

## СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ПО ВХОДУ

Малышева А.Л.<sup>1</sup>, Денисов Д.А.<sup>1</sup>

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Герасимов Д.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

almalysheva@itmo.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР №325073 «Качественное адаптивное управление сложными нелинейными системами с неопределенностями».

### Введение

В работе рассматривается нелинейный объект, представленный в форме строгой обратной связи (strict-feedback). Вектор состояния доступен измерению. Параметры при нелинейных функциях и управлении неизвестны. Данная модель описывает широкий класс объектов, таких как беспилотные летательные, надводные и подводные аппараты ([1]), системы активных подвесок ([2]), гидравлические системы ([3]). В основе разработки адаптивного управления такими системами лежит метод адаптивного бэкстеппинга с модульными идентификаторами [4]. Модульный подход позволяет разделить процедуры вывода закона управления и настройки параметров. Предложенная в [4] процедура, обладает существенным недостатком, который заключается в том, что в модель ошибки замкнутой системы входит величина скорости настраиваемых параметров, которая негативно влияет на ошибку управления. В целях преодоления данной проблемы в [5] предлагается использовать в виртуальных и действительном законах управления старшие производные от настраиваемых параметров. Производные в этом методе рассчитываются с помощью алгоритма высокого порядка [6]. В [7] предлагается использование алгоритма адаптации с ускоренной параметрической сходимостью, построенного на базе схемы Крейссельмейера [8], что позволило существенно увеличить скорость сходимости ошибки управления к нулю. Следует отметить, что потенциальные возможности предложенных решений ограничиваются тем, что в них алгоритмы адаптивного бэкстеппинга сводятся к использованию динамической модели ошибки замкнутой системы, как следствие, применению алгоритма адаптации с расширенной ошибкой, скорость настройки которого зависит от скорости изменения настраиваемых параметров. В целях решения данной проблемы, предлагается модификация алгоритма адаптивного бэкстеппинга, предложенного в [5] и [7], и введения в виртуальные и действительный законы управления динамических компенсирующих членов (ДКЧ), позволяет получить относительно простую статическую модели ошибки.

### Основная часть

В работе разработан алгоритм адаптивного управления по состоянию для параметрически неопределенной нелинейной устойчивой системы в каскадной форме с несогласованными неопределенностями, с ограничением на величину управления типа «насыщение», обеспечивающий:

- 1) ограниченность всех сигналов в замкнутой системе;
- 2) стремление выхода объекта к выходу эталонной модели;
- 3) ускоренная сходимость параметрической ошибки регулятора;
- 4) компенсация негативного влияния высокой скорости настройки параметров на ошибку управления.

В работе используются следующие методы:

- 1) схема Морза, сводящая задачу к статической модели ошибки;
- 2) встраивание старших производных настраиваемых параметров в закон управления для компенсации влияния скорости настройки параметров на ошибку управления;
- 3) схема Крейссельмейера (или алгоритм с расширением памяти регрессора), которая дает ускоренную сходимость параметров и возможность найти производные более высоких порядков оценки параметров.

На основе метода модульного адаптивного бэкстеппинга предлагается решение задачи, обладающего следующей новизной: объединение описанных методов с учетом ограничения на управление с помощью фильтров антивиндапа.

Анализ устойчивости системы проведен с помощью метода Ляпунова. Для демонстрации работы алгоритма было проведено компьютерное моделирование.

### **Выводы**

Предложен закон управления каскадными нелинейными системами с параметрической неопределенностью и нарушенными условиями согласования при ограничении на управление. Проведено моделирование в среде MatLab/Simulink, которое иллюстрирует свойства закона управления.

### **Литература**

1. Godhavn J.M., Fossen T.I., Berge S. Nonlinear and adaptive backstepping designs for tracking control of ships // *Int. J. on Adaptive Control and Signal Processing*. — 1998. — Vol. 12, no. 8. — P. 649–670.
2. Wang J.Y., Sun L.Y. Design of semi-active air suspension system based on backstepping sliding mode control // *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*. — 2017. — P. 4378–4382.
3. Guo Q., Yu T., Jiang D. High-gain observer-based output feedback control of single-rod electro-hydraulic actuator // *IET Control Theory & Applications*. — 2015. — Vol. 9, no. 16. — P. 2395–2404.
4. Krstić M., Kanellakopoulos I., Kokotović P. *Nonlinear and Adaptive Control Design*. — New York : Wiley, 1995.
5. Nikiforov V., Voronov K. Adaptive Backstepping with High-order Tuner // *Automatica*. — 2001. — Vol. 37. — P. 1953–1960.
6. Morse A. High-order Parameter Tuners for the Adaptive Control of Linear and Nonlinear Systems // In A. Isidori, & T. J. Tarneds., *Systems, Models and Feedback: Theory and Applications*, 'Basel: Birkhäuser. — 1992. — P. 339–364.
7. Nikiforov V., Gerasimov D., Pashenko A. Modular adaptive backstepping design with a high-order tuner // *IEEE Trans. Automatic Control*. — 2022. — Vol. 67, no. 5. — P. 2663–2668.
8. Kreisselmeier G. Adaptive observers with exponential rate of convergence // *IEEE Transactions on Automatic Control*. — 1977. — Feb. — Vol. 22, no. 1. — P. 2–8.