

УДК 681.51

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОБАСТНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

Д.Н. Захаров*Университет ИТМО*

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, лит А

E-mail: dnzakharov@itmo.ru

А.Ю. Живицкий*Университет ИТМО*

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, лит А

E-mail: zhivitckii@itmo.ru

О.И. Борисов*Университет ИТМО*

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, лит А

E-mail: borisov@itmo.ru

Д.М. Куровский*Университет ИТМО*

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, лит А

E-mail: 371255@edu.itmo.ru

А.М. Куровский*Университет ИТМО*

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, лит А

E-mail: 312569@edu.itmo.ru

Ключевые слова: робастное управление, мобильные роботы, управление по выходу, роботизированное надводное судно, платформа на роликонесущих колесах

Аннотация: В работе представлены экспериментальные исследования, связанные с решением задачи управления по выходу параметрически неопределенными многоканальными объектами при наличии внешних возмущений. Авторы предлагают применить робастную структуру регулятора, основанную на методе наблюдателя с высоким коэффициентом усиления для различных мобильных роботов.

1. Введение

Современные методы управления, основанные на модельном подходе и обратной связи, должны обеспечивать устойчивость системы даже при наличии параметрических неопределенностей модели и внешних возмущений, влияющих на поведение системы. В таких условиях применимы робастные методы управления [1].

Предполагая, что математическая модель объекта управления известна и точно описывает его поведение, ученые и инженеры сталкиваются с проблемой несогласованности номинальной модели и ее физического воплощения из-за наличия различных видов неопределенностей, допущений принятых в ходе создания модели и тд. Целью данной работы является исследование синтезированных робастных регуляторов для управления по выходу линейными системами в реальных робототехнических приложениях.

2. Постановка задачи

Рассматривается класс объектов, динамическая модель которых в общем виде описывается уравнениями

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx, \end{aligned}$$

где $x \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния системы, $u \in \mathbb{R}^m$ – вектор управляющих воздействий, $y \in \mathbb{R}^m$ – вектор измеряемых выходных (регулируемых) переменных системы, $w \in \mathbb{R}^{n_w}$ – вектор возмущающих воздействий, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $P \in \mathbb{R}^{n \times n_w}$, $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $Q \in \mathbb{R}^{m \times n_w}$ – матрицы с неизвестными параметрами.

Замечание 1. К виду (1) могут быть приведены следующие динамические системы: динамически позиционируемые надводные суда (2) и мобильные роликонесущие платформы (3).

Рассмотрена модель динамически позиционируемого надводного судна, описанная в [2], вида

$$(2) \quad \begin{aligned} \dot{\eta} &= \nu, \\ M\dot{\nu} + D\nu &= \tau + \tau_d, \end{aligned}$$

где $\eta = [X \ Y \ \Phi]^T$ – вектор координат, определяющих положение и ориентацию надводного судна в плоскости относительно параллельной системы координат, $\nu = [u \ v \ r]^T$ – вектор линейных и угловой скоростей надводного судна, $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ – вектор проекции сил и моментов, развиваемых исполнительными приводами, $\tau_d = [\tau_{d1} \ \tau_{d2} \ \tau_{d3}]^T$ – вектор проекции внешних сил и моментов, обусловленных действием волн, ветра и течения, $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $D \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ – матрицы добавленных масс и инерции и демпфирования, соответственно.

Также рассмотрена динамическая модель движения мобильного робота,

предложенная в [3], вида

$$(3) \quad \begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix}, & \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{bmatrix} + T \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M \end{bmatrix}, \end{cases}$$

где V_x, V_y – линейные скорости вдоль осей X и Y соответственно, ω – угловая скорость, H – матрица, содержащая инерционные параметры движения, T – матрица, содержащая параметры, связанные с эффективностью управляющих воздействий, F_x, F_y и M – обобщенные продольная и поперечные силы и поворотный момент, действующие на мобильного робота.

Задача заключается в том, чтобы провести валидацию алгоритма робастного управления, предложенного в [4], на реальных физических объектах, используемых в составе лабораторных стендов факультета Систем Управления и Робототехники.

Закон управления задается в виде:

$$u = K\hat{\xi},$$

где K – матрица настроечных коэффициентов вида $K = \begin{bmatrix} k_{p1} & 0 & 0 & k_{d1} & 0 & 0 \\ 0 & k_{p2} & 0 & 0 & k_{d2} & 0 \\ 0 & 0 & k_{p3} & 0 & 0 & k_{d3} \end{bmatrix}$,

$\hat{\xi} = [\hat{\xi}_1 \quad \hat{\xi}_2]^T$ – состояния наблюдателя на основе высокого коэффициента усиления вида

$$\begin{cases} \dot{\hat{\xi}}_1 = \hat{\xi}_2 + \kappa A_1(y - \xi_1), \\ \dot{\hat{\xi}}_2 = \kappa^2 A_0(y - \xi_1), \end{cases}$$

где A_1 и A_0 – настраиваемые диагональные матрицы, κ – высокий коэффициент усиления наблюдателя, выбор которых будет описан далее.

Необходимо продемонстрировать, что выполняется целевое условие для заданного положения y и сколь угодно малых $\epsilon > 0$ выполнялось следующее соотношение

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|y_e(t)\| \leq \epsilon,$$

где $y_e(t) = y(t) - y^*(t)$ ошибка позиционирования мобильного робота.

3. Экспериментальные стенды

В рамках данной работы были проведены исследования с использованием лабораторных стендов факультета систем управления и робототехники. В качестве мобильных роботов, в которые были имплантированы алгоритмы управления представленные ранее, выступают роботизированное надводное судно и мобильная роликонесущая платформа. На рисунке 1 представлена схема стенда с роботизированным надводным судном [5]. Для мобильной платформой на базе роликонесущих колес месапим-типа [6] схема стенда будет отличаться исключительно компонентами самой платформы (двигатели и драйверы).

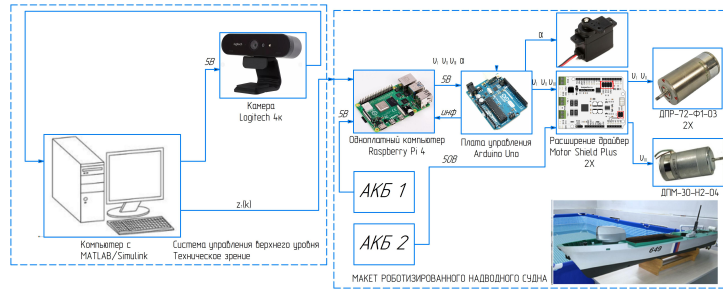


Рис. 1: Схема лабораторного стенда с роботизированным надводным судном

4. Основной результат

В этом разделе приведены результаты экспериментов, полученные в ходе исследований алгоритмов управления для физических объектов.

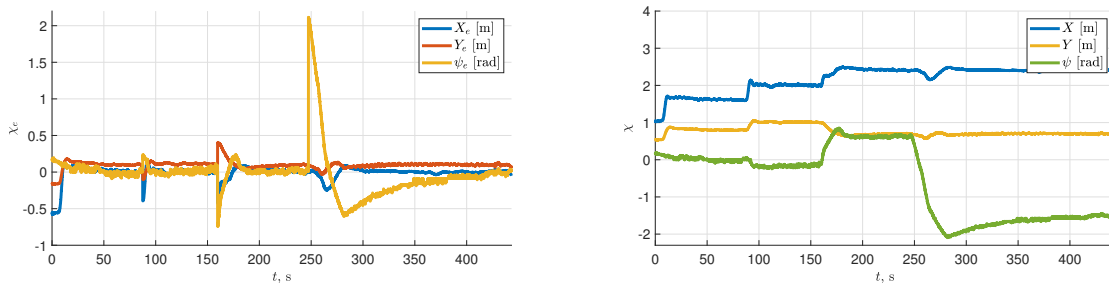


Рис. 2: Экспериментальное исследование алгоритма управления для роботизированного надводного судна

Роботизированное надводное судно функционировало в режиме динамического позиционирования и перемещалась по заданным координатам. Кроме того, на объект управления, в качестве возмущающего воздействия, действовала струя воды, направленная против движения корабля. Заданные положения были определены как

$$\chi^* = \begin{bmatrix} 1.6 \\ 0.9 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ -0,17 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 2.4 \\ 0.8 \\ 0,61 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 2.4 \\ 0.8 \\ -1,4 \end{bmatrix}.$$

Результаты исследования показаны на рис. 2. Сигналы ошибок приближаются к окрестности нуля, при этом в третьей и четвертой точках, расположенных у стенок бассейна и находящихся наиболее близко к источнику возмущений, отраженные от стенок бассейна волны и поток жидкости усложняли позиционирование объекта.

Для исследования алгоритма управления роликонесущей платформы была задана параметрическая траектория

$$x = 0.60 \cos(0.2t) + 1.92; \quad y = 0.60 \sin(0.2t) + 1.08;$$

$$\theta = \arccos(\cos(0.2t)) \cdot \text{sign}(\arcsin(\sin(0.2t))).$$

Результаты исследования показаны на рис. 3. Сигналы ошибок имеют синусоидальный вид и небольшую статическую ошибку. Колебательность

сигнала ошибки объекта управления объясняется конструктивными особенностями платформы (неидеальная форма роликов, использование в качестве исполнительного двигателя шаговых моторов, отсутствие подвески, проскальзывание роликов).

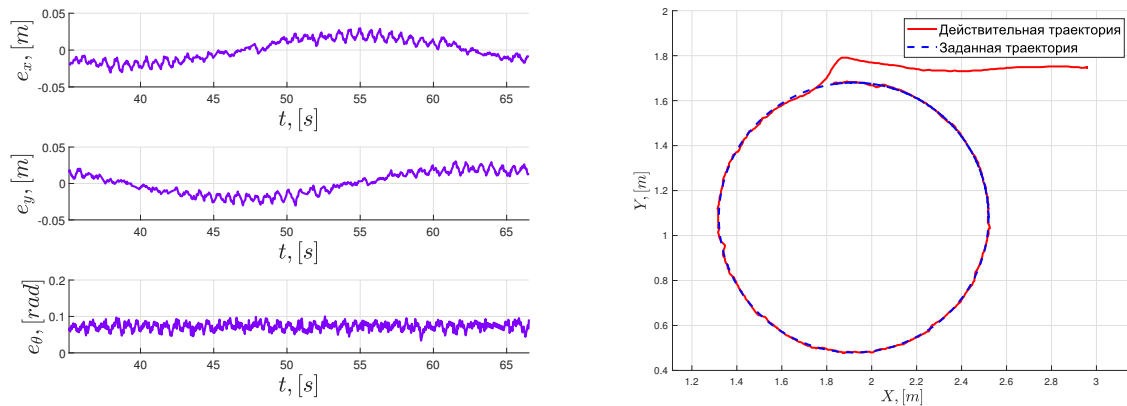


Рис. 3: Экспериментальное исследование алгоритма управления для мобильной роликонесущей платформы месапим-типа

5. Заключение

Данное исследование мотивировано результатами моделирования, полученными в предыдущих работах [4, 5]. Апробирован алгоритм робастного управления по выходу многоканальным объектом, имеющим параметрические неопределенности, при наличии возмущающих воздействий с неизвестными параметрами. Результаты экспериментов показывают, что регуляторы на основе наблюдателя с высоким коэффициентом усиления могут быть использованы в реальных робототехнических приложениях и обеспечивать допустимую ошибку позиционирования.

Список литературы

1. K. Zhou and J. C. Doyle, Essentials of robust control. Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 1998, vol. 104
2. Fossen Thor I. Models for Ships, Offshore Structures and Underwater Vehicles // Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. — John Wiley Sons, Ltd, 2011. — Pp. 133–186.
3. Хоанг Д. Т. Траекторное управление при неполной информации о параметрах и переменных состояния нелинейной модели движения мобильного робота: дис. ... канд. техн. наук. 2.3.1. — Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 2022, 170 с.
4. Громова Ф. Б. Управление по выходу параметрически неопределенным линейным объектом с неучтенной динамикой и возмущающими воздействиями: дис. ... канд. техн. наук. 2.3.1. — Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 2023, 206 с.
5. A. Y. Zhivitskii, D. N. Zakharov, O. I. Borisov, D. M. Kurovskii and A. A. Pyrkin, "Experimental Study on Output Robust Control of a Surface Vessel with Uncertainties and Exogenous Disturbances," 2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Rome, Italy, 2023, pp. 1683-1687.
6. Dmitrii N. Zakharov, Kirill Yu Bodrov, Andrei Yu. Zhivitskii, Alisa D. Rodionova, Anton K. Golubev, Oleg I. Borisov, Anton A. Pyrkin, Botao Zhang, QUALITY IMPROVEMENTS OF OMNIDIRECTIONAL PLATFORMS, IFAC-PapersOnLine, Volume 56, Issue 2, 2023, Pages 2140-2145.