

**А. Ахмад**, аспирант, aws.ahmad318@gmail.com, **Я. Вассуф**, аспирант, thelegend990@gmail.com,  
**К. В. Коновалов**, аспирант, bmstu.konovlov2011@yandex.ru,  
**А. С. Юценко**, д-р техн. наук, проф., arkadyus@mail.ru,  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

## Исследование подводного робота с волнообразным движителем

*Статья посвящена анализу механизма волнообразного движения подводных роботов. Приводится краткий обзор исследований, связанных с разработкой математической модели движения подводного робота с использованием волнообразного движителя в рабочем пространстве. Эта математическая модель имитирует движение некоторых видов рыб, например, скатов-батоидов (batooids). Целью исследования было обоснование возможности создания движительного механизма робота, в котором волнообразное движение плавника обеспечивается колебательными движениями отдельных элементов, реализуемых серводвигателями. При соответствующем управлении эти движения обеспечивают распространение волны в гибком плавнике робота. Преимуществом такого подхода является значительное повышение маневренности аппарата по сравнению с существующими моделями. Кроме того, движение становится практически бесшумным. Приводятся результаты предварительных экспериментов, выполненных на макете робота в целях проверки основных режимов движения. Эксперименты подтвердили возможность реализации предложенного способа управления. Определены параметры модели, обеспечивающие устойчивое движение подводного робота.*

**Ключевые слова:** волнообразное движение, плавник, сила тяги, кинематическая схема, гидромеханический анализ, дифференциальная модель, походный режим

### Введение

Сегодня роботы проникли во все сферы деятельности человека (в промышленность, сельское хозяйство, медицину, военную сферу). В связи с этим возросла важность исследований и разработок в области управления и проектирования роботов различного типа, в том числе летающих, наземных и подводных [1–6]. В числе прочих актуальными становятся задачи, связанные с изучением и защитой подводной среды, проведением поисково-спасательных работ и разведывательных операций с использованием подводных роботов. Робототехника существенно расширяет возможности таких операций по сравнению с использованием судовых платформ. Вместе с тем, существующие в настоящее время подводные роботы обладают определенными ограничениями, связанными, в первую очередь, с невысокой маневренностью. К тому же они могут перемещаться только непосредственно в воде, хотя в ряде случаев возникают задачи, требующие перемещения робота по дну, а также в прибрежной зоне.

Эти ограничения могут быть преодолены за счет использования иного принципа перемещения роботов, заимствованного из живой природы, а именно, принципа перемещения за счет волнообразного движения плавников, свойственного скатам и некоторым другим подводным существам. Этот способ движения

позволяет обеспечить значительную маневренность, а также стабилизацию при наличии течения. Кроме того, такой способ позволяет перемещаться не только в воде, но и по дну моря, а также "выползти" на берег и перемещаться в пределах береговой зоны. Все эти особенности позволяют существенно расширить круг задач, выполняемых подводными роботами как при дистанционном управлении, так и в автономном плавании. Отметим также относительную бесшумность их работы, что также является преимуществом при решении ряда задач.

Отметим, что в литературе уже есть информация о работах по созданию роботов такого типа [6, 7]. Ряд компаний уже разработали роботы с волнообразной двигательной установкой. Так, компания Noa-marine разработала модель робота "Морской страж" (Sea Sentinel UUVs) [8]. Задачей системы, частью которой является этот робот, является сбор химических, акустических и визуальных данных в море и проведение непрерывных измерений с высоким разрешением в течение 300 дней в году. Такие роботы могут использоваться, среди прочего, для мониторинга потенциально загрязняющих воду обломков. К настоящему времени завершены работы над полномасштабным прототипом робота, способного выполнять беспилотные миссии и проводить первые лоцманские исследования в районе Балтийского моря. На рис. 1, а показана кон-



Рис. 1. Подводный робот Морской страж (Sea Sentinel) (а); робот с гибким движителем (Pliant Energy Systems) (б)  
Fig. 1. Underwater robot Sea Sentinel(a); Flexible Propulsion Robot (Pliant Energy Systems) (б)

струкция робота, разработанного в этой компании [9].

Компания Pliant Energy Systems также разработала проект робота с волнообразным движителем [10]. Этот робот, снабженный плавниками, может перемещаться не только в воде, но и на прибрежной полосе, а также по льду, снегу и песку (рис. 1, б). Аналогичная конструкция робота с плавниками (Bionic Fin Wave) для перемещения внутри труб большого диаметра была разработана компанией Festo [11].

### Принцип работы волнообразного движителя

У каждого вида живых существ есть свой уникальный способ перемещения, который адаптирован к среде. Скаты используют следующий принцип волнообразного движения [12, 13]: плавник совершает волнообразное движение, при котором волна движется по направлению от передней кромки плавника к задней кромке или в обратном направлении, создавая гидродинамическую силу, обеспечивающую движение вперед или назад соответственно. Направление движения волны противоположно направлению плавания, поэтому скат может изменить направление движения на противоположное [14].

Кинематическая схема гибкого плавника показана на рис. 2. Здесь приняты следующие обозначения:  $O_q X_q Y_q Z_q$  — система координат плавника, связанная с корпусом робота;  $O_r X_r Y_r Z_r$  — система координат в вертикальном сечении плавника, в которой можно описать движение образующей поверхности (луча) плавника. Координаты произвольной точки плавника  $S$  определяются в системе координат  $O_q X_q Y_q Z_q$  как

$$\begin{pmatrix} x_q \\ y_q \\ z_q \end{pmatrix} = I \begin{pmatrix} 0 \\ h \cos(\theta_f) \\ h \sin(\theta_f) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} O_r O_q \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_q \\ h \cos(\theta_f) \\ h \sin(\theta_f) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\begin{pmatrix} 0 \\ h \cos(\theta_f) \\ h \sin(\theta_f) \end{pmatrix}$  — координаты точки  $S$  в системе координат  $O_r X_r Y_r Z_r$ ;  $I$  — матрица поворота;  $h$  — расстояние от точки  $S$  до базовой линии  $O_r O_q$ .

Угловое положение  $\theta_{sf}(s, t)$  точки  $S$  может быть записано в виде [14]

$$\theta_{sf}(s, t) = \theta_{sf \max}(x_q) \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - 2\pi \frac{x_q}{\lambda} + \vartheta_0\right), \quad (2)$$

где  $\theta_{sf \max}$  — амплитуда волны, соответствующая точке  $S$  плавника на рис. 2;  $1/T$  — частота колебаний плавника;  $\lambda$  — длина волны;  $2\pi \frac{x_q}{\lambda}$  — фаза колебания, соответствующая точке  $S$  плавника;  $\vartheta_0$  — исходная фаза начального луча плавника.

Линейную скорость плавника, совершающего волнообразное движение, можно вычислить с использованием закона сохранения импульса [15], в соответствии с которым масса воды, выталкиваемая плавником  $V_{fin}$ , определяется из соотношения

$$M_{water} V_{water} = M_{fin} V_{fin}, \quad (3)$$

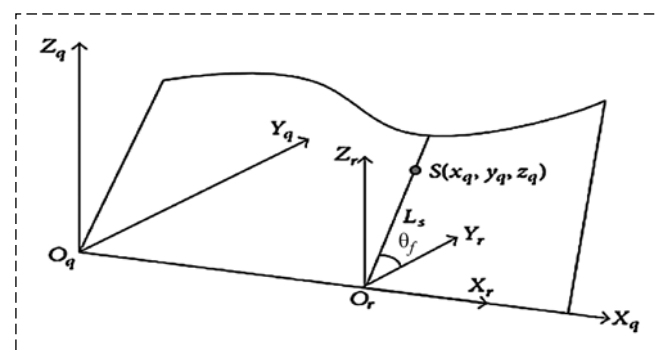


Рис. 2. Кинематическая схема волнообразного плавника  
Fig. 2. Kinematic scheme of undulating fin

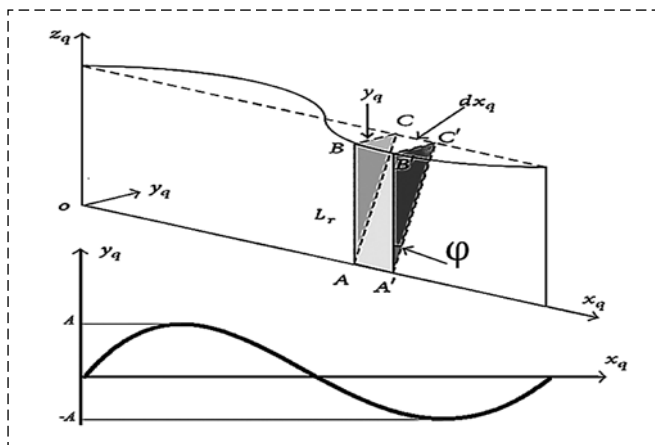


Рис. 3. К определению приращения массы жидкости [15]  
Fig. 3. The definition of the mass increment of a liquid [15]

где  $V_{\text{water}}$ ,  $V_{\text{fin}}$  — скорость жидкости и скорость плавника относительно неподвижной системы координат  $O_{\omega}X_{\omega}Y_{\omega}Z_{\omega}$  соответственно, а  $M_{\text{fin}}$  и  $M_{\text{water}}$  — масса плавника и массы воды, перемещаемой плавником.

Масса воды  $M_{\text{water}}$  может быть получена как интеграл от объема воды, которая окружена волнообразным плавником (рис. 3). При этом приращение массы жидкости между треугольниками  $\Delta ABC$  и  $\Delta A'B'C'$  выражается как

$$dM_{\text{water}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{water}} |y_q| \sqrt{L_r^2 - y_q^2} dx, \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{water}}$  — плотность жидкости;  $L_r$  — гипотенуза треугольника  $ABC$ .

Из рис. 3 следует, что  $\sqrt{L_r^2 - y_q^2} = L_r \cos \varphi$ . Таким образом,

$$M_{\text{water}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{water}} \int_0^{\lambda} |y_q| \sqrt{L_r^2 - y_q^2} dx.$$

Можно также определить  $y_q(x_q, z_q, t)$ :

$$y_q(x_q, z_q, t) = A(x_q, z_q) \sin(\omega t - kx_q), \quad (5)$$

где  $A(x_q, y_q)$  — амплитуда волны;  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  — частота колебаний;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

Предположим, что в начальный момент времени  $t = 0$

$$y_q(x_q, z_q, 0) = -A(x_q, z_q) \sin(kx_q);$$

$$M_{\text{water}} = \rho_{\text{water}} L_r \cos \varphi \int_0^{\lambda/2} |-A \sin(kx_q)| dx,$$

$$\text{т. е.} \quad M_{\text{water}} = \frac{2\rho A L_r \cos \varphi}{k}. \quad (6)$$

Из соотношения (3) можно найти скорость плавника:

$$V_{\text{fin}} = \frac{M_{\text{water}}}{M_{\text{fin}}} V_{\text{water}}. \quad (7)$$

Вместе с тем, можно записать, что

$$V_{\text{water}} + V_{\text{fin}} = V,$$

где  $V$  — скорость жидкости, толкаемой поверхностью плавника относительно системы координат плавника  $O_qX_qY_qZ_q$ . Таким образом,

$$V_{\text{fin}} = V - V_{\text{water}} = \frac{M_{\text{water}}}{M_{\text{water}} + M_{\text{fin}}} V, \quad (8)$$

где  $V = \lambda f = \frac{\omega \lambda}{2}$ .

С учетом выражения (6) получаем

$$V_{\text{fin}} = \frac{(2\rho A L_r \cos \varphi)}{(2\rho A L_r \cos \varphi) + k M_{\text{fin}}} (\lambda f) = \xi(\lambda f), \quad (9)$$

$$0 < \xi < 1.$$

Здесь параметр  $\xi$  определяет влияние геометрических характеристик плавника на скорость движения образующей его поверхности луча на рис. 2. Из полученного соотношения можно заключить, что скорость плавника  $V_{\text{fin}}$  прямо пропорциональна частоте колебаний  $\omega$  и длине волны  $\lambda$ .

### Гидромеханический анализ

Перемещение робота обеспечивается тягой, создаваемой длинным гибким плавником, которая создается взаимодействием мембраны и жидкости. Поверхность мембраны изменяется циклически, поэтому мы выбираем для исследования один период движения для расчета средней тяги. Вся мембрана разделена на ряд малых элементов (рис. 4), и силы, действующие на элементы за период, суммируются для получения средней тяги. Взаимодействие между поверхностью малого элемента и жидкостью определяется следующими уравнениями [16]:

$$df_n = \frac{dF_n}{dS} = -\frac{1}{2} \rho C_n \|V_n\| V_n; \quad (10)$$

$$df_{\tau} = \frac{dF_{\tau}}{dS} = -\frac{1}{2} \rho C_{\tau} \|V_{\tau}\| V_{\tau},$$

где  $dF_n$  — нормальная сила, действующая на поверхность элемента;  $dF_{\tau}$  — тангенциальная сила, действующая на поверхности элемента;  $dS$  — площадь элемента;  $\rho$  — плотность жидкости;  $C_n$  — коэффициент тангенциального сопротивления [15];  $C_{\tau}$  — коэффициент вязкого сопро-

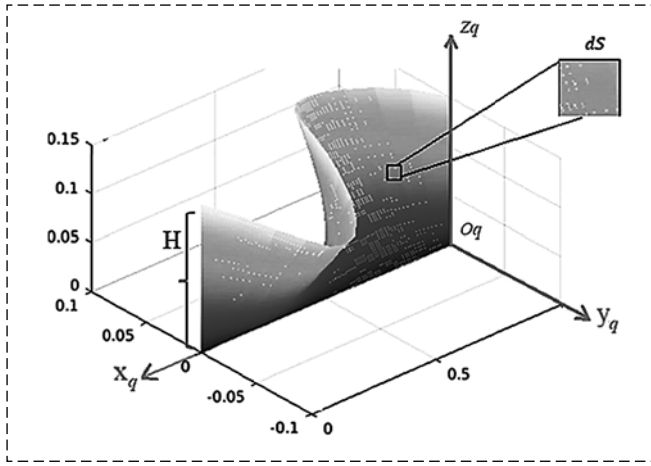


Рис. 4. Элемент мембраны плавника  
Fig. 4. Fin membrane element

тивления жидкости;  $V_n$  — нормальная скорость относительно жидкости;  $V_\tau$  — тангенциальная скорость элемента относительно жидкости.

Следовательно, нормальная и тангенциальная силы плавника могут быть получены как интегралы по поверхности мембраны от сил, действующих на все элементы:

$$F_n = \iint_{\Omega(t)} f_n dS, \quad F_\tau = \iint_{\Omega(t)} f_\tau dS, \quad (11)$$

где  $F_n$  — нормальная сила, действующая на плавник;  $F_\tau$  — тангенциальная сила, действующая на него;  $\Omega(t)$  — поверхность мембраны в момент времени  $t$ . Предполагаем, что число Рейнольдса достаточно велико, поэтому вязкость считается невязкой и вязкостным эффектом можно пренебречь, что позволяет пренебречь и тангенциальной силой.

Гидродинамический анализ основан на трех основных допущениях:

1. Волнообразные движения лучей плавника заставляют плавник двигаться прямо вперед вдоль оси  $O_q X_q$  без какого-либо вращения (рис. 4).

2. Волнообразные движения рассматриваются только относительно оси  $O_q X_q$ .

3. Число волн, образующихся на плавнике, — целое число.

Положение произвольной точки  $S(x_q, y_q, z_q)$  на рис. 3 можно получить согласно (1) по формуле

$$\begin{pmatrix} x_{sq}(s, h, t) \\ y_{sq}(s, h, t) \\ z_{sq}(s, h, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} o_r o_q \\ h \cos(\theta_f(h, t)) \\ h \sin(\theta_f(h, t)) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Вектор скорости элемента поверхности  $S$  относительно системы координат  $O_q X_q Y_q Z_q$  может быть получен в следующем виде:

$$\mathbf{V}_{sq} = \frac{dS(x_q, y_q, z_q)}{dt} = \begin{pmatrix} 0 \\ -h\theta'_{fs} \sin(\theta_f) \\ h\theta'_{fs} \cos(\theta_f) \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$\text{где } \theta'_{fs} = \frac{d\theta_f(h, t)}{dt} = -\frac{2\pi}{T_i} \theta_{if \max}(x_i) \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i} - \theta_{0i}\right).$$

Если линейная и угловая скорости начала координат системы координат  $O_q X_q Y_q Z_q$  относительно инерциальной системы координат равны, соответственно,

$$\mathbf{V}_{wq} = (U_x, U_y, U_z)^T, \quad \boldsymbol{\omega}_{wq} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T, \quad (14)$$

то скорость элемента  $S$  относительно инерциальной системы отсчета может быть записана как

$$\mathbf{V}_{ws} = \mathbf{V}_{oq} + \boldsymbol{\omega}_{wq} \times \mathbf{r}_{qs} + \mathbf{V}_{qs}, \quad (15)$$

где  $\mathbf{r}_{qs}$  представляет собой вектор положения элемента  $S$  по отношению к системе координат  $O_q X_q Y_q Z_q$ . Скорость и угловая скорость начала координат этой системы относительно инерциальной системы отсчета можно принять равными  $\mathbf{V}_{wq} = (U_x, 0, 0)$  и  $\boldsymbol{\omega}_{wq} = (0, 0, 0)$  согласно сформулированным выше предположениям. Тогда скорость элемента  $S$  относительно инерциальной системы координат может быть представлена как

$$\mathbf{V}_{ws} = \mathbf{V}_{oq} + \mathbf{V}_{qs} = \begin{pmatrix} U_x \\ -h\dot{\theta}_f \sin(\theta_f(h, t)) \\ h\dot{\theta}_f \cos(\theta_f(h, t)) \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Вектор  $\mathbf{n}$ , нормальный к поверхности элемента  $S$ , определяется по формуле

$$\mathbf{n} = \frac{\partial \mathbf{S}_q(s, h, t)}{\partial s} \times \frac{\partial \mathbf{S}_q(s, h, t)}{\partial h} = \begin{pmatrix} h\theta'_s \\ -\sin(\theta_f) \\ \cos(\theta_f) \end{pmatrix}, \quad (17)$$

где

$$\theta_{fs}(s, h, t) = \theta_{sf \max}(x_s) \sin\left(\frac{2\pi t}{o} - 2\pi \frac{s}{\lambda}\right);$$

$$\theta'_{fs} = \frac{\partial \theta(s, t)}{\partial s} = \frac{2\pi}{\lambda} \theta_{sf \max} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - 2\pi \frac{s}{\lambda}\right),$$

а единичный нормальный вектор определяется из выражения (17) как

$$\mathbf{n}_0 = \frac{\mathbf{n}}{\|\mathbf{n}\|} = \frac{1}{\sqrt{1 + (h\theta'_s)^2}} \begin{pmatrix} h\theta'_s \\ -\sin(\theta_f) \\ \cos(\theta_f) \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Нормальная скорость  $V_{sn}$  элемента  $S$  теперь может быть определена как

$$V_{sn} = (V_{ws} \mathbf{n}_0) \mathbf{n}_0, \quad (19)$$

или

$$V_{sn} = \frac{U_x h \theta'_{fs} + h \theta'_{ft}}{1 + (h \theta'_s)^2} \begin{pmatrix} -h \theta'_{fs} \\ -\sin(\theta_f) \\ \cos(\theta_f) \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Используя соотношения (12), (13), (20), силу воздействия на плавник можно получить в виде

$$\begin{aligned} F_n &= -\frac{1}{2} \rho C_n \iint_{\Omega} \|V_{sn}\| V_{sn} dS = \\ &= -\frac{1}{2} \rho C_n \iint_{\Omega} \|V_{sn}\| V_{sn} \|\mathbf{n}\| ds dh = \\ &= -\frac{1}{2} \rho C_n (U_x + \lambda f)^2 \iint_D \frac{|h \theta'_{fs}| h \theta'_{fs}}{1 + (h \theta'_s)^2} \times \\ &\quad \times (-h \theta'_s, -\sin(\theta_f), \cos(\theta_f))^T ds dh, \end{aligned} \quad (21)$$

где  $D = \{(s, h) | 0 \leq s \leq L, 0 \leq h \leq H\}$ ;  $L$  — длина плавника;  $H$  — высота плавника. Проекция этой силы на оси координат  $OXYZ$  определяются равенством

$$\begin{pmatrix} F_{nX} \\ F_{nY} \\ F_{nZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \rho C_n (U_x + \lambda f)^2 \iint_D \frac{|h \theta'_{fs}| (h \theta'_{fs})^2}{1 + (h \theta'_s)^2} ds dh \\ \frac{1}{2} \rho C_n (U_x + \lambda f)^2 \iint_D \frac{|h \theta'_{fs}| h \theta'_{fs} \sin(\theta_f)}{1 + (h \theta'_s)^2} ds dh \\ -\frac{1}{2} \rho C_n (U_x + \lambda f)^2 \iint_D \frac{|h \theta'_{fs}| h \theta'_{fs} \cos(\theta_f)}{1 + (h \theta'_s)^2} ds dh \end{pmatrix}. \quad (22)$$

В соответствии с принятыми допущениями данные аналитические выражения могут быть приведены к следующему виду:

$$\begin{pmatrix} F_{nX} \\ F_{nY} \\ F_{nZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \rho C_n (U_x + \lambda f)^2 D \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} D &= [2n_{\lambda} \theta_{\max} H^2 + \frac{n_{\lambda} \lambda^2}{2\pi^2 \theta_{\max}} \ln^2 \lambda - \\ &- \frac{n_{\lambda} \lambda^2}{4\pi^2 \theta_{\max}} \ln^2 (\sqrt{4\pi^2 \theta_{\max}^2 H^2 + \lambda^2} - 2\pi \theta_{\max} H) - \\ &- \frac{n_{\lambda} \lambda^2}{4\pi^2 \theta_{\max}} \ln^2 (\sqrt{4\pi^2 \theta_{\max}^2 H^2 + \lambda^2} + 2\pi \theta_{\max} H)], \end{aligned}$$

причем  $n_{\lambda} = \frac{L}{\lambda}$  — число волн в плавнике.

Из приведенных соотношений следует, что генерируемая сила тяги зависит от частоты волны, ее амплитуды и длины, а также от числа волн, создаваемых плавником  $n_{\lambda}$ .

На рис. 5 показана зависимость изменения тяги плавника в формуле (23) от числа волн  $n_{\lambda}$ , частоты колебаний  $f$  (Гц) и амплитуды колебаний  $\theta_{\max}$ , образующихся в плавнике.

Геометрические параметры предполагаемого плавника следующие:

- высота плавника (см. рис. 4)  $H = 0,12$  м;
- длина плавника  $L = 1$  м;
- коэффициент тангенциального сопротивления  $C_n = 10$  [17].

Плотность жидкости принята равной  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, а линейная скорость плавника  $U_x = 0$ .

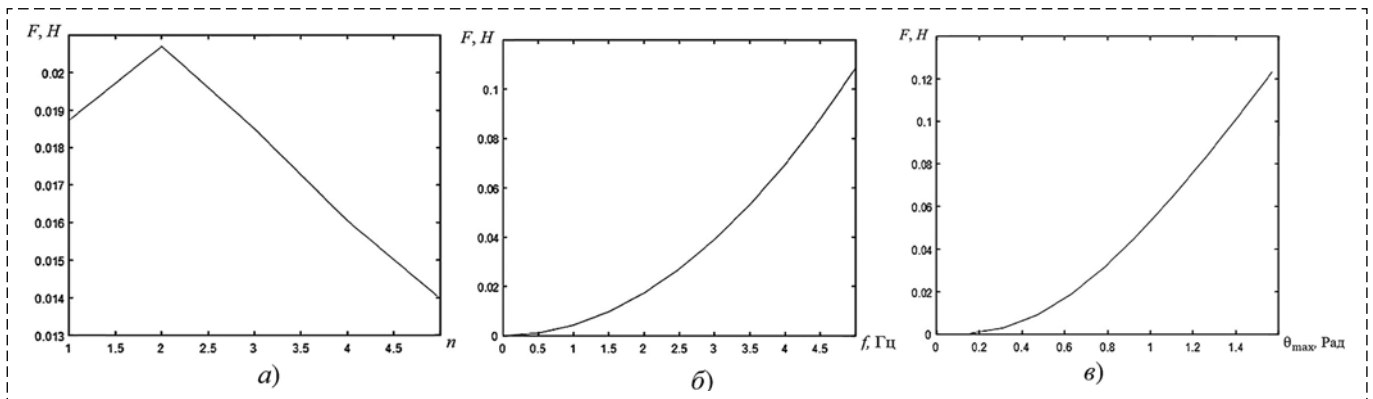


Рис. 5. Зависимость тяги от числа волн (а); частоты колебаний (б); амплитуды колебаний (в)

Fig. 5. Thrust vs: quantity wave in fin (a); undulating frequency (б); undulating amplitude (в)

Рис. 5, а соответствует частоте 2 Гц и максимальной волнообразной амплитуде  $0,2\pi$ . Волновые числа  $n_\lambda$  задавались равными 1, 2, 3, 4, 5. Видно, что тяга сначала увеличивается, а затем уменьшается с увеличением волнового числа. В результате на плавнике образуется максимальная тяга при  $n_\lambda = 2$ .

Рис. 5, б соответствует частоте 0...5 Гц и максимальной волнообразной амплитуде  $0,2\pi$ . Волновые числа  $n_\lambda$  приняты единичными. Видно, что тяга увеличивается нелинейно с увеличением частоты.

Рис. 5, в соответствует частоте 2 Гц и максимальной волнообразной амплитуде  $0,2\pi...0,5\pi$ . Волновые числа приняты единичными. Видно, что тяга увеличивается нелинейно с увеличением амплитуды.

### Исследование прототипа робота

После изучения волнообразного плавника и нахождения кинематических и динамических уравнений одного плавника необходимо найти механический прототип плавника который создавал бы синусоидальную волну на плавнике. При этом число активных лучей плавника должно быть выбрано таким образом, чтобы сохранить его основные кинематические характеристики.

Уравнение (2) определяет угловое положение каждой точки плавника в связанной с ним системе координат  $O_q X_q Y_q Z_q$  в том случае, когда плавник представляет собой гибкую мембрану. При механической реализации мы разделяем плавник на  $n$  ребер, соединенных между собой эластичной мембраной, как показано на рис. 6. Угловое положение ребра с номером  $i$  можно определить следующим образом [12–15]:

$$\theta_{if}(i, t) = \theta_{if \max}(x_i) \times \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - 2\pi \frac{x_q}{\lambda} + \vartheta_0\right), x_q = \frac{(i-1)}{(n-1)} L; \quad (24)$$

$$\theta_{if}(i, t) = \theta_{if \max}(x_i) \times \sin\left(2\pi \frac{t}{T} - (i-1)\Delta P + \vartheta_0\right).$$

$$2\pi \frac{x_q}{\lambda} = 2\pi \frac{(i-1)}{(n-1)} \frac{L}{\lambda} = 2\pi(i-1) \frac{\Delta L}{\lambda} = (i-1)\Delta P. \quad (25)$$

Здесь  $\theta_{if \max}$  — амплитуда волны на  $i$ -м ребре плавника;  $\vartheta_{0i}$  — начальная фаза  $i$ -го ребра;  $n$  —

общее число ребер;  $\Delta P$  — фазовый сдвиг между двумя соседними ребрами, который не должен быть больше  $\Delta P \leq \pi/2$ . Таким образом, общее число ребер  $n$  в приведенной кинематической схеме должно удовлетворять следующему выражению:

$$\frac{\pi}{2} \geq 2\pi \frac{1}{(n-1)} \frac{L}{\lambda}, \text{ или } n \geq 4n_\lambda + 1. \quad (26)$$

Для проверки полученных результатов была реализована модель подводного робота, показанная на рис. 7.

Исследуемый робот работает, используя принцип волновой тяги. Его двигательная система состоит из двух симметричных двусторонних плавников. Был выбран механизм, в котором ребра плавника соединены на базовой линии, и каждое ребро приводится в движение непосредственно двигателем. Чтобы упростить механическую конструкцию, число двигателей, используемых в модели, показан-

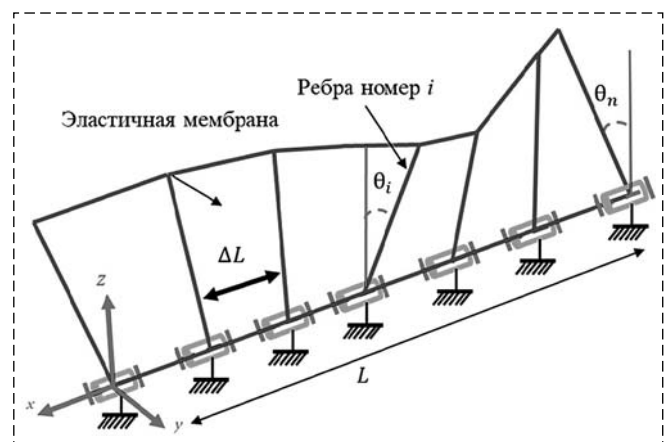


Рис. 6. Дискретная кинематическая схема плавника  
Fig. 6. Discrete kinematic scheme of the fin

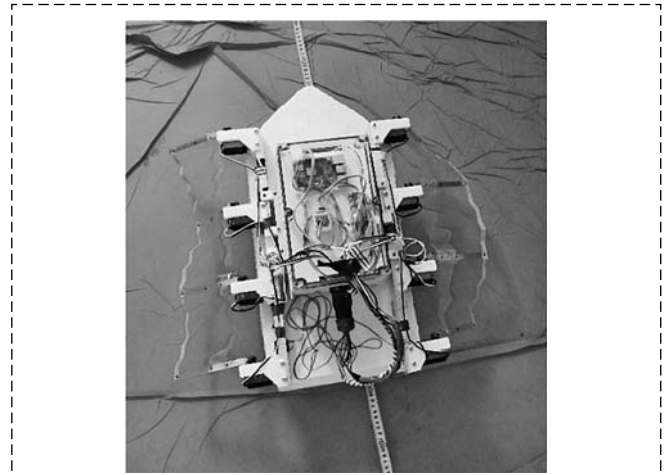


Рис. 7. Прототип робота  
Fig. 7. Robot prototype

ной на рис. 7, было уменьшено. Принцип работы и способность робота двигаться и маневрировать остались прежними.

Система управления робота состоит из следующих основных частей:

- Raspberry Pi 4 для формирования команд управления восемью серводвигателями;
- модель PCA-9685 16bit;
- блок питания;
- датчик (IMU GY955-AHRS) для определения углового положения и угловой скорости робота.

Поскольку рассматривается движение робота в двумерной плоскости  $OXY$  (рис. 8), то робот может вращаться относительно мгновенного центра вращения, изменяя соотношение скоростей, определяемых правым и левым плавниками.

В соответствии со схемой на рис. 8 угловая и линейная скорости робота определяются соответственно следующими формулами:

$$\omega_{\text{robot}} = \frac{V_{R-\text{fin}} - V_{L-\text{fin}}}{2b}; \quad (27)$$

$$V_{\text{robot}} = \frac{V_{R-\text{fin}} + V_{L-\text{fin}}}{2}, \quad (28)$$

где  $V_{R-\text{fin}}$ ,  $V_{L-\text{fin}}$  — линейные скорости, определяемые правым и левым плавниками соответственно;  $b$  — расстояние между плавником и центром массы робота. Можно назвать такое управление дифференциальным по аналогии с аналогичным способом управления наземным мобильным роботом с дифференциальным приводом колес.

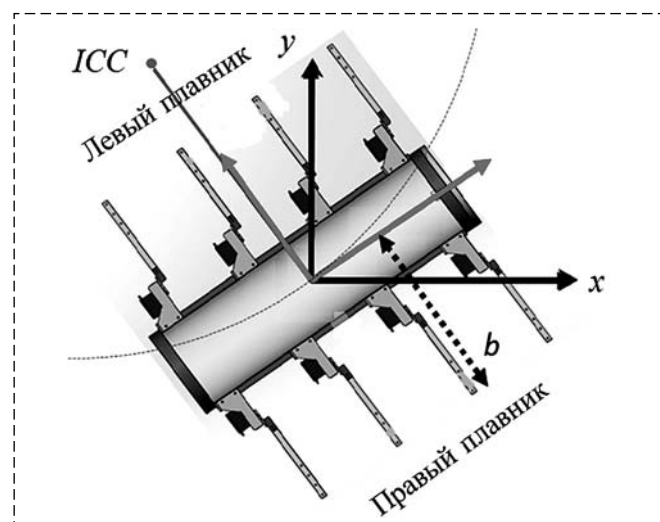


Рис. 8. Модель робота  
Fig. 8. Model of robot

## Результаты экспериментов

Эксперименты проводились с прототипом робота в бассейне размером  $2,4 \times 2,4 \times 0,4$  м. Благодаря беспроводной связи робот получал команды, отправленные с компьютера. Проводились эксперименты для основных способов движения. Целью эксперимента были проверка маневренности и тяговых характеристик робота, а также определение основных параметров его движения, включая среднюю линейную и угловую скорости, а также силу тяги плавника при различной частоте и амплитуде движений плавника.

Для измерения скорости робота в "маршевом режиме" применялась высокоскоростная камера, размещенная над бассейном. Частота колебаний изменялась от 0,5 Гц до 2 Гц, а амплитуды колебаний принимались равными 10, 15, 20 и 25° соответственно.

На рис. 9 представлены результаты проведенных экспериментов в форме зависимости линейной скорости робота от частоты и от амплитуды колебаний плавников при линейной аппроксимации полученных при эксперименте результатов. Можно видеть, что увеличение скорости за счет амплитуды происходит значительно более эффективно, чем за счет частоты.

Эксперименты показали, что робот плавает с самой высокой скоростью при амплитуде 25°. При этом на параметры движения влияют два ограничения. Во-первых, мембрана, покрывающая лучевые плавники, ограничивает их колебания. Во-вторых, максимальное значение гидродинамических сил, образуемых длинными ребрами, при определенной амплитуде также ограничивает их колебания.

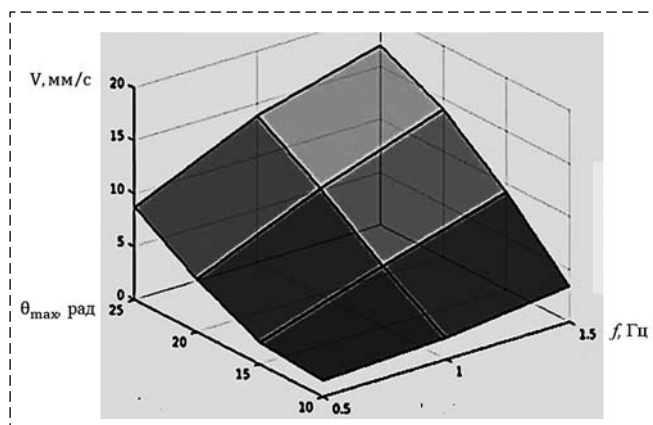


Рис. 9. Зависимость линейной скорости робота от частоты и амплитуды колебаний плавника  
Fig. 9. Linear speed of the robot vs fin oscillation frequency and amplitude

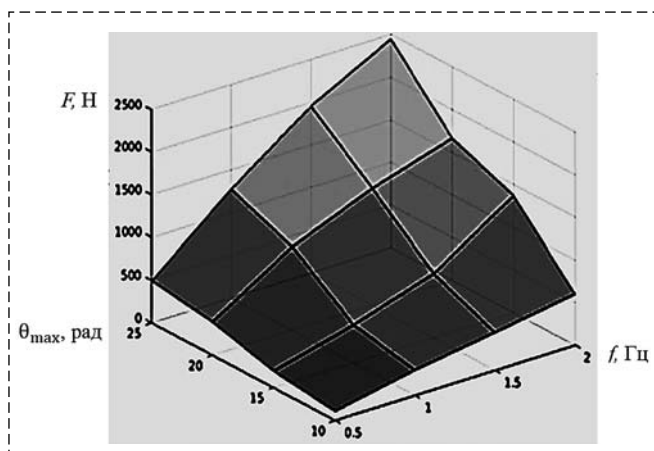


Рис. 10. Сила тяги робота  
Fig. 10. Propulsion force robot

Эксперименты также показывают, что робот плавает с самой высокой скоростью при частоте колебаний 1,5 Гц. Проводились эксперименты при частотах 0,5, 1, 1,5, 2 Гц, которые показали, что при частоте 0,5 Гц робот получает слишком малую тягу для поступательного движения, а когда частота равна или превышает 2 Гц, образовавшаяся большая водяная волна делает плавание робота неустойчивым. Таким образом, всегда существует диапазон частот, зависящий от конструкции робота, в котором

управление с помощью гибких плавников является эффективным. Более того, можно установить и частоту, при которой обеспечивается наиболее эффективное управление. В данном эксперименте максимальная скорость движения робота была достигнута в установившемся режиме при частоте 1,5 Гц. При проведении трех экспериментов при одинаковых условиях средняя скорость составила около 170 мм/с, а максимальная — около 200 мм/с.

Для исследования силы тяги робота была проведена серия экспериментов, в которых сила тяги измерялась электронным безменом с точностью 5 г. Эксперименты проводили в диапазоне частот от 0,5 Гц до 2 Гц, с амплитудой колебаний, равной 10, 15, 20 и 25° соответственно в маршевом режиме. На рис. 10 представлены результаты проведенных экспериментов, которые показали практически линейную зависимость силы тяги робота как от частоты, так и от амплитуды колебаний плавников.

На следующем этапе экспериментов были исследованы основные режимы движения. Во-первых, это походный режим прямолинейного движения (рис. 11) (вперед—назад) при условии  $\theta_{fmax} = 25^\circ$  и  $f = 1$  Гц. В этом режиме важно, чтобы скорость плавников была одинаковой независимо от того, идет ли движение вперед или назад.

При анализе вращения робота рассматривались два случая. Первый случай — вращение с неподвижным центром тяжести робота как показано на рис. 12, а. В этом случае угловая скорость определяется из уравнения (27) при условии  $V_{R-fin} = V_{L-fin}$ . Второй случай — вращение с подвижным центром тяжести робота, как показано на рис. 12, б, когда угловая скорость и радиус вращения определяются из уравнений (27), (28) при условии  $V_{R-fin} \neq V_{L-fin}$ .

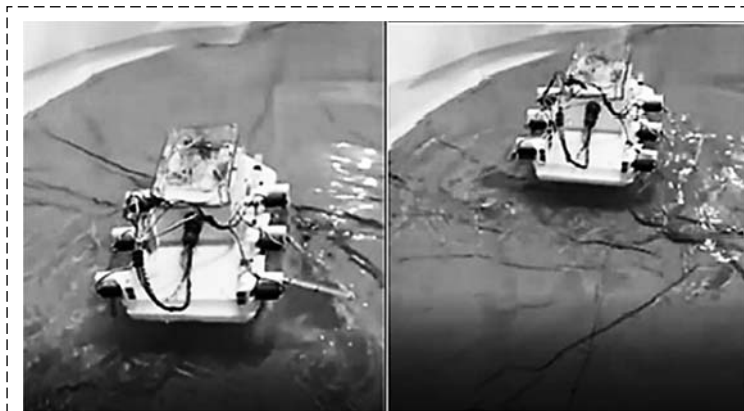


Рис. 11. Походный режим (Вперед)  
Fig. 11. Marching mode (Forward)

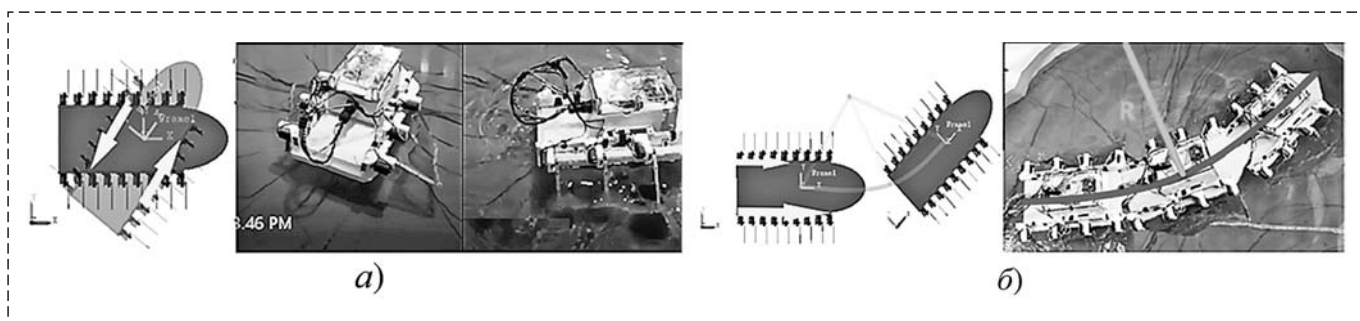


Рис. 12. Движение с неподвижным центром тяжести (а); движение с подвижным центром тяжести (б)  
Fig. 12. Rotation with a fixed center of gravity (a); Rotation with a moving center of gravity (b)



## Заклучение

В работе представлены результаты предварительного исследования волнообразного движителя подводного робота. Представлены кинематическая и динамическая модели гибкого плавника и исследовано влияние параметров движителя на скорость и силу тяги, развиваемую движителем робота.

В процессе исследования был создан макет робота и проведена серия экспериментов в целях анализа основных способов движения и проверки теоретических результатов. Показана возможность определения оптимальных значений параметров, при которых сохраняется устойчивость движения и обеспечиваются наилучшие скоростные показатели. Продемонстрированы маневренные возможности робота, близкие к возможностям наземного мобильного робота с дифференциальным приводом колес. Результаты исследований показывают, что разработка роботов с гибким плавником является перспективной и позволяет существенно повысить возможности таких устройств.

## Список литературы

1. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. Multi-agent robotic systems in collaborative robotics // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham. 2018. Sep. 18. P. 270–279.
2. Serebrennyi V., Boshliakov A., Ovsiankin G. Active stabilization in robotic vision systems // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 161. P. 03019.
3. Mashkov K., Rubtsov V., Rubtsov I. Development of robotics technologies in agriculture // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224. P. 05004.

4. Rubtsov I. V., Rubtsov V. I., Lapshov V. S., Kononov K. V. Simulation in MATLAB group control when conducting reconnaissance in areas // AIP Conference Proceedings. 2019 Dec 17. Vol. 2195, N. 1. P. 020009.
5. Serebrennyi V., Boshliakov A., Ogorodnik A. Current control in the drives of dexterous robot grippers // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. 2018 Sep. 18. P. 239–248.
6. Wang S., Wang Y., Wei Q., Tan M., Yu J. A bio-inspired robot with undulatory fins and its control methods // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2016 Oct 31. Vol. 22, N. 1. P. 206–216.
7. Bi S., Niu C., Cai Y., Zhang L., Zhang H. A waypoint-tracking controller for a bionic autonomous underwater vehicle with two pectoral fins // Advanced Robotics. 2014. May 19. Vol. 28, N. 10. P. 673–681.
8. NOA MARINE unmanned technologies as an intelligent network for remote underwater observation of the ecosystems of the Baltic Sea. URL: [https://fundacjamare.pl/file/repository/Michal\\_Latacz\\_NOA\\_MARINE\\_1.pdf](https://fundacjamare.pl/file/repository/Michal_Latacz_NOA_MARINE_1.pdf).
9. Engineers Use Biomimicry to Innovate the Propulsion of Unmanned Underwater Vehicles. URL: <https://www.ansys.com/blog/biomimicry-innovates-unmanned-underwater-vehicles>.
10. Pliant Energy Systems — Swimming Skating Crawling Robot. URL: <https://www.pliantenergy.com/robotics>
11. URL: [https://www.festo.com/tw/en/e/journal/collision-free-swimming-with-ultrasound-id\\_45231/](https://www.festo.com/tw/en/e/journal/collision-free-swimming-with-ultrasound-id_45231/)
12. Hu T., Shen L., Lin L., Xu H. Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus* // Mechanism and machine theory. 2009 Mar 1. Vol. 44, N. 3. P. 633–645.
13. Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies J. B. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion // IEEE Journal of oceanic engineering. 1999 Apr. Vol. 24, N. 2. P. 237–252.
14. Hu T., Low K. H., Shen L., Xu X. Effective phase tracking for bioinspired undulations of robotic fish models: A learning control approach // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2012 Nov. 26, Vol. 19, N. 1. P. 191–200.
15. He J., Zhang Y. Development, and motion testing of a robotic ray // Journal of Robotics. 2015 Jan 1.
16. Wang S., Dong X., Shang L. J. Thrust analysis of the undulating ribbon-fin for biomimetic underwater robots // 2011 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing. 2011. Jul 25. Vol. 1. P. 335–340.
17. Benson T. Shape effects on drag. NASA Webpage. URL: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/rocket/shaped.html>. 2004.

## Study of an Underwater Robot with an Undulating Propulsion Fin

A. Ahmad, [aws.ahmad318@gmail.com](mailto:aws.ahmad318@gmail.com), Y. Wassouf, [thelegend990@gmail.com](mailto:thelegend990@gmail.com),  
K. V. Kononov, [bmstu.kononov2011@yandex.ru](mailto:bmstu.kononov2011@yandex.ru), A. S. Yuschenko, [arkadyus@mail.ru](mailto:arkadyus@mail.ru),  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: Yuschenko Arkady S., Dr. of Sc., Professor,  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: [arkadyus@mail.ru](mailto:arkadyus@mail.ru)

Accepted on July 25, 2022

### Abstract

The article is devoted to the study and analysis of the mechanism of undulating propulsion in the case of its application in underwater robots. It gives a brief review of studies related to developing a mathematical model of the movement of an underwater robot. Robot using two-symmetry undulating fin. This mathematical model imitates the movement of some fish species, such as batoid rays. The purpose of the study was to substantiate the possibility of creating a propulsion mechanism. In this mechanism the undulating movement of the fin is provided by individual elements controlled by servomotors. With appropriate control, these movements provide the propagation of the wave in the flexible fin of the robot. The advantage of this approach is a significant increase in the maneuverability of the device compared to existing traditional models. Also, the

movement becomes almost silent. The experiments performed on a robot prototype. As a result, a relation is found between the parameters of the undulating movement and the linear speed and thrust of each fin. The parameters of undulating movement such frequency and amplitude are analyzed, to provide stable movement of the underwater robot. The experiments confirmed the possibility of implementing the proposed control method. They Showed the possibilities of controlling the direction of propulsion force by changing oscillating phase of each fin ray. Also, the possibilities of controlling the thrust of the fin by changing the amplitude and frequency of undulating movement of the fin.

**Keywords:** undulating propulsion, fin, thrust force, discrete kinematic scheme, hydromechanical analysis, differential model

For citation:

Ahmad A., Wassouf Y., Konovalov K. V., Yuschenko A. S. Study of an Underwater Robot with an Undulating Propulsion Fin, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 11, pp. 607–616.

DOI: 10.17587/mau.23.607-616

## References

1. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. Multi-agent robotic systems in collaborative robotics, *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, 2018, Sep. 18, pp. 270–279, Springer, Cham.
2. Serebrennyi V., Boshliakov A., Ovsiankin G. Active stabilization in robotic vision systems, *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 161, p. 03019.
3. Mashkov K., Rubtsov V., Rubtsov I. Development of robotics technologies in agriculture, *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 224, p. 05004.
4. Rubtsov I. V., Rubtsov V. I., Lapshov V. S., Konovalov K. V. Simulation in MATLAB group control when conducting reconnaissance in areas, *AIP Conference Proceedings*, 2019, Dec. 17, vol. 2195, no. 1, p. 020009.
5. Serebrennyi V., Boshlyakov A., Ogorodnik A. Current control in the drives of dexterous robot grippers, *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, 2018 Sep. 18, pp. 239–248.
6. Wang S., Wang Y., Wei Q., Tan M., Yu J. A bio-inspired robot with undulatory fins and its control methods, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016 Oct 31, vol. 22, no. 1, pp. 206–216.
7. Bi S., Niu C. Cai Y., Zhang L., Zhang H. A waypoint-tracking controller for a bionic autonomous underwater vehicle with two pectoral fins, *Advanced Robotics*, 2014, May 19, vol. 28, no. 10, pp. 673–681.
8. NOA MARINE unmanned technologies as an intelligent network for remote underwater observation of the ecosystems of the Baltic Sea, available at: [https://fundacjamare.pl/file/repository/Michal\\_Latacz\\_NOA\\_MARINE\\_1.pdf](https://fundacjamare.pl/file/repository/Michal_Latacz_NOA_MARINE_1.pdf)
9. Engineers Use Biomimicry to Innovate the Propulsion of Unmanned Underwater Vehicles, available at: <https://www.ansys.com/blog/biomimicry-innovates-unmanned-underwater-vehicles>.
10. Pliant Energy Systems — Swimming Skating Crawling Robot, available at: <https://www.pliantenergy.com/robotics>
11. Available at: [https://www.festo.com/tw/en/e/journal/collision-free-swimming-with-ultrasound-id\\_45231/](https://www.festo.com/tw/en/e/journal/collision-free-swimming-with-ultrasound-id_45231/)
12. Hu T., Shen L., Lin L., Xu H. Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus*, *Mechanism and machine theory*, 2009, Mar. 1, vol. 44, no. 3, pp. 633–645.
13. Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies J. B. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion, *IEEE Journal of oceanic engineering*, 1999 Apr, vol. 24, no. 2, pp. 237–252.
14. Hu T., Low K. H., Shen L., Xu X. Effective phase tracking for bioinspired undulations of robotic fish models: A learning control approach, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, Nov. 26, vol. 19, no. 1, pp. 191–200.
15. He J., Zhang Y. Development, and motion testing of a robotic ray, *Journal of Robotics*, 2015 Jan. 1.
16. Wang S., Dong X., Shang L. J. Thrust analysis of the undulating ribbon-fin for biomimetic underwater robots, *2011 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing*, 2011, Jul 25, vol. 1, pp. 335–340.
17. Benson T. Shape effects on drag. NASA Webpage, available at: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/rocket/shaped.html>.2004.

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Матросская тишина, 23с2

Телефон редакции журнала: +7(499) 270 16 52

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор М. Ю. Безменова.

Сдано в набор 26.08.2022. Подписано в печать 10.10.2022. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Заказ МН1122. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".  
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)