

УДК 62.533

DOI: 10.18287/2409-4579-2019-5-3-6-13

Галушко И.Д.,  
Салмина В.А.,  
Макарьянц Г.М.

## РАЗРАБОТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНОГО РОБОТА С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ КОРПУСА

Самарский национальный  
исследовательский университет  
имени С.П. Королева  
ул. Московское шоссе, д. 34,  
г. Самара, Российская Федерация  
443086  
neeva2804@gmail.com  
salmina.va@yandex.ru  
georgy.makaryants@gmail.com

*Для подводных движущихся аппаратов в последние три десятилетия остро встала проблема энергетической эффективности и акустической бесшумности. Решение этих проблем неразрывно связано с решением задач динамики и виброакустики, возникающих при обтекании подводных тел потоком жидкости. К таким задачам относят задачу возникновения пульсаций давления и скорости, распределённых по поверхности объекта, а также шума и вибраций, вызванных этими пульсациями. Для создания энергоэффективных и малошумных подводных движущихся роботов необходимо создание методов воздействия на структуру пристеночных течений и форму аэродинамических поверхностей робота с целью снижения его поверхностного трения, а также полного сопротивления. В данной работе представлена разработка испытательного стенда для тестирования основных элементов системы управления автономного необитаемого подводного аппарата с изменяемой геометрией тела, где в виде отдельных модулей размещены подсистема переменной плавучести, подсистема изменения углов атаки, крена и тангажа, а также подсистема изменения геометрии на основе пневматических мускулов.*

**Ключевые слова.** Пневматический мускул; подводная робототехника; анизотропный корпус; пневматика; изменяемая геометрия; испытательный стенд; математическая модель

### 1 Введение

В настоящее время одной из наиболее значительных тенденций в подводной робототехнике являются автономные подводные биомиметические роботы, имеющие небольшие размеры [1]. Такие роботы находят применение в различных гражданских и военных областях. Одним из таких проектов является Aquaroid Fish, разработанный в Японии компанией "Takara Co" [2]. Робот способен работать автономно в течение 15 дней без подзарядки благодаря солнечным батареям. Он имеет длину тела, равную 0,145 м, и массу 0,1 кг. Другой проект по разработке такого робота был осуществлен компанией Mitsubishi Heavy Industries [3]. Робот имеет массу 2,5 кг, длину 0,50 м и способен развивать максимальную скорость 0,9 км / ч. Его батареи обеспечивают автономность в течение 30 минут. Среди разработанных роботов широко распространены и другие принципы передвижения. Например,

змееподобный робот Amphibot I был разработан в Швейцарском федеральном технологическом институте в Лозанне (EPFL) [4]. Этот робот способен не только плавать, но и ползать. Таким образом, биомиметическая робототехника привела к появлению революционных подходов к разработке подводных роботов, особенно в области движения [5].

Эффективное маневрирование и обход препятствий в сочетании с высокой скоростью и автономностью робота в случае непредсказуемых сценариев работы является большим недостатком подводной робототехники [6]. В соответствии с современным уровнем техники не существует универсальных многофункциональных роботов, которые могли бы использоваться как для путешествий на большие расстояния, так и для выполнения небольших и точных задач. Одним из наиболее распространенных примеров задач является инспектирование подводных трубопроводов. Робот должен

преодолевать большие расстояния, а также производить диагностику и последующий ремонт трубопровода [7, 8].

В соответствии с этим, целью данной работы является разработка анизотропного корпуса для автономного подводного робота, а также исследование возможности использования пневматического привода для изменения внешней формы робота. Для достижения этих целей необходимо учитывать влияние различных параметров на производительность робота. Эти параметры можно разделить на три группы: факторы окружающей среды, гидродинамические свойства робота и параметры конструкции [9].

Факторы окружающей среды играют важную роль с точки зрения скорости потока, направления и, следовательно, сопротивления. Вместе с вязкостью жидкости они напрямую влияют на гидродинамические свойства робота, такие как поверхностное трение. Более того, такие препятствия, как кораллы, водоросли, отходы и многое другое, являются очень частым явлением, с которым сталкиваются

подводные роботы при выполнении поставленных задач. В целом эти параметры влияют на сопротивление формы [10]. Параметры робота обычно представлены его формой, мощностью, двигательной установкой и, следовательно, они должны быть выбраны в соответствии с условиями окружающей среды и желаемыми параметрами производительности, такими как:

- маневренность (способность тела контролировать изменения направления движения);
- энергоэффективность (отношение мощности и автономности к максимально достигнутой скорости, которая напрямую зависит от сопротивления формы);
- КПД привода;
- Выносливость (напрямую зависит от общей энергоэффективности робота) [11].

## 2 Разработка испытательного стенда

В основе системы управления роботом лежат три подсистемы. Схема системы управления представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Принципиальная схема системы управления

Система управления позволит роботу осуществлять режим плавания, подобный движению лабораторных глайдеров MarJam I и MarJam II. Для исследования свойств и отладки системы управления роботом было принято решение монтировать ее в виде модулей на испытательном стенде.

Оборудование, используемое на испытательном стенде, показано на рисунке 2.

Для экспериментальных исследований энергетических характеристик робота с изменяемой геометрией корпуса были смоделированы подсистемы переменной плавучести, смещения центра масс, а также изменения геометрии.

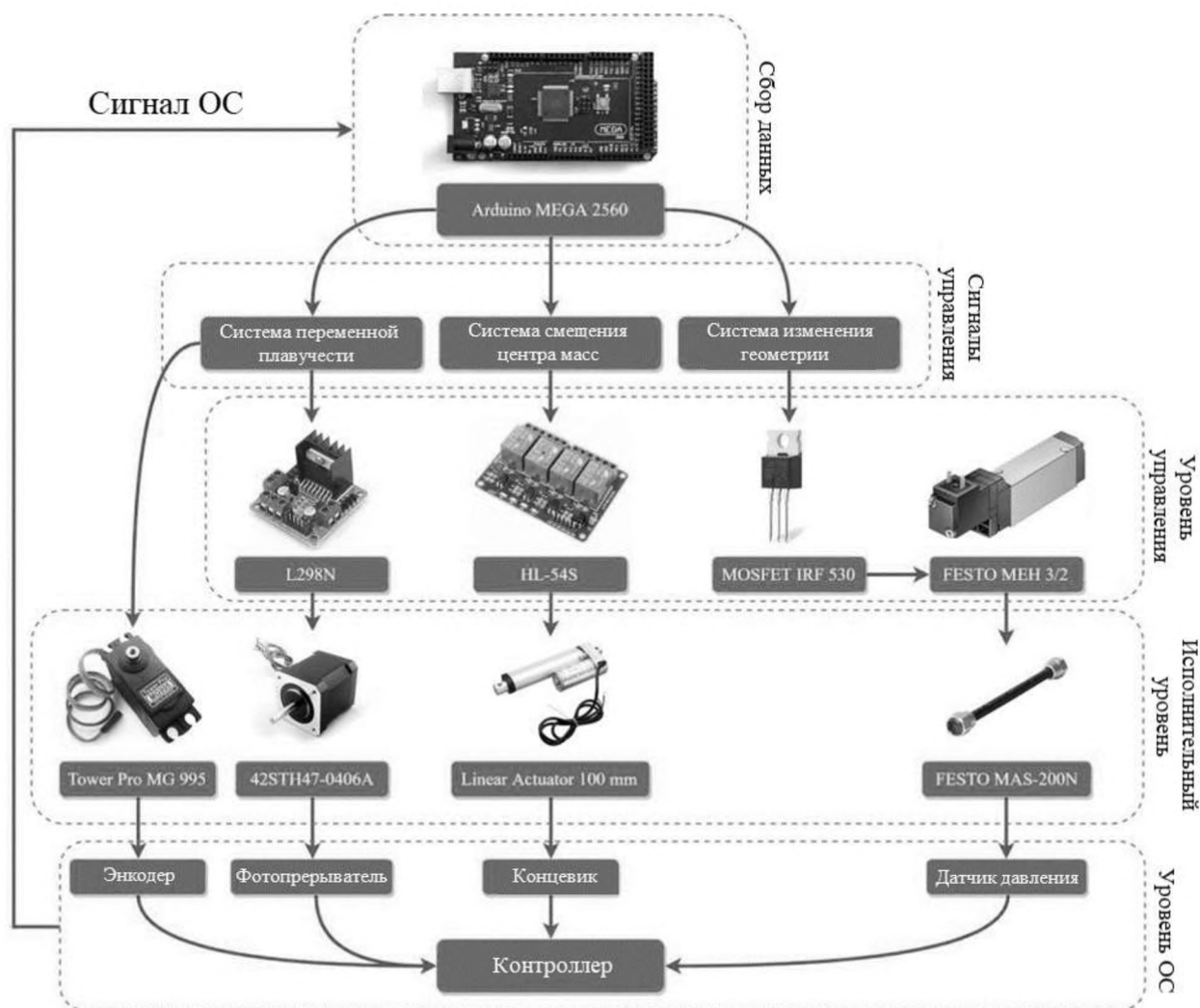


Рисунок 2. Система управления испытательным стендом (элементная база)

### 3 Подсистемы испытательного стенда

Принцип работы системы переменной плавучести заключается в том, что окружающая робота жидкость закачивается в колбу посредством движения поршня, поршень, в свою очередь, жестко связан с основным исполнительным элементом системы – линейным актуатором. За счет этого механизма система переменной плавучести закачивает и сбрасывает воду с борта робота, изменяя при этом его массу. Разработанная в программном пакете SolidWorks 2015 трехмерная модель системы переменной плавучести представлена на рисунке 3.

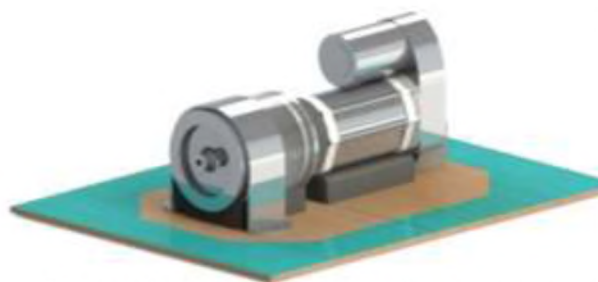


Рисунок 3. Система переменной плавучести

За счет смещения центра масс робота, задаются углы крена и дифферента, что определяет ориентацию робота в пространстве. Основными исполнительными элементами в этой системе являются шаговый двигатель и сервомотор. Шаговый двигатель обеспечивает передвижение каретки с батареями на определенное расстояние, тем самым изменяя угол атаки

робота. Сервомотор обеспечивает поворот каретки с батареями в обе стороны, это обеспечивает поворот робота вокруг продольной оси его тела и позволяет изменять угол крена. Для управления шаговым двигателем потребуется драйвер. Сервомотор управляется посредством подключения к аналоговому выходу микроконтроллера с интегрированной ШИМ. Разработанная в программном пакете SolidWorks 2015 трехмерная модель системы смещения центра масс представлена на рисунке 4.



Рисунок 4. Система смещения центра масс

Система изменения геометрии тела робота состоит из пневматических мускулов и пневматических распределителей. При нажатии кнопок, подаются сигналы на реле, которые в свою очередь переключают пневматические распределители из нормально закрытого положения в нормально открытое. После чего в пневматические мускулы подается давление 6 бар, и они сокращаются. Разработанная в программном пакете SolidWorks 2015 трехмерная модель системы изменения геометрии представлена на рисунке 5.



Рисунок 5. Система изменения геометрии

На рисунке 6 представлена пневматическая система управления геометрией корпуса робота.

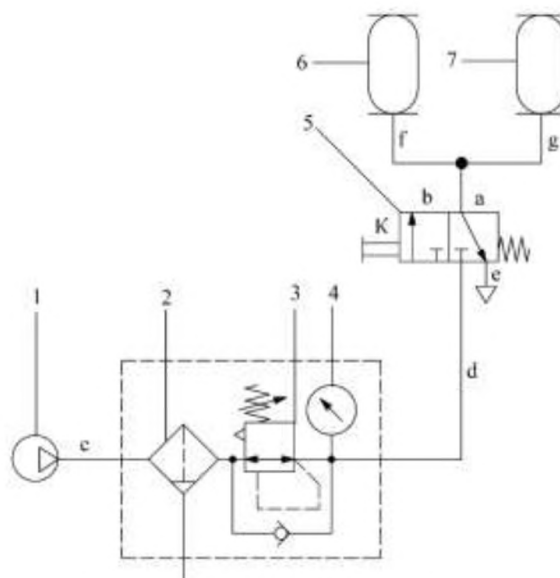


Рисунок 6. Пневматическая система

От компрессора (1) по линии (с) сжатый воздух проходил в блок подготовки, включающий в себя фильтр с отводом конденсата (2), регулятор давления (3) и манометр (4). Регулятор давления (3) настраивался в диапазоне от 0 до 6 бар. Значение давления подаваемого воздуха фиксировалось с помощью манометра (4). На выходе из блока подготовки по линии (d) воздух подавался в нормально закрытый пневматический распределитель 3/2 (5). После нажатия на кнопку К распределитель (5) переключался из положения а в положение b, сжатый воздух проходил по линиям (f) и (g), после чего попадал в рабочие полости интегрированных в алюминиевый корпус робота пневматических мускулов (6) и (7). Далее снимались значения горизонтальной и вертикальной составляющих деформации корпуса робота, данные заносились в таблицу. После чего, посредством пружинного возврата, распределитель (5) переключался из положения b в положение а, и осуществлялся сброс воздуха из рабочей полости пневмомускулов (6) и (7) по линии (е).

#### 4 Экспериментальное исследование пневмомускулов

Для того, чтобы осуществлять управление геометрией корпуса робота, необходимо знать математическую модель основного исполнительного элемента системы. В связи

с этим был проведен эксперимент, в ходе которого были получены данные об изменении геометрических параметров пневматических мускулов от величины подаваемого в них давления. Полученные в ходе эксперимента данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные данные

Зависимость длины пневматического мускула от величины давления									
P, бар	0	1,6	2,0	2,8	3,6	4,0	4,8	5,2	6,0
h, мм	400	362	350	327	315	313	306	301	296
Зависимость диаметра пневматического мускула от величины давления									
P, МПа	0	1,6	2,0	3,2	4,0	5,2	6,0		
D, мм	22,30	28,50	31,80	35,70	36,30	38,40	39,00		

Для выявления функциональной зависимости длины пневматического мускула от величины подаваемого в рабочую полость давления необходимо произвести аппроксимацию экспериментальных данных.

Для аппроксимации экспериментальных данных зависимости длины пневматического мускула от величины подаваемого в него давления была выбрана квадратичная зависимость в силу того, что данная аппроксимация имеет наименьшую среднюю ошибку. Найдем коэффициенты a, b и c уравнения квадратичной регрессии

$h(P) = aP^2 + bP + c$  из системы уравнений:

$$\begin{cases} a \sum P_i^2 + b \sum P_i + nc = \sum h_i \\ a \sum P_i^3 + b \sum P_i^2 + c \sum P_i = \sum P_i h_i \\ a \sum P_i^4 + b \sum P_i^3 + c \sum P_i^2 = \sum P_i^2 h_i \end{cases}$$

После подстановки рассчитанных значений в систему уравнений, получим:

$$\begin{cases} 129,44a + 30,00b + 9,00c = 2970,00 \\ 611,904a + 129,44b + 30,00c = 9390,80 \\ 3065,98a + 611,90b + 129,44c = 39826,08 \end{cases}$$

Вычислим значения определителей  $\Delta, \Delta_a, \Delta_b, \Delta_c$ , а также коэффициентов уравнения квадратичной регрессии a, b и c (таблица 2).

Таблица 2 – Вычисленные значения определителей и коэффициентов

$\Delta$	$\Delta_a$	$\Delta_b$	$\Delta_c$	a	b	c
-26085,67	-61406,98	827545,33	-10483587,07	2,35	-31,72	401,89

Тогда искомое уравнение квадратичной регрессии, показывающее зависимость длины пневматического мускула от величины подаваемого в него давления имеет вид:

$$h(P) = 2,35P^2 - 31,72P + 401,89$$

Построим и сравним графики полученной квадратичной зависимости и экспериментальных данных в программе MathCAD (рисунок 7).

Построим и сравним графики полученной квадратичной зависимости и экспериментальных данных в программе MathCAD (рисунок 7).

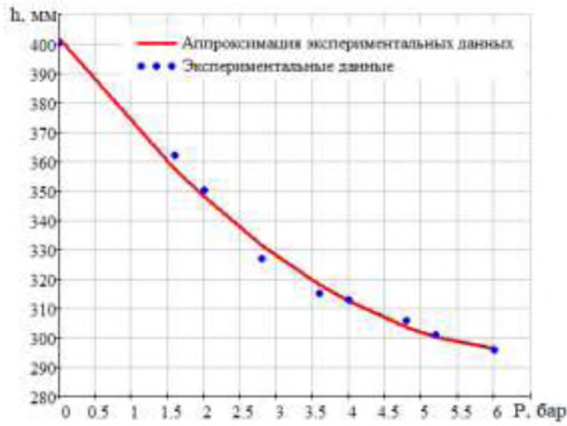


Рисунок 7. Сравнение экспериментальных данных с расчетными

Произведем оценку средней ошибки аппроксимации полученной функциональной зависимости. Средняя ошибка аппроксимации вычисляется по формуле:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - \square(P_i)}{n} \right| \cdot 100\% \approx 0,65\%$$

Для аппроксимации экспериментальных данных зависимости диаметра пневматического мускула от величины

подаваемого в него давления также была выбрана квадратичная зависимость в силу того, что данная аппроксимация имеет наименьшую среднюю ошибку.

Найдем коэффициенты a, b и c уравнения квадратичной регрессии

$y = ax^2 + bx + c$  из системы уравнений:

$$\begin{cases} a \sum P_i^2 + b \sum P_i + nc = \sum D_i \\ a \sum P_i^3 + b \sum P_i^2 + c \sum P_i = \sum P_i D_i \\ a \sum P_i^4 + b \sum P_i^3 + c \sum P_i^2 = \sum P_i^2 D_i \end{cases}$$

После подстановки рассчитанных значений в систему уравнений, получим:

$$\begin{cases} 95,84a + 22,00b + 7,00c = 232,00 \\ 465,47a + 95,84b + 22,00c = 802,32 \\ 2410,57a + 465,47b + 95,84c = 3588,86 \end{cases}$$

Аналогичным образом, были вычислены значения определителей  $\Delta, \Delta_a, \Delta_b, \Delta_c$ , а также коэффициентов уравнения квадратичной регрессии a, b и c. Результаты вычислений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Вычисленные значения определителей и коэффициентов

$\Delta$	$\Delta_a$	$\Delta_b$	$\Delta_c$	a	b	c
-16395,68	7061,70	-88389,53	-362288,83	-0,43	5,39	22,10

Тогда искомое уравнение квадратичной регрессии, показывающее математическую зависимость диаметра пневматического мускула от величины подаваемого в него давления, имеет вид:

$$\square(P) = 2,35P^2 - 31,72P + 401,89$$

Построим и сравним графики полученной квадратичной зависимости и экспериментальных данных в программе MathCAD (рисунок 8):

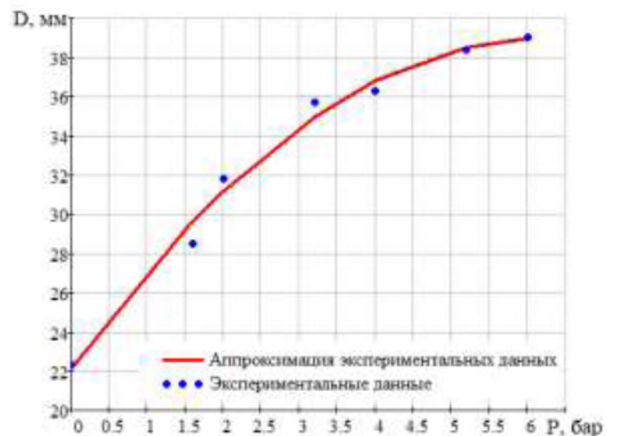


Рисунок 8. Сравнение экспериментальных и расчетных данных

Произведем оценку средней ошибки аппроксимации полученной функциональной зависимости.

Средняя ошибка аппроксимации вычисляется по формуле:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{\square_i - \square(P_i)}{n} \right| \cdot 100\% \approx 0,65\%$$

## 5 Заключение

Была разработана система управления подводным роботом с изменяемой геометрией корпуса. Данная система управления реализована в виде отдельных модулей на испытательном стенде, предназначенном для дальнейших исследований в области динамики и виброакустики обтекания тел. Также были проведены экспериментальные исследования зависимости основных геометрических параметров пневматических мышц от величины давления. После этого полученные экспериментальные данные были аппроксимированы с помощью регрессионного анализа, и получены функциональные зависимости длины и диаметра пневматического мускула от величины подаваемого давления.

## 6 Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант 1.7914.2017/8.9, 0777-2017-000 4).

## Список использованных источников

- [1] Bandyopadhyay R. Trends in Biorobotic Autonomous Undersea Vehicles / R. Bandyopadhyay // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2005. - Vol. 30, №. 1. - P. 109-139.
- [2] Ayers J. Architectures for Adaptive Behavior in Biomimetic Underwater Robots / J. Ayers // Northeastern University. – 2004. - P. 9.
- [3] Lu J. C. Z. A new type of under water turbine imitating fish-fin for under water robot / J. C. Z. Lu, W. Chen, L. Wang // Robot. - 2000. - 22(5). - P. 427-432.
- [4] Xie H. Z. D. Control System Design and Realization of Bionic Underwater Vehicle Propelled by the Long Flexible Fin Undulation / H. Z. D. Xie, Shen L. // Journal of Control & Automation. - 2006. - 22(8-2). - P. 218-221.
- [5] Eriksen C. C. Seaglider: a long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research / C. C.

Eriksen, T. J. Osse, R. D. Light, T. Wen, T. W. Lehman, P. L. Sabin, J. W. Ballard, A. M. Chiodi // IEEE J. Ocean. Eng. – 2001. - 26(4). - P. 424-436. doi:10.1109/48.972073.

[6] Mahmoudian N. Underwater Glider Motion Control / N. Mahmoudian, C. A. Woolsey // IEEE Conf. on Decision Control. - 2008. - P. 552-557.

[7] Crespi A. Swimming and Crawling with an Amphibious Snake Robot, in Robotics and Automation / A. Crespi et al. // ICRA Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on. - 2005. - P. 3024 – 3028.

[8] Crespi A. Amphibot I: an amphibious snakelike robot / A. Crespi et al. // Robotics and Automation Systems. - 2005. - 50(4). - P. 163-175.

[9] Ayers J. Architectures for Adaptive Behavior in Biomimetic Underwater Robots / J. Ayers // Northeastern University. – 2004. - P. 9.

[10] Tohngui L. Analysis of hydrodynamic noise around acoustic modem on the AUV using Hybrid LES-Lighthill Method / L. Tohngui, W. Yanhui, G. Zhu, // Advanced Material Research. – 2012. – Vols. 546-547. - P.176-181. ISSN: 1662-8985.

[11] Gafurov S. Semi-natural test bench for buoyancy variation system of underwater robots investigations / S. Gafurov, V. Salmina, P. Greshnyakov, A. Mukhametzyanov, H. Handroos, // Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017, London, UK, 2017.

**Galushko I.D.,  
Salmina V.A.,  
Makaryants G.M.**

Samara University  
Moskovskoe Shosse,34  
Samara, Russian Federation  
443086  
neeva2804@gmail.com  
salmina.va@yandex.ru  
georgy.makaryants@gmail.com

**DEVELOPMENT OF A TEST BENCH FOR TESTING THE UNDERWATER ROBOT CONTROL SYSTEM WITH VARIABLE GEOMETRY OF THE BODY**

*For underwater robots in the past three decades, the problem of energy efficiency and acoustic noiselessness has arisen sharply. The solution of these problems is inextricably linked with the solution of the problems of dynamics and vibroacoustics arising in the flow of a liquid under the flow of underwater bodies. These problems include the problem of the pressure pulsations occurrence and velocity distributed over the surface of the object, as well as noise and vibrations caused by these pulsations. To create energy-efficient and low-noise underwater robots, it is necessary to create methods for influencing the structure of wall currents and the shape of the aerodynamic surfaces of the robot in order to reduce its surface friction, as well as impedance. In this paper, we consider the development of an experimental bench for testing the main executive systems of an underwater robot with an anisotropic hull, including a buoyancy variation system, a trim and roll change system, and a hull geometry changing system.*

**Key words:** *Pneumatic muscle; underwater robotics; anisotropic body; pneumatic; variable geometry; experimental test bench, mathematical model*

**References**

- [1] Bandyopadhyay, R. (2005), "Trends in Biorobotic Autonomous Undersea Vehicles", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 109-139.
- [2] Ayers, J. (2004), *Architectures for Adaptive Behavior in Biomimetic Underwater Robots*, Northeastern University, pp. 9.
- [3] Lu, J.C.Z., Chen, W. and Wang, L. (2000), "A new type of under water turbine imitating fish-fin for under water robot", *Robot*, vol. 22, issue 5, pp. 427-432.
- [4] Xie, H.Z.D. and Shen, L. (2006), "Control System Design and Realization of Bionic Underwater Vehicle Propelled by the Long Flexible Fin Undulation", *Journal of Control & Automation*, vol. 22, issue 8-2, pp. 218-221.
- [5] Eriksen, C.C., Osse, T.J., Light, R.D., Wen, T., Lehman, T.W., Sabin, P.L., Ballard, J.W. and Chiodi, A.M. (2001), "Seaglider: a long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research", *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 26, issue 4, pp. 424-436. doi:10.1109/48.972073.
- [6] Mahmoudian, N., Woolsey, C.A., (2008). "Underwater Glider Motion Control", *IEEE Conf. on Decision Control*, pp. 552- 557.
- [7] Crespi, A. et al. (2005), "Swimming and Crawling with an Amphibious Snake Robot", *Robotics and Automation, ICRA Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, 2005, pp. 3024 – 3028.
- [8] Crespi, A. et al. (2005), "AmphiBot I: an amphibious snakelike robot", *Robotics and Automation Systems*, vol. 50, issue 4, pp. 163-175.
- [9] Ayers, J. (2004), *Architectures for Adaptive Behavior in Biomimetic Underwater Robots*, Northeastern University, p. 9.
- [10] Tohnghui, L., Yanhui, W. and Zhu, G. (2012), "Analysis of hydrodynamic noise around acoustic modem on the AUV using Hybrid LES-Lighthill Method", *Advanced Material Research*, vol. 546-547, pp.176-181. ISSN: 1662-8985.
- [11] Gafurov, S., Salmina, V., Greshnyakov, P., Mukhametzyanov, A. and Handroos, H. (2017), Semi-natural test bench for buoyancy variation system of underwater robots investigations, *Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017*, London, UK.