УДК 977.1
ББК 161.8

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АНАЛИЗА С ВОЗМУЩЕНИЕМ ВО ВХОДЕ И ВЫХОДЕ

Железнов К. О.[1]
(*ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва*)

Предлагается метод решения задачи анализа для линейной системы управления с возмущением, подаваемым на вход и выход системы. На примере тестовой задачи из COMPleib демонстрируется его более высокая эффективность по сравнению со стандартным подходом.

Ключевые слова: линейные матричные неравенства, техника инвариантных эллипсиодов, задача слежения.

Введение

Задачи управления регулируемым выходом системы управления можно разбить на два класса, которые отличаются по целям управления: задачи синтеза заданного поведения, когда требуется обеспечить наличие у замкнутой системы управления некоторых заданных свойств, и оптимальные задачи, когда требуется оптимизировать некий критерий качества работы замкнутой системы. Как правило, указанные задачи рассматриваются при наличии внешних возмущений и помех, которые являются неизмеряемыми. При таких условиях требуется выполнение основной цели системы при компенсации внешних возмущений и помех.

Первой работой, посвященной созданию систем, не зависящих от внешних возмущений, является [11]. Такие системы получили название инвариантных [3]. Данная работа посвящена решению одной из возможных задач управления первого класса —

[1] *Кирилл Олегович Железнов, аспирант* (*kirill.zheleznov@phystech.edu*).

задаче слежения, которая является одной из основных задач как линейной, так и нелинейной теории управления и не теряет актуальности и сейчас. Наибольшее внимание уделяется решению различных постановок задач слежения и их приложений в линейных системах. Ключевые аспекты теоретического аппарата данной теории изложены в [6, 7, 14, 23]. К основным подходам к решению указанной задачи можно отнести линейное следящее управление (Linear Tracking Control, [16]); подход, основанный на применении векторных функций Ляпунова [4, 12]; естественное следящее управление (Natural Tracking Control, [17]); метод линейных матричных неравенств (Linear Matrix Inequalities, LMI), который приобрел значительную популярность в последнее время [13, 21, 22, 26, 27]. Предпринимаются попытки исследования постановок задач слежения при неполной априорной информации, в частности, при неизвестных верхних границах возмущений [8]. В данной работе используется метод инвариантных эллипсоидов [5], который также основан на технике LMI.

Целью работы является исследование задачи управления регулируемым выходом линейной системы в одной из разнообразных постановок задачи анализа для задачи слежения, восходящей к Р. Калману [18].

В данной работе, в отличие от [2], рассматривается постановка задачи анализа, при этом источником возмущений и помех является один и тот же векторный сигнал (в частности, аналогичная система управления рассматривается в [9]). Стандартным походом к решению таких задач является предположение, что возмущения на входе и выходе системы предполагаются разными (независимыми). Это позволяет оценивать каждую из частей выхода системы по отдельности и затем суммировать получившиеся оценки. Но если возмущение во входе и выходе системы имеет одинаковый источник, то такое предположение «огрубляет» оценку, поскольку не учитывает внутреннюю связь системы. По этой причине решение таких задач без указанного предположения представляется более сложным, чем решение задач, в которых возмущения во входе и выходе предполагаются разными (независимыми). Стоит отметить, что используемая постановка задачи (которая будет детально описана ниже) включает в себя частный случай, когда возмущения и помехи являются независимыми. Существуют разнообразные примеры систем, в которых возмущение и помехи имеют одинаковый источник. В частности, при перелетах источником помех является ветер. Он оказывает влияние как непосредственно на состояние системы, так и на все измерительные приборы (необязательно с одинаковой интенсивностью).

С технической точки зрения полученные далее задачи сводятся к решению задачи полуопределенного программирования (Semi-Definite Programming, SDP) и одномерной оптимизации. Для ее решения существуют эффективные программные средства, в частности – свободно распространяемые пакеты SDPT3 [24, 25] и YALMIP [20] на базе системы MATLAB.

Для демонстрации эффективности предложенных подходов использовалась задача из стандартной библиотеки COMPleib [19]. Данная библиотека содержит математические модели как практических задач, так и их упрощенных учебных версий. Она широко используется для тестирования и сравнения алгоритмов решения различных задач в теории управления.

1. Постановка задачи анализа

В дальнейшем нам потребуются два следующих определения.

Определение 1. *Эллипсоид с центром в начале координат*

$$\mathcal{E}_P = \{x \in \mathbb{R}^n\colon \quad x^\top P^{-1} x \leqslant 1\}, \qquad P \succeq 0, \tag{1}$$

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

Определение 2. *Эллипсоид с центром в начале координат*

$$\mathcal{E}_{CPC^\top} = \{z \in \mathbb{R}^l\colon \quad z^\top (CPC^\top)^{-1} z \leqslant 1\}, \qquad P \succeq 0,$$

называется ограничивающим по выходу для динамической системы

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

соответствующим инвариантному эллипсоиду (1). *Соответственно, если состояние x_0 принадлежит инвариантному эллипсоиду с матрицей P, то выход системы $z(t)$ будет находиться в эллипсоиде $\mathcal{E}_{CPC^\top}$ для всех $t \geqslant 0$.*

Теперь сформулируем задачу анализа. Рассмотрим линейную непрерывную систему управления

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Dw, \\ y &= Cx + Ew, \end{aligned} \quad x(0) = x_0, \tag{2}$$

где $A \in \mathbb{R}^{n\times n}, D \in \mathbb{R}^{n\times p}, C \in \mathbb{R}^{m\times n}, E \in \mathbb{R}^{m\times p}, x(t) \in \mathbb{R}^n$ — это фазовое состояние системы, $w \in \mathbb{R}^p$ — внешнее возмущение, такое что

$$\dot{w} = -\delta w + \Delta, \quad \|\Delta\| \leqslant 1, \tag{3}$$

где $\delta \in \mathbb{R}^1 > 0$ определяется условиями задачи, а $\Delta \in \mathbb{R}^p$ — неизвестная ограниченная аддитивная компонента. Целью является нахождение минимального (по критерию следа) ограничивающего эллипсоида, содержащего выход y.

Здесь и далее $\|\cdot\|$ — евклидова норма вектора.

2. Решение задачи

2.1. Подход на основе суммирования эллипсоидов

В данном разделе рассматривается стандартный подход к решению задачи (см., например, [10]), который состоит в следующем. Будем строить грубую оценку, получая искомый эллипсоид как сумму эллипсоидов для векторов Cx и Ew. Найдя ограничивающий эллипсоид для каждого из слагаемых, можно получить минимальный ограничивающий эллипсоид (по критерию следа) для выхода y. Нам потребуется следующее утверждение.

Утверждение 1. *Если вектор $l \in \mathbb{R}^n$ лежит в эллипсоиде с матрицей $L \in \mathbb{R}^{n\times n}$, а вектор $h \in \mathbb{R}^n$ — в эллипсоиде с матрицей*

$H \in \mathbb{R}^{n\times n}$, то вектор $(l+h)$ лежит в эллипсоиде с матрицей $(\frac{1}{\varepsilon}L + \frac{1}{1-\varepsilon}H) \in \mathbb{R}^{n\times n}$ при $\forall\varepsilon \in (0,1)$.

Доказательство. Если вектор $l \in \mathbb{R}^n$ лежит в эллипсоиде с матрицей $L \in \mathbb{R}^{n\times n}$, то он удовлетворяет неравенству

$$l^\top L^{-1} l \leqslant 1,$$

и если вектор $h \in \mathbb{R}^n$ — в эллипсоиде с матрицей $H \in \mathbb{R}^{n\times n}$, то он удовлетворяет неравенству

$$h^\top H^{-1} h \leqslant 1.$$

Таким образом, задача состоит в определении матрицы минимального эллипсоида R такой, что

$$(l+h)^\top R^{-1}(l+h) \leqslant 1 \ \text{ при } \ l^\top L^{-1} l \leqslant 1 \ \text{ и } \ h^\top H^{-1} h \leqslant 1. \tag{4}$$

Вводя в рассмотрение вектор $s = \begin{pmatrix} l \\ h \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2n}$, представим условие (4) в виде

$$s^\top \begin{pmatrix} R^{-1} & R^{-1} \\ R^{-1} & R^{-1} \end{pmatrix} s \leqslant 1 \tag{5}$$

$$\text{при } \ s^\top \begin{pmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} s \leqslant 1 \ \text{ и } \ s^\top \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & H^{-1} \end{pmatrix} s \leqslant 1. \tag{6}$$

В силу S-процедуры с двумя ограничениями условие (5) эквивалентно выполнению линейного матричного неравенства

$$\begin{pmatrix} R^{-1} & R^{-1} \\ R^{-1} & R^{-1} \end{pmatrix} - \varepsilon \begin{pmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} - \delta \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & H^{-1} \end{pmatrix} \preceq 0 \tag{7}$$

$$\text{при } \ \varepsilon, \delta > 0 \ \text{ таких, что } \ \varepsilon + \delta \leqslant 1. \tag{8}$$

По лемме Шура (7) равносильно

$$R^{-1} - \varepsilon L^{-1} \preceq R^{-1}(R^{-1} - \delta H^{-1})^{-1} R^{-1}.$$

Домножая слева и справа на R, а затем снова применяя лемму Шура, получим

$$\begin{pmatrix} R - \varepsilon R L^{-1} R & I \\ I & R^{-1} - \delta H^{-1} \end{pmatrix} \preceq 0,$$

что, согласно критерию Сильвестра, равносильно выполнению следующих неравенств

$$
\begin{aligned}
&R - \varepsilon R L^{-1} R \preceq 0,\\
&(R - \varepsilon R L^{-1} R)(R^{-1} - \delta H^{-1}) - I \succeq 0.
\end{aligned}
$$

Первое из которых равносильно $R \succeq \dfrac{1}{\varepsilon} L$, а второе —

$$I - \varepsilon R L^{-1} - \delta R H^{-1} - \varepsilon\delta R L^{-1} R H^{-1} - I \succeq 0 \Leftrightarrow R \succeq \frac{1}{\delta} H + \frac{1}{\varepsilon} L.$$

Поскольку ищется минимальный эллипсоид, то, полагая $\delta = \delta_{max} = 1 - \varepsilon$, приходим к утверждению теоремы.

Нам понадобится определить матрицу минимального инвариантного эллипсоида W для возмущения w. Для этого воспользуемся следующим утверждением, установленным в [7].

Лемма 1. *Эллипсоид* $\mathcal{E}_P = \{x \in \mathbb{R}^n : x^\top P^{-1} x \leqslant 1\},\ P \succ 0$, *является инвариантным для системы*

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

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

$$AP + PA^\top + \alpha P + \frac{1}{\alpha} DD^\top \preceq 0, \quad P \succ 0.$$

Теперь можно сформулировать следующую лемму.

Лемма 2. *Возмущение* w*, удовлетворяющее* (3)*, содержится в инвариантном эллипсоиде с матрицей*

$$W = \frac{1}{\delta^2} I. \tag{9}$$

Доказательство. Применяя лемму 1 при $A = -\delta, D = I$, получим, что матрица инвариантного эллипсоида W удовлетворяет неравенству

$$-2\delta W + \alpha W + \frac{1}{\alpha} I \preceq 0.$$

Откуда получаем

$$W \geqslant \frac{1}{\alpha(2\delta - \alpha)} I.$$

Исследуя функцию $\dfrac{1}{\alpha(2\delta - \alpha)}$ на минимум, находим, что минимальное значение достигается при $\alpha = \delta$. Лемма доказана.

Отметим, что найденный эллипсоид является минимальным по критерию вложенности. Этот критерий является более «строгим», чем критерий следа. Для формулировки теоремы нам понадобится следующая лемма, установленная в [7].

Лемма 3. *Образом эллипсоида*

$$\mathcal{E}_P = \{x \in \mathbb{R}^n : x^\top P^{-1} x \leqslant 1\},\ P \succ 0,$$

при линейном отображении $z = Cx$, где C — матрица максимального строчного ранга, является эллипсоид

$$\mathcal{E}_{CPC^\top} = \{z \in \mathbb{R}^l : z^\top (CPC^\top)^{-1} z \leqslant 1\},\ P \succ 0.$$

Теперь можно сформулировать следующую теорему.

Теорема 1. *Решение задачи минимизации*

$$\mathrm{tr}\ \frac{1}{\varepsilon\delta^2} E^\top E + \frac{1}{1-\varepsilon} C^\top S C \to \min$$

при ограничениях

$$AS + SA^\top + \beta S + \frac{1}{\beta} DD^\top \preceq 0,\quad S \succ 0, \tag{10}$$

где минимизация проводится по матричным переменным $S = S^\top \in \mathbb{R}^{n\times n}$ и числовым параметрам $\varepsilon \in (0,1)$ и $\beta > 0$, определяет матрицу ограничивающего эллипсоида $\widehat{R} = \dfrac{1}{\varepsilon\delta^2} E^\top E + \dfrac{1}{1-\varepsilon} C^\top \widehat{S} C$.

Доказательство. Применяя леммы 1 и 3 к системе (2), получаем, что решение задачи минимизации $\mathrm{tr}\ C^\top S C \to \min$ при ограничениях (10) определяет матрицу ограничивающего эллипсоида для выхода Cx. Применяя лемму 2 и суммируя полученные эллипсоиды, при помощи утверждения 1 приходим к утверждению теоремы.

2.2. Основной результат

Вводя в рассмотрение вектор

$$z = \begin{pmatrix} x \\ w \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{(n+p)},$$

перепишем систему (2) в виде

(11)
$$\dot{z} = \underbrace{\begin{pmatrix} A & D \\ 0 & -\delta I \end{pmatrix}}_{\tilde{A}} z + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ \Delta \end{pmatrix}}_{\tilde{w}},$$
$$y = (C E) z = \tilde{C} z.$$

Теорема 2. *Решение $\widehat{Q}$ задачи минимизации*

(12)
$$\mathrm{tr}\ H \to \min$$

при ограничениях

(13)
$$\begin{pmatrix} Q\tilde{A} + \tilde{A}^\top Q + \alpha Q & Q \\ Q & -\alpha I \end{pmatrix} \preceq 0,$$

(14)
$$\begin{pmatrix} H & I \\ I & Q \end{pmatrix} \succeq 0,$$

(15)
$$Q \succeq \gamma I,\ \gamma \in \mathbb{R}^1 \geqslant 0,$$

где минимизация проводится по матричным переменным $Q = Q^\top \in \mathbb{R}^{(n+l)\times(n+l)}, H = H^\top \in \mathbb{R}^{(n+l)\times(n+l)}$ *и числовому параметру* $\alpha > 0$, *определяет матрицу* $\widehat{P} = \widehat{Q}^{-1}$ *инвариантного эллипсоида для системы* (11).

Доказательство. Применяя лемму 1 к (11), получим, что матрица инвариантного эллипсоида P должна удовлетворять

$$\tilde{A}P + P\tilde{A}^\top + \alpha P + \frac{1}{\alpha} I \preceq 0.$$

Домножив данное неравенство слева и справа на Q, получаем

$$Q\tilde{A} + \tilde{A}^\top Q + \alpha Q + \frac{1}{\alpha} QQ \preceq 0,$$

что, согласно лемме Шура, равносильно

$$\begin{pmatrix} Q\tilde{A} + \tilde{A}^\top Q + \alpha Q & Q \\ Q & -\alpha I \end{pmatrix} \preceq 0.$$

Чтобы свести задачу минимизации $\operatorname{tr} P = \operatorname{tr} Q^{-1}$ к линейной, введем матрицу $H = H^\top$ такую, что $Q^{-1} \leqslant H$. Последнее неравенство эквивалентно линейному матричному неравенству (14). Нетрудно видеть, что тривиальное решение $Q = 0$ удовлетворяет системе (13), (14). Такое решение хоть и является корректным, но означает, что инвариантным эллипсоидом с матрицей Q^{-1} является все пространство. Для того чтобы избежать при численном решении сходимости к решению $Q = 0$, в систему добавляется техническое условие (15). Тогда при выборе достаточно малого γ система будет иметь решение, отличное от тривиального.

Пример 1. Продемонстрируем предложенный подход на примере видоизмененной задачи AC5 из библиотеки COMPleib, где

$$A = \begin{pmatrix} -4{,}3760 & 1{,}0000 & -0{,}1209 & 0 \\ 8{,}9117 & -3{,}5000 & -130{,}7500 & 0 \\ 1{,}0000 & 5{,}000 & -153{,}5000 & 1{,}000 \\ -1{,}0000 & -10{,}0000 & -5{,}0000 & -3{,}5500 \end{pmatrix},$$

$$D = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

При использовании стандартного подхода 1 при $\delta = 0{,}2$ получим следующую матрицу эллипса

$$\widehat{M_1} = \begin{pmatrix} 0{,}8045 & -0{,}8452 \\ -0{,}8452 & 37{,}6434 \end{pmatrix},$$

след которой равен 36,9390.

При использовании предлагаемого подхода получим следующую матрицу

$$\widehat{Q} = \begin{pmatrix} 4{,}3213 & -2{,}0168 & -2{,}2524 & -0{,}0522 & -0{,}7185 \\ -2{,}0168 & 3{,}8277 & -0{,}6608 & 0{,}8856 & 0{,}2765 \\ -2{,}2524 & -0{,}6608 & 108{,}7736 & -0{,}0367 & -0{,}5232 \\ -0{,}0522 & 0{,}8856 & -0{,}0367 & 0{,}3629 & 0{,}0948 \\ -0{,}7185 & 0{,}2765 & -0{,}5232 & 0{,}0948 & 0{,}2488 \end{pmatrix}.$$

Ей соответствует следующая матрица эллипса

$$\widehat{M}_2 = \begin{pmatrix} 3{,}8817 & -0{,}8077 \\ -0{,}8077 & 11{,}0059 \end{pmatrix},$$

след которого равен 14,8875.

Результирующие эллипсы изображены на рис. 1. Синим цветом изображен эллипс, полученный при решении задачи стандартным подходом, а красный цветом — эллипс, полученный при использовании предлагаемого подхода. При этом по критерию следа второй эллипс (красный) оказался меньше второго эллипса (синего) на примерно 60%. Таким образом, на рассматриваемом примере видно, что предлагаемый подход оказался эффективнее стандартного.

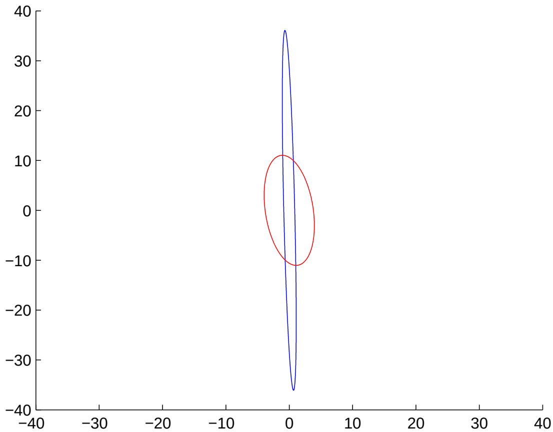

Рис. 1. Ограничивающие эллипсы при использовании двух подходов

•

3. Выводы и перспективы

В работе предложен новый подход решения задачи анализа при одинаковом возмущении, подаваемом на вход и на выход системы. В описанном примере на основе задачи AC5 след ограничивающего эллипсоида при использовании предлагаемого подхода оказался примерно в полтора раза меньше, чем при использовании стандартного подхода. При этом в предлагаемом подходе требуется минимизация по одному числовому параметру вместо двух в стандартном подходе. В дальнейшем планируется применение предлагаемого подхода для синтезирования оптимального управления в задаче слежения.

Литература

1. АХОБАДЗЕ А. Г., КРАСНОВА С. А. *Задача слежения в линейных многомерных системах при наличии внешних возмущений* // Автоматика и телемеханика. – 2009. – №6. – С. 21–27.
2. ЖЕЛЕЗНОВ К. О., ХЛЕБНИКОВ М. В. *Применение метода инвариантных эллипсоидов для решения линейной задачи слежения* // Труды МФТИ. – 2013. – Т. 5, №1. – С. 115–121.
3. ЛЕЗИНА З. М., ЛЕЗИН В. И. *Щипанов и теория инвариантности.* – М.: УРСС, 2004. – 428 с.
4. МАТРОСОВ В. М. *К теории устойчивости движения* // Прикладная математика и механика. – 1962. – Т. 26, №5. – С. 885–895.
5. 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.
6. ПОЛЯК Б. Т., ХЛЕБНИКОВ М. В., ЩЕРБАКОВ П. С. *Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств.* – М.: УРСС, 2014. – 560 с.
7. ПОЛЯК Б. Т., ЩЕРБАКОВ П. С. *Робастная устойчивость и управление.* – М.: Наука, 2002. – 303 с.

8. СОКОЛОВ В. Ф. *Робастное слежение при неизвестных верхних границах возмущений и помехи измерений* // Автоматика и телемеханика. – 2013. – №1. – С. 98–115.
9. ЦЫКУНОВ А. М. *Робастная система слежения с компенсацией возмущений и помех* // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2014. – №1. – С. 54–61.
10. ШОЛОХОВ А. В. *Об эллипсоидальной аппроксимации суммы двух эллипсоидов по минимуму объема* // Кибернетика и системный анализ. – 2011. – №6. – С. 138–144.
11. Щипанов Г. В. *Теория и методы проектирования автоматических регуляторов* // Автоматика и телемеханика. – 1939. – №47. – С. 49–66.
12. Bellman R. *Vector Lyapunov Functions* // J.S.I.A.M. Control. – 1966. – Vol. 1, №1. – P. 32–34.
13. BOUOUDEN S., CHADLI M., FILALI S., EL HAJJAJI A. *Fuzzy model based multivariable predictive control of a variable speed wind turbine: LMI approach* // Renewable Energy. – 2012. – Vol. 37, №1. – P. 434–439.
14. BOYD S., EL GHAOUI L., FERON E., BALAKRISHAN V. *Linear matrix inequalities in system and control theory.* – SIAM, 1994. – 250 p.
15. CERVANTES I., ALVAREZ-RAMIREZ J. *On the PID tracking control of robot manipulators* // Systems & control letters. – 2001. – Vol. 142, №1. – P. 37–46.
16. GRUJIĆ L. T. *Tracking control of linear systems.* – CRC Press, 2013.
17. GRUJIĆ L. T., MOUNFIELD W. P. *Natural tracking PID process control for exponential tracking* // AIChE journal. – 1992. – Vol. 38, №4. – P. 555–562.
18. KALMAN R. E. *Contributions to the theory of optimal control* // Bol. Soc. Mat. Mexicana. – 1960. – Vol. 5, №2. – P. 102–119.
19. LEIBFRITZ F. *COMPl$_e$ib: COnstrained Matrix-optimization*

Problem library. Version 1.1 // Univ. Trier, Germany. URL: www.compleib.de.

20. LÖFBERG J. *YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB* // Computer Aided Control Systems Design, 2004 IEEE International Symposium – 2004. – P. 284–289.
21. LIAO F., WANG J. L., YANG G.-H. *Reliable robust flight tracking control: an LMI approach* // Control Systems Technology, IEEE Transactions on. – 2002. – Vol. 10, №1. – P. 76–89.
22. PHAT V. N., KNOGTHAM Y., RATCHAGIT K. *LMI approach to exponential stability of linear systems with interval time-varying delays* // Linear Algebra and its Applications. – 2012. – Vol. 436, №1. – P. 243–251.
23. SKOGESTAD S., POSLETHWAITE I. *Multivariable feedback control: analysis and design.* – New York: Wiley, 2007. – 608 p.
24. TOH K., TODD M., TÜTÜNCÜ R. *SDPT3—a MATLAB software package for semidefinite programming, version 1.3* // Optimization methods and software. – 1999. – Vol. 11, №1–4. – P. 545–581.
25. TÜTÜNCÜ R., Toh K., Todd M. *Solving semidefinite-quadratic-linear programs using SDPT3* // Mathematical programming. – 2003. – Vol. 95, №2. – P. 189–217.
26. ZHANG H., SHI I., MEHR A. S., HUANG H. *Robust FIR equalization for time-varying communication channels with intermittent observations via an LMI approach* // Signal Processing. – 2011. – Vol. 91, №7. – P. 1651–1658.
27. ZHANG B., ZHENG W. X., XU S. *Passivity analysis and passive control of fuzzy systems with time-varying delays* // Fuzzy Sets and Systems. – 2011. – Vol. 174, №1. – P. 83–98.

ANALYSIS PROBLEM SOLUTION WITH DISTURBANCE BOTH IN INPUT AND OUTPUT

Kirill Zheleznov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Ph.D. candidate (kirill.zheleznov@phystech.edu).

Abstract: The conventional approach to disturbances suggests that input and output disturbances are independent. This assumption can lead to inaccurate estimation when input and output disturbances originates from a common source. New tracking problem solution method for linear systems with identical disturbance in both system's input and output is suggested. Our technique is based on semi-definite programming and scalar optimixation. Its higher effectiveness in comparison with conventional method is shown on example task from COMPleib.

Keywords: linear matrix inequalities, invariant ellipsoid techniques, tracking problem.

Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии И. Б. Фуртатом.

Поступила в редакцию 09.02.2016.
Дата опубликования 30.09.2016.