

# **Синтез и исследование авторулевого надводного мини-корабля «Нептун»**

**В.Х. Пшихопов, Б.В. Гуренко**

## **Введение**

В настоящей работе предлагается подход к реализации системы автоматического управления автономных необитаемых надводных кораблей на примере надводного мини-корабля «Нептун». Как показано в работах [1-5] многие подходы к проектированию систем автоматического управления обладают рядом недостатков. Наиболее значимые из них, это, во-первых, разделение движений по каналам, как это принято в классических системах управления подвижными объектами, которое может приводить к качественному несоответствию желаемой и реальной траекторий движения, во-вторых, это разделение общего движения на движения в продольной и поперечной плоскостях. В автоматическом режиме такое разделение движений, которое имеет целью свести задачу синтеза многосвязным нелинейным объектом к синтезу линейных односвязных регуляторов, приводит к потере качества управления в режимах больших отклонений.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что классическая структура и идеология построения систем управления движением работоспособна в ограниченной области координат. Если, какое-либо возмущение (например, сильное течение, которое нельзя компенсировать полностью из-за энергетических ограничений) выведет корабль в область «больших» отклонений, то это может привести к нарушению устойчивости и, как следствие, аварийной или критической ситуации.

Предлагаемые в работе подходы базируются на принципах управления динамическими объектами [1-5,7], а также на введении в структуру системы автопилотирования блоков оценивания [8-10] как параметрических, так и структурных возмущений.

## Математическая модель

Математическая модель надводного мини-корабля “Нептун”, в соответствии с результатами, полученными в [6], имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_g \\ \dot{z}_g \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_x \\ V_z \\ \omega_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} m \frac{dV_x}{dt} &= F_x^u + R_X^A + R_X^r + F_e \\ J_y \frac{d\omega_y}{dt} &= M_y^u + M_Y^A + M_Y^r + M_e \end{aligned} \quad (2)$$

где  $m$  – масса судна;  $V_x$  – продольная скорости судна;  $R_X^A, R_X^r, M_Y^A, M_Y^r$  – гидро- и аэродинамические силы и моменты создаваемые ими;  $J_y$  – момент инерции относительно оси  $Y$ ;  $\omega_y$  – угловая скорость относительно оси  $Y$ ;  $F_x^u, M_y^u$  – управляющая сила и момент, создаваемые двигателем и рулевой колонкой;  $\dot{x}_g, \dot{z}_g$  – скорость изменение координат положения центра тяжести корабля в неподвижной системе координат;  $\dot{\varphi}$  – скорость изменения угла ориентации в неподвижной системе координат.

## Синтез авторулевого

На основе теории позиционно-траекторного управления [1,2,3,4] проф. Пшихопова В.Х. сформируем такой закон управления, который позволит выполнять задачи позиционирования в точку и движения по заданному курсу. Для этого для модели объекта (1) и (2) введем следующие переменные:

$$\begin{aligned} \Psi_{mp} &= \varphi - \varphi_3 = 0 \\ \Psi_{ck} &= V_x - V_3 = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

где  $V_3, \varphi_3$  – заданная скорость и курс надводного мини-корабля.

В соответствии с методикой, описанной в [2,4] получим

$$F_u = -M\Psi_u - F_d - \hat{F}_e \quad (4)$$

где  $\Psi_u = \begin{bmatrix} -T_3^{-1}\Psi_{ск} \\ -(T_1T_2)^{-1}[(T_1+T_2)\dot{\Psi}_{mp} + \Psi_{mp}] \end{bmatrix}$ ;  $T_1, T_2, T_3$  - постоянные времени;  $\hat{F}_6$  -

оценка возмущающих сил.

Для оценки неизмеряемых внешних сил и моментов введем в структуру системы управления наблюдатель внешних возмущений. За основу возьмем структуру наблюдателя, разработанную проф. Медведевым М.Ю.[2,5].

Для формирования этой оценки получены следующие алгоритмы:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -Lz - LMX - L(F_u + F_d) \\ \hat{F}_6 &= z + LMX \end{aligned} \quad (5)$$

где  $L = \begin{pmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \end{pmatrix}$  -коэффициенты наблюдателя.

### **Разработка моделирующей среды для исследования замкнутой системы управления надводным мини-кораблем**

Для моделирования замкнутой системы в автономном режиме на языке MATLAB был разработан моделирующий комплекс. В этот комплекс входят программные модули наблюдателя, регулятора, блоков построения графиков и т.д. Основными элементами разработанного комплекса являются уравнений кинематики (1) и динамики (2) надводного мини-корабля, записанные в отдельном m-файле.

Для интегрирования уравнений кинематики и динамики используются встроенные в Matlab функции ode23 и ode45, которые предназначены для численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

На рисунке 1 показана структура программного комплекса. Файл boat\_main.m включает задание параметров моделирования, вызов функции ode45, которой передается имя файла boat\_fun.m, рассчитывающего правые части дифференциальных уравнений модели мини-корабля. По результатам интегрирования строятся графики. В файле boat\_fun.m на каждом шаге интегрирования происходит вызов функций планировщика, наблюдателей и регулятора.

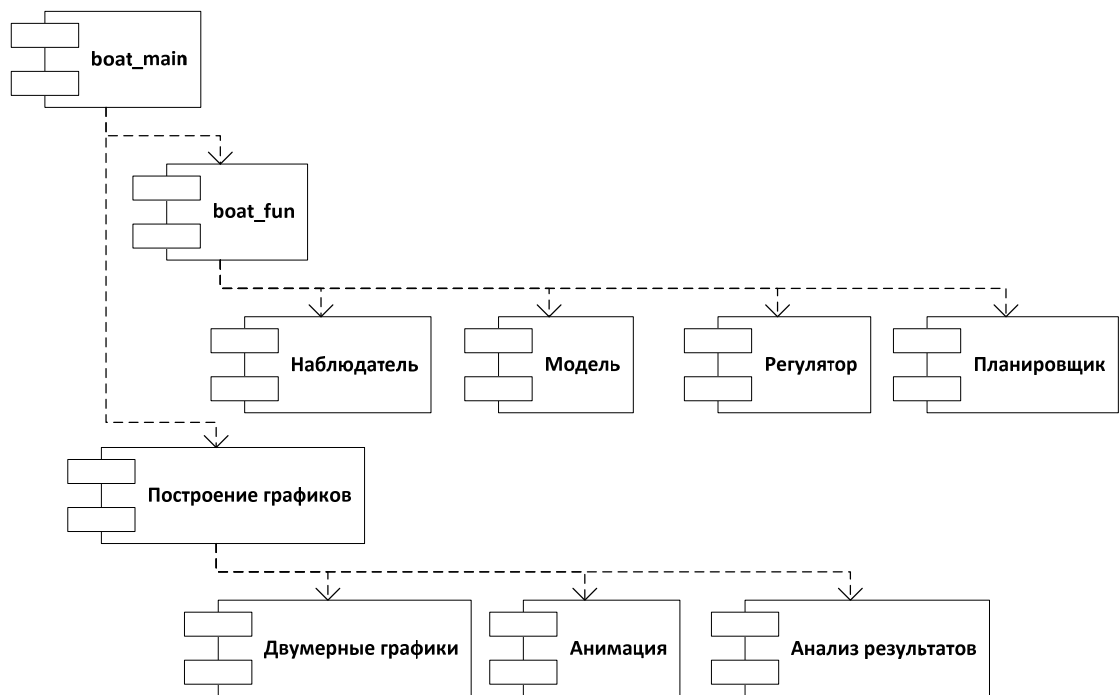


Рис. 1. - Организация файлов при реализации модели мини-корабля на m-языке с использованием функций ode

### Моделирование движения при движении по заданному курсу

Мини-корабль из точки  $(0;0)$  должен двигаться по курсу  $\varphi_3 = 1 \text{ рад}(57^\circ)$  со скоростью движения  $V_3 = 1.5 \text{ м/с}$ .

Значение коэффициентов в выражении (3)  $\Psi_{mp} = \varphi - 1$   
 $\Psi_{ск} = V_x - 1,5, T_1 = T_2 = T_3 = 1.5$ .

Ограничения на управляющие воздействия установлены следующие:

$$F_{\max} = 40 \text{ Н} \quad \alpha = \pm 30^\circ$$

Результаты моделирования представлены на рисунках 2-5.

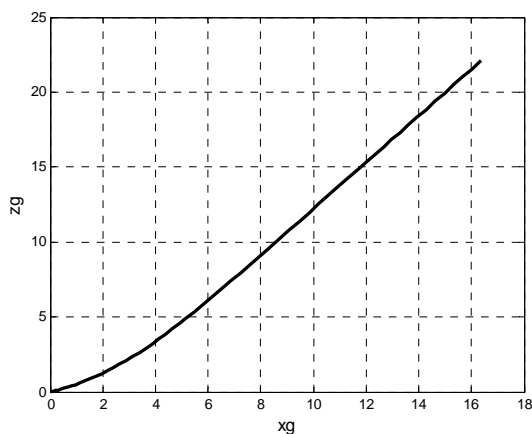


Рис. 2. – Траектория движения мини-

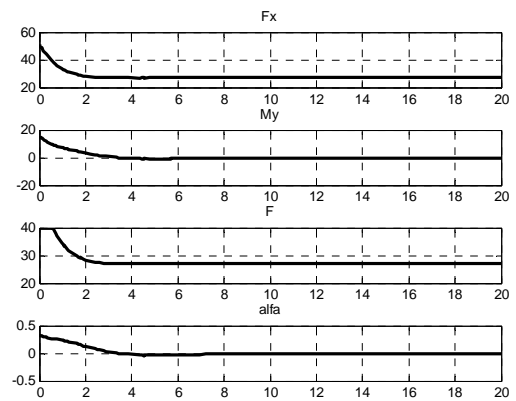


Рис. 3. – Управляющие силы и моменты, вырабатываемые

корабля

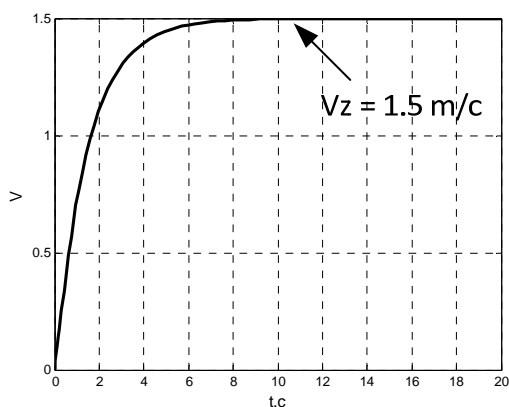


Рис. 4. – Изменение скорости движения мини-корабля

регулятором

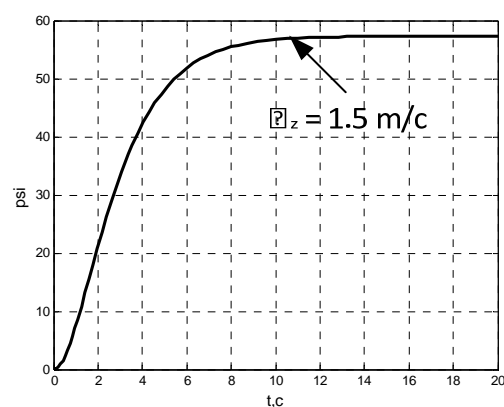


Рис.5.– Изменение курса движения мини-корабля

### Моделирование движения при позиционировании в точку

При решении позиционной задачи мини-корабль из начального положения должен переместиться в заданную точку ( $x_0=25; z_0=25$ ). При решении позиционной задачи желаемый угол определяется как

$$\varphi_s = \arctg\left(\frac{x_0 - x_g}{z_0 - z_g}\right),$$

где ( $x_g; z_g$ )- текущее положение мини-корабля. При подходе к точке позиционирования и при выполнении условия :

$$\sqrt{(x_0 - x_g)^2 + (z_0 - z_g)^2} < \varepsilon, \text{ где } \varepsilon = 3 \text{ м},$$

заданная скорость движения в выражении (2) принимается равной нулю

$V_s = 0 \text{ м / с}$ . Так как у мини-корабля отсутствует задний ход, то осуществить более точное позиционирование не представляется возможным. Результаты моделирования показаны на рисунках 6-9.

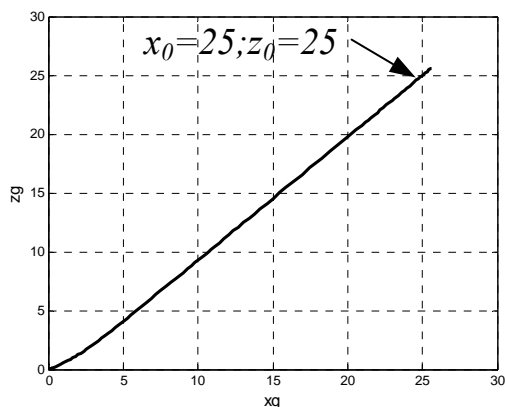


Рис. 6. – Траектория движения мини-корабля

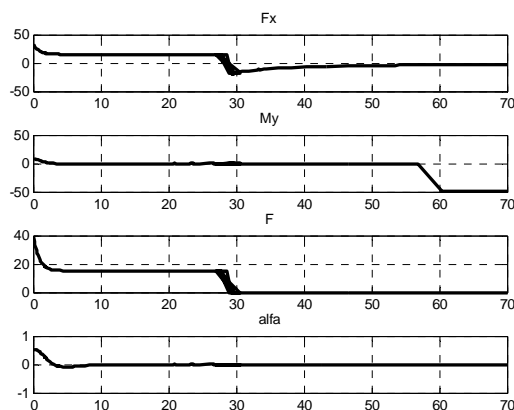


Рис. 7. – Управляющие силы и моменты, вырабатываемые регулятором

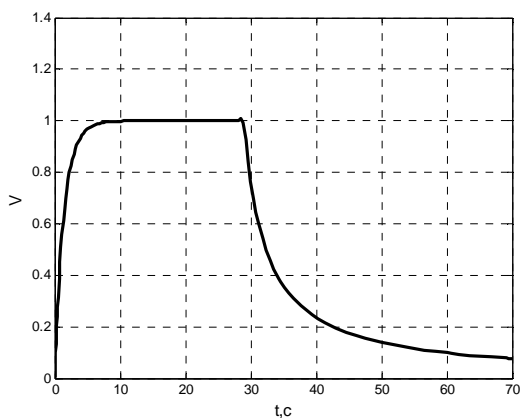


Рис. 8. – Изменение скорости движения мини-корабля

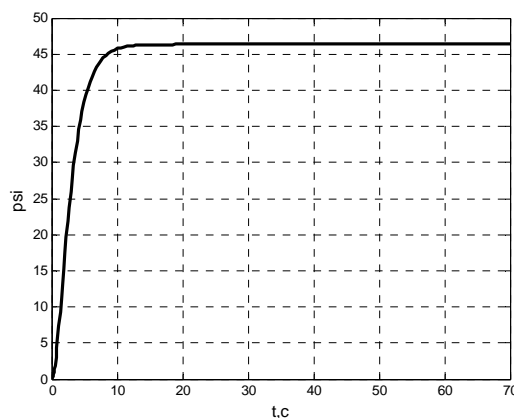


Рис.9.– Изменение курса движения мини-корабля

## Заключение

Полученные результаты моделирования подтверждают эффективность и корректность предлагаемых алгоритмов.

Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта ЮФУ 213.01-24/2013-109 и гранта РФФИ №13-08-00 249-а.

## Литература:

1. Пшихопов, В.Х. Позиционно-траекторное управление подвижными объектами [Текст]: Монография/В.Х. Пшихопов – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. –183 с.

2. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Структурный синтез автопилотов подвижных объектов с оцениванием возмущений [Текст] // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – № 1. – С. 103-109.

3. Пшихопов В.Х. Аттракторы и репеллеры в конструировании систем управления подвижными объектами [Текст] // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 49-57.

4. Пшихопов В.Х., Сиротенко М.Ю., Гуренко Б.В. Структурная организация систем автоматического управления подводными аппаратами для априори неформализованных сред [Текст] // Информационно-измерительные и управляющие системы. Интеллектуальные и адаптивные роботы. – М.: Изд-во Радиотехника, 2006. – № 1-3. – Т. 4. – С. 73-79.

5. Пшихопов В.Х. Суконкин С.Я., Нагучев Д.Ш., Стракович В.В., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В., Костюков В.А., Волощенко Ю.П. Автономный подводный аппарат «СКАТ» для решения задач поиска и обнаружения заиленных объектов [Текст] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № (104). – С. 153-163.

6. Пшихопов В.Х., Гуренко Б.В. Разработка и исследование математической модели автономного надводного мини-корабля «Нептун» [Электронный ресурс] // "Инженерный вестник Дона", 2013, №4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

7. Medvedev M. Yu., Pshikhov V.Kh., Robust control of nonlinear dynamic systems [Text] // Proc. of 2010 IEEE Latin-American Conference on Communications. September 14 – 17, 2010, Bogota, Colombia. ISBN: 978-1-4244-7172-0.

8. Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Gurenko B.V. Control System Design for Autonomous Underwater Vehicle [Text]

9. Pshikhov V., Medvedev M., Kostjukov V., Fedorenko R., Gurenko B., Krukhmalev V. Airship autopilot design [Text] // Proceedings of SAE AeroTech Congress & Exhibition. October 18-21, 2011.

10. Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. Homing Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle[Text]

11. Федоренко Р.В. Алгоритмы автопилота посадки роботизированного дирижабля [Электронный ресурс] // "Инженерный вестник Дона", 2011, №1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/371> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.