

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО ВЫХОДУ МНОГОКАНАЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Д. Е. КОНОВАЛОВ¹, С. А. ВРАЖЕВСКИЙ^{1,2}, И. Б. ФУРТАТ^{1,2}, А. С. КРЕМЛЕВ¹

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vrazhevskij.s@gmail.com

²Институт проблем машиноведения РАН, 199178, Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается задача робастного управления по выходу многоканальным линейным объектом под воздействием неизвестных несогласованных ограниченных возмущений и параметрических неопределенностей. Алгоритм управления основан на совмещении двух методов — бэкстеппинга и вспомогательного контура. Описана итеративная процедура синтеза децентрализованной системы управления с дополнительным включением на каждом шаге специальной динамической системы (вспомогательного контура), которая обеспечивает оценивание и компенсацию неизвестных несогласованных возмущений без использования сильной обратной связи. Представлены результаты практической апробации разработанного алгоритма с использованием лабораторного стенда "Twin Rotor MIMO System".

Ключевые слова: бэкстеппинг, метод вспомогательного контура, управление по выходу, многоканальные системы, робастное управление, наблюдатель возмущений, несогласованные возмущения

Введение. Задачи управления объектами под воздействием несогласованных возмущений (возмущения, которые присутствуют в уравнениях объекта, где не содержится сигнал управления) являются одной из активно развивающихся областей исследований современной теории автоматического управления. Среди наиболее распространенных методов, применяемых в данной области, можно выделить подходы с использованием наблюдателей возмущений, методы активного подавления возмущений и алгоритмы управления со скользящим режимом (Sliding-Mode Control) [1—7].

В настоящей статье рассматривается альтернативный подход к решению проблемы компенсации несогласованных возмущений, в основе которого лежит метод бэкстеппинга (backstepping — метод обратного обхода интегратора) [8]. Преимущества данного метода заключаются в том, что он может быть использован для широкого класса систем, как линейных, так и нелинейных, к которым бэкстеппинг применим, а также в достигаемой высокой точности регулирования без использования сильной обратной связи в контуре управления [9]. Одним из недостатков алгоритма [8] и ряда его модификаций [9—13] является потеря устойчивости при наличии неизвестных несогласованных возмущений. Решение этой проблемы представлено в работах [14, 15]. В работе [14] для линейных одноканальных систем предложена робастная модификация алгоритма бэкстеппинга на базе метода вспомогательного контура [16], использование которого позволяет на каждом шаге итеративной процедуры синтеза системы управления оценить и компенсировать нежелательную динамику (как внешнюю, вызванную влиянием возмущающих воздействий, так и внутреннюю, зависящую от параметрических неопределенностей объекта). При этом в работе [14] рассматривается задача управления по выходу одноканальным линейным объектом, а работоспособность метода подтверждается результатами компьютерного моделирования. В настоящей статье полученные в работе [14] результаты расширены применительно к случаю управления многоканальными объектами по выходу. Кроме того, в статье приведены результаты практической апробации

полученного алгоритма на реальном лабораторном электромеханическом стенде „Twin Rotor MIMO System“.

Постановка задачи. Рассмотрим многоканальный объект, который может быть декомпозирован на конечное число k одноканальных подсистем вида

$$\dot{x}_j = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} I_{[n-1] \times [n-1]} x_j + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_j \end{bmatrix} u_j + H_j \varphi_j, \quad (1)$$

$$y_j = [1 \ 0 \ \dots \ 0] x_j, j = \overline{1, k},$$

где $x_j(t) \in R^n$ — вектор состояния подсистемы j , недоступный для измерения; $u_j(t) \in R$ — управляющий сигнал подсистемы j ; $b_j > 0$ — неизвестные константы; $\varphi_j(x_j, f_j) \in R^n$ — неизвестные ограниченные функции внешних возмущений и неучтенной внутренней динамики; H_j — нижние треугольные матрицы; $f_j \in R^n$ — векторы неизвестных параметров; предполагается, что $\varphi_j(x_j, f_j)$ — неизвестные функции, ограниченные по t и липшицевы по x .

Целевое условие задается в виде

$$\|y_j - y_{\text{ref } j}\| < \delta_j, \quad t_j > T_j, \quad (2)$$

где $y_{\text{ref } j}$ — эталонный сигнал для каждой подсистемы j ; $\delta_j > 0$ — требуемая точность регулирования; $T_j > 0$ — время переходных процессов.

Синтез алгоритма. Введем в рассмотрение вспомогательные контуры

$$\dot{z}_{ij} = -c_{ij} z_{ij} + \hat{x}_{(i+1)j}, \quad \dot{z}_{nj} = -c_{nj} z_{nj} + \alpha_j u_j, \quad i = \overline{1, n-1}, j = \overline{1, k}, \quad (3)$$

которые соответствуют каждому из уравнений состояния объекта (1):

$$\dot{x}_{ij} = x_{(i+1)j} + \varphi_{ij}, \quad \dot{x}_{nj} = b_j u_j + \varphi_{nj}, \quad i = \overline{1, n-1}, j = \overline{1, k}, \quad (4)$$

где $z_j(t) = [z_{1j} \ z_{2j} \ \dots \ z_{nj}]^T$ — векторы состояний вспомогательных контуров, представляющих желаемую динамику для объекта (1) в случае $\varphi_{ij}(t) = 0$; $\hat{x}_j(t) = [\hat{x}_{1j} \ \hat{x}_{2j} \ \dots \ \hat{x}_{nj}]^T$ — оценки векторов состояний каждой из подсистем; $\alpha_j, c_{ij} > 0$ положительные числа.

Сравнивая выражения (3) и (4), рассмотрим ошибки рассогласования и ошибки наблюдения:

$$\xi_{ij} = e_{ij} - z_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ij} = x_{ij} - \hat{x}_{ij}, \quad i = \overline{2, n}, j = \overline{1, k}, \quad (6)$$

где $\xi_{ij}(t)$ — ошибки рассогласования; $e_{ij}(t)$ — ошибки слежения (разность желаемого и фактического значений соответствующих переменных векторов состояния); $\varepsilon_{ij}(t)$ — ошибки наблюдения по вектору состояния.

Проанализируем динамику ошибок ξ_{ij} , ε_{ij} , e_{ij} согласно процедуре бэкстеппинга последовательно в n шагов.

Шаг 1. Ошибки слежения $e_{1j}(t)$ определяются как

$$e_{1j} = x_{1j} - y_{\text{ref } j}, \quad (7)$$

а производные ошибок рассогласования $\xi_{1j}(t)$ — как

$$\dot{\xi}_{1j} = c_{1j}z_{1j} + \tilde{\Phi}_{1j} + \varepsilon_{2j}, \quad (8)$$

где $\tilde{\Phi}_{1j} = \Phi_{1j} - \dot{y}_{\text{ref } j}$ — новые функции возмущений для первых уравнений состояния в каждой из подсистем.

Из выражения (8) следует, что функции $\tilde{\Phi}_{1j}(t)$ могут быть оценены как

$$\tilde{\Phi}_{1j} = \dot{\xi}_{1j} - c_{1j}z_{1j} - \varepsilon_{2j}. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет переписать уравнение (7) в следующем виде:

$$\dot{e}_{1j} = x_{2j} + \dot{\xi}_{1j} - c_{1j}z_{1j} - \varepsilon_{2j}. \quad (10)$$

В соответствии с методом бэкстеппинга предположим, что $x_{2j}(t)$ — виртуальные сигналы управления в (10) и существуют законы виртуального управления v_{1j} , такие что если $x_{2j} = v_{1j}$, то динамика (10) удовлетворяет условию (2).

Введем первый закон виртуального управления для каждой подсистемы:

$$v_{1j} = -c_{1j}\xi_{1j} - \tilde{\xi}_{1j}, \quad (11)$$

где $\tilde{\xi}_{1j}(t)$ — оценки функций $\dot{\xi}_{1j}(t)$.

Подставляя уравнение (11) в (10), получаем

$$\dot{e}_{1j} = -c_{1j}e_{1j} - \varepsilon_{2j} + \eta_{1j}, \quad (12)$$

где $\eta_{1j} = \dot{\xi}_{1j} - \tilde{\xi}_{1j}$ — ошибки наблюдения.

Шаг $i, i = \overline{2, n-1}$. Следующие вычисления выполняются для каждого из уравнений состояния (4) при $i = \overline{2, n-1}, j = \overline{1, k}$. Ошибки слежения определяются как

$$e_{ij} = x_{ij} - v_{(i-1)j}, i = \overline{2, n-1}, j = \overline{1, k}, \quad (13)$$

где $v_{(i-1)j}(t)$ — законы виртуального управления, определенные на предыдущем шаге по формуле

$$v_{(i-1)j} = -c_{(i-1)j}\xi_{(i-1)j} - \tilde{\xi}_{(i-1)j}. \quad (14)$$

Принимая во внимание (4), ошибки слежения можно представить как

$$\dot{e}_{ij} = x_{(i+1)j} + \tilde{\Phi}_{ij}, \quad (15)$$

где $\tilde{\Phi}_{ij} = \Phi_{ij} - \dot{v}_{(i-1)j}$ — новые функции возмущений для i -го уравнения подсистемы j .

Из уравнений (3)—(6) и (15) следует

$$\dot{\xi}_{ij} = c_{ij}z_{ij} + \tilde{\Phi}_{ij} + \varepsilon_{(i+1)j}, i = \overline{1, n-1}, j = \overline{1, k}, \quad (16)$$

откуда, в свою очередь, следует, что функции $\tilde{\Phi}_{ij}$ могут быть переписаны как

$$\tilde{\Phi}_{ij} = \dot{\xi}_{ij} - \varepsilon_{(i+1)j} - c_{ij}z_{ij}. \quad (17)$$

Выражение (17) позволяет представить уравнения ошибок слежения на i -м шаге в виде

$$\dot{e}_{ij} = x_{(i+1)j} + \dot{\xi}_{ij} - \varepsilon_{(i+1)j} - c_{ij}z_{ij}. \quad (18)$$

Предположим, что $x_{(i+1)j}(t)$ — виртуальные сигналы управления в (18) и существуют законы виртуального управления v_{ij} , такие что если $x_{(i+1)j} = v_{ij}$, то динамика (18) соответствует целевому условию (2) и обеспечивает сходимость ошибок (13) к нулю. Сформируем законы виртуального управления в виде

$$v_{ij} = -c_{ij}\hat{\xi}_{ij} - \tilde{\xi}_{ij}, \quad (19)$$

где $\hat{\xi}_{ij}(t)$ и $\tilde{\xi}_{ij}(t)$ — оценки функций $\xi_{ij}(t)$ и $\dot{\xi}_{ij}(t)$ соответственно.

Подставляя (19) в (18), получаем

$$\dot{e}_{ij} = -c_{ij}e_{ij} + \eta_{ij} + c_{ij}\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{(i+1)j}, \quad (20)$$

где $\eta_{ij} = \dot{\xi}_{ij} - \ddot{\xi}_{ij}$ — ошибки наблюдения.

Шаг n. Ошибки слежения n_j -х уравнений состояния определяются как

$$e_{nj} = x_{nj} - v_{(n-1)j}, \quad (21)$$

где $v_{(n-1)j}(t)$ — законы виртуального управления, определенные на предыдущем шаге.

Принимая во внимание (4), ошибки слежения e_{nj} можно представить как

$$\dot{e}_{nj} = b_j u_j + \tilde{\varphi}_{nj}, \quad (22)$$

где $\tilde{\varphi}_{nj} = \varphi_{nj} - \dot{v}_{(n-1)j}$ — новые функции возмущений.

Из уравнений (3)—(5) и (22) следует

$$\dot{\xi}_{nj} = c_{nj}z_{nj} + \tilde{\varphi}_{nj} + (b_j - \alpha_j)u_j, \quad (23)$$

откуда, в свою очередь, следует, что функции $\tilde{\varphi}_{nj}(t)$ могут быть переписаны как

$$\tilde{\varphi}_{nj} = \dot{\xi}_{nj} - c_{nj}z_{nj} - (b_j - \alpha_j)u_j. \quad (24)$$

Выражение (24) позволяет представить уравнения ошибок слежения на n -м шаге:

$$\dot{e}_{nj} = \dot{\xi}_{nj} - c_{nj}z_{nj} + \alpha_j u_j. \quad (25)$$

Из (25) следует, что закон управления может быть представлен в виде

$$u_j = -\frac{1}{\alpha_j} (c_{nj}\hat{\xi}_{nj} + \tilde{\xi}_{nj}), \quad (26)$$

где $\hat{\xi}_{nj}(t)$ и $\tilde{\xi}_{nj}(t)$ — оценки функций $\xi_{nj}(t)$ и $\dot{\xi}_{nj}(t)$ соответственно.

Подставляя (26) в (25), получаем

$$\dot{e}_{nj} = -c_{nj}e_{nj} + c_{nj}\varepsilon_{nj} + \eta_{nj}, \quad (27)$$

где $\eta_{nj} = \dot{\xi}_{nj} - \tilde{\xi}_{nj}$ — ошибки наблюдения.

Для оценки неизвестных сигналов $\xi_{ij}(t)$, $\dot{\xi}_{ij}(t)$ и $x_{ij}(t)$ в качестве наблюдателей используем реальные дифференциаторы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{\xi}}_{ij} &= -\mu_j^{-1}\hat{\xi}_{ij} + \mu_j^{-1}\xi_{ij}; \\ \dot{\hat{\xi}}_{ij} &= -\mu_j^{-1}\tilde{\xi}_{ij} + \mu_j^{-1}\dot{\xi}_{ij}; \\ \dot{\hat{x}}_{ij} &= -\mu_j^{-1}\hat{x}_{ij} + \mu_j^{-1}x_{ij}, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}, \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

где $\mu_j > 0$ — достаточно большие числа.

Теорема. Существуют значения параметров $c_{ij} > 0, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, k}$, и $\mu_{0j} > 0$, такие что для любого $0 < \mu_j \leq \mu_{0j}$ система управления, состоящая из вспомогательных контуров (3), законов виртуального управления (11), (19), закона управления (26) и наблюдателей (28), обеспечивает для объекта (1) выполнение целевого условия (2).

Доказательство теоремы аналогично приведенному в работе [17] с дополнительным учетом динамики ошибок наблюдения $\varepsilon_i(t)$ и многоканальной структуры объекта. Эффективность предложенного алгоритма продемонстрируем на следующем примере.

Моделирование и апробация. Для проверки работоспособности метода были проведены компьютерное моделирование алгоритма и его апробация на лабораторном стенде.

Моделирование алгоритма управления многоканальным объектом реализовано в программной среде MatLab/Simulink. Структурная схема алгоритма представлена на рис. 1.

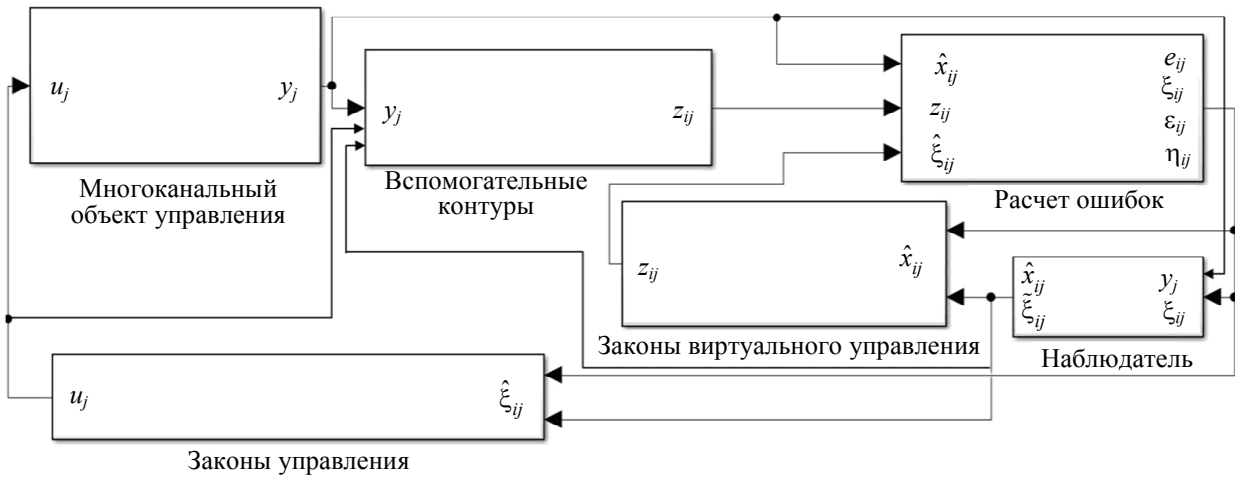


Рис. 1

Для дальнейшего исследования алгоритма на практике использована лабораторная установка „Twin Rotor MIMO System“ (TRMS). TRMS — упрощенная модель вертолета, которая может быть представлена линейной моделью с неизвестной нелинейной функцией нежелательных внутренних и внешних воздействий и системой двухканального независимого управления для регулирования положения установки по двум угловым координатам. Общий вид стенда TRMS представлен на рис. 2.

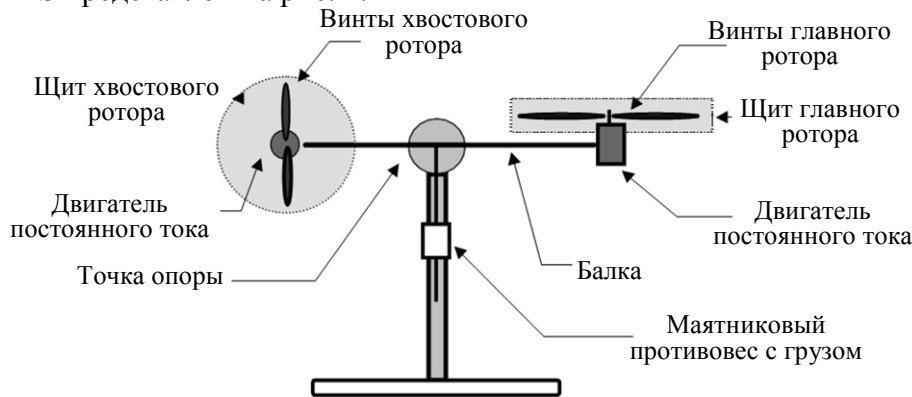


Рис. 2

Динамика объекта в линейном виде описывается следующей системой [18]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + f_d(t), x(0) = 0; \\ y(t) &= Lx(t), \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -12,354 & -2,774 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1,56 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0,847 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0,046 \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

где $f_d(t)$ — неизвестная функция внешних возмущений, предполагаемая ограниченной; $y = [\theta \ \psi]^T$ (θ — угол тангажа, ψ — угол рыскания).

Функцию управляющего воздействия выполняет напряжение, подаваемое на двигатели постоянного тока.

Для синтеза системы управления использованы следующие параметры наблюдателя и вспомогательного контура: $\mu = 0,01$, $\alpha = 2,5$, $c_1 = 0,4$, $c_2 = 0,2$. На рис. 3, а, б показаны пе-

реходные процессы по углам тангажа и рыскания, а на рис. 4, а, б — по управлению (для главного и хвостового роторов соответственно). Результаты практической апробации подтверждают результаты компьютерного моделирования.

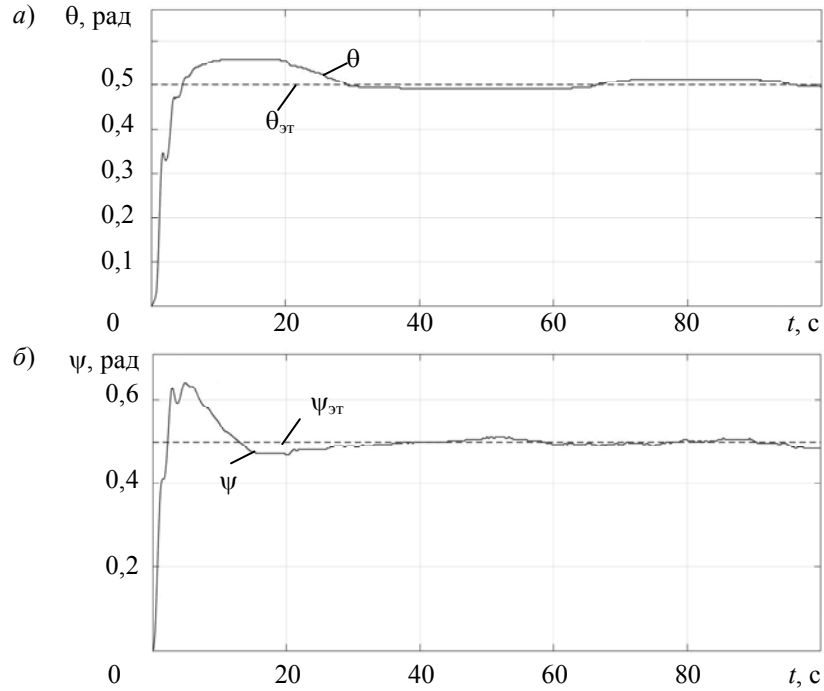


Рис. 3

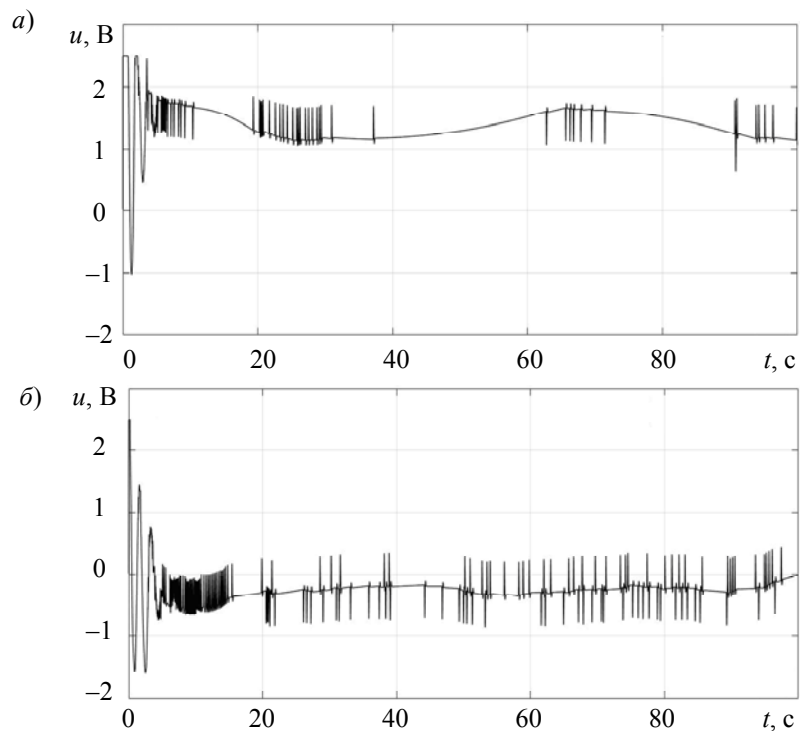


Рис. 4

Заключение. Представлен робастный метод управления многоканальным объектом при наличии ограниченных неизвестных несогласованных возмущений. Алгоритм основывается на методе бэкстеппинга и методе вспомогательного контура с использованием итеративного подхода к оцениванию и компенсации нежелательной динамики объекта в каждом уравнении состояния. Применимость данного метода на практике продемонстрирована с помощью лабораторного стенда.

Предложенный алгоритм управления относится к классу децентрализованных, однако может быть представлен в централизованном виде путем замены всех эталонных сигналов в целевой задаче (2) на один сигнал без дополнительных изменений в структуре алгоритма. В этом случае будет решена задача синхронизации подсистем многоканального объекта, что позволяет сделать вывод о применимости полученного решения для задач управления много-агентными или сетевыми системами.

Разработка алгоритма управления выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-38-20037; формулировка теоремы выполнена в рамках гранта 08-08 Правительства Российской Федерации; численное моделирование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 17-08-01728; экспериментальные исследования выполнены при поддержке РФФИ, проект № 19-08-00246.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N., Slita O.* Identification of frequency of biased harmonic signal // IFAC Proc. Vol. 2007. Vol. 40, N 13. P. 167—172.
2. *Aparicio A., Castaños F., Fridman L.* Output feedback sliding-mode control with unmatched disturbances, an ISS approach // Intern. Journal of Robust and Nonlinear Control. 2016. Vol. 26, N 18. P. 4056—4071.
3. *Yu P., Shtessel Y., Edwards C.* Continuous higher order sliding mode control with adaptation of air breathing hypersonic missile // Intern. Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2016. Vol. 30, N 8—10. P. 1099—1117.
4. *Chang J. L.* Sliding mode control design for mismatched uncertain systems using output feedback // Intern. Journal of Control, Automation and Systems. 2016. Vol. 14, N 2. P. 579—586.
5. *Li S., Yang J., Chen W. H., Chen X.* Disturbance Observer-Based Control: Methods and Applications. CRC Press, 2016.
6. *Gao Z.* Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design // IEEE Amer. Control Conf. 2006.
7. *Wang X., Li S., Lam J.* Distributed active anti-disturbance output consensus algorithms for higher-order multi-agent systems with mismatched disturbances // Automatica. 2016. Vol. 74. P. 30—37.
8. *Kokotovic P. V.* The joy of feedback: nonlinear and adaptive // IEEE Control Systems Magazine. 1992. Vol. 12, N 3. P. 7—17.
9. *Fradkov A. L., Miroshnik I. V., Nikiforov V. O.* Nonlinear and Adaptive Control of Complex Systems. Springer Science & Business Media, 2013.
10. *Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P. V.* Nonlinear and Adaptive Control Design. N. Y.: Wiley, 1995. P. 490—491.
11. *Nikiforov V. O.* Modified adaptive controller for linear plants with improved parametric robustness and transient performance // IEEE European Control Conf. (ECC). 1997. P. 1213—1218.
12. *Queiroz K., Dias S., Araujo A.* Modular variable structure adaptive backstepping controller: Design and stability analysis // J. of the Franklin Institute. 2014. Vol. 351, N 4. P. 2089—2106.
13. *Zhou J., Wen C., Wang W.* Adaptive backstepping control of uncertain systems with unknown input time-delay // Automatica. 2009. Vol. 45, N 6. P. 1415—1422.
14. *Furtat I., Furtat E., Tupichin E. A.* Modified backstepping algorithm with disturbances compensation // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, N 11. P. 1056—1061.
15. *Sun H., Li S., Yang J., Zheng W. X.* Global output regulation for strict-feedback nonlinear systems with mismatched nonvanishing disturbances // Intern. Journal of Robust and Nonlinear Control. 2015. Vol. 25, N 15. P. 2631—2645.
16. *Tsykunov A. M.* Robust control algorithms with compensation of bounded perturbations // Automation and Remote Control. 2007. Vol. 68, N 7. P. 1213—1224.

17. Furtat I. B., Vrazhevsky S. A., Kremlev A. S., Gushchin P. A. Robust control algorithm under mismatched disturbances // Proc. of the 9th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), IEEE. Munich, Germany. 2017. P. 61—66.
18. Vrazhevsky S. A., Chugina J. V., Furtat I. B., Kremlev A. S. Robust suboptimal output stabilization for multi input multi output plants under disturbances // Proc. of the 9th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), IEEE. Munich, Germany. 2017. P. 55—60.

Сведения об авторах

- Дмитрий Евгеньевич Коновалов** — студент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: d.e.konovlov@mail.ru
- Сергей Александрович Вражевский** — Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; ИПМаш РАН, лаборатория управления сложными системами; инженер; E-mail: vrazhevskij.s@gmail.com
- Игорь Борисович Фуртат** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; ИПМаш РАН, лаборатория управления сложными системами; E-mail: cainenash@mail.ru
- Артем Сергеевич Кремлев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: kremlev_artem@mail.ru

Поступила в редакцию
21.05.19 г.

Ссылка для цитирования: Коновалов Д. Е., Вражевский С. А., Фуртат И. Б., Кремлев А. С. Робастное управление по выходу многоканальными объектами // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 782—790.

ROBUST OUTPUT CONTROL FOR NONLINEAR MULTI-CHANNEL SYSTEMS

D. E. Konovalov¹, S. A. Vrazhevsky^{1,2}, I. B. Furtat^{1,2}, A. S. Kremlev¹

¹*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*
E-mail: vrazhevskij.s@gmail.com

²*Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS,*
199178, St. Petersburg, Russia

The problem of robust output control for multiple-input multiple-output linear system under unknown mismatched bounded disturbances and parametric uncertainties is considered. The proposed control algorithm is based on a combination of two techniques: the backstepping method and the auxiliary loop method. An iterative procedure is described for synthesis of a decentralized control system with a specialized dynamical subsystem (auxiliary loop) included on each step to provide estimation and compensation of unknown inconsistent perturbations without the use of a strong feedback. Results of practical approbation of the developed algorithm using a real laboratory platform "Twin Rotor MIMO System" are presented.

Keywords: backstepping, auxiliary loop method, output control, multiple-input multiple-output systems, robust control, disturbance observer, mismatched disturbances

REFERENCES

1. Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N., Slita O. *IFAC Proceedings Volumes*, 2007, no. 13(40), pp. 167–172.
2. Aparicio A., Castaños F., Fridman L. *Intern. Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2016, no. 18(26), pp. 4056–4071.
3. Yu P., Shtessel Y., Edwards C. *Intern. Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2016, no. 8–10(30), pp. 1099–1117.
4. Chang J.L. *Intern. Journal of Control, Automation and Systems*, 2016, no. 2(14), pp. 579–586.
5. Li S., Yang J., Chen W.H., Chen X. *Disturbance observer-based control: methods and applications*, CRC press, 2016.
6. Gao Z. *American Control Conference*, IEEE, 2006, pp. 7.
7. Wang X., Li S., Lam J. *Automatica*, 2016, vol. 74, pp. 30–37.
8. Kokotovic P.V. *IEEE Control Systems Magazine*, 1992, no. 3(12), pp. 7–17.
9. Fradkov A.L., Miroshnik I.V., Nikiforov V.O. *Nonlinear and adaptive control of complex systems*, Springer Science & Business Media, 2013, vol. 491.
10. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V. *Nonlinear and adaptive control design*, New York, Wiley, 1995, vol. 222, pp. 490–491.

11. Nikiforov V.O. *European Control Conference (ECC)*, IEEE, 1997, pp. 1213–1218.
12. Queiroz K., Dias S., Araujo A. *Journal of the Franklin Institute*, 2014, no. 4(351), pp. 2089–2106.
13. Zhou J., Wen C., Wang W. *Automatica*, 2009, no. 6(45), pp. 1415–1422.
14. Furtat I., Furtat E., Tupichin E.A. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, no. 11(48), pp. 1056–1061.
15. Sun H., Li S., Yang J., Zheng W.X. *Intern. Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2015, no. 15(25), pp. 2631–2645.
16. Tsykunov A.M. *Automation and Remote Control*, 2007, no. 7(68), pp. 1213–1224.
17. Furtat I.B., Vrazhevsky S.A., Kremlev A.S., Gushchin P.A. *9th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, IEEE, 2017, pp. 61–66.
18. Vrazhevsky S.A., Chugina J.V., Furtat I.B., Kremlev A.S. *9th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, IEEE, 2017, pp. 55–60.

Data on authors

Dmitry E. Konovalov	—	Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: d.e.konovalov@mail.ru
Sergey A. Vrazhevsky	—	ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, Laboratory of Control of Complex Systems; Engineer; E-mail: vrazhevskij.s@gmail.com
Igor B. Furtat	—	Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Institute for Problems in Mechanical Engineering of the RAS, Laboratory of Control of Complex Systems; E-mail: cainenash@mail.ru
Artem S. Kremlev	—	PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: kremlev_artem@mail.ru

For citation: Konovalov D. E., Vrazhevsky S. A., Furtat I. B., Kremlev A. S. Robust output control for nonlinear multi-channel systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 9. P. 782–790 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-9-782-790