

Ба Хю Нгуен, аспирант, leningrat206@gmail.com,

И. Б. Фуртат, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., зав. лаб., cainenash@mail.ru,
Институт проблем машиноведения РАН, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

Управление объектами с секторной нелинейностью с гарантией нахождения регулируемой переменной в заданном множестве*

Предложен новый метод синтеза управления объектами с секторной нелинейностью с гарантией нахождения регулируемой переменной в заданном множестве при неизвестных ограниченных возмущениях. Синтез алгоритма осуществляется в два этапа. На первом этапе используется преобразование координат, чтобы свести исходную задачу с ограничениями к задаче исследования на устойчивость по вход—состоянию новой расширенной системы без ограничений. На втором этапе синтезируется закон управления для преобразованной системы, в котором настраиваемый параметр выбирается из решения линейных матричных неравенств. Для иллюстрации эффективности работы предлагаемого метода приведены результаты моделирования в MATLAB/Simulink, которые показали эффективность предложенного метода и подтвердили теоретические результаты.

Ключевые слова: нелинейная система, секторная нелинейность, преобразование координат, заданное множество, неизвестное ограниченное возмущение, устойчивость, линейные матричные неравенства

Введение

На практике широко распространены задачи управления нелинейными системами, в частности, объектами с секторной нелинейностью. Примерами таких систем могут быть электромеханические объекты, колебательные системы, электроэнергетические сети, манипуляторы и т. д. Существует большое число работ, посвященных управлению такими системами, например [1–6]. Однако в данных работах удается обеспечить заданное качество регулирования только в установившемся режиме.

Настоящая статья посвящена управлению с гарантией заданного качества выходного сигнала в любой момент времени. Для управления линейными системами в работах [7–9] предложен базовый метод на основе специального преобразования координат, позволяющего свести исходную задачу с ограничениями по регулируемой переменной к задаче без ограничений.

В данной работе будет применен метод, предложенный в [7–9], для синтеза закона управления системами с секторной нелинейностью и будут получены новые условия расчета параметров регулятора с использованием техники линейных матричных неравенств (ЛМН) [10, 11]. Статья организована следующим образом. В разделе 1 формулируется задача управ-

ления нелинейным объектом с гарантией принадлежности выходных сигналов в заданном множестве. В разделе 2 описан основной результат статьи, где предложен метод синтеза на основе линейных матричных неравенств. Для иллюстрации результатов работы и эффективности предполагаемого метода в разделе 3 приводятся и анализируются результаты моделирования, полученные в MATLAB/Simulink.

1. Постановка задачи

Рассмотрим нелинейную систему

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{G}\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{f}; \\ y &= \mathbf{L}\mathbf{x},\end{aligned}\quad (1)$$

где $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ — измеряемый вектор состояния; $\mathbf{u} \in \mathbb{R}$ — сигнал управления; $y \in \mathbb{R}$ — выходной сигнал; $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^l$ — неизвестное ограниченное возмущение такое, что $|\mathbf{f}(t)| \leq \bar{\mathbf{f}}$ для любых $t > 0$; $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^n$ — неизвестная нелинейная функция, которая удовлетворяет условию секторного ограничения для любых $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$:

$$|\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})| \leq M |\mathbf{x}|. \quad (2)$$

Здесь $M > 0$ — известная константа. Матрицы $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$, $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{n \times l}$ известны. Пара $(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ управляема и пара $(\mathbf{A}, \mathbf{L})$ наблюдаема.

Требуется разработать закон управления, обеспечивающий нахождение регулируемого сигнала $y(t)$ объекта (1) в следующем множестве:

*Метод решения и основной результат получены за счет гранта Российского научного фонда № 18-79-10104-П в ИПМаш РАН, <https://rscf.ru/project/18-79-10104/>. Численное моделирование выполнено за счет средств гранта РФФИ № 20-08-00610.

$$\mathcal{Y} = \{y \in \mathbb{R} : \underline{g}(t) < y(t) < \bar{g}(t)\} \quad (3)$$

для любых $t \geq 0$,

где $\underline{g}(t)$ и $\bar{g}(t)$ — непрерывные и ограниченные функции вместе со своими первыми производными по времени. Данные функции выбираются разработчиками исходя из требований к работе системы.

2. Метод решения. Основной результат

Следуя работам [7–9], введем следующую замену координат:

$$y(t) = \Phi(\varepsilon(t), t), \quad (4)$$

где $\varepsilon(t) \in \mathbb{R}$ — непрерывно-дифференцируемая функция по времени t , $\Phi(\varepsilon, t) \in \mathbb{R}$ удовлетворяет следующим условиям:

- а) $\underline{g}(t) < \Phi(\varepsilon, t) < \bar{g}(t)$ для любых $t \geq 0$ и $\varepsilon \in \mathbb{R}$;
- б) существует обратное отображение $\varepsilon = \Phi^{-1}(y, t)$ для любых $y \in \mathcal{Y}$ и $t \geq 0$;
- в) $\Phi(\varepsilon, t)$ — непрерывно-дифференцируемая функция по ε и t , $\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \neq 0$ для любых ε и $t \geq 0$;
- г) $\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t}$ — ограниченная функция для любых ε и $t \geq 0$, $\left| \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right| < \gamma$, $\gamma > 0$ определяется видом замены (4).

В отличие от работ [7–9] в настоящей работе $\Phi(\varepsilon, t)$ — скалярная функция. Чтобы сформулировать закон управления, требуется знание о динамике $\varepsilon(t)$. Для этого найдем полную производную по времени функции $y(t)$ вдоль траекторий (1), (4):

$$\dot{y} = \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \dot{\varepsilon} + \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t}. \quad (5)$$

Принимая во внимание (1), с учетом $\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \neq 0$ перепишем (4) в виде

$$\dot{\varepsilon} = \left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right)^{-1} \left[\mathbf{L} \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{L} \mathbf{B} u + \mathbf{L} \mathbf{D} \mathbf{f} - \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right]. \quad (6)$$

Для решения поставленной задачи напомним основной результат работы [7, теорема 1] для скалярного преобразования (4).

Теорема 1. Пусть для преобразования (4) выполнены условия (а)–(г). Если существует такой закон управления $u(t)$, что решение (6) ограничено, то $y(t) \subset \mathcal{Y}$.

Теорема 1 позволяет свести задачу управления (1) с ограничением по выходу (3) к задаче управления (6) без ограничения.

Зададим закон управления для объекта (1) в виде

$$u = -(\mathbf{L} \mathbf{B})^{-1} [K \varepsilon + \mathbf{L} \mathbf{A} \mathbf{x} + M \text{sign}(\varepsilon) \|\mathbf{L} \mathbf{G}\| \|\mathbf{x}\|], \quad (7)$$

где K — положительное число,

$$\text{sign}(\varepsilon) = \begin{cases} -\varepsilon, & \varepsilon < 0, \\ \varepsilon, & \varepsilon \geq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Далее сформулируем основной результат в виде следующей теоремы.

Теорема 2. Допустим, что при преобразовании (4) выполнены условия (а)–(г), $\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} > 0$ для любых ε и t . Пусть для заданного числа $c > 0$ существуют положительное число K и положительные коэффициенты τ_i , $i = 1, 2, 3$, такие что выполнены следующие неравенства:

$$\begin{bmatrix} -K + \tau_1 & \frac{1}{2} \mathbf{L} \mathbf{D} & -\frac{1}{2} \\ * & -\tau_2 \mathbf{I} & \mathbf{O} \\ * & * & -\tau_3 \end{bmatrix} \leq 0, \quad (9)$$

$$-2c\tau_1 + \bar{f}^2\tau_2 + \gamma^2\tau_3 \leq 0,$$

где "*" — симметричный блок симметричной матрицы; $\mathbf{O}$, $\mathbf{I}$ — нулевая и единичная матрицы соответствующей размерности. Тогда закон управления (7) обеспечивает выполнение целевого условия (3).

Доказательство. Постановив закон управления (7) в (6), получим

$$\dot{\varepsilon} = \left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right)^{-1} \left[-K \varepsilon - M \text{sign}(\varepsilon) \|\mathbf{L} \mathbf{G}\| \|\mathbf{x}\| + \mathbf{L} \mathbf{G} \Phi(\mathbf{x}) + \mathbf{L} \mathbf{D} \mathbf{f} - \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right]. \quad (10)$$

Для исследования выражения (10) на устойчивость по вход—состоянию [12, 13] рассмотрим функцию Ляпунова вида

$$V = \frac{1}{2} \varepsilon^2. \quad (11)$$

Найдем полную производную по времени от функции Ляпунова (11) вдоль решений (10):

$$\dot{V} = \varepsilon \dot{\varepsilon} = \varepsilon \left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right)^{-1} \left[-K \varepsilon - M \text{sign}(\varepsilon) \|\mathbf{L} \mathbf{G}\| \|\mathbf{x}\| + \mathbf{L} \mathbf{G} \Phi(\mathbf{x}) + \mathbf{L} \mathbf{D} \mathbf{f} - \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right]. \quad (12)$$

Потребуем выполнение условия

$$\dot{V} \leq 0 \quad (13)$$

при

$$V \geq c, \quad (14)$$

с учетом ограничений

$$|\mathbf{f}| \leq \bar{f}, \left| \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right| \leq \gamma. \quad (15)$$

Слагаемое $\left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right)^{-1} > 0$ не влияет на знак выражения (12). Принимая во внимание неравенство

$$\mathbf{L}\mathbf{G}\Phi(\mathbf{x}) \leq |\mathbf{L}\mathbf{G}\Phi(\mathbf{x})| \leq \|\mathbf{L}\mathbf{G}\| |\Phi(\mathbf{x})| \leq \mathbf{M} \|\mathbf{L}\mathbf{G}\| |\mathbf{x}|,$$

перепишем условия (13)–(15) как

$$\varepsilon \left[-K\varepsilon + \mathbf{L}\mathbf{D}\mathbf{f} - \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right] \leq 0 \quad \forall \left(\varepsilon, \mathbf{f}, \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right): \quad (16)$$

$$\varepsilon^2 > c, \quad \mathbf{f}^T \mathbf{f} \leq \bar{f}^2, \quad \left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right)^2 \leq \gamma^2.$$

Обозначив $\mathbf{z} = \text{col} \left\{ \varepsilon, \mathbf{f}, \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right\}, \mathbf{z} \in \mathbb{R}^{l+2}$, перепишем (16) в матричном виде:

$$\mathbf{z}^T \begin{bmatrix} -K & \frac{1}{2} \mathbf{L}\mathbf{D} & -\frac{1}{2} \\ * & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ * & * & 0 \end{bmatrix} \mathbf{z} \leq 0;$$

$$\mathbf{z}^T \begin{bmatrix} -1 & \mathbf{O} & 0 \\ * & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ * & * & 0 \end{bmatrix} \mathbf{z} \leq -2c; \quad (17)$$

$$\mathbf{z}^T \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{O} & 0 \\ * & I & \mathbf{O} \\ * & * & 0 \end{bmatrix} \mathbf{z} \leq \bar{f}^2;$$

$$\mathbf{z}^T \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{O} & 0 \\ * & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ * & * & 1 \end{bmatrix} \mathbf{z} \leq \gamma^2.$$

Согласно S-процедуре [10, 14] и результатам работ [15, 16] для выполнения неравенств (17) необходимо выполнение (9). Следовательно, функция $\varepsilon(t)$ ограничена для любых t , и сигнал $\mathbf{x}(t)$ будет ограничен в силу ограниченности $\varepsilon(t)$, $\Phi(\varepsilon, t)$. Тогда управление (7) будет ограничено, и, с учетом теоремы 1, целевое условие (3) будет выполнено. Теорема 2 доказана.

Замечание 1. Из соотношения (4) и ограниченности $\varepsilon(t)$ следует ограниченность $\mathbf{x}(t)$ независимо от того, гурвицева матрица $\mathbf{A}$ или нет. Таким образом данный результат может применяться для неустойчивых объектов.

3. Численное моделирование

Рассмотрим объект (1) со следующими параметрами:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0,1 & 2 & -3 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}; \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}; \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,1 & 0,1 & -0,1 \end{bmatrix}; \Phi(\mathbf{x}) = \sin \mathbf{x};$$

$$f(t) = 0,1 + \sin(3t) + \text{sat} \left(\frac{d(t)}{0,3} \right),$$

где $\text{sat}\{\cdot\}$ — функция насыщения; $d(t)$ — сигнал, моделируемый в MATLAB SIMULINK с помощью блока "Band-Limited White Noise" с мощностью шума и временем выборки 0,1.

Зададим $\Phi(\varepsilon, t)$ в виде

$$\Phi(\varepsilon, t) = \frac{\bar{g}(t)e^\varepsilon + g(t)}{e^\varepsilon + 1}. \quad (18)$$

Очевидно, что функция $\Phi(\varepsilon, t)$ удовлетворяет условиям теоремы 2. Действительно, так как $\bar{g}(t) > g(t)$, то для любых ε и $t \geq 0$ имеем

$$\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} = \frac{e^\varepsilon (\bar{g}(t) - g(t))}{(e^\varepsilon + 1)^2} > 0,$$

$$\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} = \frac{\dot{\bar{g}}(t)e^\varepsilon + \dot{g}(t)}{e^\varepsilon + 1} <$$

$$< \max \left\{ \sup_{t \geq 0} \{ \dot{\bar{g}}(t) \}, \sup_{t \geq 0} \{ \dot{g}(t) \} \right\} = \gamma.$$

Параметры функции $\Phi(\varepsilon, t)$ зададим в виде

$$\bar{g}(t) = \begin{cases} -3 \cos t + 0,2, & t < 2\pi, \\ \cos t + 2,2, & t \geq 2\pi; \end{cases}$$

$$g(t) = \begin{cases} 3 \cos t - 0,2, & t < 2\pi, \\ \cos t + 1,8, & t \geq 2\pi. \end{cases}$$

Воспользуемся пакетом YALMIP [17] и решателем SEDUMI [18] для решения неравенства (6). Для заданного числа $c = 100$ найдем $\tau_1 = 0,51, \tau_2 = 7,03, \tau_3 = 8,59$ и $K = 6,96$. Для заданного числа $c = 0,1$ найдем $\tau_1 = 1,32, \tau_2 = 4,05, \tau_3 = 7,92$ и $K = 55,62$.

Переходные процессы по $y(t)$, $u(t)$ при $\mathbf{x}(0) = \text{col} \left\{ \frac{5}{3}, \frac{2}{3}, -1 \right\}$ при двух различных значениях $c = 100$ и $c = 0,1$ приведены на рис. 1 (см. третью сторону обложки). На рис. 2 приведен график возмущения $f(t)$.

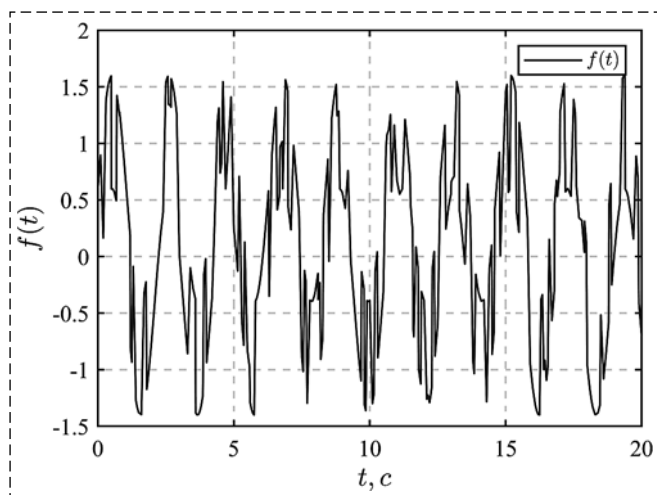


Рис. 2. Переходной процесс $f(t)$

Fig. 2. The transient of $f(t)$

Из рис. 1, а следует, что выходной сигнал не выходит из заданного множества, что удовлетворяет требованию поставленной задачи и согласуется с аналитическими выводами. Также отметим, что чем меньше значение c в условии (14), тем лучше закон управления подавляет влияние возмущения. Это объясняется тем, что траектория $\varepsilon(t)$ не покидает интервал $[-\sqrt{2c}; \sqrt{2c}]$ (см. доказательство теоремы 2). Отметим, что при уменьшении параметра c уменьшается длина отрезка $[-\sqrt{2c}; \sqrt{2c}]$, а значит, больше подавляются колебания в области $x(t)$ (рис. 1, а). Колебания сигнала управления $u(t)$ на рис. 1, б (см. третью сторону обложки), обусловлены наличием возмущения $f(t)$. Из рис. 1, б также видно, что для стабилизации системы в заданном множестве не требуется большого значения управляющего сигнала. В данном случае значение сигнала управления сопоставимо со значением возмущения.

Заключение

В статье предложен новый метод синтеза управления для систем с секторной нелинейностью и гарантией нахождения выходного сигнала в заданном множестве на основе метода, предложенного в работах [7–9], и техники ЛМН. Разработанный метод применяется в задаче управления объектом по состоянию в условиях неизвестных ограниченных возмущений. В отличие от работ [7–9] предложенный метод позволяет рассчитывать параметры регулятора с использованием линейных матричных неравенств, что расширяет применимость полученного метода на практике по сравнению с работами [7–9].

Результаты моделирования проиллюстрировали эффективность предложенного метода и подтвердили теоретические выводы.

Список литературы

1. Gupta S., Joshi S. M. Some properties and stability results for sector-bounded LTI systems // Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and Control. 1994. Vol. 3. P. 2973–2978. DOI: 10.1109/CDC.1994.411339.
2. Alvergue L., Gu G., Acharya S. A generalized sector bound approach to feedback stabilization of nonlinear control systems // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2012. Vol. 23. P. 1563–1580 DOI:10.1002/rnc.2843.
3. Churilov A. Stabilization of systems with sector bounded nonlinearity by a sawtooth sampled-data feedback // Cybernetics and Physics. 2019. Vol. 8. P. 222–227. DOI: 10.35470/2226-4116-2019-8-4-222-227.
4. Pendharkar I., Pillai H. Systems with sector bound nonlinearities: A behavioral approach // Systems & Control Letters. 2008. Vol. 57. P. 112–122. DOI: 10.1016/j.sysconle.2007.06.019.
5. Novara C., Canuto E., Carlucci D. Control of systems with sector-bounded nonlinearities: robust stability and command effort minimization by disturbance rejection // Control Theory and Technology. 2016. Vol. 14. P. 209–223. DOI: 10.1007/s11768-016-6017-6.
6. Gomes da Silva J. M., Castelan E. B., Corso J., Eckhard D. Dynamic output feedback stabilization for systems with sector-bounded nonlinearities and saturating actuators // Journal of the Franklin Institute. 2013. Vol. 350. P. 464–484. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2012.12.009.
7. Фуртат И. Б., Гущин П. А. Управление динамическими объектами с гарантией нахождения регулируемого сигнала в заданном множестве // Автоматика и телемеханика. 2021. № 4. С. 121–139.
8. Furtat I., Gushchin P. Nonlinear feedback control providing plant output in given set // International Journal of Control. 2021. URL: <https://doi.org/10.1080/00207179.2020.1861336>.
9. Furtat I., Gushchin P. Control of Dynamical Systems with Given Restrictions on Output Signal with Application to Linear Systems // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53, N. 2. P. 6384–6389.
10. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory // SIAM studies in applied mathematics. 1994. Vol. 15. 205 p.
11. Herrmann G., Turner M., Postlethwaite I. Linear matrix inequalities in control // Mathematical Methods for Robust and Nonlinear Control. Springer Nature. 2007. P. 123–142 (Lecture Notes in Control and Information Sciences).
12. Sontag E. Input to state stability: Basic concepts and results // Nonlinear and optimal control theory. Springer. 2008. P. 163–220.
13. Dashkovskiy S., Efimov D., Sontag E. Input to state stability and allied system properties // Automation and Remote Control. 2011. Vol. 72, N. 8. P. 1579–1614.
14. Fridman E. A refined input delay approach to sampled-data control // Automatica. 2010. V. 46. P. 421–427.
15. Furtat I. B. Robust Synchronization of the Structural Uncertainty Nonlinear Network with Delay and Disturbances // Proc. of the 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing, July 3-5, 2013, Caen, France. P. 227–232.
16. Фуртат И. Б. Робастное управление электрическим генератором с компенсацией возмущений // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 5. С. 102–108.
17. Lofberg J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB // 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE Cat. No.04CH37508). 2004. P. 284–289. DOI: 10.1109/CACSD.2004.1393890.
18. Sturm J. F. Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones // Optimization methods and software. 1999, Vol. 11. P. 625–653.

Control of Sector-Bound Systems with the Guarantee Output Signal in a Given Set

Ba Huy Nguyen, leningrat206@gmail.com, I. B. Furtat, cainenash@mail.ru,

Institute for Problems of Mechanical Engineering (RAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation,
ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: **Furtat Igor**, Head of Lab at IPME RAS,
Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: cainenash@mail.ru

Accepted on February 24, 2022

Abstract

In this paper, we propose a new method for synthesizing the control of plants with sector-bound nonlinearity with a guarantee of finding the controlled signal in given set at any time under conditions of unknown bounded disturbances. The basis of the method consists of two stages. At the first stage, the coordinate transformation is used to reduce the original constrained problem to the problem of studying the input-to-state stability of a new extended system without constraints. Thus, any known control methods can now be applied to stabilize the system in new coordinates. At the same time, to achieve the goal, it is not required to reduce the value of the control error. It is enough to show its boundedness. At the second stage, a control law is synthesized for the extended system, where the adjustable parameter is selected from the solution of linear matrix inequalities. To illustrate the effectiveness of the proposed method, simulation in the MATLAB Simulink is given. The simulation results show the presence of controlled signals in the given set and the boundness of all signals in the control system. It is shown that an increase the value of the gains in the control law improves the quality of disturbance attenuation that is consistent with theoretical results.

Keywords: nonlinear systems, sector nonlinearity, coordinate transformation, given set, unknown bounded disturbance, stability, linear matrix inequalities

Acknowledgements. The proposed method and the main result were obtained under the Russian Science Foundation Grant No. 18-79-10104-П at IPME RAS, <https://rscf.ru/en/project/18-79-10104/>. Numerical simulations were performed at RFBR grant No. 20-08-00610.

For citation:

Nguyen Ba Huy, Furtat I. B. Control of Sector-Bound Systems with the Guarantee Output Signal in a Given Set, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 7, pp. 351—355.

DOI: 10.17587/mau.23.351-355

References

1. Gupta S., Joshi S. M. Some properties and stability results for sector-bounded LTI systems, *Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, 1994, vol. 3, pp. 2973—2978.
2. Alvergue L., Gu G., Acharya S. A generalized sector bound approach to feedback stabilization of nonlinear control systems, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2012, vol. 23, pp. 1563—1580.
3. Churilov A. Stabilization of systems with sector bounded nonlinearity by a sawtooth sampled-data feedback, *Cybernetics and Physics*, 2019, vol. 8, pp. 222—227.
4. Pendharkar I., Pillai H. Systems with sector bound nonlinearities: A behavioral approach, *Systems & Control Letters*, 2008, vol. 57, pp. 112—122.
5. Novara C., Canuto E., Carlucci D. Control of systems with sector-bounded nonlinearities: robust stability and command effort minimization by disturbance rejection, *Control Theory and Technology*, 2016, vol. 14, pp. 209—223.
6. Gomes da Silva J. M., Castelan E. B., Corso J., Eckhard D. Dynamic output feedback stabilization for systems with sector-bounded nonlinearities and saturating actuators, *Journal of the Franklin Institute*, 2013, vol. 350, pp. 464—484.
7. Furtat I., Gushchin P. Control of dynamic plants with a guarantee of finding the regulated signal in a given set, *Automation and Remote Control*, 2021, no. 4, pp. 121—139 (in Russian).
8. Furtat I., Gushchin P. Nonlinear feedback control providing plant output in given set, *International Journal of Control*, 2021, available at: <https://doi.org/10.1080/00207179.2020.1861336>.
9. Furtat I., Gushchin P. Control of Dynamical Systems with Given Restrictions on Output Signal with Application to Linear Systems, *IFAC-PapersOnLine*, 2020, vol. 53, no. 2, pp. 6384—6389.
10. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory, *SIAM studies in applied mathematics*, 1994, vol. 15, 205 p.
11. Herrmann G., Turner M., Postlethwaite I. Linear matrix inequalities in control, *Mathematical Methods for Robust and Nonlinear Control*. Springer Nature, 2007, pp. 123—142 (Lecture Notes in Control and Information Sciences).
12. Sontag E. Input to state stability: Basic concepts and results, *Nonlinear and optimal control theory*, Springer, 2008, pp. 163—220.
13. Dashkovskiy S., Efimov D., Sontag E. Input to state stability and allied system properties, *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, no. 8, pp. 1579—1614.
14. Fridman E. A refined input delay approach to sampled-data control, *Automatica*, 2010, vol. 46, pp. 421—427.
15. Furtat I. B. Robust Synchronization of the Structural Uncertainty Nonlinear Network with Delay and Disturbances, *Proc. of the 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing*, July 3—5, 2013, Caen, France, pp. 227—232.
16. Furtat I. B. Robust control of electric generator with compensation of perturbations, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 5, pp. 785—792.
17. Lofberg J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB, *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE Cat. No.04CH37508)*, 2004, pp. 284—289.
18. Sturm J. F. Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones, *Optimization methods and software*, 1999, vol. 11, pp. 625—653.