

СИНТЕЗ КВАЗИТЕРМИНАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

В.К. Завадский, В.П. Иванов, Е.Б. Каблова, Л.Г. Кленовая

Аннотация. В классе линейных алгоритмов управления линейными стационарными многосвязными объектами выделен подкласс квазитерминальных алгоритмов с неявным прицеливанием в краевые условия, скользящие вдоль по программе требуемого изменения координат вектора состояния и отдаленные от текущего момента времени на фиксированный интервал. Прицеливание (компенсация прогнозируемого промаха) реализуется путем вычисления программ изменения компонент вектора будущего управления в виде отрезков степенного ряда, зависящих от будущего времени и обеспечивающих решение двухточечной граничной задачи. Показано, что в идеализированных модельных условиях полной управляемости и наличия точной информации о состоянии и уравнениях объекта управления, а также мгновенной и точной реализации вычисленных команд квазитерминальный алгоритм обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой многосвязной системы и сколь угодно высокую наперед заданную скорость сходимости переходных процессов независимо от наличия устойчивости модели объекта управления. Предложен достаточно простой и удобный для реализации в среде MATLAB метод синтеза алгоритма, основанный на применении матричного представления модели объекта управления в пространстве состояний и аппарата экспоненциальных функций матриц. Отмечено, что квазитерминальные алгоритмы могут применяться в многосвязных системах стабилизации и, в частности, в системах стабилизации подвижных терминальных объектов относительно траекторий, вычисляемых системой терминального управления.

Ключевые слова: терминальное управление, прогнозирующая модель, асимптотическая устойчивость.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сухарулдзе Ю.Г.* Баллистика и наведение летательных аппаратов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 407 с. [*Sikharulidze, Yu.G.* Ballistika i navedenie letatel'nykh apparatov. – М.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2011. – 407 s. (In Russian)]
2. *Завадский В.К., Иванов В.П., Каблова Е.Б., Кленовая Л.Г.* Алгоритмы терминального управления с прогнозированием невязок подвижных краевых условий // Проблемы управления. – 2017. – № 3. – С. 57–63. [*Zawadzki, V.K., Ivanov, V.P., Kablova, E.B., Klenovaya, L.G.* Terminal control algorithms with predictions of the moving boundary conditions residuals // Control Sciences. – 2017. – No. 3. – P. 1226–1233. (In Russian)]
3. *Завадский В.К.* Условно-оптимальное управление в терминальных системах с прогнозированием // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 9. – С. 63–72. [*Zavadskii, V.K.* Conditionally optimal control in terminal systems with prediction // Automation and remote control. – 1991. – No. 9. – P. 63–72. (In Russian)]
4. *Батенко А.П.* Управление конечным состоянием движущихся объектов. – М.: Советское радио, 1977. – 256 с. [*Batenko, A.P.* Upravlenie konechnym sostoyaniem dvizhushchikhsya ob'ektov. – М.: Sovetskoe radio, 1977. – 256 s. (In Russian)]
5. *Гулько Ф.Б., Новосельцева Ж.А.* Применение методов прогнозирования в задачах синтеза систем автоматического управления // VIII Всесоюз. совещание по проблемам управления. Таллин, октябрь 1980 г. Тез. докл., кн. 1. – С. 32–34. [*Gul'ko, F.B., Novosel'tseva, Zh.A.* Primenenie metodov prognozirovaniya v zadachakh sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya // VIII Vsesoyuzn. soveshchanie po problemam upravleniya. Tallin, oktyabr' 1980 g. Tez. dokl., kn. 1. – S. 32–34. (In Russian)]
6. *Kamyar, R. Taheri, E.* Aircraft Optimal Terrain / Threat-Based Trajectory Planning and Control // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2014. – Vol. 37, No. 2. – P. 466–483.
7. *Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.С.* Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. – М.: Наука, 1977. – 272 с. [*Krasovskii, A.A., Bukov, V.N., Shendrik, V.S.* Universal'nye algoritmy optimal'nogo upravleniya nepreryvnymi protsessami. – М.: Nauka, 1977. – 272 s. (In Russian)]

8. *Klaučo, M., Kalúz, M., Kvasnica, M.* Real-time implementation of an explicit MPC-based reference governor for control of a magnetic levitation system // *Control Engineering Practice*. – 2017. – Vol. 60, No. 3. – P. 99–105.
9. *Буков В.Н.* Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1987. – 232 с. [*Bukov, V.N.* Adaptivnyye prognoziruuyushchie sistemy upravleniya poletom. – М.: Nauka, 1987. – 232 s. (In Russian)]
10. *Langson, W., Chryssoschoos, I., Rakovic, S.V., Mayne, D.Q.* Robust model predictive control using tubes // *Automatica*. – 2004. – Vol. 40, No. 1. – P.125–133.
11. *Веремей Е.И., Еремеев В.В., Сотникова М.В.* Введение в задачи управления на основе предсказаний // *Model Predictive Control Toolbox*. [*Veremei, E.I., Eremeev, V.V., Sotnikova, M.V.* Vvedenie v zadachi upravleniya na osnove predskazanii. (In Russian)] – URL: [http // www.matlab.exponenta.ru>modelpredict /book1/](http://www.matlab.exponenta.ru>modelpredict/book1/) .
12. *Проскурников А.В., Якубович В.А.* Синтез регуляторов, обеспечивающих инвариантность системы управления // Тр. науч. семинара «70 лет теории инвариантности». Москва, 2 июня 2008 г. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – С. 102–120. [*Proskurnikov, A.V., Yakubovich, V.A.* Sintez regulyatorov, obespechivayushchikh invariantnost' sistemy upravleniya // Tr. nauchnogo seminarra «70 let teorii invariantnosti». Moskva, 2 iyunya 2008 g. – М.: Izd-vo LKI, 2008. – S. 102–120. (In Russian)]
13. *Гантмахер Ф.Р.* Теория матриц / Изд. третье. – М.: Машиностроение, 1967. – 575 с. [*Gantmakher, F.R.* Teoriya matrits / Izd. tret'e. – М.: Mashinostroenie, 1967. – 575 s. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Поступила в редакцию 28.12.2017, после доработки 5.04.2019.

Принята к публикации 28.05.2019.

Завадский Владимир Константинович – канд. техн. наук,

Иванов Владимир Петрович – д-р техн. наук,

Каблова Елена Борисовна – инженер,

Кленовая Людмила Григорьевна – инженер,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ vladguc@ipu.ru.

QUASI-TERMINAL CONTROLLERS SYNTHESIS

V.K. Zavadsky[#], V.P. Ivanov, E.B. Kablova, L.G. Clenovaya

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]✉ vladguc@ipu.ru

Abstract. In the class of linear algorithms of linear stationary multi-connected objects control the subclass is distinguished of quasi-terminal algorithms with implicit aiming at the boundary conditions moving along the program of the required change of the state vector coordinates and being at a fixed interval from the current time. Aiming is realized by calculating the programs of changing the future control vector components in the form of power series segments that depend on the future time and provide a solution of the two-point boundary value problem. In idealized model conditions of the complete controllability and the availability of an accurate information about the control object state and equations, as well as of the instantaneous and accurate implementation of the calculated commands, the quasi-terminal algorithm provides the asymptotic stability of a closed multi-connected system and as high pre-set rate of transients convergence as needed, regardless of whether the control object model is stable. The relatively simple and easy to implement in MATLAB non-optimization method of algorithm synthesis is suggested based on the use of the matrix representation of the control object model in the state space and of the apparatus of exponential functions of matrices. Quasi-terminal algorithms can be used in multi-connected stabilization systems and, in particular,

in stabilization systems of mobile terminal objects with respect to trajectories calculated by the terminal control system.

Keywords: terminal control, predictive model, asymptotic stability.