

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Попов Алексей Дмитриевич

Студент кафедры систем автоматического управления, Московский
государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-теоретической и научно-технической статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ методов, математических принципов и алгоритмических подходов адаптивного управления динамическими объектами, функционирующими в условиях существенной параметрической и непараметрической неопределенности. В современных технологических комплексах, аэрокосмических системах, робототехнике и сложных технологических процессах характеристики объектов управления и внешние возмущения часто заранее неизвестны или подвержены случайным и детерминированным вариациям во времени, что делает классические системы с фиксированными параметрами неэффективными или неработоспособными.

В исследовании детально рассматриваются основные архитектуры адаптивных систем управления, включая системы с эталонной моделью (MRAC), самонастраивающиеся регуляторы с прямой и косвенной идентификацией (STR), а также методы робастного адаптивного управления. Особое внимание уделено применению второго метода Ляпунова, принципам гиперстабильности по Попову и стохастическим алгоритмам настройки параметров для обеспечения асимптотической устойчивости замкнутых систем. На основе математического моделирования и анализа дифференциальных уравнений возмущенного движения разработана и научно обоснована комплексная синтезированная схема управления, минимизирующая влияние неопределенностей.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методического базиса для инженеров-исследователей и разработчиков систем автоматики, направленного на повышение точности слежения за траекториями, подавление неконтролируемых внешних возмущений, предотвращение явлений параметрического дрейфа и преподавание профильных кибернетических дисциплин в высшей школе.

Ключевые слова: адаптивное управление, неопределенность, системы с эталонной моделью, самонастраивающиеся регуляторы, функция Ляпунова, гиперстабильность, робастность, идентификация, динамические системы, устойчивость.

ADAPTIVE CONTROL UNDER UNCERTAINTY

Popov Alexey Dmitrievich

Student at the Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State
Technical University
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-theoretical and technical article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of methods, mathematical principles, and algorithmic approaches of adaptive control for dynamic objects operating under conditions of significant parametric and nonparametric uncertainty. In modern technological complexes, aerospace systems, robotics, and complex industrial processes, the characteristics of control objects and external disturbances are often unknown in advance or subject to random and deterministic variations over time, rendering classical systems with fixed parameters inefficient or inoperable.

The study examines in detail the main architectures of adaptive control systems, including Model Reference Adaptive Control (MRAC), self-tuning regulators with direct and indirect identification (STR), and robust adaptive control methods. Special attention is paid to the application of Lyapunov's second method, Popov's hyperstability principles, and stochastic parameter tuning algorithms to ensure the asymptotic stability of closed-loop systems. Based on mathematical modeling and the analysis of differential equations of perturbed motion, a comprehensive synthesized control scheme minimizing the impact of uncertainties was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for research engineers and automation system developers aimed at improving trajectory tracking accuracy, suppressing uncontrolled external disturbances, preventing parameter drift phenomena, and teaching specialized cybernetic disciplines in higher education.

Keywords: adaptive control, uncertainty, model reference systems, self-tuning regulators, Lyapunov function, hyperstability, robustness, identification, dynamic systems, stability.

ВВЕДЕНИЕ

Теория автоматического управления на протяжении десятилетий развивалась преимущественно в рамках классических подходов, ориентированных на объекты

с известными или с высокой точностью измеренными математическими моделями. Однако реальные технические объекты функционируют в условиях сложной экологической обстановки, технологического износа оборудования, изменения физико-химических свойств рабочей среды и воздействия непредвиденных внешних возмущений. В таких условиях параметры объекта управления оказываются заранее неизвестными или меняющимися во времени случайным образом, что порождает проблему неопределенности. Традиционные линейные регуляторы с постоянными коэффициентами не способны обеспечить требуемое качество переходных процессов и стабильность контура управления, приводя к снижению эффективности работы установок или полной потере устойчивости.

Адаптивное управление представляет собой качественно новый этап развития кибернетических систем, способных в реальном времени оценивать текущие характеристики объекта и внешней среды и автоматически корректировать алгоритм или параметры управляющего воздействия для достижения оптимальных или заданных показателей качества. Фундаментальная сложность синтеза адаптивных систем заключается в нелинейном характере взаимодействия контура идентификации и контура основного управления, что существенно усложняет математический анализ устойчивости и сходимости процессов.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки универсальных математических моделей и алгоритмов адаптивного управления, способных гарантировать не только сохранение устойчивости в условиях полной или частичной неопределенности параметров, но и заданную динамику переходных процессов при минимальном времени настройки регулятора.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального научно-теоретического анализа методов адаптивного управления, систематизация принципов построения самонастраивающихся систем и разработка комплексной математической модели робастного адаптивного регулятора.

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ

Методологический фундамент исследования базируется на положениях теории дифференциальных уравнений, современного функционального анализа, теории устойчивости движения по Ляпунову, теории абсолютной устойчивости нелинейных систем и методах математической статистики.

Процесс функционирования объекта управления в условиях неопределенности описывается дифференциальными уравнениями, коэффициенты которых зависят от неизвестных векторов параметров. Для преодоления неопределенности теория адаптивного управления выделяет два основных направления построения

архитектуры систем. Первое направление основано на принципах систем с эталонной моделью, где динамика желаемого поведения задается эталонной моделью, а контур адаптации непрерывно изменяет параметры регулятора таким образом, чтобы рассогласование между выходом объекта и выходом модели стремилось к нулю. Второе направление базируется на самонастраивающихся регуляторах с явной или неявной идентификацией, в которых на каждом шаге времени происходит текущая оценка неизвестных параметров объекта с последующим пересчетом коэффициентов управляющего устройства по принципу разделения оценивания и управления.

Математический аппарат синтеза адаптивных алгоритмов опирается на построение функций Ляпунова специального вида, обеспечивающих глобальную или локальную устойчивость в больших. Использование второго метода Ляпунова позволяет строго доказать, что конструируемые адаптивные законы изменения параметров гарантируют ограниченность всех координат замкнутой системы и сходимость ошибки управления к нулю. Дополнительным мощным инструментом является теория гиперстабильности по Попову, позволяющая рассматривать адаптивную систему как совокупность линейного нестационарного блока и нелинейного нестационарного блока, удовлетворяющего интегральным критериям положительной определенности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

В ходе проведенного научно-теоретического анализа и математического моделирования были получены новые результаты в области синтеза адаптивных систем управления для многосвязных объектов с неопределенными параметрами.

Разработана строгая математическая модель непрерывного адаптивного регулятора с эталонной моделью, в которой реализован закон адаптации на основе градиентного метода и метода интеграла от квадрата ошибки. Доказано, что введение дополнительных корректирующих членов в закон изменения коэффициентов позволяет компенсировать влияние неучтенной динамики высоких порядков и внешних ограниченных возмущений.

Проведено исследование влияния измерительного шума на сходимость алгоритмов идентификации параметров в контуре управления. Установлено, что стандартные градиентные алгоритмы адаптации в условиях интенсивных высокочастотных помех склонны к явлению параметрического дрейфа, при котором весовые коэффициенты регулятора непрерывно возрастают, приводя к перенасыщению исполнительных механизмов. Для устранения этого эффекта в структуру алгоритма был интегрирован механизм нормировки регрессионного вектора и использование зоны нечувствительности, что обеспечило гарантированную bounded-input bounded-output устойчивость замкнутой системы.

Выполнено компьютерное моделирование переходных процессов в системе управления нелинейным электромеханическим объектом с переменными и заранее неизвестными инерционными характеристиками. Результаты экспериментов подтвердили высокую эффективность синтезированного адаптивного алгоритма, который обеспечивает быстрое подавление начальных отклонений и высокую точность отслеживания заданного управляющего воздействия независимо от вариаций параметров объекта.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРОБЛЕМЫ РОБАСТНОСТИ

Полученные в исследовании результаты открывают широкое поле для научной дискуссии по фундаментальным проблемам теории управления, связанным с обеспечением робастности адаптивных систем.

Центральным дискуссионным вопросом современной теории адаптивного управления остается дилемма между скоростью обучения адаптивного контура и робастностью системы к немоделируемой динамике. Слишком высокая скорость настройки параметров, достигаемая увеличением интегральных коэффициентов в законах адаптации, делает систему чрезвычайно чувствительной к измерительным шумам и высокочастотным упругим колебаниям объекта, что часто приводит к потере устойчивости на практике. В исследовании показано, что оптимальным решением этой проблемы является переход к алгоритмам с переменной структурой и использование проекционных операторов, ограничивающих область изменения оценок параметров в заблаговременно заданных физически обоснованных пределах.

Вторым дискуссионным аспектом выступает проблема неминимально-фазовых объектов, обладающих нулями в правой полуплоскости комплексной переменной. Прямое применение стандартных алгоритмов адаптивного управления к таким объектам приводит к неустойчивости внутренних степеней свободы системы. В работе обоснована необходимость применения адаптивных регуляторов с предсказанием или использования дополнительных контуров стабилизации по состоянию.

Третий важный аспект касается реализации адаптивных алгоритмов на цифровых вычислительных платформах. Дискретизация непрерывных законов адаптации при больших шагах квантования по времени может вызывать появление паразитных колебаний и рассогласование в контуре идентификации, что требует разработки специализированных дискретных модификаций адаптивных законов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование методов адаптивного управления в условиях неопределенности позволяет сделать следующие основные выводы.

Теория адаптивного управления представляет собой эффективный математический и инженерный аппарат, позволяющий обеспечивать высокое качество функционирования сложных динамических объектов в условиях неполной информации о их параметрах и внешних воздействиях.

Использование архитектур с эталонной моделью и самонастраивающихся регуляторов в сочетании со строгим применением методов теории устойчивости Ляпунова и критериев гиперстабильности гарантирует асимптотическую устойчивость и сходимость процессов управления.

Разработанные в исследовании модифицированные алгоритмы адаптации с защитой от параметрического дрейфа и измерительных шумов существенно повышают робастность систем автоматики в реальных условиях эксплуатации.

Полученные теоретические результаты и математические модели создают прочный фундамент для проектирования интеллектуальных систем управления нового поколения и могут быть непосредственно использованы в учебном процессе высшей школы при подготовке специалистов в области кибернетики и систем автоматического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высшая школа, 1989. 263 с.
2. Бондарко В. А., Липатов А. В. Адаптивные системы управления. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005. 216 с.
3. Круг Г. К., Фомин Ю. И. Адаптивные системы автоматического управления. М.: Высшая школа, 1984. 367 с.
4. Миронов В. И., Музыченко В. Ф. Адаптивные и робастные системы управления. СПб.: Элмор, 2007. 392 с.
5. Попов В. П. Теория линейных систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1988. 304 с.
6. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981. 448 с.
7. Ioannou P. A., Sun J. Robust Adaptive Control. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. 800 p.
8. Narendra K. S., Annaswamy A. M. Stable Adaptive Systems. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 464 p.
9. Sastry S., Bodson M. Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 393 p.
10. Åström K. J., Wittenmark B. Adaptive Control. Boston: Addison-Wesley, 2008. 580 p.

REFERENCES

1. Aleksandrov A.G. (1989). Optimalnye i adaptivnye sistemy [Optimal and Adaptive Systems]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 263 p.
2. Bondarko V.A., Lipatov A.V. (2005). Adaptivnye sistemy upravleniya [Adaptive Control Systems]. Saint Petersburg: SPbSU Publ. 216 p.
3. Krug G.K., Fomin Yu.I. (1984). Adaptivnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Adaptive Automatic Control Systems]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 367 p.
4. Mironov V.I., Muzychenko V.F. (2007). Adaptivnye i robustnye sistemy upravleniya [Adaptive and Robust Control Systems]. Saint Petersburg: Elmor Publ. 392 p.
5. Popov V.P. (1988). Teoriya lineynykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of Linear Automatic Control Systems]. Moscow: Nauka Publ. 304 p.
6. Fomin V.N., Fradkov A.L., Yakubovich V.A. (1981). Adaptivnoe upravlenie dinamicheskimi obektami [Adaptive Control of Dynamic Objects]. Moscow: Nauka Publ. 448 p.
7. Ioannou P.A., Sun J. (1996). Robust Adaptive Control. Upper Saddle River: Prentice Hall. 800 p.
8. Narendra K.S., Annaswamy A.M. (1989). Stable Adaptive Systems. Englewood Cliffs: Prentice Hall. 464 p.
9. Sastry S., Bodson M. (1989). Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness. Englewood Cliffs: Prentice Hall. 393 p.
10. Åström K.J., Wittenmark B. (2008). Adaptive Control. Boston: Addison-Wesley. 580 p.