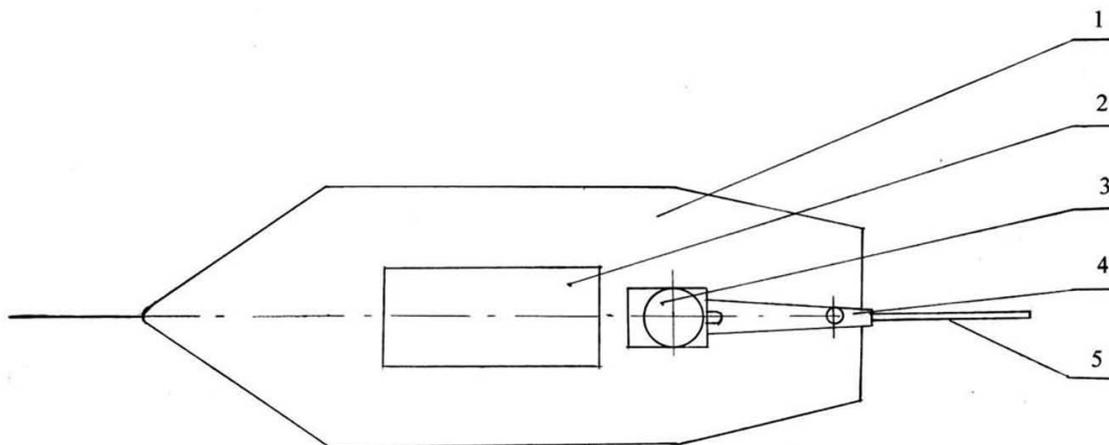
Экспериментальные исследования модели хвостового плавника рыбы

На рис.12 представлен общий вид изготовленной действующей модели надводного гидробионта. Она состоит из корпуса 1, аккумулятора 2, электрического двигателя постоянного тока 3, кулисного механизма 4, хвостового жесткого плавника 5, переднего и заднего стабилизаторов 6 и 7.

При подаче напряжения от аккумулятора 2 на электродвигатель 3 с помощью кулисного механизма 4 приводится в движение хвостовой плавник 5, который совершает поочередные вращательные движения вокруг оси на угол 20° в каждую сторону. При этом создается сила тяги, движущая модель вперед. Для уменьшения рыскания модели служат кормовые стабилизаторы 6 и 7.

Основные технические характеристики модели-1

1. Габаритные размеры модели (мм): длина - 480; ширина - 120.
2. Масса (г): корпуса - 200; аккумулятора - 290; электродвигателя - 90; кинематической системы - 22; плавника - 7.
3. Размеры хвостового плавника (мм): длина - 55; высота - 30.
4. Угол отклонения плавника - 20° .
5. Удлинение - 0,54.
6. Отношение площади плавника к площади поперечного сечения миделя корпуса - 0,48.



а

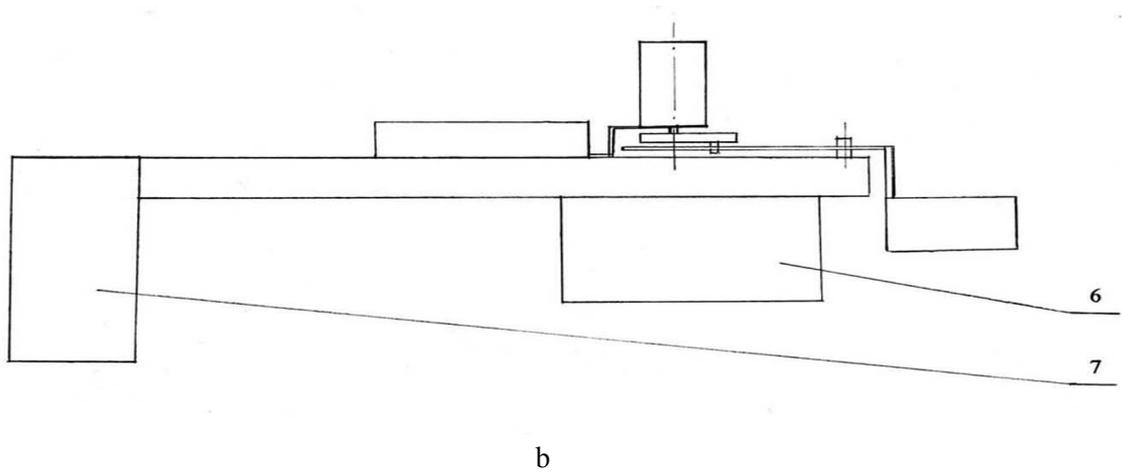


Рис.12. Модель -1 с плавниковым двигателем: а – вид сверху; б - вид сбоку



Рис. 13. Бассейн.



Рис. 14. Неавтономная модель на стенде.



Рис. 15. Неавтономная модель в бассейне.



Рис. 16. Автономная модель в бассейне.

Выводы

В целом, неавтономная модель показала невысокие технические характеристики:

а) Велики внутренние потери мощности в двигателе ($\Delta_1 = 30\%$), так потребляемая мощность P отдельно взятого электродвигателя на холостом ходу составила 1,8 Вт при 1440 об/мин (24 Гц). Под нагрузкой в воздухе с подключенным плавником потребляемая мощность возросла до 4,2 Вт при снижении скорости вращения до 290 об/мин (5 Гц), что обусловлено потерями в кинематической схеме передачи мощности к плавнику ($\Delta_2 = 40\%$). Таким образом еще до погружения в воду теряется 70% мощности. При передвижении модели в воде потребляемая мощность возросла до 4,5 Вт (на $\Delta_3 = 5\%$) при снижении скорости вращения до 190 об/мин (3 Гц). Возросшее значение потребляемой мощности связано с потреблением мощности плавником и преодолением гидродинамического сопротивления корпуса при движении. Предельное значение потребляемой мощности при заторможенном роторе двигателя составило 6 Вт. Таким образом, остаток неиспользованной мощности Δ_4 равен 6 Вт – 4,5 Вт = 1,5 Вт, что может быть связано с гидродинамическим несовершенством плавника.

б) Значительны амплитуды рысканья, что приводит к большим потерям энергии.

в) Скорость движения модели составила 0,5 км/ч.

г) После доработки (увеличение мощности электродвигателей, снижение потерь в кинематической схеме и установки гибкого плавника длиной 160 мм и шириной 40мм с улучшенными гидродинамическими характеристиками, модель №2) исчезло рысканье и скорость возросла до 1,8 км/ч.

Данная работа проводится в рамках Международного Европейского проекта «Robotic Fish Locomotion and sensing» совместно с Tallinn University of Tehnology (EE), University of Verona (IT), Italian Institute of tehnology (IT), University of Bath (UK).

Литература

1. М.А. Кузьмицкий, М.Р. Гизитдинова. Автономные подводные роботы на бионических принципах локомоций // Подводные исследования и робототехника, 2006, № 2.
2. А.Ю. Бочаров. Современные тенденции в развитии миниатюрных подводных аппаратов и роботов за рубежом. Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2.
3. Алеев Ю.Г. Нектон. Киев: Наукова Думка, 1976.
4. http://fibo/kmutt/ac.th/project/eng/current_research/fish/html
5. <http://mhi.ru/news/?id=5>
6. http://www.servihoo.com/channels/kinews/afp_details.php?id=100244&CategoryID==46
7. http://news.bbc.co.uk/cbbcnews/hi/newsid_4310000/newsid_4315200/4315282.stm
8. <http://www.robots.net/article/641.html>
9. Н.В. Кокшайский. Очерк биологической аэро- и гидродинамики (полет и плавание животных). – М.: Наука, 1974. - 253с.
10. www.nmri.go.jp/.../fish/model/ppf06i/ppf06ie.htm
11. <http://vger.aa.washington.edu/research.html>.
12. [Projects 2006 Airacuda b-IONIC Airfish](#)
13. "Robotic fish powered by Gumstix PC and PIC". Human Centred Robotics Group at Essex University. <http://cswww.essex.ac.uk/staff/hhu/HCR-Group.html#Entertainment>. Retrieved on 2007-10-25.

Поступила: 16.06.09.