

УДК 681.5.01

# РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ОЦЕНКОЙ И КОМПЕНСАЦИЕЙ СОГЛАСОВАННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

**А.И. Глущенко**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: aiglush@ipu.ru

**А.Н. Абраменков**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: aabramenkov@asmon.ru

**А.В. Абдулов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: aabdulov@asmon.ru

**Ключевые слова:** необитаемый подводный аппарат, управление ориентацией, параметрическая неопределенность, экспоненциальная устойчивость.

**Аннотация:** Разработана система управления ориентацией необитаемого подводного аппарата (НПА), компенсирующая согласованную неопределенность, вызванную, например, неизвестными моментами инерции относительно осей неинерциальной системы отсчета и смещенным центром тяжести. В отличие от большого числа опубликованных работ, для решения рассматриваемой задачи предлагается метод оценки неопределенности, идеологически близкий к расширенным наблюдателям состояния и робастному методу А. Цыкунова. Его основное преимущество заключается в том, что экспериментально необходимо выбрать всего несколько гиперпараметров. Сначала в работе рассматривается модель НПА, из которой выражается описание неопределенности. Далее описывается предлагаемый метод синтеза системы управления ориентацией и для нее доказывается экспоненциальная сходимость расширенной ошибки слежения к компактному множеству. Для проверки эффективности предложенной системы проводятся эксперименты с реальным НПА.

## 1. Введение

Необитаемый подводный аппарат (НПА) представляет собой объект со многими входами и выходами и существенной неопределенностью, обусловленной как внутренними (неизвестные масса и моменты инерции вдоль осей неинерциальной системы отсчета (НСО) и т.д.), так и внешними (вязкое трение, влияние течений и волн) [1] причинами. Компенсация такой неопределенности необходима при решении задачи отслеживания аппаратом некоторой идеальной траектории.

Наиболее классическим решением упомянутой задачи является использование ПИД-схем управления [2]. Однако такие законы являются линейными, а кроме того, параметры регулятора могут быть точно вычислены только в том случае, если полностью известна модель НПА, что малореалистично.

Адаптивная схема управления свободна от вышеупомянутого недостатка и позволяет подстраивать параметры регуляторов для компенсации неопределенностей [3]. Для этого неопределенность выражается из модели объекта и преобразуется в форму регрессии с известным регрессором и неизвестными параметрами. Затем они оцениваются с помощью законов, обеспечивающих асимптотическую сходимость ошибки слежения к нулю или компакт. Многие гидродинамические эффекты и внешние возмущения не могут быть полностью математически описаны, поэтому выражение неопределенности имеет неизвестную структуру. В этом случае оно может быть аппроксимировано, например, нейронными сетями (НС) [4]. К основным недостаткам адаптивных подходов относятся: *(i)* большое число гиперпараметров, которые необходимо выбирать (скорость настройки, параметры робастных модификаций, структура НС и др.), *(ii)* упомянутые скорости необходимо настраивать в режиме онлайн при изменении сигнала задания.

Другим способом компенсации неопределенностей является не учет их структуры, а их оценка или полное подавление с использованием скользящих режимов [2]. Однако подобные регуляторы чувствительны к шумам измерений.

Упомянутые выше недостатки рассмотренных подходов могут быть преодолены с помощью предлагаемой процедуры оценки неопределенности объекта, идеологически близкой к расширенным наблюдателям состояния [5] и робастному методу А. Цыкунова [6]. Она является основой для предлагаемой экспоненциально устойчивой системы управления, которая робастна к согласованной неопределенности, не учитывает ее структуру и обеспечивает более быструю компенсацию неопределенности по сравнению с ПИД-регуляторами или адаптивными решениями.

В работе рассматривается управление ориентацией НПА (углами Эйлера).

## 2. Постановка задачи

Временной аргумент здесь и далее опускается, если это не вызывает разночтений. Уравнения модели НПА для углов Эйлера [7] записываются в виде:

$$(1) \quad \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_\psi \\ \tau_\theta \\ \tau_\phi \\ \tau_\phi \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} qr \frac{J_y - J_z}{J_x} \\ pr \frac{J_z - J_x}{J_y} \\ pq \frac{J_x - J_y}{J_z} \end{bmatrix} + I_b^{-1} S_b R^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho g V \end{bmatrix} + G_2 \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix}}_{\Delta_{pqr}},$$

где

$$S_b = \begin{bmatrix} 0 & -b_z & b_y \\ b_z & 0 & -b_x \\ -b_y & b_x & 0 \end{bmatrix}, \quad G_2 = I_b^{-1} m \begin{bmatrix} 0 & g_{21} & -g_{22} \\ -g_{21} & 0 & g_{23} \\ g_{22} & -g_{23} & 0 \end{bmatrix},$$

$$g_{21} = \dot{w} - uq + vp, \quad g_{22} = \dot{v} - wp + ur, \quad g_{23} = \dot{u} - vr + wq,$$

$\psi$  – крен,  $\theta$  – тангаж,  $\phi$  – рыскание,  $(x_g, y_g, z_g)$  – центр тяжести НПА;  $u, v, w$  – линейные скорости в НСО;  $p, q, r$  – угловые скорости в НСО.  $\tau_\psi, \tau_\theta, \tau_\phi$  – внешние моменты, формируемые регуляторами.  $J_x, J_y, J_z$  – моменты инерции вдоль осей НСО,  $\rho$  – плотность воды,  $V$  – объем корпуса НПА,  $(b_x, b_y, b_z)$  – точка приложения силы плавучести.  $R$  и  $J$  – матрицы преобразования (см. [7] (2.18) и (2.28), соответственно).

**Предположение 1.** Матрица  $I_b = \text{diag}(J_x, J_y, J_z)$  является диагональной.

**Предположение 2.** Параметры НПА неизвестны.  $p, q, r$  и  $X, Y, Z$  измеряемы.

**Предположение 3.** Регуляторы линейных координат синтезированы и обеспечивают стабилизацию положения НПА.

**Цель.** Спроектировать систему управления ориентацией НПА, компенсирующую неопределенность объекта (см. (1)) и обеспечивающую экспоненциальную сходимость ошибки слежения к компакту (шару) произвольно выбранного радиуса.

### 3. Основной результат

#### 3.1. Параметризация неопределенности

В (1) второе уравнение подставляется в результат дифференцирования первого:

$$(2) \quad \begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \bar{b} J \underbrace{\begin{bmatrix} \tau_\psi \\ \tau_\theta \\ \tau_\phi \end{bmatrix}}_{\tau} + \underbrace{J \Delta_{pqr} + (J I_b^{-1} - \bar{b} J)}_{\Delta} \begin{bmatrix} \tau_\psi \\ \tau_\theta \\ \tau_\phi \end{bmatrix} + \dot{J} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \bar{b} \left( \underbrace{J J^{-1} \begin{bmatrix} u_\psi \\ u_\theta \\ u_\phi \end{bmatrix}}_{\bar{u}} + \underbrace{\bar{b}^{-1} \Delta}_{\bar{\Delta}} \right) = \bar{b} (\bar{u} + \bar{\Delta}).$$

Здесь  $\bar{b} \neq 0$  – обратное к номинальному значению всех моментов инерции в НСО. Проанализировав (2), динамика изменения каждого из углов Эйлера описана как:

$$(3) \quad \dot{x}(t) = Ax(t) + B_0 \bar{b} (u(t) + \Lambda(t)),$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix},$$

где  $x_1(t)$  – конкретный угол Эйлера ( $\psi, \theta$  или  $\phi$ ),  $x_2(t)$  – угловая скорость,  $u(t)$  – сигнал управления (элемент  $\bar{u}(t)$ ),  $\Lambda$  – компенсируемая неопределенность (элемент  $\bar{\Delta}$ ).

### 3.2. Система управления ориентацией НПА

Для проектирования системы управления для каждого из углов Эйлера используется следующий подход. Сигнал управления выбирается в виде:

$$(4) \quad \begin{aligned} u(t) &= u_b(t) + u_{ad}(t), \\ u_b(t) &= k_x x(t) + k_r r(t), \quad k_x = [k_{1x} \quad k_{2x}] \in \mathbb{R}^2, \quad k_r = -k_{1x}, \end{aligned}$$

где  $A + B_0 \bar{b} k_x$  – Гурвицева матрица и  $[1 \quad 0] (A + B_0 \bar{b} k_x)^{-1} B_0 \bar{b} k_r = 1$ , а  $u_{ad}(t)$  будет выбрано далее. Уравнение (4) подставим в (3):

$$(5) \quad \dot{x}(t) = (A + B_0 \bar{b} k_x) x(t) + B_0 \bar{b} k_r r(t) + B_0 \bar{b} (u_{ad}(t) + \Lambda(t)).$$

Цель состоит в том, чтобы в правой части (5) были только слагаемые  $(A + B_0 \bar{b} k_x) x(t) + B_0 \bar{b} k_r r(t)$ , определяющие эталонную динамику. Для этого предлагается получить оценку неопределенности  $\Lambda(t)$  следующим образом.

Вводятся в рассмотрение следующие фильтры ( $l > 0$  – параметр фильтра):

$$(6) \quad \dot{\bar{x}}(t) = -l(\bar{x}(t) - x(t)), \quad \dot{\bar{r}}(t) = -l(\bar{r}(t) - r(t)), \quad \dot{\bar{u}}_{ad}(t) = -l(\bar{u}_{ad}(t) - u_{ad}(t)).$$

Ошибка  $\chi(t) = l(\bar{x}(t) - x(t))$  продифференцирована по времени:

$$(7) \quad \dot{\chi}(t) = -l\chi(t) - l[(A + B_0 \bar{b} k_x) x(t) + B_0 \bar{b} k_r r(t) + B_0 \bar{b} (u_{ad}(t) + \Lambda(t))].$$

Учитывая решения дифференциальных уравнений из (6), запишем решение (7):

$$(8) \quad \chi(t) = e^{-lt} \chi(0) - (A + B_0 \bar{b} k_x) \bar{x}(t) - B_0 \bar{b} k_r \bar{r}(t) - B_0 \bar{b} (\bar{u}_{ad}(t) + \bar{\Lambda}(t)),$$

где

$$(9) \quad \dot{\bar{\Lambda}}(t) = -l(\bar{\Lambda}(t) - \Lambda(t)), \quad \bar{\Lambda}(t_0) = 0.$$

Отбрасывая затухающее слагаемое, выразим  $\bar{\Lambda}(t)$  из (8):

$$(10) \quad \bar{\Lambda}(t) = -[0 \quad \bar{b}^{-1}] (\chi(t) + (A + B_0 \bar{b} k_x) \bar{x}(t)) - k_r \bar{r}(t) - \bar{u}_{ad}(t).$$

Значение (10) – это лучшая возможная оценка неопределенности, поэтому именно она используется для формирования сигнала управления (4):

$$(11) \quad u_{ad}(t) = -\bar{\Lambda}(t) = [0 \quad \bar{b}^{-1}] (\chi(t) + (A + B_0 \bar{b} k_x) \bar{x}(t)) + k_r \bar{r}(t) + \bar{u}_{ad}(t).$$

Подстановка (11) в (5) позволяет получить:

$$\dot{x}(t) = (A + B_0 \bar{b} k_x) x(t) + B_0 \bar{b} k_r r(t) + B_0 \bar{b} (-\bar{\Lambda}(t) + \Lambda(t)).$$

На основании (9) можно утверждать, что для достаточно большого значения параметра  $l > 0$  оценка  $\bar{\Lambda}$  сходится к  $\Lambda$ , в результате чего достигается полная компенсация неопределенности. Тогда идеальное качество управления системой определяется следующей эталонной моделью:

$$\dot{x}_{ref}(t) = A_{ref} x_{ref}(t) + B_{ref} r(t),$$

где  $A_{ref} = A + B_0 \bar{b} k_x$ ,  $B_{ref} = B_0 \bar{b} k_r$ .

Свойства полученной замкнутой системы описаны в следующей теореме.

**Теорема 1.** Пусть существуют  $c_1 > 0$ ,  $c_2 > 0$  такие, что выполняется:

$$\left| \dot{\Lambda}(t) \right| \leq c_1 \|x(t)\| + c_2.$$

Тогда существует  $l_0 > 0$  такая, что для всех  $l \geq l_0 > 0$  закон (4) + (11) обеспечивает:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t) - x_{ref}(t)\| = \varepsilon_{UB}(l), \lim_{l \rightarrow \infty} \|\varepsilon_{UB}(l)\| = 0.$$

Доказательство теоремы не приводится ввиду ограничений на объем статьи.

## 4. Результаты эксперимента

Для экспериментов в бассейне был выбран дистанционно управляемый НПА, описанный в [8]. Для сравнения реализованы два варианта системы управления ориентацией: предложенный и на основе ПИД-регуляторов. Для всех углов Эйлера  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  использовались:  $k_{1x} = -4$ ,  $k_{2x} = -2$ ,  $k_r = 4$ ,  $l = 15$ ,  $\bar{b} = 10$ . Для обеих систем управления использовалась ступенчатое задание с амплитудой 0,3 рад. Разработанная система позволила улучшить качество управления (см. рис.1).

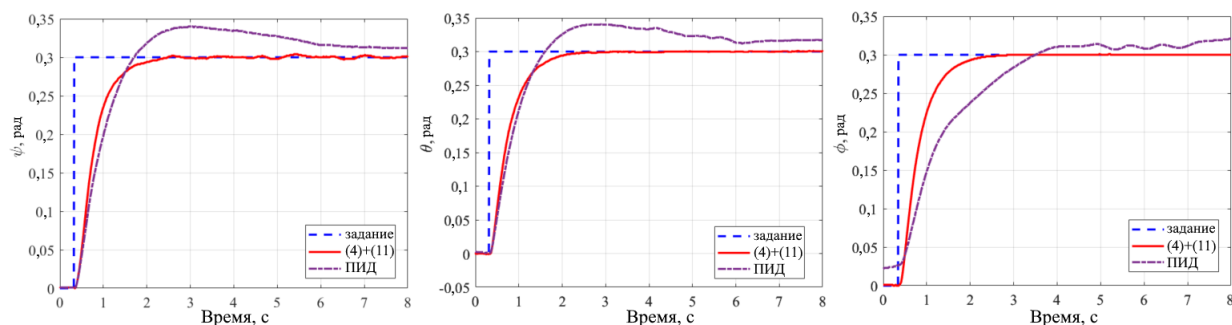


Рис. 1. Переходные процессы для  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\phi$

## 5. Заключение

Разработана система управления ориентацией НПА, которая (i) имеет всего четыре гиперпараметра для каждого угла Эйлера, (ii) не требует использования регулятора с высоким коэффициентом усиления. Доказано, что ошибка слежения экспоненциально сходится к компакту (шару). Полученные результаты валидированы с помощью натуральных экспериментов.

## Список литературы

1. McMahon J., Plaku E. Mission and motion planning for autonomous underwater vehicles operating in spatially and temporally complex environments // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2016. Vol. 41, No.4. P. 893–912.

2. Tijjani A.S., Chemori A., Creuze V. A survey on tracking control of unmanned underwater vehicles: Experiments-based approach // *Annual Reviews in Control*. 2022. Vol. 54. P. 125–147.
3. Antonelli G., Caccavale F., Chiaverini S., Fusco G. A novel adaptive control law for underwater vehicles // *IEEE Transactions on control systems technology*. 2003. Vol. 11, No. 2. P. 221–232.
4. Qiu J., Ma M., Wang T., Gao H. Gradient descent-based adaptive learning control for autonomous underwater vehicles with unknown uncertainties // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2021. Vol. 32, No. 12. P. 5266–5273.
5. Han J. From PID to active disturbance rejection control // *IEEE transactions on Industrial Electronics*. 2009. Vol. 56, No. 3. P. 900–906.
6. Tsykunov A.M. Robust control algorithms with compensation of bounded perturbations // *Automation and Remote Control*. 2007. Vol. 68. P. 1213–1224.
7. Fossen T.I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Wiley, 2011. 582 p.
8. Abdulov A., Abramnikov A. Extra Steering for ROV Control System by Tracking the Gamepad Orientation // *Proceedings of 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, Russia, 2021. Piscataway: IEEE, 2021. P. 1041–1045.