

РОБАСТНОЕ СУБОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МНОГОКАНАЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ НАСЫЩЕНИЯ

С. А. ВРАЖЕВСКИЙ¹, Ю. В. ЧУГИНА¹, И. Б. ФУРТАТ^{1,2}, А. С. КРЕМЛЕВ¹

¹ *Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия*
E-mail: Vrazhevskij.S@gmail.com

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

Рассматривается робастный субоптимальный алгоритм стабилизации многоканальных объектов в условиях ограничений на управляющие сигналы типа „насыщение“. Подход сочетает компенсацию возмущений робастным методом вспомогательного контура и оптимальное управление, реализуемое линейным квадратичным регулятором. Объект управления исследуется в форме линейной интервальной модели, учитывающей влияние неизмеряемых ограниченных внешних возмущений. Интервальность модели в постановке задачи управления позволяет применить полученный алгоритм к нелинейным системам, модели которых отвечают требованиям возможности их интервальной линеаризации. Приведены результаты экспериментальной апробации предлагаемого алгоритма на лабораторной установке Twin Rotor MIMO System, модель которой содержит существенные нелинейности. Результаты свидетельствуют о том, что алгоритм обеспечивает стабилизацию системы с высокой точностью за конечное время. Полученные результаты сравниваются с результатами использования традиционных подходов к управлению установкой: предлагаемый алгоритм демонстрирует отсутствие перерегулирования и повышение точности стабилизации в установившемся режиме.

Ключевые слова: *многоканальные системы, стабилизация, робастное управление, субоптимальное управление, параметрическая неопределенность, ограниченные возмущения*

Введение. Разработка методов централизованного управления многоканальными объектами является актуальной задачей во многих прикладных областях, в частности, при управлении многоагентными системами мобильных роботов, энергосетями, нефтеперерабатывающими установками и другими сложными устройствами встречаются задачи, в которых централизованный подход повышает качество управления по сравнению с децентрализованным за счет использования полезных взаимосвязей подсистем. К примеру, в модели дистилляции нефти серией колонн выход предшествующей колонны следует учитывать в матрице состояния последующей, а не компенсировать как возмущение. Другим примером служит учет перекрестных связей между лопастными системами винтокрылых летательных аппаратов, который необходим для обеспечения движения в желаемом направлении.

Предлагаемый метод управления распространяет алгоритм, предложенный в работе [1], на случай многоканальных систем. Автором [1] для компенсации возмущений был использован робастный метод вспомогательного контура [2], который в целях оптимизации управления был дополнен линейным квадратичным регулятором (Linear Quadratic Regulator, LQR). Стоит отметить, что результат [2] был распространен на линейные многоканальные системы в работе [3], однако все перекрестные связи в предложенном подходе принимались за возмущения. Также задача робастного управления многоканальными объектами рассматривается в работах [4–6], где за основу был взят метод управления в скользящем режиме, но перекрестные связи рассматривались как возмущения и подлежали компенсации. Предлагаемый

в настоящей статье алгоритм позволяет сохранить полезные перекрестные связи, повышая тем самым качество управления.

Важным дополнением при синтезе алгоритма управления является учет ограничения на управление. Учет насыщения усложняет синтез алгоритмов управления, в силу чего зачастую не выполняется, однако для гарантии устойчивости функционирования и расширения рабочих диапазонов системы необходимо учитывать возможность насыщения в каналах управления, а также возможные параметрические неопределенности и возмущения на этапе аналитического построения системы управления. Подход к учету насыщения в настоящей работе аналогичен подходу, предложенному в работе [7].

Экспериментальная апробация метода проводится на стенде Twin Rotor MIMO System (TRMS). Предлагаемый алгоритм синтезируется для нелинейной модели за счет сведения последней к линейной методом интервальной линеаризации, он сравнивается с децентрализованным аналогом [8], а также с линейным квадратичным регулятором и ПИД-регулятором.

Объект управления. Неопределенные параметры представим в форме интервалов $[a] = [\underline{a}, \bar{a}] = \{x \in R \mid \underline{a} \leq x \leq \bar{a}\}$. Множество всех интервалов из R обозначим как IR . Интервальная матрица $[M]$ является матрицей вида $[M] = \text{row}(\text{col}([a]_{ij}, i = \overline{1, m}), j = \overline{1, n})$, $[M] \in IR^{m \times n}$, она может быть представлена разложением $[M] = M + [\Delta M]$, где $M \in R^{m \times n}$ — матрица номинальных значений параметров, а $[\Delta M] \in IR^{m \times n}$ — ограниченная вариация $[M]$ относительно M .

Будем рассматривать объекты, представимые в пространстве состояний линейной многоканальной моделью с интервальными параметрами

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = [A]x(t) + [B]g(u, t) + [D]f(t), & x(0) = x_0, \\ y(t) = Lx(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ — вектор состояния, $x_0 \in IR^n$ — неизвестные начальные условия, $f(t) \in R^k$ — ограниченный вектор внешних возмущений, $y(t) \in R^k$ — вектор выходов объекта управления (ОУ), $[A] \in IR^{n \times n}$ — матрица состояния, $[B] \in IR^{n \times k}$ — матрица входов по управлению, $[D] \in IR^{n \times k}$ — матрица входов по возмущению, $L \in R^{k \times n}$ — матрица выходов с известными коэффициентами, $g(u, t) = \text{col}\{g_i(u_i, t), i = \overline{1, k}\} \in R^k$,

$$g_i(u_i, t) = \begin{cases} u_i(t), & u_i(t) \in [\underline{m}, \bar{m}], \\ \underline{m}, & u_i(t) < \underline{m}, \\ \bar{m}, & u_i(t) > \bar{m}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $\underline{m}, \bar{m} \in R$ — технические ограничения на управляющие сигналы, $u_i(t)$ — элементы вектора входных сигналов $u(t) \in R^k$. Система (1) должна соответствовать следующим модельным предположениям.

Предположение 1. Выполнены условия структурного согласования: $[A] = A + B[c_a]$, $[B] = B[c_b]$, $[D] = B[c_d]$, где $[c_a] \in IR^{k \times n}$, $[c_b] \in IR^{k \times k}$, $[c_d] \in IR^{k \times k}$ — неизвестные интервальные матрицы.

Предположение 2. Пара (A, B) управляема, пара (A, L) наблюдаема.

Предположение 3. Измерению доступны только $y(t)$ и $u(t)$.

Предположение 4. Структура многоканального ОУ известна, он может быть представлен конечным числом динамически связанных подсистем, порядок которых известен

$$n_i, i = \overline{1, l}: \sum_{i=1}^l n_i = n.$$

Цель управления. Задача стабилизации задается условием

$$\|y(t)\| < \delta, \forall t \geq T, \quad (3)$$

где $\delta > 0$ — точность управления, T — время переходного процесса. Здесь и далее $\|\cdot\|$ — евклидова норма соответствующего вектора.

Задача оптимального управления определяется требованием

$$J = \int_0^{\infty} (y^T(t) Q y(t) + u_o^T(t) R u_o(t)) dt \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $u_o(t) \in R^k$ — сигнал оптимального управления; $Q = Q^T \geq 0$ и $R = R^T > 0$ — весовые матрицы.

Алгоритм управления. Зададим $u(t)$ в следующем виде [7]:

$$u(t) = \frac{1}{1 + \sigma} (u_c(t) + \sigma \gamma(t)), \quad (5)$$

где значение $\sigma \in (-\infty; -1) \cup (0; +\infty)$ выбирается достаточно большим по модулю,

$$\gamma(u, t) = \text{col} \{ \gamma_i(u_i, t), i = \overline{1, k} \} \in R^k, \quad \gamma_i(t) = \begin{cases} u_{ci}(t), u_{ci}(t) \in [\underline{m}, \tilde{m}], \\ \underline{m}, u_{ci}(t) < \underline{m}, \\ \tilde{m}, u_{ci}(t) > \tilde{m}, \end{cases}$$

$\underline{m} = \underline{m} + \Delta$, $\tilde{m} = \tilde{m} - \Delta$, $\Delta > 0$ — малое число, $u_{ci}(t)$ — элементы вектора $u_c(t)$,

$$u_c(t) = u_o(t) + u_r(t), \quad (6)$$

$u_r(t)$ — сигнал управления для компенсации параметрических и внешних возмущений [2]. В соответствии с [9, 12] система (1) может быть представлена как

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + [\Delta A]x(t) + Bg(u, t) \pm Bu(t) + [\Delta B]g(u, t) + [D]f(t), \\ y(t) = Lx(t). \end{cases} \quad (7)$$

С учетом Предположения 1 возмущения в (7) можно выделить в виде $\varphi(t) = [c_a]x(t) + [c_b]g(u, t) - u(t) + [c_d]f(t)$. Принимая во внимание (5) и (6), перепишем систему (7):

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu_o(t) + Bu_r(t) + B\sigma(\gamma(t) - u(t)) + B\varphi(t), \\ y(t) = Lx(t). \end{cases} \quad (8)$$

Для синтеза линейного квадратичного регулятора рассмотрим систему

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu_o(t), \\ y(t) = Lx(t). \end{cases} \quad (9)$$

Оптимальный закон управления задан выражением $u_o(t) = -Gx(t)$, где $G = R^{-1}B^TK$, $K \in R^{n \times n}$ — решение алгебраического уравнения Риккати,

$$Q - KBR^{-1}B^TK + A^TK + KA = 0. \quad (10)$$

Согласно Предположению 3, вектор $x(t)$ недоступен прямому измерению. Для оценки $x(t)$ и его производной воспользуемся наблюдателем [10]:

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = H_o \xi(t) - M_o (\hat{y}(t) - y(t)), \xi(0) = 0, \\ \hat{y}(t) = \bar{L} \xi(t), \end{cases} \quad (11)$$

где $\xi(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_k(t)]$, $\xi_i(t) \in R^{n_i+1}$; вектор $\hat{y}(t) \in R^k$ — оценка $y(t)$;

$$H_o = \text{blkdiag} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & I_{n_i} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, i = \overline{1, k} \right\};$$

$$\bar{L} = \text{blkdiag} \{ [L, 0]_{i, i = \overline{1, k}} \};$$

$$M_o = \text{blkdiag} \left\{ -[d_1 \tau^{-1}, d_2 \tau^{-2}, \dots, d_{n_i+1} \tau^{-n_i+1}]^T, i = \overline{1, k} \right\}, \tau > 0, \text{ коэффициенты } d_j, j = \overline{1, n_k+1},$$

такие, что матрица $H = H_o - M\bar{L}$ — гурвицева, $M = \text{blkdiag} \left\{ -[d_1, d_2, \dots, d_{n_i+1}]^T, i = \overline{1, k} \right\}$.

Таким образом, закон оптимального управления может быть рассчитан как

$$u_o(t) = -G\hat{x}(t), \quad (12)$$

где $\hat{x}(t) = C_{tr} \xi(t)$, $C_{tr} = \text{blkdiag} \{ [I_{n_i} \ 0], i = \overline{1, k} \}$.

Принимая во внимание (12), перепишем (8) в виде

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_o x(t) + Bu_r(t) + B\sigma(\gamma(t) - u(t)) + B\psi(t), \\ y(t) = Lx(t), \end{cases} \quad (13)$$

где $A_o = A - BG$ — гурвицева матрица; $\psi(t) = \varphi(t) - BG\varepsilon(t)$, $\varepsilon(t) = \hat{x}(t) - x(t)$. Для выделения $\psi(t)$ из (13) введем вспомогательный контур

$$\begin{cases} \dot{x}_a(t) = A_o x_a(t) + Bu_r(t) + B\sigma(\gamma(t) - u(t)), \\ y_a(t) = Lx_a(t). \end{cases} \quad (14)$$

С учетом (13) и (14) динамика рассогласования $x(t) - x_a(t)$ описывается как $\dot{x}(t) - \dot{x}_a(t) = A_o(x(t) - x_a(t)) + B\psi(t)$. Выразим из полученного выражения $\psi(t)$:

$$\psi(t) = B^+ (\dot{x}(t) - \dot{x}_a(t) - A_o(x(t) - x_a(t))), \quad (15)$$

где B^+ — псевдообратная матрица. С учетом Предположения 3 уравнение (15) может быть переписано в виде

$$\psi(t) = B^+ (\hat{x}(t) - \dot{x}_a(t) - A_o(\hat{x}(t) - x_a(t))) - B^+ (\dot{\varepsilon}(t) - A_o\varepsilon(t)), \quad (16)$$

где $\hat{x}(t) = C_d \xi(t)$, $C_d = \text{blkdiag}\left\{\begin{bmatrix} 0 & I_{n_i} \end{bmatrix}, i = \overline{1, k}\right\}$. Согласно выражению (16), робастный закон управления записывается как

$$u_r(t) = -B^+ \left(\hat{x}(t) - \dot{x}_a(t) - A_o (\hat{x}(t) - x_a(t)) \right). \quad (17)$$

Подставив (16) и (17) в (13), получим замкнутую систему

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_o x(t) + B \sigma(\gamma(t) - u(t)) - (\dot{\varepsilon}(t) - A_o \varepsilon(t)), \\ y(t) = Lx(t). \end{cases} \quad (18)$$

Здесь $(\dot{\varepsilon}(t) - A_o \varepsilon(t)) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, если функция $B \sigma(\gamma(t) - u(t))$ ограниченная. Ограниченность $B \sigma(\gamma(t) - u(t))$ следует из (5), а в отсутствие насыщения $B \sigma(\gamma(t) - u(t)) = 0$. Согласно [12], последнее можно гарантировать только, если

$$\bar{y}_{si} \leq y_{pi}, \quad (19)$$

где \bar{y}_{si} — значение $\|y(t)\|$, максимально возможное в условиях известных ограничений на параметры системы (1); y_{pi} — максимально допустимое значение $\|y(t)\|$ с учетом ограничений на управление.

Утверждение. Пусть выполнены условия Предположений 1—4 и (19). Тогда существует такое число $\tau_0 > 0$, что при $\tau < \tau_0$ для ОУ, представимого моделью вида (1), алгоритм управления, состоящий из закона управления (5), (6), (12), (17), наблюдателя (11) и вспомогательного контура (14), обеспечивает выполнение условия (3) и минимизирует функционал (4).

Доказательство Утверждения подобно приведенному в работе [7].

Эксперимент. Полученные теоретические результаты реализуются в практическом эксперименте при помощи программного обеспечения Simulink Real-Time на персональном компьютере, подключенном к TRMS 33-220. Общий вид TRMS представлен на рис. 1.

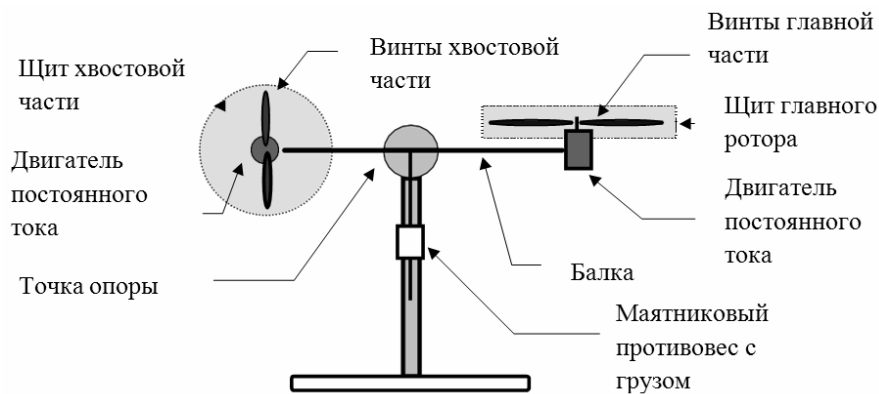


Рис. 1

Динамическая модель TRMS [11] описывается системой уравнений

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\alpha} = -k_{f11} \dot{\alpha} - k_{f12} \text{sign}(\dot{\alpha}) + gN_1 \cos \alpha - \\ - gN_2 \sin \alpha - N_3 \beta^2 \sin \alpha \cos \alpha + F_1(u_1), \\ J_2 \ddot{\beta} = -k_{f21} \dot{\beta} - k_{f22} \text{sign}(\dot{\beta}) + F_2(u_2), \end{cases} \quad (20)$$

где $\alpha \in (-\pi/2; \pi/2)$ — угол тангажа, рад; $\beta \in (-3\pi/4; 3\pi/4)$ — угол рысканья, рад; J_1 и J_2 — моменты инерции в вертикальной и горизонтальной плоскости, кг·м²; k_{f1i} , $i=1,2$ — коэффициенты вязкого трения; k_{f2i} , $i=1,2$ — коэффициенты трения покоя; $g = 9,8$ м/с² — ускорение свободного падения; $F_i(u_i)$, $i=1,2$ — полиномиальные функции, задающие управляющие моменты, зависящие от амплитуды напряжения в двигателях постоянного тока $u_i(t) \in [-2,5; 2,5]$ В, $i=1,2$; N_i , $i=1,3$ — безразмерные коэффициенты, определенные в соответствии с документацией [11].

Модель (20) может быть сведена к линейной при помощи интервальной линеаризации [11], согласно которой, если $\exists S_x : \|x(t)\| < d_s$, при $t > 0$

$$f(x) = A(x)x \subseteq [A]x, \quad (21)$$

$$\text{где } [A]_{n \times n} : [A_{ij}] = \left[\min_{x \in S_x} (f_i(x)/nx_j), \max_{x \in S_x} (f_i(x)/nx_j) \right], \quad A(x) = \text{row}_i \left\{ \text{col}_j \left\{ f_i(x)/nx_j \right\} \right\}.$$

Линеаризованная математическая модель динамики TRMS описывается системой уравнений (1). Численные значения матриц для исследуемой установки принимают вид

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ [-1753,7; 1729] & [-5,4; -0,1] & 0 & [-3,1; 3,1] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ [-0,3; 0,3] & 0 & 0 & [-1,6; 0] \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[B] = \text{blkdiag} \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ [0,173; 1,522] \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ [0,007; 0,085] \end{bmatrix} \right\}, \quad x_0 = [0, 0, 0, 0]^T.$$

Определим элементы матриц номинальной модели как средние арифметические граничных значений интервальных параметров. Зададим $Q = \text{diag}\{35, 0,5\}$ и $R = \text{diag}\{10, 2\}$ в (4). Вычислим матрицу обратной связи в (12) в виде

$$G = \text{blkdiag} \{ [0,1195 \quad 0,0269], [0,5 \quad 0,3293] \}.$$

Матрица A_0 в (14) принимает вид

$$A_0 = \text{blkdiag} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -12,455 & -4,45 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0,023 & -1,526 \end{bmatrix} \right\}.$$

Матрицы наблюдателя (11):

$$H_o = \text{blkdiag} \{ H_i, i=1,2 \}, \quad H_i = \begin{bmatrix} 0 & I_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad M_o = \text{blkdiag} \{ D_{oi}, i=1,2 \},$$

$$D_{oi} = -[3\tau_0^{-1}, 3\tau_0^{-2}, \tau_0^{-3}]^T, \quad \bar{L} = \text{blkdiag} \{ [1 \ 0 \ 0], [1 \ 0 \ 0] \},$$

значение параметра $\tau = 0,01$ определяется разрешающей способностью энкодеров. Робастный закон управления вычисляется согласно выражению (16). Результаты эксперимента приведены на рис. 2 (переходные процессы по: a — углу тангажа, b — входному сигналу главного ротора, c — углу рысканья, d — входному сигналу хвостового ротора).

Ошибки управления в установившемся режиме не превышают $\delta_1 = 1\%$ от желаемого положения в вертикальной плоскости и $\delta_2 = 2\%$ — в горизонтальной, что близко к разре-

шающей способности энкодеров. Перерегулирование отсутствует, а время переходного процесса меньше, чем в аналогичных работах, к примеру, [5, 6].

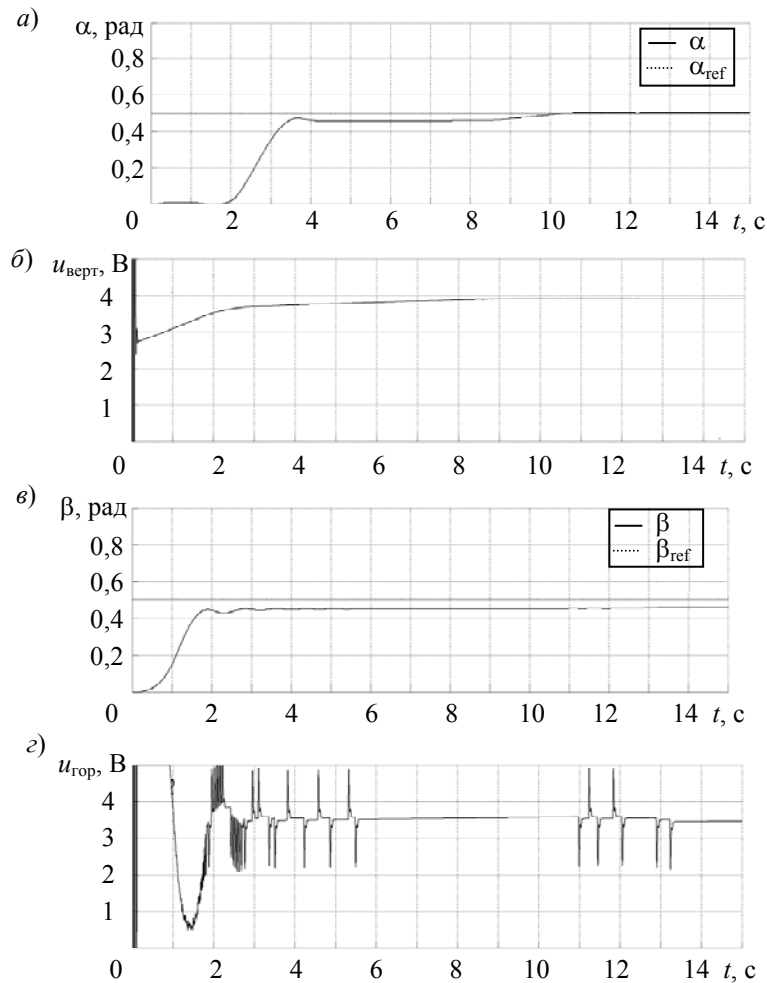


Рис. 2

Полученные показатели качества приведены в таблице, где также приводятся показатели для децентрализованного робастного субоптимального управления, LQR и ПИД регулятора.

Показатель качества		Алгоритм управления			
		робастный субоптимальный (централизованный)	робастный субоптимальный (децентрализованный)	LQR	ПИД
Тангаж	$t_{\Gamma 1}, \text{с}$	3,5	8,5	4	16
	$\delta_1, \%$	1	1	3	2
	$\sigma_1, \%$	0	0	3,6	43,8
Рысканье	$t_{\Gamma 2}, \text{с}$	2,5	3,5	2,4	9,9
	$\delta_2, \%$	2	0,6	2,4	2
	$\sigma_2, \%$	0	0	3,1	0

Заключение. В настоящей работе результаты работ [1, 7] обобщены на случай интервальных многоканальных систем, функционирующих в условиях насыщения. Представленный метод позволяет сохранить полезные перекрестные связи, что приводит к повышению качества управления. Интервальность модели в рассмотренной постановке задачи управления позволяет применить полученный алгоритм к нелинейным системам, математические модели которых отвечают условиям интервальной линеаризации. Полученные экспериментальные данные апробации метода демонстрируют его эффективность.

Синтез нового алгоритма управления (раздел „Алгоритм управления“) выполнен при поддержке грантов Президента Российской Федерации (договор № 14.W01.16.6325-МД (МД-6325.2016.8) и №14.Y3116.9281-НШ). Утверждение сформулировано при поддержке РФФИ (грант № 14-29-00142) в ИПМаш РАН. Остальные результаты получены при поддержке грантов РФФИ (№ 16-08-00282, 16-08-00686) и при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), а также поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (проект 14.Z50.31.0031).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Furtat I. B.* Robust suboptimal control with disturbances compensation // 19th Intern. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). 2014. P. 532—537.
2. *Цыкунов А. М.* Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. 2007. № 7. С. 103—115.
3. *Tsykunov A. M.* Robust control of multidimensional nonstationary linear plants // Automation and Remote Control. 2009. Vol. 70, N 2. P. 271—282.
4. *Tao C. W.* et al. 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, N 5. P. 893—905.
5. *Huang L.* An approach for robust control of a twin-rotor multiple input multiple output system // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). 2011. P. 4423—4428.
6. *Su J. P., Liang C. Y., Chen H. M.* Robust control of a class of nonlinear systems and its application to a twin rotor MIMO system // IEEE Intern. Conf. on Industrial Technology. ICIT'02. 2002. Vol. 2. P. 1272—1277.
7. *Furtat I. B., Chugina J. V.* Synchronization of Dynamic Network Subjected to Control Input Saturation // IFAC Proc. Volumes (IFAC-PapersOnline). 2015. Vol. 48, N 11. P. 527—533.
8. *Vrazhevsky S. A.* et al. Robust suboptimal output control for a Twin Rotor MIMO System // 8th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2016. P. 23—28.
9. *Moore R. E.* Interval Analysis. Prince-Hall, 1966.
10. *Atassi A. N., Khalil H. K.* A separation principle for the stabilization of a class of nonlinear systems // IEEE Transact. on Automatic Control. 1999. Vol. 44, N 9. P. 1672—1687.
11. *Дударенко Н. А., Нуйа О. С., Сержантова М. В., Слута О. В., Ушаков А. В.* Математические основы теории систем: Лекционный курс и практикум. СПб: НИУ ИТМО, 2014.
12. Twin Rotor M. System Advanced Teaching Manual 1 (33-007-4M5). Feedback Instruments Ltd, Crowborough, UK, 1998.

Сведения об авторах

- Сергей Александрович Вражевский** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: Vrazhevskij.S@gmail.com
- Юлия Владимировна Чугина** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: yofrid@mail.ru
- Игорь Борисович Фуртат** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики, профессор; ИПМаш РАН, лаборатория управления сложными системами, ведущий научный сотрудник; E-mail: cainenash@mail.ru
- Артём Сергеевич Кремлев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: kremlev_artem@mail.ru

Рекомендована кафедрой систем управления и информатики

Поступила в редакцию 20.03.17 г.

Ссылка для цитирования: *Вражевский С. А., Чугина Ю. В., Фуртат И. Б., Кремлев А. С.* Робастное субоптимальное управление многоканальными объектами в условиях насыщения // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 6. С. 495—503.

ROBUST SUBOPTIMAL CONTROL OVER MULTICHANNEL OBJECTS UNDER SATURATION CONDITIONS**S. A. Vrazhevsky¹, Yu. V. Chugina¹, I. B. Furtat^{1,2}, A. S. Kremlev¹**¹*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: Vrazhevskij.S@gmail.com*²*Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, 199178,
St. Petersburg, Russia*

A robust suboptimal stabilization algorithm for multiple-input-multiple-output (MIMO) systems with input signal restrictions of amplitude saturation type is considered. The proposed approach uses auxiliary loop method for disturbances compensation together with the optimal control provided by a linear quadratic regulator. The object under control is described by a linear interval model in which the effect of unmeasured bounded external disturbances is taken into account. Interval linearization allows to use the proposed approach in practical testing with Twin Rotor MIMO System laboratory setup. Comparison of obtained results with performance at conventional control approaches demonstrate the lack of overshoot and increase the accuracy of stabilization in the steady state with the proposed algorithm.

Keywords: multiple-input-multiple-output systems, stabilization, robust control, suboptimal control, parametric uncertainty, bounded perturbation

Data on authors

- Sergey A. Vrazhevsky** — Post-Graduate student; ITMO University; Department of Computer Science and Control Systems; E-mail: Vrazhevskij.S@gmail.com
- Yulia V. Chugina** — Post-Graduate student; ITMO University; Department of Computer Science and Control Systems; E-mail: yofrid@mail.ru
- Igor B. Furtat** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of Computer Science and Control Systems; Institute of Problems of Mechanical Engineering of RAS, Laboratory of Control over Complex Systems, Leading Scientist; E-mail: cainenash@mail.ru
- Artem S. Kremlev** — PhD, Associate Professor; ITMO University; Department of Computer Science and Control Systems; E-mail: kremlev_artem@mail.ru

For citation: Vrazhevsky S. A., Chugina Yu. V., Furtat I. B., Kremlev A. S. Robust suboptimal control over multichannel objects under saturation conditions. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 6. P. 495—503 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-495-503