

УДК 618.52

Алгоритм управления на основе решения уравнения Риккати с параметрами, зависящими от состояния

Комков Александр Евгеньевич(*)

komkov.ae@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Исследован способ оптимального управления нелинейным динамическим объектом в условиях неконтролируемых возмущений. Для управления высокоманевренным летательным аппаратом предложено использовать эквивалентное представление нелинейных моделей в виде линейных моделей с параметрами, зависящими от состояния. Представлен алгоритм управления с активным подавлением помех, компенсатором и адаптивным наблюдателем.

Ключевые слова: высокоманевренный летательный аппарат, оптимальное управление, уравнение Риккати, активное подавление помех, наблюдатель

A control algorithm based on solving the Riccati equation with state-dependent parameters

Komkov, Alexander Evgenievich(*)

komkov.ae@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. A method for optimal control of a nonlinear dynamic object under conditions of uncontrolled disturbances is investigated. To control a highly maneuverable aircraft, it is proposed to use an equivalent representation of nonlinear models in the form of linear models with state-dependent parameters. A control algorithm with active interference suppression, compensator and adaptive observer is presented.

Keywords: highly maneuverable aircraft, optimal control, Riccati equation, active interference suppression, observer

Введение. Впервые проблема управления нелинейными объектами с их эквивалентным представлением в виде линейных моделей (State Dependent Coefficient, SDC) с параметрами, зависящими от состояния, и функционалами, матрицы штрафа которых также зависят от состояния объекта, была сформулирована в начале 60-х годов XX столетия в работе [1]. С конца 90-х годов прошлого столетия метод привлекает все большее внимание со стороны ученых и практиков. Линейность структуры преобразованной нелинейной системы и квадратический функционал качества при синтезе оптимального управления позволяют перейти от необходимости поиска решений уравнения Гамильтона — Якоби — Беллмана (HJB) к уравнению типа Риккати с параметрами, зависящими от состояния (SDRE) [1, 2].

Материалы и методы. Рассматривается задача синтеза нелинейного оптимального закона отслеживания с обратной связью по выходу системы на основе решения уравнения Риккати с зависящими от состояния параметрами.

Чтобы решить линейно-квадратическую оптимальную задачу слежения за выходом системы, исследована стандартная проблема LQR, которая оптимизирует взвешенную сумму выхода исследуемой системы. Решение задачи оптимального управления заключается в определении матрицы, являющейся решением уравнения Риккати. Рассмотрена нелинейная динамическая модель продольного движения высокоманевренного летательного аппарата (ВМЛА). Использована тестовая нелинейная модель для синтеза системы управления на основе SDRE подхода. Разработан регулятор на основе алгоритма управления с компенсатором ADRC [3, 4].

Результаты. Разработана система управления ВМЛА на основе априорных математических моделей с неполной информацией о изменяющихся параметрах, входных воздействиях и помехах, которая является не робастной. Поэтому предполагается использовать наблюдатель расширенного состояния (ESO) для оценивания и компенсации помех, вызванных окружающей средой, а также неопределенности системы, подвергающейся воздействию неконтролируемых возмущений.

Обсуждение полученных результатов. Управление ВМЛА при неопределенности обычно предусматривает использование априорной информации и знаний для построения эталонных математических моделей, в которых предполагаются некоторые упрощения и допущения, определяемые конкретными полетами. Таким образом, робастность системы управления, учитывающая внутренние неопределенности характеристик самого ВМЛА и внешних возмущений окружающей среды в основном зависит от характеристик алгоритма управления. Одним из эффективных подходов к повышению робастности является построение наблюдателя возмущений и компенсация их влияния на полученные оценки.

Управления с активным подавлением помех (Active Disturbance Rejection Control (ADRC)) — новый нелинейный алгоритм управления, используемый в последние годы в различных областях. Он не требует знания точной математической модели объекта, очень устойчив к изменениям параметров и внешними возмущениями не только в некоторых рабочих зонах, но и во всей рабочей области. Оценивая и компенсируя влияние различного рода внешних возмущающих воздействий и влияние изменения параметров объекта в режиме реального времени в сочетании с нелинейной обратной связью, алгоритм управления может улучшить статические и динамические характеристики объекта, повысить надежность и адаптивность.

Регулятор ADRC является модификацией ПИД-регулятора, состоит из четырех частей: отслеживающего дифференциатора (TD), наблюдателя расширенного состояния (ESO) и нелинейной комбинации обратной связи (NLSEF) и комбинированного управления.

Отслеживающий дифференциатор предназначен для того, чтобы управляемая величина динамической системы быстро отслеживал входной сигнал.

Нелинейная обратная связь позволяет при пропорционально-интегрально-дифференциальном законе регулирования управляющее воздействие опреде-

лять линейной функцией отклонения выходной величины от требуемого значения, его интеграла и производной отклонения [5]. Но такая комбинация имеет низкую эффективность регулирования, поэтому для повышения быстродействия переходного процесса используется нелинейная обратная связь.

Заключение. В ADRC-регуляторе применяется комбинированное управление, при котором управляющее воздействие состоит из не только из управляющего воздействия по отклонению от требуемого значения, а также включает управление по внешними возмущающими воздействиями и изменению параметров динамического объекта.

Список источников

- [1] Афанасьев В.Н. *Управление нелинейными неопределенными динамическими объектами*. Москва, Либроком/URSS, 2015.
- [2] Narendra K.S. Neural network for control: Theory and practice. *Proc. of the IEEE*, 1996, vol. 84, no 10, pp. 1385–1406.
- [3] Hu Y., Shen K., Neusypin K.A., Proletarsky A.V., Selezneva M.S. Hierarchic controllability analysis in high-dynamic guidance for autonomous vehicle landing. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, vol. 58 (3), pp. 1545–1557.
- [4] Hu Y., Neusypin K.A., Shen K. Quantifying Controllability for Nonlinear State-Dependent Riccati Equation Control. *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2022, pp. 80–85. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896348>
- [5] Rauch H.E., Schaecter D.B. Neural networks for control, identification, and diagnosis. *Proc. World space congress*, 1992, vol. 14(11), pp. F4.4–M1.06. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)90313-1](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)90313-1)