

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОБИОНИЧЕСКОГО ДВИЖИТЕЛЯ ПЛАВНИКОВОГО ТИПА ДЛЯ ЗАДАЧ СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Блинецов В.С., Ольшевский С.И.,

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Найдены зависимости для определения мгновенного значения угла атаки набегающего на плавник потока жидкости от параметров движителя. Показана необходимость в точном определении кинематических параметров элементов движителя на всем цикле движения и, в особенности, в крайних его положениях.

Ключевые слова: моделирование, движитель, системы управления.

Введение. Гидробионические движители давно привлекают внимание исследователей, особенно после открытия так называемого «парадокса Грея», который стимулировал большое количество исследований [1-6]. Создание движителя, способного обеспечить лучшие маневренность и экономичность, меньшую шумность и большую скорость – конечная цель таких исследований, частью которых является разработка достоверной математической модели плавникового типа для задач синтеза систем управления его работой.

Применение подобного движителя позволит увеличить эффективность подводных аппаратов (ПА), имеющих ограниченную мощность энергоустановки, поскольку позволит функционировать в течение более длительного периода времени (для автономных ПА), увеличит их подвижность и маневренность, что существенно увеличит их функциональные возможности. Предполагается, что улучшение маневренности может быть самым большим преимуществом аппаратов с плавниковым движителем по сравнению с традиционными двигателями типа гребного винта.

Актуальность исследований. Одна из наиболее известных моделей робототехнической рыбы была построена M.S. Triantafyllou и G. S. Triantafyllou [2]. Их рыба-робот имела достаточно управляемых степеней свободы, чтобы довольно точно воспроизводить плавание тунца. Исследователи определили, что форма хвоста и тела тунца способны уменьшить сопротивление движению в воде. Однако вопрос о сравнительной эффективности гребного винта и плавника все еще остается открытым.

Уменьшение шумности – второй довод в пользу дальнейших исследований в этой области. Кроме того, движитель в форме колеблющегося крыла работает более скрытно (по сравнению с гребным винтом), имеется возможность создания вектора силы в разных направлениях, что увеличивает маневренность. К. А. Harper и др. [5] предложил способ определения оптимальных коэффициентов для привода движителя. S. D. Kelly и др. [8, 9] предложили выражения для определения параметров движения в стандартной форме через метод упрощения Лагранжа

в геометрической структуре. Экспериментальная установка была модифицирована R. Mason и J. Burdick [10, 11]. Добавлены степени свободы – поворот в горизонтальной плоскости и перемещение поперек курса. К погруженной части добавлена плоская прямоугольная пластина перед стеблем движителя для эмуляции тела рыбы (корпуса аппарата). Экспериментально подтвержденная модель основывалась на квазистационарной однородной жидкости. K. Morgansen [12] предложил геометрический метод определения продольных и вращательных перемещений. Были попытки сравнения эффективности жесткого крыла, гребного винта и гибкого (составного) крыла. Было показано, что гибкое крыло может иметь наибольшую эффективность [13].

Однако, применительно к созданию эффективных систем управления ПА до сих пор остается нерешенным вопрос о практическом синтезе законов управления движителями в виду отсутствия достоверной математической модели, которая связывала бы работу движителя и поведение всего ПА через мгновенные значения сил и моментов, создаваемых движителем и параметрами состояния приводного двигателя – ток, момент, частота вращения.

Постановка задачи. Целью данной статьи является получение математической модели гидробионического движителя плавникового типа с двумя сочленениями (carangiform) и проверка ее адекватности путем сравнения результатов моделирования с существующими экспериментальными данными.

Изложение основного материала. На рис. 1 схематично показан ПА с гидробионическим движителем плавникового типа (вид сверху). Упрощенно конструкцию можно считать состоящей из трех основных элементов – корпуса ПА (1), стебля движителя (2) длиной $L_{СТ}$ и плавника (3) с хордой $L_{КР}$. Вся система имеет два сочленения O_1 и O_2 .

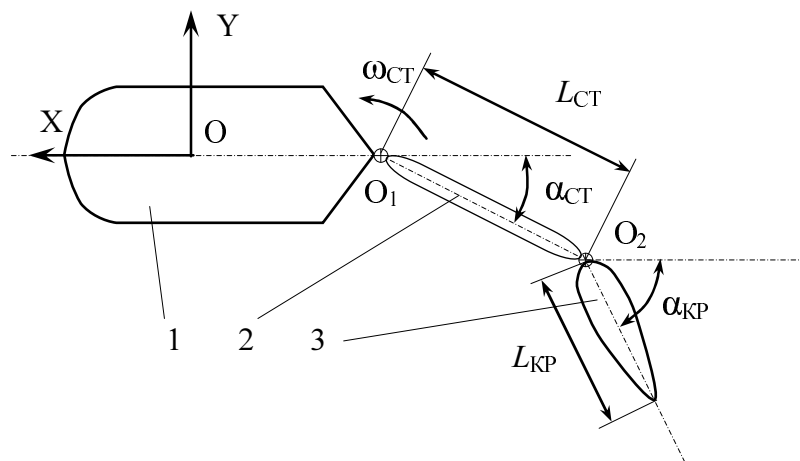


Рисунок 1 – Взаимное расположение элементов движителя

Перемещение элементов происходит в виде поворотов вокруг вертикальных осей, проходящих через кормовую оконечность ПА (точка O_1)

и хвостовую часть стебля (точка O_2).

Для упрощения решения поставленной задачи вводим ограничения, обеспечивающие возможность получения аналитических зависимостей для уравнений движения, определяемые кинематикой механизма. Задание исходных уравнений движения (гармонических или кусочно-линейных) определяет последующие уравнения по принципу координата – скорость – ускорение. Кроме того, на данном этапе рассматриваем движение ПА только в горизонтальной плоскости.

Кроме того, при разработке модели принимаем следующие допущения:

- окружающая среда – несжимаемая жидкость [14];
- гидродинамические силы определяются режимами обтекания крыла и могут быть получены по известным [14-16] зависимостям с учетом конкретных параметров набегающего потока;
- корпус ПА описывается системой дифференциальных уравнений с использованием механизма присоединенных масс и сведением всех воздействий движителя к суммарному вектору силы и суммарному моменту (в проекциях) [17, 20, 21, 22];
- силы, возникающие на стебле движителя, не учитываются ввиду их малости по сравнению с силами, возникающими на крыле [15, 17];
- длина стебля движителя достаточна для того, чтобы исключить влияние корпуса ПА на режимы обтекания крыла движителя [15, 17].

В качестве исходных данных используем следующие параметры.

Геометрические параметры:

- количество плавников движителя – 1;
- длина стебля движителя ($L_{СТ}$) – 1 м;
- положение лопасти – вертикальное;
- форма лопасти – симметричная, относительное утолщение 0,12 (профиль NASA0012);
- ширина лопасти ($L_{КР}$) – 0,1 м;
- высота лопасти ($H_{КР}$) – 0,6 м;
- площадь лопасти ($S_{КР}$) – 0,06 м².

Кинематические параметры:

- частота колебаний стебля ($f_{СТ}$) – 1,0 Гц;
- угловая частота колебаний стебля ($\omega_{СТ} = 2\pi f_{СТ}$) – 6,283 с⁻¹;
- закон изменения угла отклонения стебля ($\alpha_{СТ}$) от ДП – гармонический;
- закон изменения угла поворота крыла относительно стебля ($\alpha_{КР}$) – гармонический, линейный;
- гидродинамические коэффициенты крыла (c_x, c_y, c_m).

Кинематика движителя описана в виде двух уравнений – движение стебля и движение плавника. Оба вида движения – повороты вокруг осей O_1 и O_2 . Закон изменения угла поворота стебля вокруг оси O_1 :

$$\bar{\alpha}_{CT}(t) = \bar{\alpha}_{CT0} \cos(\omega_{CT} t).$$

Исходное состояние механизма движителя – максимальное отклонение стебля от ДП ПА в сторону правого борта.

При описании модели используем связанную систему координат $OXYZ$. Начало координат O совпадает с центром водоизмещения ПА. Ось OX располагается в ДП ПА, направлена в сторону носовой оконечности ПА, горизонтальна. Ось OY направлена вверх от центра водоизмещения. Ось OZ перпендикулярна плоскости OXY и образует с остальными осями правую систему координат [17].

Вектор собственной скорости ПА относительно воды задаем в виде проекций скоростей на оси связанной системы координат – V_X и V_Z . Линейная скорость точки O_2 определяем через угловую скорость стебля (производную от угла поворота) и длину стебля. Используя принцип сложения скоростей получаем значение проекций вектора скорости набегающего на крыло потока (в точке O_2) на оси OX и OZ :

$$V_{O_2Z} = -L_{CT} \frac{d\bar{\alpha}_{CT}}{dt} \cos\bar{\alpha}_{CT} + V_Z,$$

$$V_{O_2X} = -L_{CT} \frac{d\bar{\alpha}_{CT}}{dt} \sin\bar{\alpha}_{CT} + V_X.$$

В случае постоянной частоты ω_{CT} :

$$V_{O_2Z} = L_{CT} \bar{\alpha}_{CT0} \omega_{CT} \sin(\omega_{CT} t) \cdot \cos(\bar{\alpha}_{CT0} \cos(\omega_{CT} t)) + V_Z,$$

$$V_{O_2X} = L_{CT} \bar{\alpha}_{CT0} \omega_{CT} \cos(\omega_{CT} t) \cdot \sin(\bar{\alpha}_{CT0} \cos(\omega_{CT} t)) + V_X.$$

В случае переменной частоты $\omega_{CT}(t)$:

$$V_{O_2Z} = L_{CT} \bar{\alpha}_{CT0} (\dot{\omega}_{CT} t + \omega_{CT}) \cdot \sin(\omega_{CT} t) \cdot \cos(\bar{\alpha}_{CT0} \cos(\omega_{CT} t)) + V_Z,$$

$$V_{O_2X} = L_{CT} \bar{\alpha}_{CT0} (\dot{\omega}_{CT} t + \omega_{CT}) \cdot \sin(\omega_{CT} t) \cdot \sin(\bar{\alpha}_{CT0} \cos(\omega_{CT} t)) + V_X.$$

Определение угла вектора скорости набегающего потока через обратные тригонометрические функции (арктангенс) может привести к возникновению ошибки в знаке угла, представим вектор скорости набегающего потока в виде комплексной функции:

$$\vec{V}_{HP}(t) = V_{O_2X}(t) + j \cdot V_{O_2Z}(t).$$

Вещественную ось полагаем совпадающей с осью OX , а мнимую – с осью OZ . Угол отклонения оси крыла от оси стебля полагаем функцией времени. Тогда мгновенное значение угла атаки будет:

$$\bar{\alpha}(t) = (\beta - \bar{\alpha}_{\text{CT}}(t) - \bar{\alpha}_{\text{KP}}(t)) - \bar{\alpha}_1(t), \quad (1)$$

где $\alpha_1(t) = \arg(\bar{V}_{\text{HP}}(t))$ – угол между вектором скорости набегающего потока и положительным направлением оси ОХ.

Полная скорость обтекания крыла потоком:

$$V_{\text{HP}}(t) = \sqrt{V_{o_2 Z}^2(t) + V_{o_2 X}^2(t)}.$$

Вектор силы, воздействующий на крыло, определяется через проекции на оси скоростной системы координат – силу лобового сопротивления и подъемную силу. Кроме того, имеется и момент, стремящийся повернуть крыло таким образом, чтобы сила лобового сопротивления стала минимальной (нулевое значение угла атаки для симметричного профиля крыла) [15].

Сила лобового сопротивления:

$$R_x(t) = c_x(\bar{\alpha}(t)) \frac{\rho}{2} S V_{\text{HP}}^2(t).$$

Подъемная сила:

$$R_z(t) = c_z(\bar{\alpha}(t)) \frac{\rho}{2} S V_{\text{HP}}^2(t).$$

Вращающий момент:

$$M_y(t) = c_m(\bar{\alpha}(t)) \frac{\rho}{2} S V_{\text{HP}}^2(t) L_{\text{KP}}.$$

Модуль вектора силы, действующей на крыло:

$$R(t) = \sqrt{R_x^2(t) + R_z^2(t)}.$$

В зависимости от величины собственной скорости ПА и параметров движителя угол атаки может изменяться в значительных пределах. В частности, величина мгновенного значения угла атаки зависит от закона изменения угла поворота крыла относительно стебля во времени. Чаще всего в природе встречается гармоническое изменение. В [18] при анализе движения дельфинов была экспериментально получена зависимость угла наклона лопасти хвостового плавника к направлению движения близкая к синусу. В [6] подобные же результаты получены для рыб. При разработке роботорыбы [19] для упрощения механики движителя был реализован постоянный угол поворота крыла относительно стебля.

Приведенные выше зависимости для получения полного вектора скорости набегающего потока позволяют определить границы изменения угла атаки для выбора корректного способа определения вектора гидродинамических сил, возникающих на крыле движителя.

Переход от угла по отношению к отрицательному направлению оси ОХ

к углу между крылом и стеблем выполняем по формуле:

$$\bar{\alpha}_{\text{кр}}(t) = -\bar{\alpha}_{\text{ст}}(t) + \bar{\alpha}_{\text{кр}0 \text{ ДП}} \sin(\psi_{\text{ст}} t),$$

где $\alpha_{\text{кр}0 \text{ ДП}}$ – максимальный угол отклонения крыла от ДП ПА.

В соответствии с (1) при гармоническом изменении угла поворота крыла:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}(t) &= (p - \bar{\alpha}_{\text{ст}}(t) + \bar{\alpha}_{\text{ст}}(t) - \bar{\alpha}_{\text{кр}0 \text{ ДП}} \sin(\psi_{\text{ст}} t)) - \bar{\alpha}_1(t) = \\ &= (p - \bar{\alpha}_{\text{кр}0 \text{ ДП}} \sin(\psi_{\text{ст}} t)) - \bar{\alpha}_1(t). \end{aligned} \quad (2)$$

При постоянном повороте (с учетом направления движения) относительно стебля:

$$\bar{\alpha}(t) = p - \bar{\alpha}_{\text{ст}}(t) - \bar{\alpha}_{\text{кр}0} - \bar{\alpha}_{\text{НП}}(t). \quad (3)$$

На рис. 2 приведены графики мгновенного значения угла от времени для случая (2) (сплошная линия) и (3) (штриховая линия) при нулевой скорости движения ПА (швартовный режим). Расчет выполнялся в течении одного периода колебаний при частоте 1 Гц и $\alpha_{\text{ст}0} = 25^\circ$, $\alpha_{\text{кр}0} = \alpha_{\text{кр}0 \text{ ДП}} = 65^\circ$.

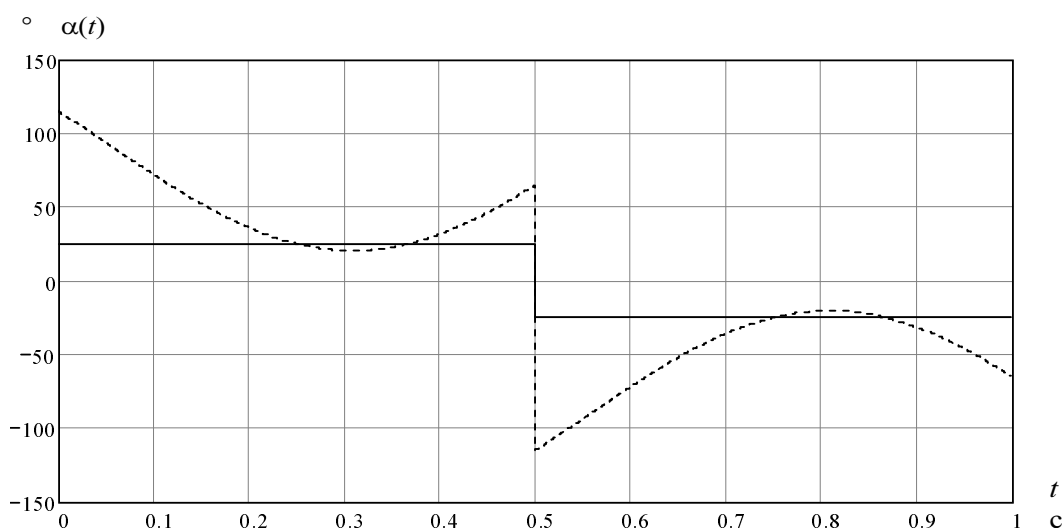


Рисунок 2 – Мгновенное значение угла атаки при $V=0$

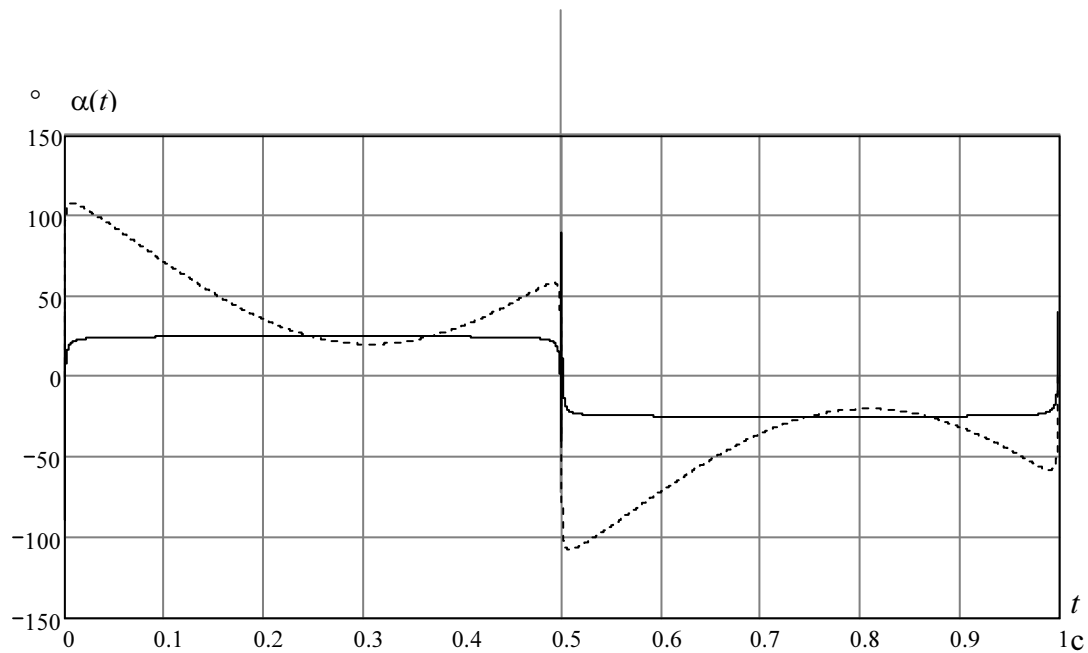


Рисунок 3 – Мгновенное значение угла атаки при $V=V_x = 0,01$ м/с

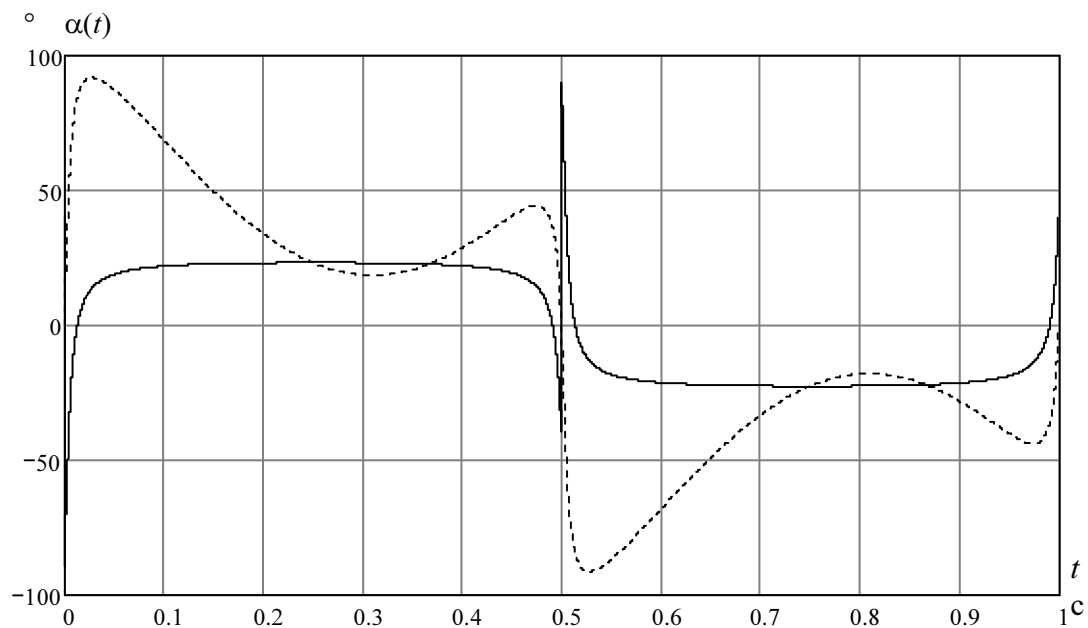


Рисунок 4 – Мгновенное значение угла атаки при $V=V_x = 0,1$ м/с

В моменты $\omega_{CT}(t)=0$ ($t = 0; 0,5$ и $1,0$ с при $f_{CT} = 1,0$ Гц) имеет место резкое изменение угла атаки (величины и/или знака). Характер этого изменения зависит от собственной скорости ПА (рис. 2 ÷ 4).

Выводы

1. Анализ научно-технической литературы показал перспективность использования в качестве движителей для надводных судов и подводных аппаратов гидробионических движителей плавникового типа, которые дают возможность повышения управляемости морских подвижных объектов, экономии энергоресурсов и снижению шумности.

2. Выполнен обзор существующих моделей гидробионических

двигателей, на основании которого установлены особенности построения и применения моделей, а так же определены их основные недостатки, что позволило уточнить требования к конструкции и техническим характеристикам модели.

3. Анализ сформированных требований к модели гидробионического двигателя позволил обосновать возможность применения кинематической модели с двумя сочленениями, что позволило использовать классические уравнения гидродинамики крыла.

4. При создании модели было учтено, что вид исходных уравнений движения стебля и плавника определяет результирующие уравнения для определения скоростей, позволяющие учесть основные рабочие режимы и характеристики гидробионических двигателей. Это позволило получить математическую модель кинематики гидробионического двигателя с двумя сочленениями.

5. В работе рассмотрены основные зависимости изменения угла наклона лопасти хвостового плавника к направлению движения подводной системы, что позволило обосновать возможность использования гармонической и линейной зависимостей, как наиболее соответствующих реальным объектам.

6. Предложенная математическая модель кинематики гидробионического двигателя с двумя сочленениями с гармонической и линейной зависимостями изменения угла наклона лопасти хвостового плавника к направлению движения подводной системы позволила выявить зависимость мгновенного значения угла атаки от пространственного положения элементов двигателя и скорости продольного перемещения подводного объекта. Это дало возможность проанализировать изменение мгновенного значения угла атаки набегающего потока в зависимости от собственной скорости подводного объекта.

7. Анализ результатов, полученных при моделировании гидробионического двигателя плавникового типа, показал необходимость дополнения модели зависимостями, учитывающими конечность скорости перекладки плавника в крайних точках отклонения стебля двигателя от ДП подводного объекта, что позволит учесть механические и энергетические особенности работы двигателя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. Hoar and D. Randall, editors. Fish Physiology, volume 7. Academic Press, 1978. Locomotion.
2. M. S. Triantafyllou and G. S. Triantafyllou. An efficient swimming machine // Scientific American. – March, 1995.
3. Слижевский Н. Б. Гидробионика в судостроении : Учеб. пособие / Н. Б. Слижевский – Николаев : УГМТУ, 2002. – 112 с.
4. J. Gray. The propulsive powers of the dolphin // Journal of Experimental Biology, August 1935. – P. 192-199.

5. Ahlborn B., Harper D. G., Blake R. W., Ahlborn D., Cam M. Fish without footprints // *Journal of Theoretical Biology*, 1991.
6. P. Liu, N. Bose. Hydrodynamic characteristics of a lunate shape oscillating propulsor. *Ocean Engineering*, 26:519–529, 1999.
7. K. A. Harper, M. D. Berkemeier and S. Grace. Modeling the dynamics of spring-driven oscillating-foil propulsion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 23(3):285–296, 1998.
8. S. D. Kelly, R. J. Mason, C. T. Anhalt, R. M. Murray, J. W. Burdick. Modeling and experimental investigation of carangiform locomotion for control. In *Proceedings of the American Control Conference*, pages 1271–1276, June 1998.
9. S. D. Kelly and R. M. Murray. Modelling efficient pisciform swimming for control. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 10:217–241, 2000.
10. R. Mason, J. Burdick. Construction and modeling of a carangiform robotic fish. In *International Symposium on Experimental Robotics*, Sydney, Australia, 1999.
11. R. Mason, J. Burdick. Experiments in carangiform robotic fish locomotion. In *Proceedings of the 2000 International Conference on Robotic and Automation*, 2000. – P. 428-435.
12. K. Morgansen, V. Duindam, R. Mason, J. Burdick, R. Murray. Nonlinear control methods for planar carangiform robot fish locomotion. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotic and Automation*, pages 427-434, 2001.
13. H. Yamaguchi, N. Bose. Oscillating foils for marine propulsion. In *Proceedings of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference*, volume 3, April 1994. – P. 539-544.
14. Кравец А. С. Характеристики авиационных профилей. – М., Л. : Государственное издательство оборонной промышленности, 1939. – 332 с.
15. Павленко В. Г. Основы механики жидкости / В. Г. Павленко. – Л. : Судостроение, 1988. – 240 с.
16. Егоров В. И. Подводные буксируемые системы / В. И. Егоров. – Л. : Судостроение, 1981. – 304 с.
17. Пантов Е. Н. Основы теории движения подводных аппаратов / Е. Н. Пантов, Н. Н. Махин, Б. Б. Шереметов. – Л. : Судостроение, 1973.
18. Романенко Е. В. Гидродинамика дельфинов. Аналитический обзор. Проекты РФФИ №93-04-21415, №96-04-48671, №99-04-48317.
19. Hirata K. Development of Experimental Fish Robot. *Proceeding of the 6th International Symposium on Marine Engineering*. Volume 2, Tokyo, Japan, 2000. – P. 711-714.
20. Блинцов В. С. Моделирование движения необитаемого подводного аппарата / В. С. Блинцов, С. И. Ольшевский // *Зб. наук. пр. УДМТУ*. – Миколаїв : УДМТУ, 1998. – № 12. – С. 109-118.
21. Ольшевский С. И. Математическое моделирование режима рывка привязного подводного аппарата / С. И. Ольшевский // *Зб. наук. пр.*

УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 1999. – № 5. – С. 7-13.

22. Ольшевский С. И. Упрощенное моделирование динамики подводного аппарата в задачах программного управления движением / С. И. Ольшевский // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 2000. – № 4. – С. 147-156.

Блінцов В.С., Ольшевський С.І. МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОБІОНІЧНОГО РУШІЯ ПЛАВНИКОВОГО ТИПУ ДЛЯ ЗАВДАННЯ СИНТЕЗУ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ
Знайдено залежності для визначення миттєвого значення кута атаки потоку рідини, що набігає на плавник, від параметрів рушія. Показано необхідність точного визначення кінематичних параметрів елементів рушія протягом всього циклу руху і, особливо, у крайніх його положеннях.

Ключові слова: моделювання, рушій, система керування.

Blintsov V.S., Olszewski S.I. THE HYDROBIONICS THRUSTER OF FLIPPER TYPE DESIGN FOR SYSTEMS MANAGERMENTS SYNTHESIS TASKS

There being determined the dependence of attack corner instantaneous value from the liquid stream, running up to a flipper, from the propeller parameter. A necessity for the accurate determination of the kinematical parameters of the thruster elements at the whole cycle of motion and, particularly, in the extreme positions, is exposed.

Keywords: design, thruster, control systems.