

provides self-learning and control in one process. The AAC system works on base of empirical knowledge and does not use of mathematical models of controlled object. In case of robot group the AAC system is uses as individual control system of each robot. Each individual robot learns to keep local order in the group. The global order is the result of sum of local orders. As example we have used a model of cluster of nano-satellites in experiment of monitoring of ionosphere of Earth. In the space mission the group of nano-satellites has to keep global order in the space. In our approach individual AAC systems self-learn to keep local orders in the cluster. As result we can see obtaining of global order in the cluster. The AAC system gives more cheap approach to high quality control than other methods regards to its adaptive properties.

Keywords: distributed control, control of robots group, adaptive control, autonomous adaptive control, satellite cluster, nano-satellites, ionosphere monitoring

For citation:

Zhdanov A. A., Romanov A. A., Romanov A. A., Semenov S. S. Method of Autonomous Adaptive Control application for Group of Robots on Example of Nano-Satellite Cluster Model, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 11–18.

DOI: 10.17587/mau/17.11-18

References

1. Zhdanov A. A. *Avtonomniy iskusstvenniy intellect* (Autonomy artificial intelligence), Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008 (in Russian).
2. Zhdanov A. A. *Metod avtonomnogo adaptivnogo upravleniya* (Method of Autonomous Adaptive Control), *Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 1999, no. 5, pp. 127–134 (in Russian).
3. Pulinets S. A., Romanov A. A., Urlichich Ju. M., Romanov A. A., Doda L. N., Ouzounov D. *Pervye rezul'taty pilotnogo proekta po kompleksnomu diagnostirovaniyu predvestnikov zemletrjasenij na Sahaline* (The first results of the pilot project on complex diagnosing earthquake precursors on Sakhalin), *Geomagnetizm i Ajeronomiya*, 2009, vol. 49, no. 1, pp. 123–132 (in Russian).
4. Romanov A. A., Trusov S. V., Novikov A. V., Adzhalova A. A., Romanov A. A., Selin V. A. *Vosstanovlenie dvumernogo raspredeleniya*

jelektronnoj koncentracii ionosfery v ploskosti orbity nizkoorbital'nyh ISZ na osnove analiza harakteristik kogerentnogo izluchenija (Reconstruction of the 2D distribution of the ionosphere electron concentration in orbit plane of LEO satellites on the basis of coherent signals characteristics analysis), *Voprosy Jeletromehaniiki*, 2009, vol. 111, no. 4, pp. 37–42 (in Russian).

5. Romanov A. A., Romanov A. A., Urlichich Ju. M. *Tomograficheskie issledovaniya ionosfery Zemli s ispol'zovaniem klasterov malorazmernih kosmicheskikh apparatov* (Earth ionosphere tomography using small satellites clusters), *Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii Sredizemnomorskogo instituta prikladnykh nauk, Moskovskogo fiziko-tehnicheskogo instituta, Instituta fiziko-tehnicheskoy informatiki. Institut fiziko-tehnicheskoy informatiki*, 2011, pp. 47–58 (in Russian).

6. Zhdanov A. A., Zemskikh L. V., Belyaev B. B. *Sistema stabilizatsii uglovogo dvizheniya kosmicheskogo apparata na osnove neyronopodobnoy sistemi avtonomnogo adaptivnogo upravleniya* (System of Stabilization of angular motion of space craft on base of neuron-like Autonomous Adaptive Control system), *Kosmicheskie Issledovaniya*, 2004, vol. 42, no. 3, pp. 1–15 (in Russian).

7. Karavaev M. V., Zhdanov A. A. *Postroyeniye nechetkih kontrollerov na osnove metoda avtonomnogo adaptivnogo upravleniya* (Fuzzy controllers on base of the method of Autonomous Adaptive Control), *Trudi Vserossiyskoy Nauchno-Tehnicheskoy Konferencii Neiroinformatika-2006*, Moscow, 2006, МЭPhI, pp. 31–37 (in Russian).

УДК 681.5

DOI: 10.17587/mau.17.18-25

С. М. Власов¹, аспирант, vlasov.serge.m@gmail.com,

О. И. Борисов¹, аспирант, borisov@corp.ifmo.ru, В. С. Громов¹, аспирант, gromov@corp.ifmo.ru,

А. А. Пыркин¹, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., доц., a.pyrkin@gmail.com,

А. А. Бобцов^{1, 2}, д-р техн. наук, декан, зав. кафедрой, проф., bobtsov@mail.ru,

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург,

²Институт проблем машиностроения, г. Санкт-Петербург

Алгоритмы адаптивного и робастного управления по выходу роботизированным макетом надводного судна*

Предлагаются два регулятора на основе метода последовательного компенсатора. Параметры рассматриваемого объекта управления неизвестны, а элементы его вектора состояния не измеряются. Первый регулятор является робастным с фиксированными коэффициентами, второй — с адаптивной настройкой параметров управления. Оба алгоритма были реализованы в робототехнической установке моделирования движения надводного судна.

Ключевые слова: многоканальные системы, адаптивное управление, робастное управление, система динамического позиционирования

Введение

Данная работа посвящена вопросам разработки и инженерной реализации систем динамического позиционирования. Такие системы предназначены для автоматического управления движением над-

водных судов [1, 2], что является крайне востребованным направлением в настоящее время. Разработка такого класса систем достаточно сложна в силу параметрической неопределенности математической модели, наличия внешних возмущающих воздействий, таких как качка, ветер, течение и др.

В работах [3–5] рассмотрены модели, состоящие из линейной части с неизвестными параметрами и статического нелинейного блока, для которых пред-

*Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (Госзадание 2014/190 (проект 2118), субсидия 074-U01. Проект 14.Z50.31.0031).

ложен алгоритм управления на основе принципа пассивации [6, 7]. Регулятор при этом имеет простую структуру и обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы. В этом смысле предлагаемый в данной работе подход близок к результатам, представленным в работах [8—10], но с меньшими требованиями к модели объекта управления.

При разработке системы автоматического управления наряду с компьютерным моделированием необходимо проводить экспериментальные испытания. Поскольку использование реального судна дорогостояще, и высок риск поломки, то для проведения экспериментальных исследований была разработана робототехническая установка моделирования движения надводного судна с системой технического зрения для получения навигационных данных. Установка позволяет испытывать различные типы регуляторов.

В данной статье рассмотрены два регулятора, на базе которых реализуются системы динамического позиционирования, и представлены соответствующие результаты экспериментальных исследований на роботизированной установке. Первый регулятор — робастный с фиксированными параметрами управления, известный как последовательный компенсатор, второй — его адаптивная модификация с динамической настройкой параметров закона управления. С использованием прямого метода Ляпунова доказана теорема о глобальной асимптотической устойчивости замкнутой системы с первым регулятором [11, 13, 14]. Адаптивный вариант алгоритма формулируется в виде утверждения. Для конкретного прикладного применения этой схемы были получены удовлетворительные результаты экспериментальных исследований. С помощью обоих регуляторов решена задача стабилизации заданных значений положения и ориентации макета судна с некоторой точностью.

Постановка задачи

Рассматривается роботизированный макет надводного судна, являющийся составной частью экспериментальной установки. Он имеет основной двигатель с поворотной насадкой и два подруливающих устройства туннельного типа. При этом параметры объекта управления являются неизвестными. Скорость и ускорение макета судна не измеряются. Доступны измерению посредством средств технического зрения только координаты: положения по осям X и Y и курсовой угол, определяющий ориентацию в плоскости.

Требуется разработать два алгоритма управления роботизированным макетом надводного судна: ро-

бастный с фиксированными коэффициентами и адаптивный с динамической настройкой параметров управления. Обе схемы, составляя основу системы динамического позиционирования, должны обеспечивать следующую цель управления:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} |x^* - x(t)| &\leq \delta_x; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |y^* - y(t)| &\leq \delta_y; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |z^* - z(t)| &\leq \delta_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где области $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ для робастного регулятора равны нулю, для адаптивного принимают некоторые ненулевые значения, заданные при экспериментальных исследованиях.

Построение математической модели

В данном разделе проанализируем математическую модель роботизированного макета надводного судна и выполним необходимые ее преобразования.

Рассмотрим конфигурацию расположения исполнительных приводов макета судна, представленную на рис. 1, а. Здесь P_e — основной двигатель, где также располагается рулевое соплó, P_b и P_s — носовое и кормовое подруливающие устройства соответственно.

Динамика движения надводного корабля такого типа может быть описана математической моделью, содержащей три динамических канала, соответствующих двум линейным и одной угловой координатам, однозначно определяющим положение и ориентацию судна в пространстве:

$$\begin{cases} \dot{x} = F(P_e, P_b, \alpha_e, P_s); \\ \dot{y} = G(P_e, P_b, \alpha_e, P_s); \\ \dot{z} = H(P_e, P_b, \alpha_e, P_s), \end{cases} \quad (2)$$

где x, y и z — выходные переменные; P_e, P_b и P_s — сигналы управления, отправляемые на исполнительные приводы; $F(\cdot), G(\cdot)$ и $H(\cdot)$ — нелинейные дифференциальные преобразования; α_e — значение поворота рулевого соплá, в рамках настоящей работы зафиксированное, поскольку малая рабочая область не позволяет обеспечивать повороты судна с большим радиусом циркуляции.

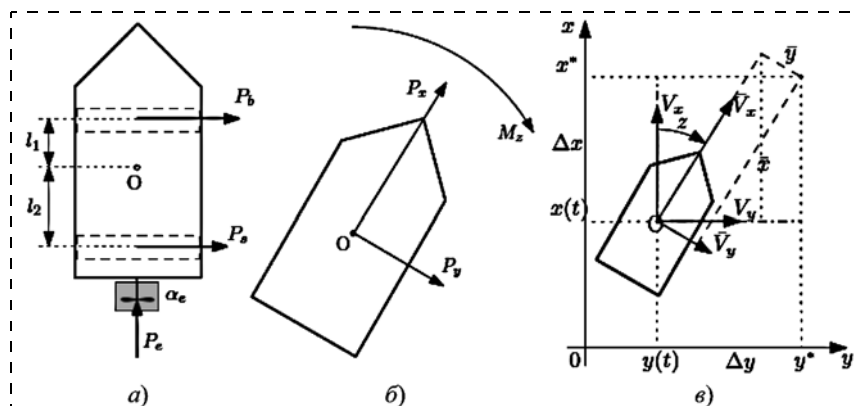


Рис. 1. Схема расположения исполнительных приводов (а); обобщенные силы и момент, действующие на объект (б); абсолютная и локальная системы координат (в)

Осуществим декомпозицию нелинейной динамической модели на статическую функцию и независимые динамические каналы с одним входом и одним выходом. Каждый из них соотнесем с соответствующими регулируемым переменными x , y и z . Введем так называемые виртуальные сигналы управления (см. рис. 1, б) P_x , P_y и M_z . Они являются обобщенными силами и моментом, действующими на судно, и представляют собой суперпозицию всех движущих сил исполнительных приводов корабля P_e , P_b и P_s . Выполняя декомпозицию, запишем систему уравнений, связывающих обобщенные силы и момент, прилагаемые к центру масс (ЦМ) корабля, и силы тяги исполнительных приводов с учетом схемы их расположения:

$$\begin{cases} P_x = P_e; \\ P_y = P_b + P_s; \\ M_z = -\alpha_e P_e l_0 + P_b l_1 - P_s l_2, \end{cases} \quad (1)$$

где P_x , P_y и M_z — обобщенные силы и момент, прилагаемые к ЦМ корабля; l_0 — расстояние от ЦМ до основного двигателя; l_1 — расстояние от ЦМ до носового подруливающего устройства; l_2 — расстояние от ЦМ до кормового подруливающего устройства.

Помимо абсолютной системы координат, связанной с Землей, введем в рассмотрение локальную, связанную с судном (рис. 1, в). Необходимо осуществить преобразование координат из одной системы в другую, с учетом их поворота и линейного смещения начал координат друг относительно друга:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos z & -\sin z \\ \sin z & \cos z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где x_0 , y_0 — координаты начальной точки; \bar{x} и \bar{y} — смещения, соответственно, в продольном и поперечном направлениях в локальной системе координат.

Модель каждого динамического канала может быть представлена в виде

$$y(t) = \frac{b(p)}{a(p)} u(t) + \frac{g(p)}{a(p)} \omega(t), \quad (3)$$

где $y(t)$ — регулируемая переменная, доступная измерению; $p = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования;

$a(p) = p^n + \dots + a_1 p + a_0$, $b(p) = b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0$, $g(p) = g_r p^r + \dots + g_1 p + q_0$ — полиномы с неизвестными коэффициентами, причем $b(p)$ -гурвицев, $b_m > 0$ и $r \leq n - 1$; относительная степень передаточной функции $\frac{b(p)}{a(p)}$ предполагается известной, и для рассматриваемого объекта она принимается равной $\rho = n - m = 2$; нелинейная функция $\omega(t) = \varphi(y(t))$ удовлетворяет условию:

$$|\varphi(y)| \leq C_0 |y|, \quad \forall y, \quad (4)$$

где параметр C_0 является неизвестным.

Данный раздел посвящен синтезу закона управления для рассматриваемого многоканального объекта. Разработка алгоритма может быть разбита на два этапа. Сначала необходимо получить виртуальные входные сигналы P_x , P_y и M_z для каждого динамического канала рассматриваемой системы (обобщенные силы и момент). Для этого будем использовать метод последовательного компенсатора, описанный в работах [4, 15], с фиксированными параметрами регулятора. На следующем этапе необходимо распределить нагрузку между приводами судна, рассчитав управления P_e , P_b и P_s , которые после введения на них ограничений и масштабирования под формат команд подаются непосредственно на соответствующие приводы корабля.

Для стабилизации динамического канала рассматриваемой системы используем известный метод последовательного компенсатора. Следуя результатам, полученным в работах [4, 15], выберем закон управления в следующем виде:

$$u(t) = -\alpha(p)k\hat{y}(t), \quad (5)$$

$$k = (\mu + \kappa), \quad (6)$$

где параметр k для данной схемы управления является фиксированным; μ и полином $\alpha(p)$ такие, что передаточная функция $\frac{b(p)\alpha(p)}{a(p) + \mu b(p)\alpha(p)}$ строго вещественно-положительная; положительное число κ необходимо для компенсации неопределенности $\omega(t)$; функция $\hat{y}(t)$ является оценкой выхода $y(t)$ и вычисляется с помощью следующего алгоритма:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma \xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-q_1 \xi_1 - \dots - q_{\rho-1} \xi_{\rho-1} + q_1 y), \end{cases} \quad (7)$$

$$\hat{y} = \xi_1, \quad (8)$$

где число $\sigma > k$, и параметры q_i выбираются так, чтобы система (9) была экспоненциально устойчива.

Перепишем модель оценки (9), (10) в матричной форме "вход — состояние — выход":

$$\dot{\xi}(t) = \sigma(\Gamma \xi(t) + dy(t)); \quad (9)$$

$$\hat{y}(t) = h^T \xi(t), \quad (10)$$

$$\text{где } \Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -q_1 & -q_2 & -q_3 & \dots & -q_{\rho-1} \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ q_1 \end{bmatrix}; h^T = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0].$$

Очевидно, что представленный алгоритм управления технически реализуем, поскольку содержит известные или измеряемые сигналы и соответствует принятым допущениям.

Рассчитаем модель замкнутой системы. Для этого подставим управление (7) в уравнение динамического канала судна (5). Получим

$$y(t) = \frac{b(p)}{a(p)} [-\alpha(p)k\hat{y}(t)] + \frac{g(p)}{a(p)} \omega(t) = \\ = \frac{b(p)}{a(p)} [-\alpha(p)ky(t) + \alpha(p)k\varepsilon(t)] + \frac{g(p)}{a(p)} \omega(t), \quad (11)$$

где $\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ — рассогласование.

После простых преобразований для модели (13) имеем

$$(a(p) + \mu\alpha(p)b(p))y(t) = \\ = b(p)\alpha(p)[k\varepsilon(t) - \kappa y(t)]g(p)\omega(t) \quad (12)$$

и

$$y(t) = \frac{b(p)\alpha(p)}{a(p) + \mu\alpha(p)b(p)} [-\kappa y(t) + k\varepsilon(t)] + \\ + \frac{g(p)}{a(p) + \mu\alpha(p)b(p)} \omega(t), \quad (13)$$

где передаточная функция $W(p) = \frac{b(p)\alpha(p)}{a(p) + \mu\alpha(p)b(p)}$ строго вещественно-положительная.

Перепишем модель (15) из формы "вход — выход" в форму "вход — состояние — выход":

$$\dot{\chi}(t) = A\chi(t) + B(-\kappa y(t) + k\varepsilon(t)) + G\omega(t); \quad (14)$$

$$y(t) = C^T\chi(t), \quad (15)$$

где $\chi \in \mathbb{R}^n$ — вектор переменных состояния рассматриваемого динамического канала; A, B, C, G — матрицы, соответствующие переходу от модели (15) к (16), (17) в некотором базисе, соответствующих размерностей.

Поскольку передаточная функция $W(p)$ строго вещественно-положительна, тогда в соответствии с леммой Якубовича — Калмана

$$A^T P + PA = -R, \quad PB = C, \quad (16)$$

где $R = R^T$, и элементы матрицы R зависят от μ , но не зависят от κ .

Рассмотрим вектор отклонений

$$\eta(t) = hy(t) - \xi(t). \quad (17)$$

В силу структуры вектора h рассогласование $\varepsilon(t)$ примет вид

$$\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) = h^T hy(t) - h^T \xi(t) = \\ = h^T (hy(t) - \xi(t)) = h^T \eta(t). \quad (18)$$

Продифференцируем $\eta(t)$:

$$\dot{\eta}(t) = h\dot{y}(t) - \sigma(\Gamma(hy(t) - \eta(t)) + dy(t)) = \\ = h\dot{y}(t) + \sigma\Gamma\eta(t) - \sigma(d + \Gamma h)y(t). \quad (19)$$

Обратим внимание, что $d = -\Gamma h$, тогда справедливо

$$\dot{\eta}(t) = h\dot{y}(t) + \sigma\Gamma\eta(t), \quad \varepsilon(t) = h^T\eta(t), \quad (20)$$

где матрица Γ — гурвицева за счет выбора параметров q_i модели оценки (9) и

$$\Gamma^T N + N\Gamma = -M, \quad (21)$$

где $N = N^T > 0$, $M = M^T > 0$.

Теорема. Рассмотрим нелинейную систему (16), (17). Пусть относительная степень объекта $\rho = n - m \geq 1$, и неизвестная функция $\omega(t) = \varphi(y(t))$ такая, что

$$|\varphi(y(t))| \leq C_0|y(t)| \text{ для всех } y(t), \quad (22)$$

где параметр C_0 неизвестен.

Существуют такие константы κ_0 и σ_0 , зависящие от параметров объекта, что для всех $\kappa \geq \kappa_0 > 0$ и $\sigma \geq \sigma_0 > 0$ нелинейная система (16), (17) экспоненциально устойчива в начале координат в смысле норм

$$(\|x(t)\|^2 + \|\eta(t)\|^2)^{1/2}. \quad (23)$$

Доказательство основано на методе функций Ляпунова. Выберем

$$V(t) = x^T(t)Px(t) + \eta^T(t)N\eta(t). \quad (24)$$

Дифференцируя (29) и выбирая $\sigma \geq \sigma_0$, $\kappa \geq \kappa_0$, где $\sigma_0 > 0$, $\kappa_0 > 0$, после необходимых преобразований получим

$$\dot{V}(t) \leq -\frac{\gamma_1}{\gamma_2} V(t), \quad (25)$$

где $\gamma_1 = \min\{\lambda_{\min}\{Q_1\}; \lambda_{\min}\{Q_2\}; \kappa\} > 0$. $\lambda_{\min}\{Q_1\}$ и $\lambda_{\min}\{Q_2\}$ — минимальные собственные числа матриц Q_1 и Q_2 ; $\gamma_2 = \max\{\lambda_{\max}\{P\}; \lambda_{\max}\{N\}; \kappa\} > 0$, $\lambda_{\max}\{P\}$ и $\lambda_{\max}\{N\}$ — минимальные собственные числа матриц P и N соответственно. Неравенство (27) подтверждает экспоненциальную устойчивость замкнутой системы. Полное доказательство представлено в работах [11, 13, 14].

В соответствии с постановкой задачи модель объекта управления может содержать неизвестные параметры. Допускается, что известна относительная степень. Будем рассматривать линеаризованную модель Номото первого порядка, которая описывает динамику надводного судна:

$$\ddot{\bar{x}}(t) = \frac{1}{T_x} (-\dot{\bar{x}}(t) + K_x P_x(t)); \quad (26)$$

$$\ddot{\bar{y}}(t) = \frac{1}{T_y} (-\dot{\bar{y}}(t) + K_y P_y(t)); \quad (27)$$

$$\ddot{\bar{z}}(t) = \frac{1}{T_z} (-\dot{\bar{z}}(t) + K_z M_z(t)), \quad (28)$$

где K_x, K_y и K_z — коэффициенты передачи; T_x, T_y и T_z — постоянные времени.

Представленный выше метод последовательного компенсатора применим для рассматриваемой модели роботизированного надводного судна с тремя независимыми динамическими каналами [4, 12–14]. Зная относительную степень объекта $\rho = 2$, используем полученный закон управления для расчета виртуальных управляющих сигналов P_x, P_y и M_z :

$$P_x = k_x(\xi_x + \dot{\xi}_x); \dot{\xi}_x = \sigma_x(-\xi_x + \bar{x}); \quad (29)$$

$$P_y = k_y(\xi_y + \dot{\xi}_y); \dot{\xi}_y = \sigma_y(-\xi_y + \bar{y}); \quad (30)$$

$$M_z = k_z(\xi_z + \dot{\xi}_z); \dot{\xi}_z = \sigma_z(-\xi_z + z^* - z(t)); \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos z & \sin z \\ -\sin z & \cos z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^* - x(t) \\ y^* - y(t) \end{bmatrix}, \quad (32)$$

где $k_x, k_y, k_z, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — фиксированные настроечные коэффициенты, которые могут быть выбраны независимо от параметров объекта.

Синтез адаптивного закона управления

Выберем закон управления в новой форме:

$$u(t) = -\alpha(p)[k(t)\hat{y}(t)]; \quad (33)$$

$$\dot{k}(t) = \gamma_k \hat{y}^2(t); k(0) > 0, \quad (34)$$

где $u(t)$ — управление; $k(t)$ — настраиваемый параметр, $\gamma_k > 0$ — положительный коэффициент. Переменная $\hat{y}(t)$ — оценка функции $y(t)$, которая определяется следующим образом:

$$\hat{y}(t) = h^T \xi(t), \quad (35)$$

$$\dot{\xi}(t) = \Gamma_\sigma \xi(t) + d_\sigma y(t), \quad (36)$$

где

$$\Gamma_\sigma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ -k_1 \sigma^{\rho-1} & -k_2 \sigma^{\rho-2} & \dots & -k_{\rho-1} \sigma \end{bmatrix}, d_\sigma = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_1 \sigma^{\rho-1} \end{bmatrix}, \quad (37)$$

$$h^T = [1 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0], \quad (37)$$

коэффициенты $k_i, i = \overline{1, \rho-1}$, выбраны из условия гурвицевости матрицы Γ_σ при $\sigma = 1$, алгоритм настройки для параметра σ будет определен позднее.

Замечание 1. Заметим, что характеристический полином матрицы Γ_σ при $\sigma = 1$ имеет вид

$$D(p) = p^{\rho-1} + k_{\rho-1} p^{\rho-2} + \dots + k_2 p + k_1, \quad (38)$$

что означает, что коэффициенты $k_i, i = \overline{1, \rho-1}$, могут быть выбраны из условия гурвицевости полинома (40).

Перейдем к новому базису системы (37), (38):

$$\bar{\xi}(t) = T \xi(t), \quad (39)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & \sigma^{-(\rho-2)} \end{bmatrix}. \quad (40)$$

Рассмотрим вектор рассогласования

$$\eta(t) = hy(t) - \bar{\xi}(t). \quad (41)$$

Пусть параметр σ будет настраиваться в соответствии с алгоритмом

$$\dot{\sigma}(t) = \gamma_\sigma \eta^T(t) \eta(t) \quad (42)$$

с некоторым положительным коэффициентом $\gamma_\sigma > 0$. Кроме того, $\sigma(0) \geq 1$.

Для того чтобы сформировать виртуальный сигнал управления, необходимо иметь $\rho - 1$ производных по времени от функции $k(t)\hat{y}(t)$. Из соотношений (38) и (39) видно, что в силу структуры матрицы Γ_σ для измерения доступны все производные функции $\hat{y}(t)$ вплоть до порядка $\rho - 1$, причем переменные ξ_i соответствуют производным $\hat{y}^{(i-1)}(t)$, а производная $\hat{y}^{(\rho-1)}(t)$ тождественно равна функции $\dot{\xi}_{\rho-1}$, которая также доступна для формирования закона управления.

Продифференцировав $k(t)\hat{y}(t)$ последовательно $\rho - 1$ раз, с учетом (36)—(38) получим

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(k(t)\hat{y}(t)) &= \dot{k}(t)\hat{y}(t) + k(t)\dot{\hat{y}}(t) = \\ &= \gamma_k \hat{y}^3(t) + k(t)\dot{\hat{y}}(t) = \gamma_k \xi_1^3(t) + k(t)\xi_2(t); \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2}(k(t)\hat{y}(t)) &= 3\gamma_k \xi_1^2(t)\xi_2(t) + \gamma_k \xi_1^2(t)\xi_2(t) + \\ &+ k(t)\xi_3(t) = 4\gamma_k \xi_1^2(t)\xi_2(t) + k(t)\xi_3(t); \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^3}{dt^3}(k(t)\hat{y}(t)) &= 8\gamma_k \xi_1(t)\xi_2(t) + 4\gamma_k \xi_1^2(t)\xi_3(t) + \\ &+ \gamma_k \xi_1^2(t)\xi_3(t) + k(t)\xi_4(t) = \\ &= 8\gamma_k \xi_1(t)\xi_2(t) + 5\gamma_k \xi_1^2(t)\xi_3(t) + k(t)\xi_4(t), \end{aligned} \quad (45)$$

и так далее вплоть до порядка $(\rho - 1)$.

Нетрудно видеть, что расчет закона управления в виде (35) возможен благодаря структуре (37)—(39). В общем виде формула для производной порядка $(\rho - 1)$ от функции $k(t)\hat{y}(t)$ будет представлять собой нелинейную комбинацию компонент вектора $\xi(t)$ и параметра $k(t)$.

Рассмотрим канал X линеаризованной модели надводного судна Номото первого порядка (28). Перепишем модель следующим образом:

$$\left(p^2 + \frac{1}{T_x}p\right)\bar{x}(t) = \frac{k_x}{T_x}P_x(t), \quad (46)$$

где относительная степень объекта $\rho = 2$.

Выберем гурвицев характеристический полином матрицы Γ_σ при $\sigma = 1$:

$$D(p) = p + 1. \quad (47)$$

Запишем алгоритм оценки (37) для функции $\hat{y}(t)$:

$$\hat{y}(t) = \xi(t); \quad (48)$$

$$\dot{\xi}(t) = -\sigma\xi(t) + \sigma y(t), \quad (49)$$

где

$$\Gamma_\sigma = -\sigma, \quad d_\sigma = \sigma, \quad h^\Gamma = 1. \quad (50)$$

Вычислим вспомогательный базис для системы (50), (51):

$$\bar{\xi}(t) = T\xi(t) = \sigma^{-1}\xi(t). \quad (51)$$

Вектор рассогласования может быть рассчитан следующим образом:

$$\eta(t) = hy(t) - \bar{\xi}(t) = y(t) - \sigma^{-1}\xi(t). \quad (52)$$

Затем воспользуемся алгоритмами адаптации (36) и (44) для настройки параметров $k(t)$ и $\sigma(t)$ соответственно, учитывая условия $k(0) > 0$ и $\sigma(0) \geq 1$.

Затем необходимо сформировать закон управления (35), используя соотношение (45) и (46). Продифференцируем функцию $k(t)\hat{y}(t)$ последовательно $\rho - 1$ раз:

$$\begin{aligned} u(t) &= -\alpha(p)[k(t)\hat{y}(t)] = -\frac{d}{dt}[k(t)\hat{y}(t)] - k(t)\hat{y}(t) = \\ &= -\gamma_k \xi^3(t) - k(t)\dot{\xi}(t) - k(t)\hat{y}(t). \end{aligned} \quad (53)$$

Для избежания роста функции $k(t)$ при малых отклонениях от положения равновесия перепишем закон адаптации (36) следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{k}(t) = \gamma_k \hat{y}_i^2(t), & |\hat{y}(t)| \geq \delta_i, & k(0) > 0, \\ \dot{k}(t) = 0, & |\hat{y}_i(t)| < \delta_i, \end{cases} \quad (54)$$

где обозначение i соответствует конкретному каналу $i = \{X, Y, Z\}$.

На следующем этапе для обеих схем управления (робастной и адаптивной) необходимо получить управляющие сигналы, которые будут отправляться непосредственно на двигатели. Иными словами, требуется распределить управление между исполнительными приводами. Это будет сделано в следующем разделе.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводили на робототехнической установке моделирования движения надводного судна (рис. 2, а, см. вторую сторону обложки), которая включает в себя роботизированный макет надводного судна (рис. 2, б, см. вторую сторону обложки), рабочий бассейн, цифровую камеру на штативе, джойстик для управления вручную, персональный компьютер. Макет судна выполнен в масштабе 1:32 и имеет следующие габаритные размеры: длина 432 мм, ширина 96 мм, высота 52 мм. Он содержит в своем составе основной двигатель, два подруливающих устройства туннельного типа на носу и корме, сервопривод для рулевого управления. В техническую оснастку лодки также входят аккумулятор и три печатные платы. На первой расположены входные порты, главный микроконтроллер, стабилизаторы напряжения и выпрямитель электропитания. На второй плате находится модуль беспроводной связи и блок преобразователя сигнала. Третья плата полностью состоит из трех драйверов приводов робота, которые получают сигнал с широтно-импульсной модуляцией, обрабатываемый вспомогательным микроконтроллером. Затем через блок полевых транзисторов соответствующее напряжение подается на исполнительные приводы. Бассейн представляет собой рабочую область для макета судна. Он выполнен из листов фанеры и вмещает около 150 л воды.

Для проведения экспериментальных исследований полученных выше алгоритмов управления требуется получить реальные управляющие сигналы для приводов судна и выполнить обратное преобразование статической нелинейности (3), т. е. распределить нагрузку движущей силы между всеми двигателями объекта. Осуществим это следующим образом. Задачу реализации движения по оси X возложим на основной двигатель. Кормовое подруливающее устройство будет выполнять позиционирование по оси Y . Носовое подруливающее устройство будет на 75 % выполнять задачу по вращению и на 25 % — позиционирования вдоль той же оси Y . Это необходимо ввиду технических нюансов, касающихся физического размещения приводов корабля. Таким образом, распределитель упоров будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} P_b = P_x; \\ P_s = P_y; \\ P_b = 0,75 \frac{M_z}{L_b} + 0,25 P_y. \end{cases} \quad (55)$$

Помимо распределителя упоров при практической реализации алгоритма необходимо наложить ограничения на управления и обеспечить соответствующий формат посылаемых команд.

Результат экспериментальных исследований робастного регулятора на основе последовательного

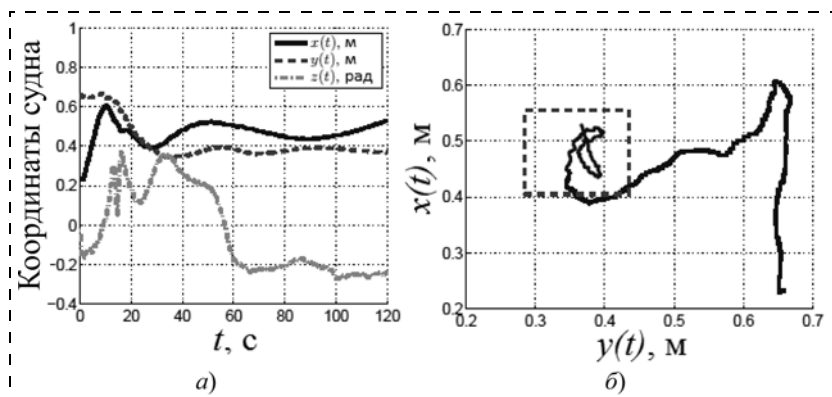


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований робастного регулятора: графики координат судна (а); путь следования (б)

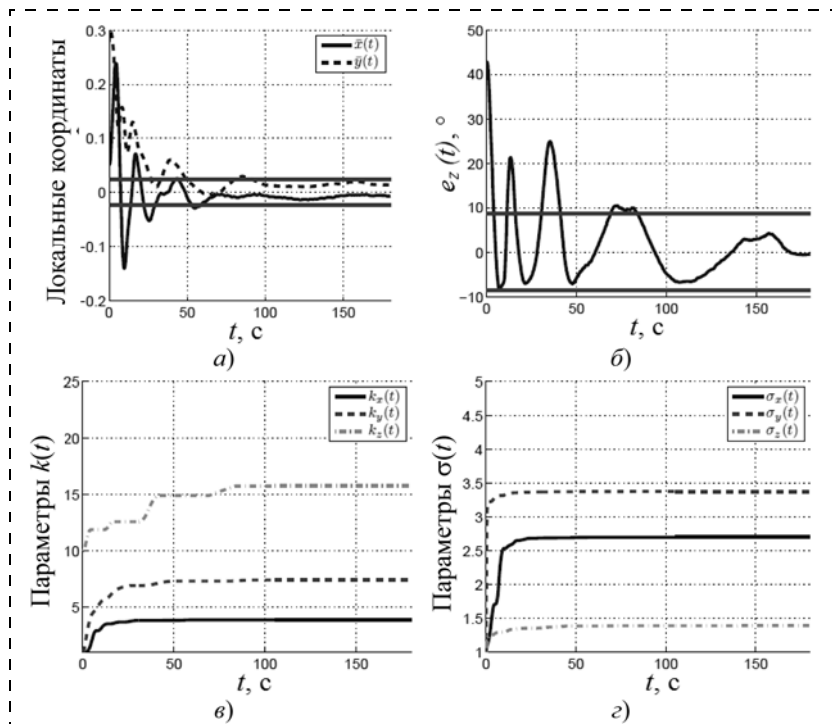


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований адаптивного регулятора: графики локальных координат (а); график ошибки по курсовому углу (б); графики параметров $k_x(t)$, $k_y(t)$, $k_z(t)$ (в); графики параметров $\sigma_x(t)$, $\sigma_y(t)$, $\sigma_z(t)$ (г)

компенсатора представлен на рис. 3. Параметры управления были выбраны следующие: $k_x = 2$, $k_y = 3$, $k_z = 12$, $\sigma_x = 10$, $\sigma_y = 10$, $\sigma_z = 17$. Желаемое положение лодки было задано: $x^* = 0,48$ м, $y^* = 0,36$ м, $z^* = 0^\circ$. Из графиков видно, как судно колеблется в окрестности желаемой точки под действием волн, которые сам наводит в процессе движения.

Результаты экспериментальных исследований динамического регулятора на основе адаптивной модификации последовательного компенсатора представлены на рис. 4. Желаемые положение и ориентация судна заданы такими же, как и в предыдущем эксперименте. Были выбраны следующие значения допустимых областей настройки параметров управления $\sigma_x = 0,024$ м, $\sigma_y = 0,024$ м, $\sigma_z = 8,6^\circ$.

Заключение

В рамках настоящей работы были разработаны алгоритмы робастного и адаптивного управления по выходу параметрически неопределенным объектом. Устойчивость робастного регулятора (последовательного компенсатора) доказана с помощью прямого метода Ляпунова. Адаптивная его модификация представляет собой практическую ценность, поскольку применима для конкретных частных случаев. В качестве направления дальнейшего развития можно выделить поиск строгого математического доказательства и необходимых условий устойчивости замкнутой системы с таким динамическим регулятором. Обе схемы были успешно апробированы на робототехнической установке моделирования движения надводного судна.

Список литературы

1. Fossen T. I. Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics AS, 2002.
2. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons Ltd., Hardcover, 2011.
3. Bobtsov A. A note to output feedback adaptive control for uncertain system with static nonlinearity // Automatica. 2005. Vol. 41, N. 12. P. 1277–1280.
4. Бобтов А. А., Николаев Н. А. Синтез управления нелинейными системами с функциональными и параметрическими неопределенностями на основе теоремы Фрадкова // Автоматика и телемеханика. 2005. № 1. С. 118–129.
5. Bobtsov A., Nikolaev N., Slita O. Adaptive control of libration angle of a satellite // Mechatronics. 2007. Vol. 17, Iss. 4–5. P. 271–276.
6. Fradkov A. L. Synthesis of adaptive system of stabilization of linear dynamic plants // Automation and Remote Control. 1974. Vol. 35, N. 12. P. 1960–1966.
7. Fradkov A. L. Passification of nonsquare linear systems and Yakubovich-Kalman-Popov Lemma // European Journal of Control. 2003. N. 6. P. 573–582.
8. Barkana I. Parallel Feedforward and Simplified Adaptive Control // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 1987. Vol. 1, N. 2. P. 95–109.
9. Barkana I. Comment on 'Design of Strictly Positive Real Systems Using Constant Output Feedback // IEEE Transactions on Automatic Control. 2004. Vol. 49, N. 10. P. 2091–2093.
10. Kaufman H., Barkana I., Sobel K. S. Direct Adaptive Control Algorithms-Theory and Applications, Springer, New York, 1998 (2nd edition).
11. Pyrkin A., Bobtsov A., Kolyubin S., Surov M., Shavetov S., Borisov O., Gromov V. Simple Output Stabilization Approach for Robotic Systems // Manufacturing Modelling, Management, and Control. 2013. Vol. 7, N. 1. P. 1873–1878.
12. Bobtsov A., Pyrkin A., Faronov M. Output Control for Time-Delay Nonlinear System Providing Exponential Stability // The 19th Mediterranean Conference on Control and Automation (IEEE). 2011.
13. Pyrkin A., Bobtsov A., Kolyubin S., Faronov M., Shavetov S., Kapitanyuk Y., Kapitonov A. Output Control Approach "Consecutive Compensator" Providing Exponential and L-infinity-stability for Nonlinear Systems with Delay and Disturbance // Proc. IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Denver, USA. 2011.
14. Pyrkin A., Bobtsov A. Output Control for Nonlinear System with Time-Varying Delay and Stability Analysis // 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. Orlando, USA. 2011.
15. Бобтов А. А. Робастное управление по выходу линейной системой с неопределенными коэффициентами // Автоматика и телемеханика. 2002. № 11. С. 108–117.

Algorithms of Adaptive and Robust Output Control for a Robotic Prototype of a Surface Vessel

S. M. Vlasov¹, vlasov.serge.m@gmail.com, O. I. Borisov¹, borisov@corp.ifmo.ru✉,
V. S. Gromov¹, gromov@corp.ifmo.ru, A. A. Pyrkin¹, a.pyrkin@gmail.com,
A. A. Bobtsov^{1, 2}, bobtsov@mail.ru,

¹ ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russian Federation,

² Institute of Problems of Mechanical Engineering, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: **Borisov Oleg I.**, Postgraduate Student,
St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
St. Petersburg, 197101, Russian Federation, e-mail: borisov@corp.ifmo.ru

Received on August 24, 2015

Accepted on September 03, 2015

The paper is devoted to development of a dynamic positioning system for a robotic vessel prototype. Two control laws, each intended to solve the posed problem, are proposed in the work. The mathematical model of MIMO plant boils down to a static function, as well as three independent dynamical channels with single input and single output, which correspond to the coordinates of the vessel (two linear ones and an angle one). They define its position in the plane uniquely. The 1st order linearized Nomoto model, which approximately describes the surface vessel behavior, is used as a mathematical description of each channel. The parameters of the considered MIMO plant are assumed to be unknown. Elements of the state vector are not measured, i.e. the feedback is provided using only the position and orientation of the prototype. It is implemented using a digital camera attached to a tripod above the workspace. The video signal is processed in a computer by image binarization according to the color of the deck and the red mark on the bow. The centers of the obtained spots are detected and after simple calculations three required coordinates become available. Error signals between the specified values and outputs at each channel enter the regulators, which shape the so called virtual control inputs distributed by the inverse transformation among the actuators of the robot. Control commands in the required format are sent to the prototype via a radio channel. The first proposed regulator is robust and it has fixed control parameters in its structure. The second one has adaptation laws of these parameters. Both algorithms are implemented on the robotic setup of surface vessel motion modeling. During the experimental approval of the obtained algorithms the stabilization problem of the vessel prototype in the specified area is performed.

Keywords: multi-input/multi-output systems, adaptive control, robust control, dynamic positioning systems

Acknowledgements: The work was supported by the leading universities of the Russian Federation (2014/190 Goszadanie (Project 2118), 074 grant-U01, project 14.Z50.31.0031).

For citation:

Vlasov S. M., Borisov O. I., Gromov V. S., Pyrkin A. A., Bobtsov A. A. Algorithms of Adaptive and Robust Output Control for a Robotic Prototype of a Surface Vessel, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 18–25.

DOI: 10.17587/mau/17.18-25

References

1. Fossen T. I. Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles, Marine Cybernetics AS, 2002.
2. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, John Wiley & Sons Ltd., Hardcover, 2011.
3. Bobtsov A. A note to output feedback adaptive control for uncertain system with static nonlinearity, *Automatica*, 2005, vol. 41, no. 12, pp. 1277–1280.
4. Bobtsov A. A., Nikolaev N. A. *Sintez upravleniya nelinejnymi sistemami s funkcional'nymi i parametricheskimi neopredelennostjami na osnove teoremy Fradkova* (Fradkov theorem-based design of the control of nonlinear systems with functional and parametric uncertainties), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2005, no. 1, pp. 118–129 (in Russian).
5. Bobtsov A., Nikolaev N., Slita O. Adaptive control of libration angle of a satellite, *Mechatronics*, 2007, vol. 17, iss. 4–5, pp. 271–276.
6. Fradkov A. L. Synthesis of adaptive system of stabilization of linear dynamic plants, *Automation and Remote Control*, 1974, vol. 35, no. 12, pp. 1960–1966.
7. Fradkov A. L. Passification of nonsquare linear systems and Yakubovich-Kalman-Popov Lemma, *European Journal of Control*, 2003, no. 6, pp. 573–582.
8. Barkana I. Parallel Feedforward and Simplified Adaptive Control, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 1987, vol. 1, no. 2, pp. 95–109.
9. Barkana I. Comment on 'Design of Strictly Positive Real Systems Using Constant Output Feedback', *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, vol. 49, no. 10, pp. 2091–2093.
10. Kaufman H., Barkana I., Sobel K. S. Direct Adaptive Control Algorithms-Theory and Applications, Springer, New York, 1998 (2nd edition).
11. Pyrkin A., Bobtsov A., Kolyubin S., Surov M., Shavetov S., Borisov O., Gromov V. Simple Output Stabilization Approach for Robotic Systems, *Manufacturing Modelling, Management, and Control*, 2013, vol. 7, no. 1, pp. 1873–1878.
12. Bobtsov A., Pyrkin A., Faronov M. Output Control for Time-Delay Nonlinear System Providing Exponential Stability, *The 19th Mediterranean Conference on Control and Automation (IEEE)*, Corfu, Greece, 2011.
13. Pyrkin A., Bobtsov A., Kolyubin S., Faronov M., Shavetov S., Kapitanyuk Y., Kapitonov A. Output Control Approach "Consecutive Compensator" Providing Exponential and L-infinity-stability for Nonlinear Systems with Delay and Disturbance, *Proc. IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, Denver, USA, 2011.
14. Pyrkin A., Bobtsov A. Output Control for Nonlinear System with Time-Varying Delay and Stability Analysis, *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Orlando, USA, 2011.
15. Bobtsov A. A. *Robustnoe upravlenie po vyhodu linejnoy sistemoj s neopredelennymi koefitsientami* (Robust Output-Control for a Linear System with Uncertain Coefficients), *Avtomatika i Telemekhanika*, 2002, no. 11, pp. 108–117 (in Russian).