УДК 517.977.1

СИНТЕЗ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ВОЗМУЩЕНИЕМ НА ВХОДАХ И ВЫХОДАХ: РОБАСТНАЯ ПОСТАНОВКА

К.О. Железнов, М.В. Хлебников

Дана постановка задачи синтеза управляющего воздействия для системы управления со структурной неопределенностью. Источником возмущений на входе и выходе системы служит один и тот же векторный сигнал. Предложен метод решения задачи, основанный на технике инвариантных эллипсоидов. Эффективность предложенного метода продемонстрирована на примере модели истребителя.

Ключевые слова: линейная система управления, линейные матричные неравенства, инвариантные эллипсоиды, ограничивающие эллипсоиды, робастность.

ВВЕДЕНИЕ

Задача синтеза управления при воздействии внешних возмущений является одной из наиболее важных в теории автоматического управления. Ряд актуальных вопросов робастного управления при подавлении внешних возмущений, в том числе вопросы построения системы управления на базе внутренней модели и управления сингулярно-возмущенными объектами и моделями со структурной неопределенностью, рассмотрен в монографиях [1, 2]. Отметим и полезный обзор [3] современных результатов в области робастного управления для систем с неопределенностью. В целом, этой проблематике уделяется достаточно большое внимание в публикациях; так в работе [4] рассматривается задача ограничения фазового состояния линейной системы с изменяющимися параметрами с ограниченным возмущением, а статья [5] посвящена задаче синтеза робастного управления априорно неопределенным объектом на основе критерия гиперустойчивости.

Настоящая работа посвящена робастному подавлению ограниченных внешних возмущений и развивает подходы, предложенные авторами в работе [6]. Рассматривается задача синтеза для линейной системы управления, в которой источником возмущений и помех служит один и тот же векторный сигнал (в частности, аналогичная система управления рассматривалась в работе [7]). Существуют разнообразные примеры систем, в которых возмущение и помехи имеют одинаковый источник, в частности — в задачах, связанных с летательными аппаратами, источником помех является ветер, оказывающий влияние непосредственно как на состояние системы, так и на измерительные приборы (необязательно с одинаковой интенсивностью).

Используемая техника базируется на методе инвариантных эллипсоидов [8] и аппарате линейных матричных неравенств (Linear Matrix Inequalities, LMI) [9—12]. Отметим, что этот подход в последнее время приобрел значительную популярность; см., например, работу [13], посвященную поиску субоптимального регулятора по выходу для подавления внешних возмущений.

С технической точки зрения получающиеся далее задачи сводятся к решению задач полуопределенного программирования (Semi-Definite Programming, SDP) и одномерной оптимизации. Для их решения существуют эффективные программные средства, в частности, свободно распространяемые пакеты SDPT3 [14, 15] и YALMIP [16] на базе системы MATLAB. Эффективность предложенного подхода продемонстрирована на модельной задаче управления истребителем F-16 [17].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНОЙ РЕЗУЛЬТАТ

Рассмотрим линейную непрерывную систему управления

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + Bu + Dv, \quad x(0) = x_0,$$
$$z = Cx + Ev, \tag{1}$$

где $A \in R^{n\times n}$, $B \in R^{n\times l}$, $C \in R^{m\times n}$, $D \in R^{n\times p}$, $E \in R^{m\times p}$ — заданные матрицы, пара (A, B) управляема, пара (A, C) наблюдаема, с фазовым состоянием $x(t) \in \mathbb{R}^n$, управлением $u(t) \in \mathbb{R}^l$ и внешним возмущением $v(t) \in \mathbb{R}^p$ таким, что

$$\dot{v} = -\delta v + \Delta_v, \quad \|\Delta_v\| \le 1, \tag{2}$$

где $\delta > 0$, а $\Delta_v(t) \in \mathbb{R}^p$ — неизвестная ограниченная аддитивная компонента. Здесь и далее $\|\cdot\|$ — евклидова норма вектора и спектральная норма матрицы, а все матричные неравенства понимаются в смысле знакоопределенности матриц.

Будем полагать, что системная неопределенность ΔA имеет структуру $\Delta A = M\Delta N$, где $M \in \mathbb{R}^{n\times d}$, $N \in \mathbb{R}^{d\times n}$, а матричная неопределенность $\Delta \in \mathbb{R}^{d\times d}$ удовлетворяет ограничению $\|\Delta\| \le 1$.

Нам потребуются два определения.

Определение 1. Эллипсоид с центром в начале координат

$$E_x = \{x \in \mathbb{R}^n : x^T P^{-1} x \le 1\}, \quad P > 0, \tag{3}$$

называется инвариантным для динамической системы $\dot{x} = Ax + Dw$, если из условия $x(0) \in E_x$ следует, что $x(t) \in E_x$ для всех моментов времени $t \ge 0$. Это означает, что вектор фазового состояния системы будет находиться внутри эллипсоида E_x, если он находится в этом эллипсоиде в начальный момент времени.

Определение 2. Эллипсоид с центром в начале координат

$$E_z = \{z \in \mathbb{R}^l : z^T (CPC^T)^{-1} z \le 1\}, \tag{4}$$

называется ограничивающим по выходу для динамической системы

$$\dot{x} = Ax + Dw, \quad x(0) = x_0,$$
$$z = Cx,$$

соответствующим инвариантному эллипсоиду E_x. Соответственно, из условия $x(0) \in E_x$ следует, что выход системы $z(t) \in E_z$ для всех $t \ge 0$. ♦

Цель состоит в построении управления

$$u = Kx, \tag{5}$$

робастно стабилизирующего систему (1) при всех допустимых v и Δ, а также минимизирующего (по некоторому критерию) ограничивающий эллипсоид для выхода замкнутой системы.

В качестве критерия минимальности эллипсоида будем рассматривать норму матрицы, с которой ассоциирован эллипсоид, т. е. минимальный радиус шара, содержащего эллипсоид.

Вводя в рассмотрение составной вектор

$$g = \begin{pmatrix} x \\ v \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n+p}$$

и замыкая систему (1) регулятором (5), представим ее в виде

$$\dot{g} = \underbrace{\begin{pmatrix} A + BK + M\Delta N & D \\ 0 & -\delta I \end{pmatrix}}_{\tilde{A}} g + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ \Delta_v \end{pmatrix}}_{\tilde{v}} =$$
$$= \tilde{A} g + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}}_{\tilde{D}} \tilde{v},$$
$$z = (C\ E)g = \tilde{C} g. \tag{6}$$

Для доказательства основной теоремы нам потребуются две леммы.

Лемма 1 [3]. *Эллипсоид* (3) *является инвариантным для динамической системы*

$$\dot{x} = Ax + Dw, \quad \|w\| \le 1,$$

тогда и только тогда, когда его матрица P удовлетворяет линейным матричным неравенствам

$$AP + PA^T + \alpha P + \frac{1}{\alpha} DD^T \le 0, \ P > 0,$$

при некотором значении положительного параметра α.

Лемма 2. [3]. *Образом эллипсоида* (3) *при линейном отображении $z = Cx$ является эллипсоид* (4). ♦

Основной результат работы содержит

Теорема. *Решение $\hat{P}_{11}$, $\hat{P}_{22}$, $\hat{Y}$ задачи*

$$\|\tilde{C} P \tilde{C}^T\| \to \min \tag{7}$$

при ограничениях

$$\begin{pmatrix} AP_{11}+P_{11}A^T+BY+Y^TB^T+\alpha P_{11}+\beta MM^T & DP_{22} & P_{11}N^T \\ P_{22}D^T & (\alpha-2\delta)P_{22}+\frac{1}{\alpha}I & 0 \\ NP_{11} & 0 & -\beta I \end{pmatrix} \le 0, \quad P>0, \tag{8}$$

где $P=\begin{pmatrix} P_{11} & 0 \\ 0 & P_{22}\end{pmatrix}$, $\tilde{C}=(C\ \ E)$, $\tilde{D}=\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I\end{pmatrix}$, *а минимизация проводится по матричным переменным* $P_{11}=P_{11}^T\in\mathbb{R}^{n\times n}$, $P_{22}=P_{22}^T\in\mathbb{R}^{p\times p}$, $Y\in\mathbb{R}^{l\times n}$, *скалярной переменной* β *и скалярному параметру* $\alpha>0$, *определяет матрицу* $\tilde{C}\hat{P}\tilde{C}^T$ *ограничивающего эллипсоида для выхода системы* (6) *с нулевым начальным условием и матрицу линейного статического регулятора по состоянию* $\hat{K}=\hat{Y}\hat{P}_{11}^{-1}$.

Доказательство. Рассмотрим систему (6)

$$\dot{g}=\tilde{A}g+\tilde{D}\tilde{v}, \qquad z=\tilde{C}g.$$

По построению $\tilde{v}=\begin{pmatrix} 0 \\ \Delta_v\end{pmatrix}$, поэтому в силу соотношения (2) $\|\tilde{v}\|=\left\|\begin{matrix} 0 \\ \Delta_v\end{matrix}\right\|\le 1$. Это означает, что к системе (6) применима лемма 1, т. е. матрица P инвариантного эллипсоида удовлетворяет условию

$$\tilde{A}P+P\tilde{A}^T+\alpha P+\frac{1}{\alpha}\tilde{D}\tilde{D}^T\le 0. \tag{9}$$

Сделаем упрощающее предположение: будем искать матрицу P в блочно-диагональном виде $P=\begin{pmatrix} P_{11} & 0 \\ 0 & P_{22}\end{pmatrix}$. Тогда соотношение (9) примет вид

$$\begin{pmatrix} A+BK+M\Delta N & D \\ 0 & -\delta I\end{pmatrix}\begin{pmatrix} P_{11} & 0 \\ 0 & P_{22}\end{pmatrix}+\begin{pmatrix} P_{11} & 0 \\ 0 & P_{22}\end{pmatrix}\begin{pmatrix} A^T+K^TB^T+N^T\Delta^TM^T & 0 \\ D^T & -\delta I\end{pmatrix}+\alpha\begin{pmatrix} P_{11} & 0 \\ 0 & P_{22}\end{pmatrix}+\frac{1}{\alpha}\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I\end{pmatrix}\le 0$$

или

$$\begin{pmatrix} AP_{11}+P_{11}A^T+BKP_{11}+P_{11}K^TB^T+\alpha P_1+M\Delta NP_{11}+P_{11}N^T\Delta^TM^T & DP_{22} \\ P_{22}D^T & (\alpha-2\delta)P_{22}+\frac{1}{\alpha}I\end{pmatrix}\le 0. \tag{10}$$

Представим условие (10) в виде

$$\begin{pmatrix} AP_{11}+P_{11}A^T+BKP_{11}+P_{11}K^TB^T+\alpha P_{11} & DP_{22} \\ P_{22}D^T & (\alpha-2\delta)P_{22}+\frac{1}{\alpha}I\end{pmatrix}+\begin{pmatrix} M \\ 0\end{pmatrix}\Delta(NP_{11}\ \ 0)+\begin{pmatrix} P_{11}N^T \\ 0\end{pmatrix}\Delta^T(M^T\ \ 0)\le 0. \tag{11}$$

По лемме Питерсена [18], условие (11) выполняется при всех допустимых неопределенностях Δ, если существует число β такое, что

$$\begin{pmatrix} AP_{11}+P_{11}A^T+BKP_{11}+P_{11}K^TB^T+\alpha P_{11}+\beta MM^T & DP_{22} & P_{11}N^T \\ P_{22}D^T & (\alpha-2\delta)P_{22}+\frac{1}{\alpha}I & 0 \\ NP_{11} & 0 & -\beta I\end{pmatrix}\le 0.$$

Вводя замену $Y=KP_{11}$, приходим к соотношению (9). Поскольку инвариантный эллипсоид для состояния g системы (7) определяется матрицей P, то согласно лемме 2 ограничивающий эллипсоид для выхода z системы дается матрицей $\tilde{C}P\tilde{C}^T$, что и завершает доказательство теоремы. ♦

Замечание 1. Решение задачи (7), (8) сводится к решению задачи полуопределенного программирования (SDP) и одномерной оптимизации по скалярному параметру α. Для численного решения таких задач существуют разнообразные свободно распространяемые пакеты, в частности SDPT3 и YALMIP в среде MATLAB.

Замечание 2. В силу того, что матрица P функции Ляпунова ищется в блочно-диагональном виде, теорема носит достаточный характер, поэтому предложенному в работе подходу присущ определенный консерватизм. Получение аналога теоремы для матрицы P общего вида остается открытой задачей.

Далее, из инженерных соображений естественно потребовать введения ограничений на уровень управляющего воздействия вида

$$\|u(t)\| \le \mu \quad \forall t \ge 0. \tag{12}$$

Достаточное условие выполнения ограничения (12) устанавливает

Лемма 3. *Пусть матрицы* P_{11} *и* Y *удовлетворяют линейным матричным неравенствам* (8). *Тогда выполнение линейного матричного неравенства*

$$\begin{pmatrix} P_{11} & Y^T \\ Y & \mu^2 I \end{pmatrix} \ge 0 \tag{13}$$

гарантирует выполнение ограничения (12) *на траекториях системы* (6).

Доказательство. В силу выражения (5) ограничение (12) представимо в виде

$$x^T K^T K x \le \mu^2$$

или

$$g^T \begin{pmatrix} K^T K & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} g \le \mu^2. \tag{14}$$

Рассмотрим эллипсоид

$$E_g = \{g \in \mathbb{R}^{(n+p)} : g^T P^{-1} g \le 1\}, \quad P > 0,$$

с матрицей P, удовлетворяющей ограничениям (8), и потребуем выполнения ограничения (14) внутри эллипсоида, т. е.

$$g^T \begin{pmatrix} K^T K & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} g \le \mu^2 \text{ при } g^T P^{-1} g \le 1. \tag{15}$$

В силу S-процедуры с одним ограничением [3] для выполнения условия (15) необходимо и достаточно, чтобы

$$\frac{1}{\mu^2} \begin{pmatrix} K^T K & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \le P^{-1} = \begin{pmatrix} P_{11}^{-1} & 0 \\ 0 & P_{22}^{-1} \end{pmatrix} \text{ или } \frac{1}{\mu^2} K^T K \le P_{11}^{-1}.$$

Поскольку $K = Y P_{11}^{-1}$, имеем

$$\frac{1}{\mu^2} P_{11}^{-1} Y^T Y P_{11}^{-1} \le P_{11}^{-1}.$$

Умножая полученное соотношение слева и справа на матрицу P_{11} и применяя лемму Шура, приходим к утверждению леммы. ♦

При численном моделировании ограничение (13) будет добавляться к условиям теоремы.

Наконец, формулировка теоремы приведена для случая нулевого начального условия x_0. В противном случае необходимо потребовать выполнения условия

$$g_0^T P^{-1} g_0 \le 1$$

или, по лемме Шура,

$$\begin{pmatrix} 1 & g_0^T \\ g_0 & P \end{pmatrix} \ge 0,$$

которое и добавится в качестве дополнительного условия к ограничениям в теореме.

3. ПРИМЕР

Продемонстрируем предложенный подход на примере модели истребителя F-16, см. [11], где

$$A = \begin{pmatrix} -0{,}0153 & 0{,}0481 & -5{,}9420 & 0{,}0021 & 0 & 0 \\ -0{,}0910 & -0{,}9568 & 138{,}3608 & 0{,}0163 & 0 & 0 \\ 0{,}0002 & 0{,}0046 & -1{,}0220 & -0{,}0005 & 0 & -0{,}0029 \\ 0 & 0 & 0 & -0{,}2804 & 6{,}2667 & -151{,}1435 \\ 0 & 0 & 0{,}0003 & -0{,}1821 & -3{,}4192 & 0{,}6401 \\ 0 & 0 & 0{,}0025 & 0{,}0454 & -0{,}0304 & -0{,}4535 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0{,}0239 & 0{,}0239 & 0{,}0250 & 0{,}0250 & 0 \\ -0{,}1722 & -0{,}1722 & -0{,}1799 & -0{,}1799 & 0 \\ -0{,}0873 & -0{,}0873 & -0{,}0076 & -0{,}0076 & 0 \\ -0{,}3149 & 0{,}3149 & 0{,}0233 & -0{,}0233 & 0{,}1205 \\ -0{,}1892 & 0{,}1892 & -0{,}3464 & 0{,}3464 & 0{,}1237 \\ -0{,}1678 & 0{,}1678 & -0{,}0147 & 0{,}0147 & -0{,}0587 \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 57{,}2958 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 57{,}2468 & 2{,}3696 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2{,}3696 & 57{,}2468 \\ -0{,}0155 & 0{,}3756 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}03760 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$D = \begin{pmatrix} 0{,}0481 \\ -0{,}9568 \\ 0{,}0046 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad M^T = N = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1)$$

со скалярной неопределенностью Δ.

Применяя теорему для $\delta = 0{,}03$ и $\mu = 10$, получаем матрицу ограничивающего эллипсоида

$$\tilde{C}\hat{P}\tilde{C}^T =$$

$$= \begin{pmatrix} 1195{,}7274 & 2{,}5029 & -4{,}4952 & -2574{,}4520 & 2{,}0365 \\ 2{,}5029 & 6439{,}0260 & -957{,}4741 & 2{,}7459 & -233{,}6640 \\ -4{,}4952 & -957{,}4741 & 597{,}9295 & 12{,}2821 & -8{,}4607 \\ -2574{,}4520 & 2{,}7459 & 12{,}2821 & 6072{,}4507 & -7{,}5914 \\ 2{,}0365 & -233{,}6640 & -8{,}4607 & -7{,}5914 & 2540{,}4079 \end{pmatrix}$$

с собственными значениями

$$\lambda(\tilde{C}\hat{P}\tilde{C}^T) = \begin{pmatrix} 7180{,}0286 \\ 6604{,}9211 \\ 2528{,}4245 \\ 443{,}9850 \\ 88{,}1823 \end{pmatrix}$$

и матрицу линейного статического регулятора по состоянию

$$\hat{K} = \begin{pmatrix} 3{,}4781 & 0{,}2734 & 38{,}7728 & -0{,}1303 & -1{,}3647 & 14{,}3270 \\ -3{,}6517 & -0{,}0999 & 35{,}3838 & 0{,}1309 & 1{,}3704 & -14{,}4680 \\ -17{,}9018 & -0{,}8690 & 5{,}2321 & 0{,}4505 & 4{,}2587 & 13{,}0617 \\ 17{,}8935 & 1{,}0104 & 22{,}7458 & -0{,}4674 & -4{,}2859 & -13{,}1402 \\ -17{,}3187 & -0{,}9159 & -10{,}1840 & -0{,}3547 & 3{,}7430 & 3{,}7302 \end{pmatrix}.$$

На рис. 1 изображены проекции ограничивающего эллипсоида и траектории системы на две первые пары координатных осей z_1, z_2 и z_3, z_4 соответственно при $\Delta_\nu = \mathrm{sign}(\sin t)$, $\Delta = 1$ и $x_0^T = (-7{,}8948\ 153{,}6350\ -0{,}4741\ 2{,}2227\ -0{,}6997\ 0{,}2135)$, а на рис. 2 — динамика компонент $u_i(t)$ управления $u(t)$ и его уровня $\|u(t)\|$.

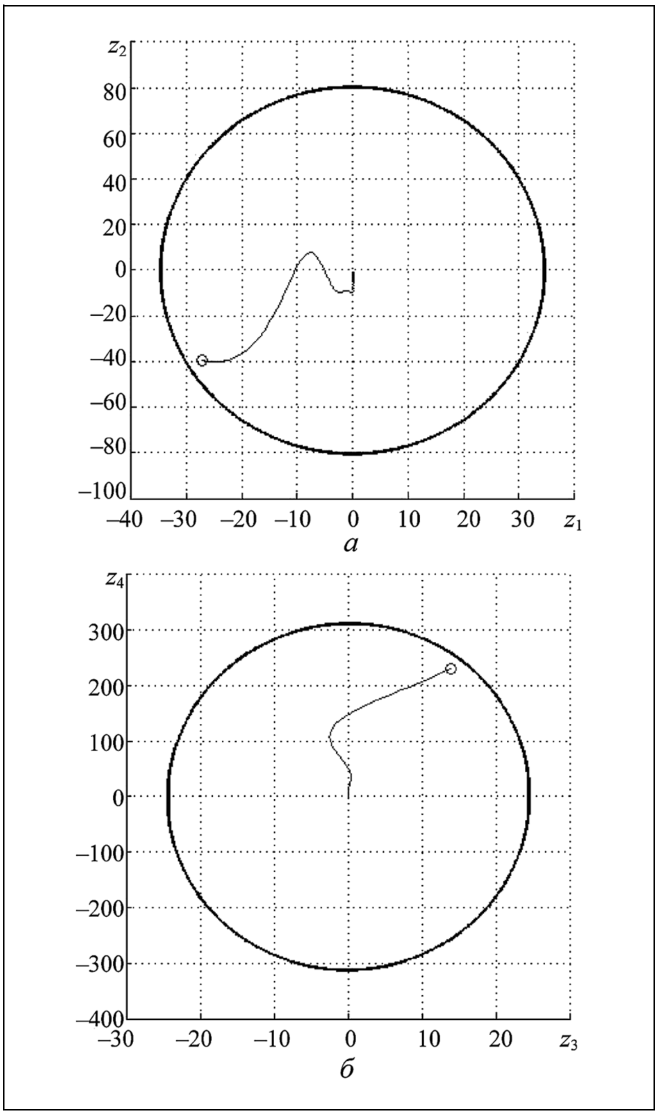

Рис. 1. Проекции ограничивающего эллипсоида (*а*) и траектории системы (*б*)

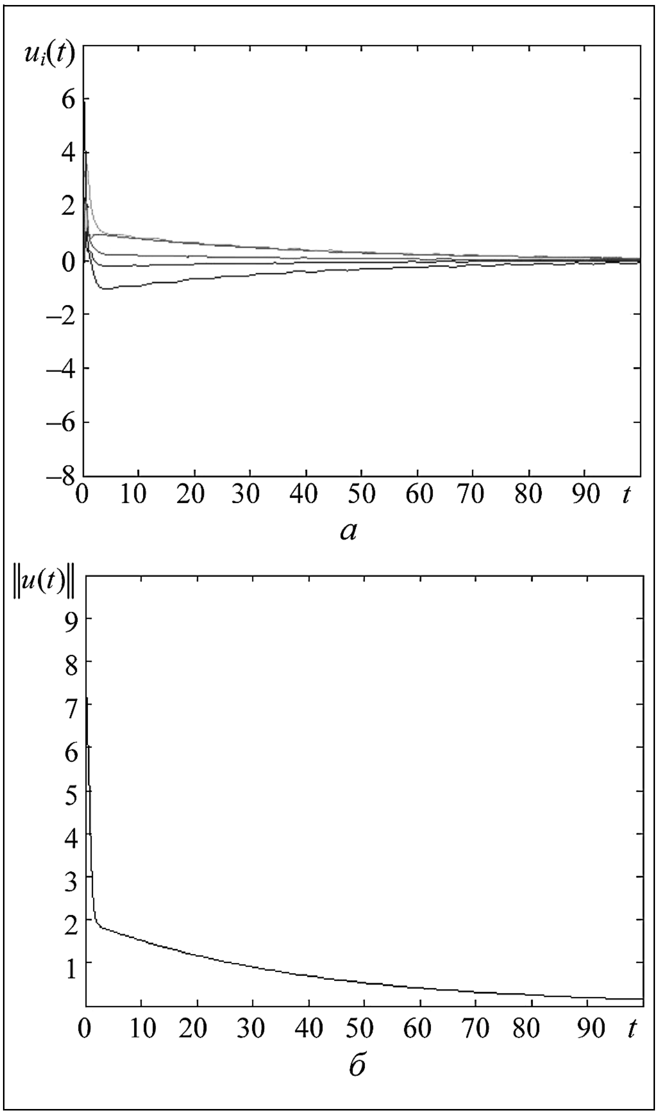

Рис. 2. Компоненты (*а*) и уровень (*б*) управления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена линейная система управления, подверженная воздействию внешних возмущений и системных неопределенностей. Предложен простой и универсальный подход к робастному подавлению внешних возмущений, основанный на методе инвариантных эллипсоидов и технике линейных матричных неравенств. Синтез регулятора в форме линейной обратной связи свелся к задачам полуопределенного программирования и одномерной минимизации, легко решаемым численными методами.

Полученные результаты в дальнейшем предполагается распространить на системы в дискретном времени, на задачи фильтрации, а также рассмотреть ситуацию, когда внешнее возмущение $v(t)$ удовлетворяет более общему условию $\dot{v} = Gv + \Delta_v$ с гурвицевой матрицей G.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Цыкунов А.М.* Робастное управление с компенсацией возмущений. — М.: Физматлит, 2012.
2. *Соколов В.Ф.* Робастное управление при ограниченных возмущениях. — Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2011.
3. *Petersen I.R., Tempo R.* Robust control of uncertain systems: Classical results and recent developments // Automatica. — 2014. — Vol. 50, N 5. — P. 1315—1335.
4. *Hien L.V., Trinh H.M.* A new approach to state bounding for linear time-varying systems with delay and bounded disturbances // Automatica. — 2014. — Vol. 50, N 6. — P. 1735—1738.
5. *Еремин Е.Л., Охотников С.С., Теличенко Д.А.* Робастная система со стационарным наблюдателем и быстродействующей эталонной моделью для нелинейных объектов с запаздыванием по управлению // Вестник Тихоокеанского гос. ун-та. — 2010. — № 2. — С. 17.
6. *Zheleznov K.O., Khlebnikov M.V.* Tracking problem for dynamical systems with exogenous and system disturbances // 20th Intern. Conf. on System Theory, Control and Computing. — Sinaia, Romania, October 13—15, 2016. — P. 125—128.
7. *Цыкунов А.М.* Робастная система слежения с компенсацией возмущений и помех // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2014. — № 1. — С. 54—61.
8. *Назин С.А., Поляк Б.Т., Топунов М.В.* Подавление ограниченных внешних возмущений с помощью метода инвариантных эллипсоидов // Автоматика и телемеханика. — 2007. — № 3. — С. 106—125.
9. *Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Щербаков П.С.* Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств. — М.: ЛЕНАНД, 2014.
10. *Поляк Б.Т., Щербаков П.С.* Робастная устойчивость и управление. — М.: Наука, 2002.
11. *Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V.* Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. — Philadelphia: SIAM, 1994.
12. *Skogestad S., Postlethwaite I.* Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. — N.- Y.: Wiley, 2007. — 608 p.
13. *Баландин Д.В., Коган М.М.* Синтез субоптимального регулятора по выходу для гашения ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. — 2011. — № . 4. — С. 3—10.
14. *Toh K.-C., Todd M., Tütüncü R.* SDPT3 — a MATLAB software package for semidefinite programming, version 1.3 // Optimization methods and software. — 1999. — Vol. 11, N 1—4. — P. 545—581.
15. *Tütüncü R., Toh K.-C., Todd M.* Solving semidefinite-quadratic-linear programs using SDPT3 // Mathematical programming. — 2003. — Vol. 95, N 2. — P. 189—217.
16. *Löfberg J.* YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB // IEEE Intern. Symp. on Computer Aided Control Systems Design — IEEE, 2004. — P. 284—289.
17. *Liao F., Wang J.L., Yang G.-H.* Reliable robust flight tracking control: an LMI approach // IEEE Trans. on Control Systems Technology. — 2002. — Vol. 10, N 1. — P. 76—89.
18. *Petersen I.* A stabilization algorithm for a class of uncertain linear systems // Systems & Control Letters. — 1987. — Vol. 8, N 4. — P. 351—357.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.А. Красновой.

Железнов Кирилл Олегович — аспирант,
✉ Kirill.zheleznov@phystech.edu,

Хлебников Михаил Владимирович — д-р физ.-мат. наук, зав. лабораторией, ✉ khlebnik@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.