
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.51
DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-1-32-40

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО ВЫХОДУ ДВУХРОТОРНЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ МНОГОКАНАЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ

С. А. ВРАЖЕВСКИЙ, А. А. МАРГУН, Д. Н. БАЗЫЛЕВ,
К. А. ЗИМЕНКО, А. С. КРЕМЛЕВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Vrazhevskij.S@gmail.com*

Обсуждается проблема робастного управления нелинейными многомерными системами. Рассматривается класс нелинейных объектов управления с параметрическими неопределенностями при наличии внешних неизвестных ограниченных возмущений. Предложен метод управления, основанный на методе последовательного компенсатора. Работоспособность алгоритма управления экспериментально исследована с помощью лабораторного стенда „Twin Rotor MIMO System“. На основе результатов эксперимента показано, что метод последовательного компенсатора обеспечивает более высокое качество переходных процессов и точность в установившемся режиме по сравнению с управлением методом пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования.

Ключевые слова: нелинейные многоканальные объекты, робастное управление, управление по выходу, последовательный компенсатор, ПИД-регулятор

Введение. Развитие современных технологий приводит к созданию все более сложных мехатронных и роботизированных технических объектов, при математическом описании которых используются модели нелинейной динамики и параметрические неопределенности, а также учитываются внешние и внутренние возмущающие воздействия. Распространенные методы управления (ПИД-регуляторы, модальное управление и т.п.) зачастую оказываются неприменимы либо не способны обеспечить требуемые показатели качества для такого рода систем.

В настоящей статье рассматривается проблема управления двухроторной многоканальной системой на примере специализированного лабораторного стенда „Twin Rotor MIMO System“ (TRMS) [1]. Тематике управления нелинейными многоканальными объектами посвящено достаточно много исследований. Так, в работе [2] проведен анализ линейных и нелинейных модификаций ПИД-регулятора для TRMS. Метод оптимального управления на основе линейного квадратичного регулятора рассмотрен в работе [3], а его модификация на основе метода адаптивного управления со скользящим режимом — в работе [4]. Субоптимальное управление с использованием метода итеративной линеаризации предложено в работе [5]

Для исследований в данной области применяются также методы нечеткой логики. Например, ПИД-регулятор с использованием генетических алгоритмов представлен в работе [6], в [7] предложена модификация регулятора, основанная на нечеткой логике с применением теории оптимального управления. Алгоритм, совмещающий в себе нечеткую логику и управление со скользящим режимом, рассмотрен в работе [8]. Адаптивное нечеткое управление

многоканальными объектами в условиях неизвестных по знаку коэффициентов матрицы входных воздействий использовано в работе [9].

В работе [10] предложено использовать адаптивный регулятор на основе алгоритма бэкстеппинга (backstepping) для управления квадрокоптером, который рассматривается как нелинейная многоканальная система. Алгоритм робастного управления для линеаризуемых нелинейных многоканальных объектов на основе методов линеаризации обратной связью представлен в работе [11].

Большинство предложенных решений имеют высокую сложность реализации и часто опираются на известную математическую модель объекта.

В настоящей статье для решения задач управления нелинейными многоканальными объектами используется метод робастного управления по выходу. Алгоритм управления базируется на методе последовательного компенсатора. Высокое качество алгоритма достигается его способностью компенсировать широкий класс внешних возмущений и обеспечивать устойчивость в условиях параметрической неопределенности. Достоинством предлагаемого метода является простота инженерной реализации и низкая вычислительная сложность.

Объект управления. Лабораторный стенд TRMS представляет собой модель винтокрылого летательного аппарата с двумя степенями свободы и двухканальным входом. Общий вид установки показан на рис. 1.



Рис. 1

Объект управления содержит два двигателя постоянного тока, по одному на каждую из степеней свободы. Входными сигналами объекта является подаваемое на двигатели напряжение, ограниченное интервалом $[-2,5 \text{ В}; +2,5 \text{ В}]$. Выходом объекта управления являются углы поворота в горизонтальной (рысканье) и вертикальной (тангаж) плоскостях. Детальное описание конструкции лабораторного стенда приведено в документации [1].

Математическая модель. Динамика объекта управления в каждой плоскости может быть описана уравнением моментов. Также на объект действуют сила тяжести, гироскопический момент, сила трения. Объект управления может быть представлен как два одноканальных объекта с перекрестными связями. Динамика объекта в вертикальной плоскости описывается выражением

$$I_1 \ddot{\psi} = M_1 - M_{FG} - M_{B\psi} - M_G, \quad (1)$$

где ψ — угол тангажа, I_1 — момент инерции, M_1 — момент, создаваемый главным двигателем, M_{FG} — момент силы тяжести, $M_{B\psi}$ — момент сил трения, M_G — гироскопический момент.

Силы, действующие в вертикальной плоскости, описываются уравнениями

$$\left. \begin{aligned} M_{FG} &= M_{g1} \sin \psi - M_{g2} \cos \psi; \\ M_G &= k_{gy} M_1 \dot{\phi} \cos \psi; \\ M_{B\psi} &= B_{1\psi} \dot{\psi} + B_{2\psi} \operatorname{sgn} \dot{\psi}; \\ M_1 &= a_1 \tau_1^2 + b_1 \tau_1, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где M_{g1}, M_{g2} — моменты гравитационных сил; φ — угол рыскания; $k_{gy}, B_{1\psi}, B_{2\psi}, a_1, b_1$ — постоянные коэффициенты, указанные в документации [1].

Динамика двигателей постоянного тока аппроксимирована передаточными функциями первого порядка:

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= \frac{k_1}{T_{11}s + T_{10}} u_1; \\ \tau_2 &= \frac{k_2}{T_{21}s + T_{20}} u_2, \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} \dot{\tau}_1 &= \frac{k_1}{T_{11}} u_1 - \frac{T_{10}}{T_{11}} \tau_1; \\ \dot{\tau}_2 &= \frac{k_2}{T_{21}} u_2 - \frac{T_{20}}{T_{21}} \tau_2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где τ_1 и τ_2 — моменты сил на валах главного и хвостового двигателей; u_1 и u_2 — входные напряжения на клеммах двигателей; $k_1, k_2, T_{ij}, i, j = \overline{1, 2}$, — известные константы [1].

С учетом выражений (2) и (3) система уравнений, описывающая динамику объекта в вертикальной плоскости, принимает следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi} &= \omega_{\psi}; \\ \dot{\omega}_{\psi} &= -\frac{M_{g1}}{I_1} \sin \psi + \frac{M_{g2}}{I_1} \cos \psi - \\ &\quad - B_{1\psi} \omega_{\psi} - B_{2\psi} \operatorname{sgn} \omega_{\psi} + \frac{b_1}{I_1} \tau_1 + \frac{a_1}{I_1} \tau_1^2 + k_{gy} M_1 \dot{\varphi} \cos \psi; \\ \dot{\tau}_1 &= -\frac{T_{10}}{T_{11}} \tau_1 + \frac{k_1}{T_{11}} u_1, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где ω_{ψ} — угловая скорость объекта в вертикальной плоскости.

Система уравнений (4) может быть переписана в следующем виде:

$$\begin{aligned} \ddot{\psi} + B_{1\psi} \dot{\psi} &= \theta_{1\psi} k_1 u_1 + \tilde{f}_{\psi}; \\ \tilde{f}_{\psi} &= \theta_{2\psi} k_1 \tau_1^2 - \frac{M_{g1}}{I_1} \cos \psi - \frac{M_{g2}}{I_1} \sin \psi + k_{gy} M_1 \dot{\varphi} \cos \psi + B_{1\psi} \operatorname{sgn} \omega_{\psi}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\theta_{1\psi}, \theta_{2\psi}$ — постоянные коэффициенты, зависящие от параметров системы (4); \tilde{f}_{ψ} — ограниченная функция, содержащая все нелинейные компоненты уравнения динамики объекта в вертикальной плоскости.

В векторно-матричной форме система (4) может быть представлена следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= A_{\psi} x + B_{\psi} u_1 + F_{\psi}; \\ y &= C_{\psi} x, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$A_{\psi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -B_{1\psi} & b_1/I_1 \\ 0 & 0 & T_{10}/T_{11} \end{bmatrix}, B_{\psi} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_1/T_{11} \end{bmatrix}, C_{\psi} = [1 \quad 0 \quad 0], \quad (7)$$

F_{ψ} — вектор-функция, содержащая все нелинейные компоненты уравнения динамики объекта в вертикальной плоскости:

$$F_{\psi} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{M_{g1}}{I_1} \\ 0 \end{bmatrix} \sin \psi + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{M_{g2}}{I_1} \\ 0 \end{bmatrix} \cos \psi + \begin{bmatrix} 0 \\ -B_{2\psi} \\ 0 \end{bmatrix} \operatorname{sgn} \omega_{\psi} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{a_1}{I_1} \\ 0 \end{bmatrix} \tau_1^2 + \begin{bmatrix} 0 \\ k_{gy} \\ 0 \end{bmatrix} M_1 \dot{\varphi} \cos \psi. \quad (8)$$

Аналогичные вычисления и преобразования справедливы для уравнений динамики объекта в горизонтальной плоскости:

$$I_2 \ddot{\varphi} = M_2 - M_{B\varphi} - M_R, \quad (9)$$

где I_2 — момент инерции, M_2 — момент, создаваемый хвостовым двигателем, $M_{B\varphi}$ — момент сил трения, M_R — момент, создаваемый перекрестными связями.

Силы, действующие в горизонтальной плоскости, описываются уравнениями

$$\left. \begin{aligned} M_R &= \left(k_c (T_0 s + 1) / (T_p s + 1) \right) \tau_1; \\ M_{B\varphi} &= B_{1\varphi} \omega + B_{2\varphi} \operatorname{sgn} \omega_\varphi; \\ M_2 &= a_2 \tau_2^2 + b_2 \tau_2, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $k_c, T_0, T_p, B_{1\varphi}, B_{2\varphi}, a_2, b_2$ — известные константы [1].

С учетом выражений (3) и (10) система уравнений, описывающая динамику объекта в горизонтальной плоскости, принимает следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varphi} &= \omega_\varphi; \\ \dot{\omega}_\varphi &= -B_{1\varphi} \omega - B_{2\varphi} \operatorname{sgn} \omega_\varphi + \frac{b_2}{I_2} \tau_2 + \frac{a_2}{I_2} \tau_2^2; \\ \dot{\tau}_2 &= -\frac{T_{20}}{T_{21}} \tau_2 + \frac{k_2}{T_{21}} u_2; \\ \dot{M}_R &= \frac{k_c}{T_p} \left(1 - \frac{T_0}{T_p} \right) \tau_1 - \frac{1}{T_p} M_R, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где ω_φ — угловая скорость объекта в горизонтальной плоскости.

Система уравнений (11) может быть переписана в следующем виде:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi} + B_{1\varphi} \dot{\varphi} &= \theta_{1\varphi} k_2 u_2 + \tilde{f}_\varphi; \\ \tilde{f}_\varphi &= \theta_{2\varphi} k_2 \tau_2^2 + B_{2\varphi} (\operatorname{sgn} \omega_\varphi) - T_p \dot{M}_R + k_c (1 - T_0/T_p) \tau_1, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\theta_{1\varphi}, \theta_{2\varphi}$ — постоянные коэффициенты, зависящие от параметров системы (11); \tilde{f}_φ — функция, содержащая все нелинейные компоненты и перекрестные связи в описании динамики объекта в горизонтальной плоскости.

В векторно-матричной форме система (11) может быть представлена следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= A_\varphi x + B_\varphi u_2 + F_\varphi; \\ y &= C_\varphi x, \end{aligned} \right\}$$

где

$$A_\varphi = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -B_{1\varphi} & b_2/I_2 \\ 0 & 0 & T_{20}/T_{21} \end{bmatrix}, B_\varphi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_2/T_{21} \end{bmatrix}, C_\varphi = [1 \quad 0 \quad 0],$$

F_φ — вектор-функция, содержащая все нелинейные компоненты и перекрестные связи в описании динамики объекта в горизонтальной плоскости:

$$F_\varphi = \begin{bmatrix} 0 \\ -B_{2\varphi} \\ 0 \end{bmatrix} \operatorname{sgn} \omega_\varphi + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{a_2}{I_2} \tau_2^2 + \frac{k_c T_0}{T_p} \tau_1 + M_R \\ 0 \end{bmatrix}.$$

В результате математическая модель лабораторного стенда TRMS может быть представлена как две независимые динамические подсистемы (5) и (12), перекрестные связи которых рассматриваются как неизвестные ограниченные функции возмущений.

Робастный алгоритм управления. Синтез алгоритма управления для объекта, динамика которого описывается моделью (5), (12), основан на методе последовательно компенсатора [12]. Модель (5), (12) в общем виде описывается уравнениями

$$\begin{aligned} Q_i(p)y_i(t) = R_i(p)u_i(t) + \tilde{f}_i(t, y, u) + d_i(t) + \\ + \sum_{j=1, j \neq i}^2 c_{ij}(p)y_j(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^2 \gamma_{ij}(p)u_j(t), \quad i = 1, 2, \end{aligned} \quad (13)$$

где Q_i, R_i — линейные дифференциальные операторы с динамическими порядками n_i и m_i соответственно; $y_i(t)$ — выходные сигналы; u_i — сигналы управления; $\tilde{f}_i(t, y, u)$ — функции нелинейных воздействий, соответствующие \tilde{f}_{ψ} и \tilde{f}_{φ} ; d_i — функции неизвестных ограниченных внешних возмущений; c_{ij} и γ_{ij} — линейные дифференциальные операторы входных и выходных воздействий перекрестных связей соответственно; $p = dp/dt$ — оператор дифференцирования.

Относительные динамические степени ρ_i уравнений (13) известны.

Эталонная модель описывается следующим образом:

$$Q_{mi}(p)y_{mi}(t) = R_{mi}(p)u_{mi}(t), \quad i = 1, 2, \quad (14)$$

где Q_{mi}, R_{mi} — линейные дифференциальные операторы, $y_{mi}(t) \in R$ — выходные сигналы эталонной модели, $u_{mi}(t) \in R$ — кусочно-непрерывные ограниченные сигналы управления эталонной моделью.

Сформируем законы робастного управления на основе информации об ошибках слежения $e_i(t) = y_i(t) - y_{mi}(t)$ для выхода реального объекта по отношению к выходу эталонной модели. Децентрализованный закон управления может быть сформирован следующим образом [13]:

$$u_i(t) = -\alpha_i K_i(\lambda) \hat{e}_i(t), \quad (15)$$

где α_i — положительная константа, $K_i(\lambda)$ — гурвицев полином с относительной степенью $\rho_i - 1$, λ — комплексная переменная, $\hat{e}_i(t)$ — оценка ошибки слежения.

Для получения оценки ошибки слежения используется наблюдатель

$$\left. \begin{aligned} \dot{\xi}_i &= \sigma_i \Gamma_i \xi_i + \sigma_i B_i e_i; \\ \hat{e}_i &= L_i^T \xi_i, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где

$$\Gamma_i = \begin{bmatrix} 0 & I_{\rho_i} \\ -k_1 & -k_{\rho_i-1} \end{bmatrix}, \quad B_i = [0 \ 0 \dots k]^T, \quad L_i = [1 \ 0 \dots 0]^T,$$

$\xi_i \in R^{\rho-1}$ — вектор состояния наблюдателя, Γ_i — гурвицева матрица в силу выбора коэффициентов, σ_i — достаточно большое число.

Как доказано в работе [13], закон управления (15) с наблюдателем (16) обеспечивают сходимость выхода объекта управления к выходу эталонной модели (14) с требуемой точностью при условии, что функция $\tilde{f}_i(t, y, u)$ липшицева. Кроме того, предложенный алгоритм управления обеспечивает робастность замкнутой системы по отношению к отклонениям параметров объекта от номинальных значений.

Отдельного рассмотрения требуют нелинейные нелипшицевы компоненты вида $\operatorname{sgn}(\cdot)$ в описаниях динамики объекта (5), (12). Функцию $\operatorname{sgn}(\cdot)$ можно полагать липшицевой во всех точках за исключением нуля. В работах [14, 15] доказано, что алгоритм управления (15), (16) обеспечивает сходимость ошибки слежения многоканальной системы в ограниченной области в условиях квантования измерений выходного сигнала объекта. В рассматриваемом случае замкнутая система экспоненциально устойчива в окрестности при определенных значениях шага квантования и возмущения. Динамикой функции квантования можно описать динамику системы, в которой присутствует компонент $\operatorname{sgn}(\cdot)$, что позволяет распространить полученный в работах [14, 15] результат на рассматриваемый случай.

Эксперимент. В процессе экспериментальной апробации алгоритма управления (15) с использованием лабораторного стенда TRMS выбраны следующие параметры регулятора и наблюдателя:

$$\alpha_i = 0,5, \quad K_i = 5p^2 + 20p + 50, \quad \sigma_i = 1, \quad i = 1, 2;$$

$$\Gamma_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0,01 & -100 \end{bmatrix}, \quad B_i = [01]^T, \quad L_i = [10]^T, \quad i = 1, 2.$$

Линейная часть уравнения динамики TRMS с учетом параметров, указанных в [1], имеет следующий вид:

$$A_\psi = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -6 \cdot 10^{-2} & 1,51 \\ 0 & 0 & -0,91 \end{bmatrix}, \quad B_\psi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C_\psi = [1 \quad 0 \quad 0],$$

$$A_\phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -6 \cdot 10^{-3} & 4,5 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad B_\phi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,8 \end{bmatrix}, \quad C_\phi = [1 \quad 0 \quad 0].$$

Был проведен сравнительный анализ предложенного децентрализованного алгоритма управления и работы ПИД-регулятора (в тех же условиях). Настройки ПИД-регулятора предоставлены разработчиками лабораторного стенда.

Результаты работы системы управления показаны на рис. 2, 3. Для каждой из подсистем лабораторного стенда задачи стабилизации в заданном положении (рис. 2, $a—г$) и слежения за эталонным сигналом $\varphi_{ref}, \psi_{ref}$ (рис. 3, $a—г$) были решены с использованием метода последовательного компенсатора (МПК) и пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора. Графики, представленные на рис. 2, $a, б$, демонстрируют сравнительно одинаковое качество регулирования; анализ рис. 2, $в, г$ и 3, $в, г$ показывает, что переходные процессы в замкнутой системе при управлении методом последовательного компенсатора заметно лучше, чем при работе ПИД-регулятора, а рис. 3, $a, б$ — что последовательный компенсатор обеспечивает более точное слежение объекта за эталонным сигналом по углу рысканья, чем ПИД-регулятор.

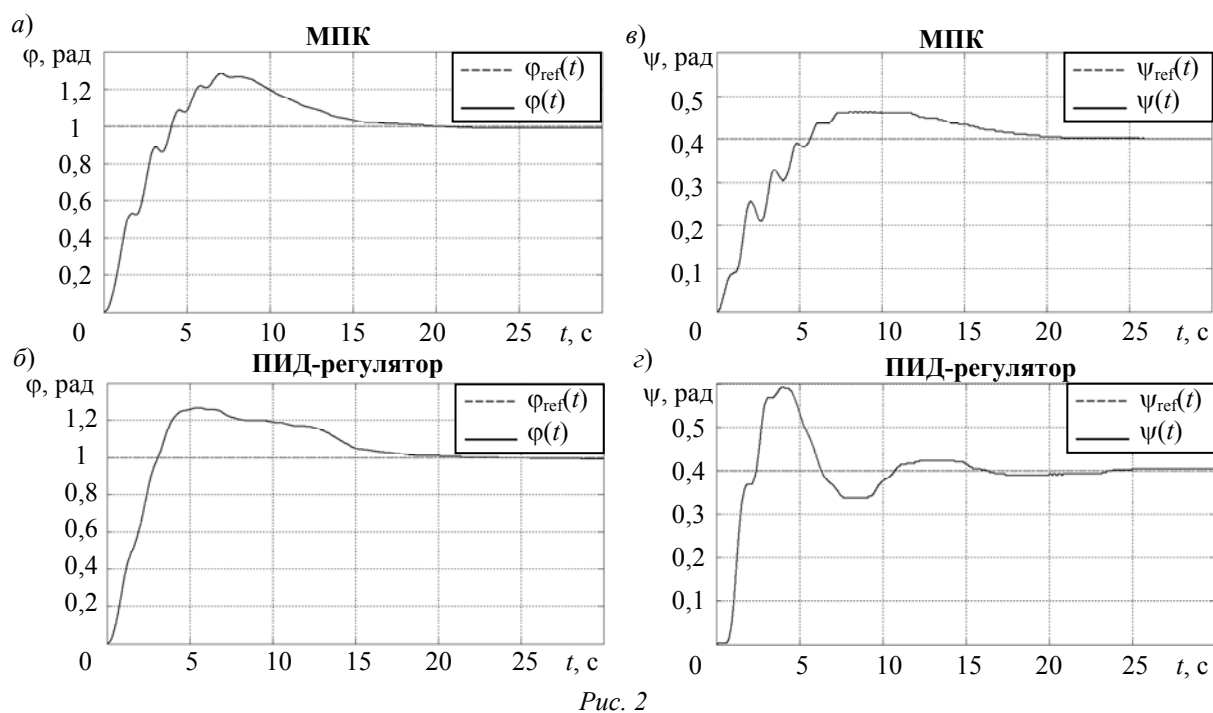


Рис. 2

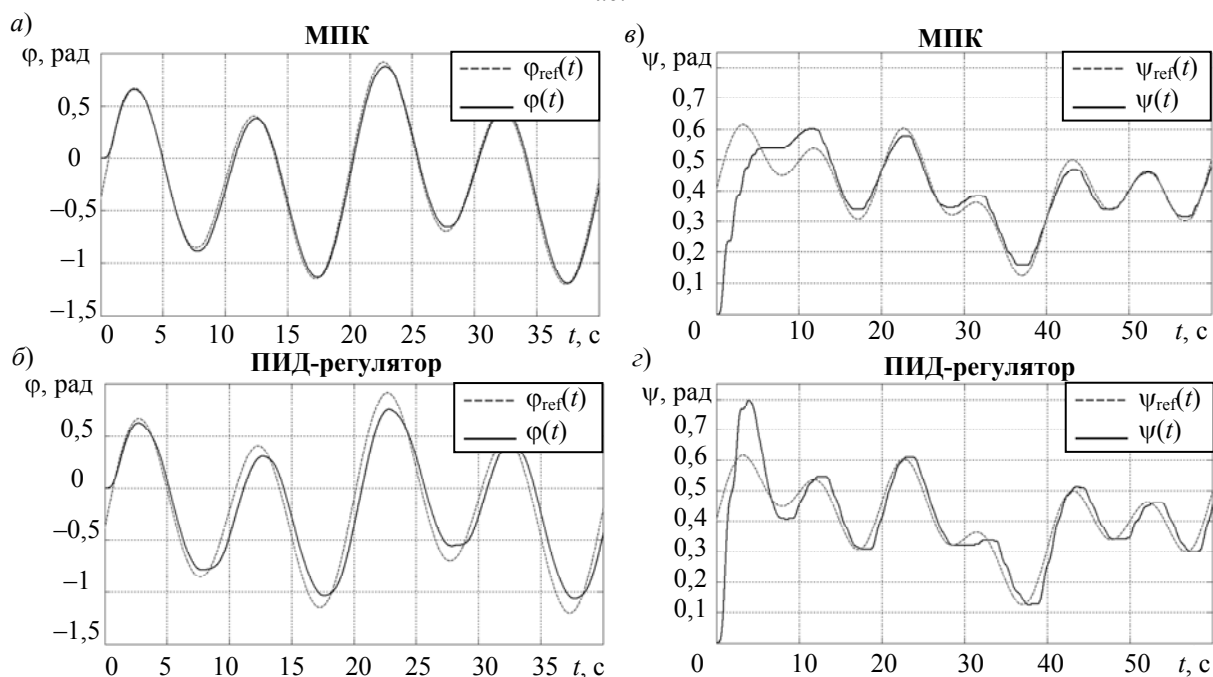


Рис. 3

Результаты эксперимента демонстрируют работоспособность робастного управления методом последовательного компенсатора применительно к многоканальным нелинейным техническим объектам, и качество управления превосходит качество, обеспечиваемое ПИД-регулятором.

Заключение. Рассмотрен алгоритм робастного управления по выходу нелинейным многоканальным объектом с параметрическими неопределенностями в условиях внешних ограниченных возмущений. Ключевое предположение о применимости предложенного закона управления состоит в том, что математическая модель объекта управления может быть представлена в виде суммы линейной и нелинейной частей. Для синтеза регулятора необходимо знать только относительную степень линейной части модели объекта управления.

Рассмотренный метод применен для управления лабораторным стендом „Twin Rotor MIMO System“. Параметрические неопределенности и нелинейная динамика объекта управления, включая перекрестные связи, рассмотрены как ограниченные или липшицевы возмущения.

По сравнению с ПИД-регулятором предложенный метод управления обеспечивает более высокое качество переходных процессов и точность стабилизации.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект №17-19-01422).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feedback Instruments Ltd. Twin Rotor MIMO System Control Experiments 33-949S. East Sussex, UK. 2006.
2. *Cajo R., Agila W.* Evaluation of algorithms for linear and nonlinear PID control for Twin Rotor MIMO System // Asia-Pacific Conf. on Computer Aided System Engineering (APCASE), IEEE. 2015. P. 214—219.
3. *Pandey S. K., Laxmi V.* Optimal control of Twin Rotor MIMO System using LQR Technique // Computational Intelligence in Data Mining. 2015. Vol. 1. P. 11—21.
4. *Phillips A. E.* A Study of Advanced Modern Control Techniques Applied to a Twin Rotor MIMO System / Rochester Inst. of Technology, N.Y., USA. 2014.
5. *Vrazhevsky S., Kremlev A.* Suboptimal control algorithm for nonlinear MIMO System // Proc. of the 7th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), IEEE. 2015. P. 20—25.
6. *Juang J. G., Liu W. K., Lin R. W.* A hybrid intelligent controller for a twin rotor MIMO system and its hardware implementation // ISA Transact. 2011. Vol. 50(4). P. 609—619.
7. *Allouani F., Boukhetala D., Boudjema F.* Particle swarm optimization based fuzzy sliding mode controller for the twin rotor MIMO system // Proc. of the 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conf. (MELECON), 2012. P. 1063—1066.
8. *Tao C. W., Taur J. S., Chang Y. H., Chang C. W.* A novel fuzzy-sliding and fuzzy-integral-sliding controller for the twin-rotor multi-input—multi-output system // IEEE Transact. on Fuzzy Systems. 2010. Vol. 18(5). P. 893—905.
9. *Shi W.* Adaptive fuzzy control for MIMO nonlinear systems with nonsymmetric control gain matrix and unknown control direction // IEEE Transact. on Fuzzy Systems. 2014. Vol. 22(5). P. 1288—1300.
10. *Basri M. A. M., Husain A. R., Danapalasingam K. A.* Intelligent adaptive backstepping control for MIMO uncertain non-linear quadrotor helicopter systems // Transact. of the Institute of Measurement and Control. 2014.
11. *Liu Y., Söffker D.* Robust control approach for input-output linearizable nonlinear systems using high-gain disturbance observer // Intern. Journal of Robust and Nonlinear Control. 2014. Vol. 24(2). P. 326—339.
12. *Bobtsov A. A.* Robust output-control for a linear system with uncertain coefficients // Automation and Remote Control. 2002. N 63(11). P. 1794—1802.
13. *Pyrkin A. A., Bobtsov A. A., Kolyubin S. A.* et al. Simple robust and adaptive tracking control for mobile robots // IFAC-PapersOnLine. 2015. N 48(11). P. 143—149.
14. *Margun A., Furtat I.* Robust control of linear MIMO systems in conditions of parametric uncertainties, external disturbances and signal quantization // 20th Intern. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), IEEE. 2015. P. 341—346.
15. *Margun A., Furtat I.* Robust control of uncertain linear systems in conditions of output quantization // IFAC-PapersOnLine. 2015. N 48(11). P. 843—847.

Сведения об авторах

Сергей Александрович Вражевский

— аспирант; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: Vrazhevskij.S@gmail.com

Алексей Анатольевич Маргун

— аспирант; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: alexeimargun@gmail.com

Дмитрий Николаевич Базылев

— аспирант; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: bazylevd@mail.ru

- Константин Александрович Зименко** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: kostyazimenko@gmail.com
- Артём Сергеевич Кремлев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: kremlev_artem@mail.ru

Поступила в редакцию
21.03.17 г.

Ссылка для цитирования: Вражевский С. А., Маргун А. А., Базылев Д. Н., Зименко К. А., Кремлев А. С. Робастное управление по выходу двухроторным нелинейным многоканальным объектом // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 1. С. 32—40.

ROBUST OUTPUT CONTROL OF TWIN ROTOR NONLINEAR MULTICHANNEL OBJECT

S. A. Vrazhevsky, A. A. Margun, D. N. Bazylev,
K. A. Zimenko, A. S. Kremlev

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: Vrazhevskij.S@gmail.com

The problem of robust control over multi-dimensional onlinear systems is addressed. The class of nonlinear control objects with parametric uncertainties is considered in the presence of external unknowns of bounded perturbations. An approach to the control problem based on the method of sequential compensator is proposed. Results of experimental study carried out with the use of the laboratory bench "Twin Rotor MIMO System" confirme the developed control algorithm efficiency. Based on the results of the experiment, it is shown that the method of a sequential compensator provides a higher quality of transient processes and accuracy in the steady-state regime in comparison with the control of the proportional-integral-differential control.

Keywords: non-linear MIMO system, robust control, output control, consecutive compensator, PID-regulator

Data on authors

- Sergey A. Vrazhevsky** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: Vrazhevskij.S@gmail.com
- Alexey A. Margun** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: alexeimargun@gmail.com
- Dmitry N. Bazylev** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: bazylevd@mail.ru
- Konstantin A. Zimenko** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: kostyazimenko@gmail.com
- Artem S. Kremlev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: kremlev_artem@mail.ru

For citation: Vrazhevsky S. A., Margun A. A., Bazylev D. N., Zimenko K. A., Kremlev A. S. Robust output control of twin rotor nonlinear multichannel object. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 1. P. 32—40 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-1-32-40