

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БИОНИЧЕСКОГО ПЛАВАЮЩЕГО РОБОТА

© 2010 Б.В. Лушников, С.Ф. Яцун, Е.Н. Политов, Е.С. Тарасова

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Поступила в редакцию 16.11.2010

Представлены результаты математического компьютерного моделирования динамики автономного подводного робота, основанного на бионических принципах движения. Разработанный вычислительный программный комплекс на основе прикладного пакета имитационного моделирования Simulink/MatLab позволяет исследовать влияние различных параметров конструкции робота и факторов среды на кинематические и динамические характеристики его движения и управления, проводить оптимальный синтез его конструкции и системы управления.

Ключевые слова: *подводные плавающие роботы, бионические принципы движения, математическое моделирование*

Естественный отбор обеспечил оптимальную конструкцию тела рыбы, приспособленность к ареалу обитания, условиям окружающей среды, повышенную эффективность перемещения. Их выдающиеся способности могут оказать влияние на развитие искусственных устройств, предназначенных для работы в водной среде. Примером применения конструкций, основанных на механике рыб, могут быть необитаемые подводные аппараты (НПА) [1]. При разработке НПА предъявляются повышенные требования к эффективности устройств с целью обеспечить возможность совершать более длительные миссии. Использование чрезвычайно эффективной механики океанических рыб может позволить создать устройства, превосходящие все используемые на данный момент. В плане маневренности и способности к «зависанию» современные механизмы значительно уступают рыбам, так как требуют для этого совершения дополнительных (излишних) действий. Дополнительные преимущества, такие как более тихая работа, менее заметный след на воде являются важными для военных приложений. Подобные роботы разрабатываются с целью оценки их преимуществ, изучения способов использования водных механизмов, разработанных с использованием механики рыб и других морских обитателей [1-4]. Для разработки такого типа роботов важно,

чтобы инженеры имели возможность изучить особенности плавания в воде, что поможет оценить качество собственных разработок и продвинуть дальше теоретические исследования.

Расчетная схема и математическая модель динамики бионического плавающего робота. В качестве расчетной схемы для построения математической модели перемещения бионического плавающего робота в горизонтальной плоскости примем трехзвенную кинематическую схему (рис. 1).

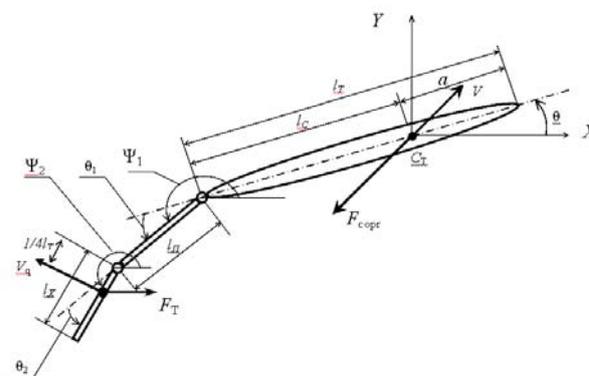


Рис. 1. Расчетная схема бионического плавающего робота в горизонтальной плоскости

На схеме приняты следующие обозначения: $X-Y$ – прямоугольная абсолютная система координат; l_T – длина «тела» робота; l_{Π} – длина хвостового стебля; l_X – длина хвостового плавника; C_T – точка, соответствующая центру масс «тела» робота; V – вектор абсолютной скорости центра масс; V_q – вектор линейной скорости точки хвостового плавника, отстоящей на расстоянии $1/4$ его длины от оси вращения; θ – угловая координата центральной продольной осевой линии тела робота; θ_1 и θ_2 – относительные углы поворота хвостового стебля и хвостового плавника соответственно вокруг своих осей вращения;

Лушников Борис Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и мехатроники. E-mail: boris@mail.kursknet.ru

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики и мехатроники. E-mail: teormeh@inbox.ru

Политов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и мехатроники. E-mail: poitovuevgeny@rambler.ru

Тарасова Елена Сергеевна, аспирантка

ψ_1 и ψ_2 – абсолютные угловые координаты положения хвостового стебля и хвостового плавника соответственно; F_T – вектор силы тяги, возникающей при движении хвостового плавника; F_{copr} – вектор силы сопротивления движению тела робота.

«Тело» робота-рыбы так же, как и хвостовой плавник будем считать плоскими недеформируемыми пластинами. В качестве обобщенных координат рассматриваемой системы примем $[X, Y, \theta, \psi_1, \psi_2]$. Относительные угловые координаты поворота хвостового стебля $\theta_1(t)$ и хвостового плавника $\theta_2(t)$ на первой стадии исследования выступают как задающие движение робота, т.е. считаются кинематически заданными. Тогда абсолютные координаты ориентации хвостового стебля и хвостового плавника определяются выражениями

$$\psi_1(t) = \theta(t) + \pi + \theta_1(t), \quad (1)$$

$$\psi_2(t) = \psi_1(t) + \theta_2(t) = \theta(t) + \pi + \theta_1(t) + \theta_2(t) \quad (2)$$

Принятая расчетная схема соответствует окунеподобному стилю плавания [2-4], при котором в формировании тягового усилия участвует треть длины тела совместно с хвостовым плавником. Окунеподобный стиль движения является одним из наиболее легко реализуемых в механических аналогах гидробионтов. Кроме того, он является эффективным как с позиций обеспечения высоких линейных скоростей плавания, так

и с позиций достаточно высокой степени маневренности. В качестве допущений примем, что масса робота распределена по его «телу», а хвостовой плавник и хвостовой стебель являются безинерционными. Также примем, что силы сопротивления хвоста и силы тяги «тела» пренебрежимо малы по сравнению с силами сопротивления «тела» и силой тяги, приложенной к хвостовому плавнику. Используя положения аэродинамической теории крыла, подъемную (тяговую) силу, действующую на движущуюся плоскую пластину, можно определить согласно следующему выражению [4]:

$$\vec{F}_T = \pi \rho S (\vec{v}_q \times \vec{l}_e) \times \vec{v}_q, \quad (3)$$

где ρ – плотность среды (воды); S – площадь поверхности пластины; \vec{v}_q – вектор скорости точки пластины, находящейся на расстоянии четверти её длины от оси вращения (см. рис. 1); \vec{l}_e – единичный вектор, расположенный в плоскости пластины и определяемый координатами

$$l_{e,t} = [-\cos(\psi_2) - \sin(\psi_2), 0] \quad (4)$$

Координаты вектора скорости \vec{v}_q определяются следующими выражениями

$$V_{qX}(t) = V_X + L_{cort} \sin[(\theta(t))\dot{\theta}(t) - L_p \sin[\psi_1(t)]\dot{\psi}_1(t) - \frac{L_t}{4} \sin[\psi_2(t)]\dot{\psi}_2(t)], \quad (5)$$

$$V_{qY}(t) = V_Y + L_{cort} \cos[(\theta(t))\dot{\theta}(t) - L_p \cos[\psi_1(t)]\dot{\psi}_1(t) - \frac{L_t}{4} \cos[\psi_2(t)]\dot{\psi}_2(t)], \quad (6)$$

$$V_{qZ(t)} = 0. \quad (7)$$

Тогда проекции вектора силы тяги F_T на оси X и Y в соответствии с (3) - (7) с учетом двойного векторного произведения векторов будут иметь вид

$$F_{TX}(t) = \pi \rho S [V_{qX}(t) \sin[\psi_2(t)] - V_{qY}(t) \cos[\psi_2(t)]] V_{qY}(t), \quad (8)$$

$$F_{TY}(t) = \pi \rho S [-V_{qX}(t) \sin[\psi_2(t)] + V_{qY}(t) \cos[\psi_2(t)]] V_{qX}(t). \quad (9)$$

Относительные движения хвостового стебля $\theta_1(t)$ и хвостового плавника $\theta_2(t)$ будем задавать по гармоническим законам

$$\theta_1(t) = \alpha_1 \sin(\omega t), \quad \theta_2(t) = \alpha_2 \sin(\omega t). \quad (10)$$

Положение «тела» робота-рыбы зададим параллельным оси X ($\theta=0$) головой вправо, а хвостом – влево. Тогда абсолютные угловые координаты $\psi_1(t)$ и $\psi_2(t)$ будут определяться выражениями (1) и (2) с учетом (10). Помимо силы тяги на хвостовую пластину будет действовать момент, определяемый выражением [3, 4]:

$$M_t = -\pi\rho \frac{L_t^2}{4} \left(\dot{x}_m \dot{y}_m \cos(2\psi_2(t)) + \frac{1}{2} (\dot{y}_m^2 - \dot{x}_m^2) \sin(2\psi_2(t)) \right), \quad (11)$$

где \dot{x}_m, \dot{y}_m - проекции вектора скорости средней точки хвостовой пластины на оси X и Y , определяемые аналогично (6) и (7).

На тело робота-рыбы будут также действовать момент от вектора силы тяги, сила сопротивления жидкости и момент сил вязкого сопротивления. Для определения последних двух факторов необходимо интегрирование распределенных по поверхности тела робота-рыбы сил. Для предварительных расчетов будем считать эти силовые факторы пропорциональными соответствующим обобщенным скоростям

$$F_{soprX} = \mu_X V_X, \quad F_{soprY} = \mu_Y V_Y, \quad M_{sopr} = \mu_0 \dot{\theta}. \quad (12)$$

Момент, действующий на тело робота, от силы тяги относительно его центра масс, определим в соответствии с векторным произведением

$$M_C(F_T) = [X_{cq}, Y_{cq}] \times [F_{TX}, F_{TY}], \quad (13)$$

где X_{cq}, Y_{cq} – координаты вектора, связывающего центр масс тела робота-рыбы т. C_T и точку приложения силы тяги на хвостовом плавнике. В результате получим:

$$M_C(F_T) = Y_{cq} F_{TX} - X_{cq} F_{TY}. \quad (14)$$

Тогда система алгебро-дифференциальных уравнений, описывающих динамику рассматриваемой системы, будет иметь вид:

$$\begin{cases} m_{tX} \ddot{X} = F_{TX}(X, Y, \theta, \psi_1, \psi_2, t) + F_{sopr}(\dot{X}); \\ m_{tY} \ddot{Y} = F_{TY}(X, Y, \theta, \psi_1, \psi_2, t) + F_{sopr}(\dot{Y}); \\ I_0 \ddot{\theta} = M_C(F_T) + M_{sopr}(\dot{\theta}) + M_t(\dot{X}, \dot{Y}, \theta, \psi_1, \psi_2); \\ \psi_1(t) = \pi + \theta(t) + \theta_1(t); \\ \psi_2(t) = \psi_1(t) + \theta_2(t). \end{cases} \quad (15)$$

Входящие в систему уравнений (15) выражения определяются формулами (8-12), (14). Величины приведенных масс робота m_{tX} и m_{tY} должны быть определены с учетом эффекта присоединенных масс жидкости, участвующей в движении. Обеспечивающие движение робота-рыбы функции относительных углов поворота хвостового стержня $\theta_1(t)$ и хвостового плавника $\theta_2(t)$ будем задавать в виде тригонометрических функций (10). Причем заданием дополнительного определенного угла $\theta_1(t)$ представляется возможным выполнять поворот корпуса робота-рыбы.

Математическое моделирование динамики бионического плавающего робота.

Математическое моделирование динамики плавающего робота-рыбы рассматриваемой конструкции будем осуществлять в среде имитационного компьютерного моделирования Simulink/MatLab [5]. Основная Simulink-программа компьютерного моделирования динамики робота-рыбы в соответствии с системой уравнений (15) представлена на рис. 2. Расположим составные элементы трехсекционного робота-рыбы горизонтально вдоль оси X головой вправо, т.е. вектор начальных координат рассматриваемой системы будет равен $[X_0, Y_0, \theta_0, \psi_{10}, \psi_{20}] = [0, 0, 0, \pi, \pi]$, и зададим движение хвостового плавника.

На рис. 3 представлен годограф вектора силы тяги, создаваемой угловым колебательным движением хвостового плавника с амплитудой $\alpha_2=0,3$ рад. и частотой $\omega_2=2$ с⁻¹ по закону $\theta_2(t) = \alpha_2 \sin(\omega_2 t)$ при неподвижном состоянии хвостового стебля $\theta_1(t)=0$ и значениях параметров $S=0,02$ м², $L_T=0,2$ м, $L_P=0,1$ м, $L_{corp}=0,3$ м.

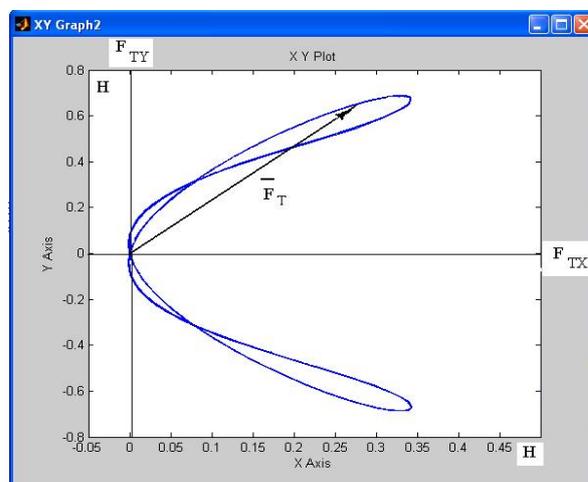


Рис. 3. Годограф вектора силы тяги, создаваемой угловым колебательным движением хвостового плавника

Как следует из анализа рис. 3, годограф вектора силы тяги имеет симметричное расположение относительно оси X , описывая за период колебательного движения хвостового плавника некоторую петлю в I и IV квадрантах. Следовательно, пульсации силы тяги на вертикальную ось Y за период взаимно компенсируются, а горизонтальные составляющие за каждый полупериод положительны и будут обеспечивать продвижение робота вперед (т.е. вправо) вдоль его

центральной оси. На рис. 4 представлена траектория движения робота-рыбы в горизонтальной плоскости за 50 с, а изменения самих обобщенных координат во времени, определяющих движение и ориентацию тела робота, даны на рис. 5-7. Средняя скорость направленного вдоль оси X перемещения составила 0,176 м/с, а само перемещение – более 8 м. Некоторая волнистость траектории носит вполне закономерный характер и вызвана колебаниями тела робота в поперечном основному движению направлении из-за углового колебательного движения хвостового плавника.

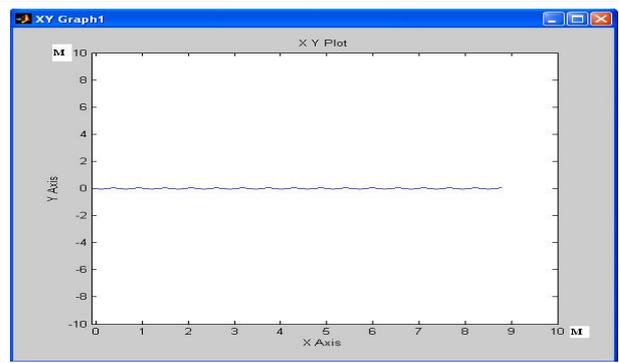


Рис. 4. Траектория движения робота-рыбы в горизонтальной плоскости за 50 с

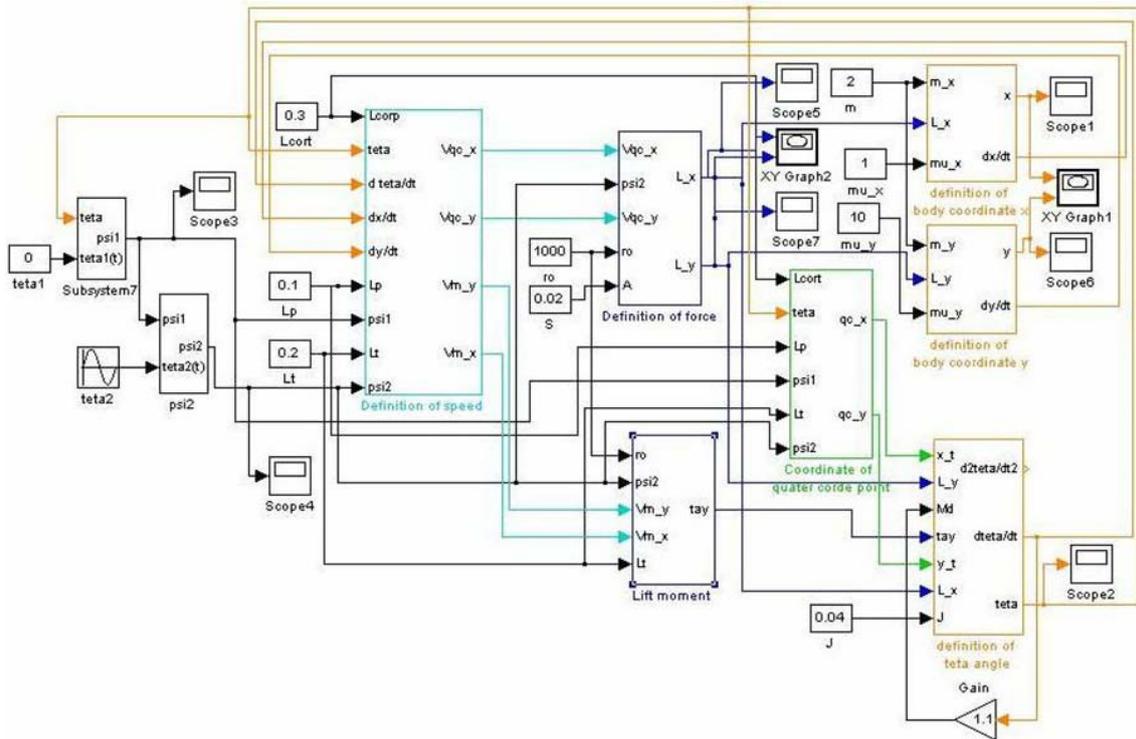


Рис. 2. Simulink-программа компьютерного моделирования динамики робота-рыбы

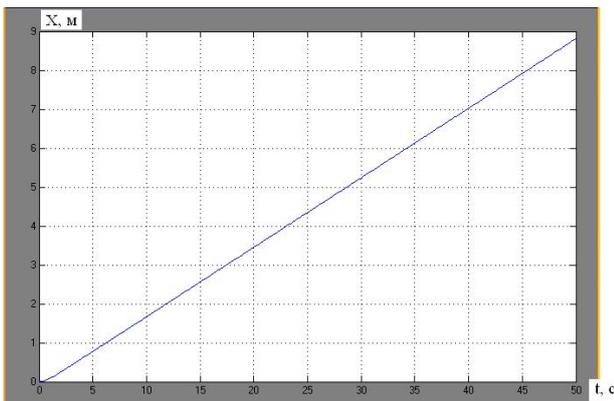


Рис. 5. График изменения во времени перемещения центра масс робота-рыбы по оси X

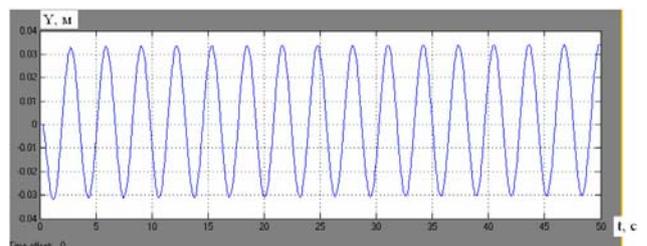


Рис. 6. График изменения во времени перемещения центра масс робота-рыбы по оси Y

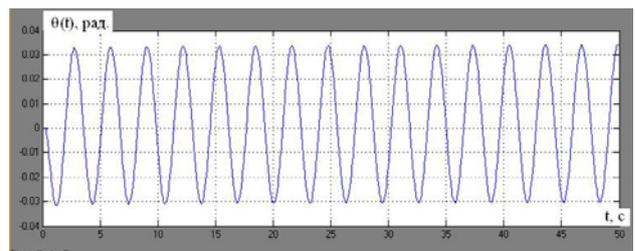


Рис. 7. График изменения во времени углового перемещения тела робота-рыбы $\theta(t)$ относительно положительного направления оси X

Рассмотрим теперь траекторию полного разворота корпуса модели робота-рыбы из состояния покоя, задав закон изменения относительного угла поворота хвостового стебля в виде $\theta_1(t) = \alpha_1 \sin(\omega_1 t)$ при значениях параметров $\alpha_1 = 1$ рад, $\omega_1 = 0,5 \text{ с}^{-1}$ и $\alpha_2 = 0,3$ рад $\omega_2 = 1 \text{ с}^{-1}$. Полученная траектория движения представлена на рис. 8. Форма траектории обусловлена законом управления относительного угла отклонения хвостового стебля от главной оси тела робота-рыбы. Для обеспечения другой требуемой траектории необходимо задавать некоторый другой закон $\theta_1(t)$ или корректировать его в зависимости от положения корпуса робота.

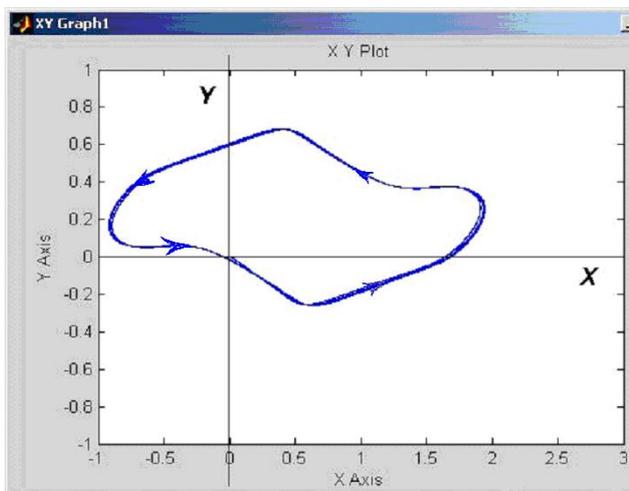


Рис. 8. Траектория разворота на 180° робота-рыбы в горизонтальной плоскости за 80 с ($\theta_1(t) = \alpha_1 \sin(\omega_1 t)$, $\alpha_1 = 1$ рад, $\omega_1 = 0,5 \text{ с}^{-1}$, $\alpha_2 = 0,3$ рад $\omega_2 = 1 \text{ с}^{-1}$)

Поставим задачу разворота корпуса робота-рыбы в процессе «прямолинейного» движения на 180° . С этой целью зададим закон изменения относительного угла поворота хвостового стебля в виде полуволны синусоиды (рис. 9). Траектория такого движения и разворота на 180° робота-рыбы за 80 с при значениях параметров $\alpha_2 = 0,3$ рад, $\theta_1(t) = \text{var}$, $\omega_2 = 1 \text{ с}^{-1}$ представлена на рис. 10. Как видно из анализа полученной траектории, разворот корпуса происходит с малым радиусом, без существенного заноса и искажения траектории.

Таким образом, полученные результаты моделирования движения робота-рыбы при различных задаваемых законах управления свидетельствуют об адекватном поведении исследуемой системы и подтверждают правильность разработанной математической модели и функционирования вычислительного программного комплекса для ее решения.

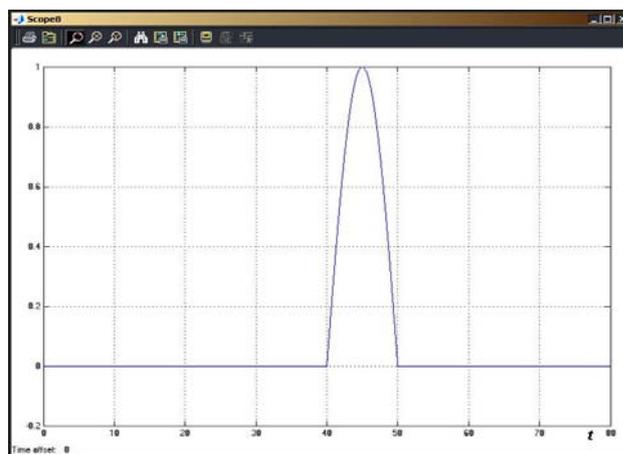


Рис. 9. Закон изменения во времени относительного угла $\theta_1(t)$ хвостового стебля, обеспечивающий разворот модели робота-рыбы на 180°

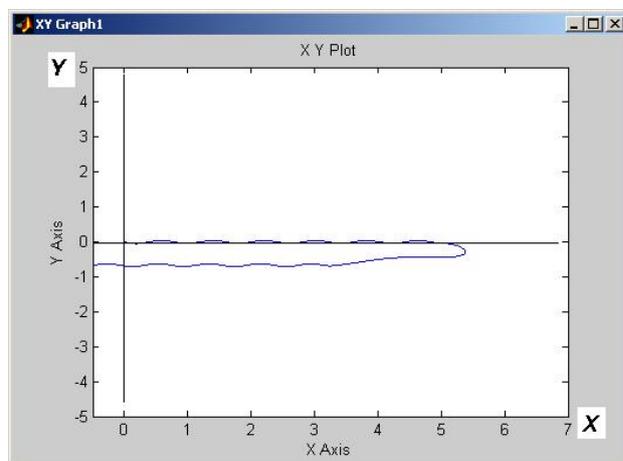


Рис. 10. Траектория движения и разворота на 180° робота-рыбы в горизонтальной плоскости за 80 с ($\alpha_2 = 0,3$ рад., $\theta_1(t) = \text{var}$, $\omega_2 = 1 \text{ с}^{-1}$)

Выводы: полученные траектории движения, и законы изменения обобщенных координат качественно соответствуют результатам, полученным в работах [2-4]. Конкретные значения коэффициентов сопротивления и других констант дифференциальных и алгебраических уравнений, используемых в данной модели, должны быть уточнены из специально поставленных экспериментов для конкретного прототипа робота-рыбы. Разработанная математическая модель и вычислительный программный комплекс позволят решать задачи оптимизации параметров конструкции разрабатываемого робота и ее системы управления.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по проблеме «Разработка бионического плавающего робота для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере» (гос. контракт № П971).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бочаров, А.Ю. Современные тенденции в развитии миниатюрных подводных аппаратов и роботов за рубежом / А.Ю. Бочаров // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 36-52.
2. Kelly, S.D. Modeling and experimental investigation of carangiform locomotion for control / S. D. Kelly, R. J. Mason, C. T. Anhalt et al. // Proc. of the 1998 Amer. Cont. Conf., 1998. P. 1271-1276.
3. Mason, R.J. Experiments in carangiform robotic fish locomotion / R. J. Mason, J. W. Burdick // Proc. of the 2000 ICRA, 2000. P. 428-435.
4. Morgansen, K.A. Nonlinear Control Methods for Planar Carangiform Robot Fish Locomotion / K.A. Morgansen, V. Duindam, R.J. Mason, J.W. Burdick // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001. P. 427-434.
5. Дьяконов, В.П. MATLAB 6/6 + Simulink 4/5. Основы применения. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 768 с.

COMPUTER SIMULATION OF BIONIC FLOATING ROBOT DYNAMICS

© 2010 B.V. Lushnikov, S.F. Yatsun, E.N. Politov, E.S. Tarasova

Southwest State University, Kursk

Results of mathematical computer simulation of autonomous underwater robot dynamics based on bionic principles of driving are presented. The designed computing program complex on the basis of application package of simulation modeling Simulink/MatLab allows to examine influence of various parameters of robot construction and factors of environment on kinematic and dynamic responses of its driving and control to spend optimum synthesis of its construction and control system.

Key words: *underwater floating robots, bionic principles of driving, mathematical simulation*

Boris Lushnikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Theoretical Mechanics and Mechatronics. E-mail: boris@mail.kursknet.ru

Sergey Yatsun, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Theoretical Mechanics and Mechatronics. E-mail: teormeh@inbox.ru

Evgeniy Politov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Theoretical Mechanics and Mechatronics. E-mail: poitovyevgeny@rambler.ru

Elena Tarasova, Post-graduate Student