

УДК 681.511.4

Добродеев Александр Викторович, аспирант, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Москва

Демкин Василий Иванович, доцент, к.т.н, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Москва

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Аннотация

Статья посвящена анализу современных методов управления нелинейными динамическими системами с интеграцией классических подходов, адаптивных алгоритмов и методов машинного обучения. Проведен анализ теоретических основ нелинейных систем управления, включая метод Ляпунова и гармоническую линеаризацию. Рассмотрены методы синтеза регуляторов: параметрический синтез ПИД-регуляторов, регуляторы переменной структуры и метод обратного шага. Детально изучены направления адаптивного управления, включая модельно-ориентированное адаптивное управление и нейросетевые подходы. Отдельное внимание уделено ядровым методам машинного обучения в задачах идентификации и синтеза законов управления. Представлена концепция интеграции трех подходов для создания многоуровневых систем управления с повышенной надежностью. Приведены примеры практического применения в электромеханических системах и технологических процессах. Определены перспективные направления исследований в области синтеза интеллектуальных систем управления.

Annotation

This article presents a comprehensive analysis of contemporary methods for nonlinear dynamical system control, integrating classical control theory, adaptive algorithms, and machine learning methods. Theoretical foundations of nonlinear control systems are

investigated, encompassing Lyapunov stability analysis and harmonic linearization techniques. The paper reviews controller design methodologies including PID parameter tuning, variable structure regulators, and backstepping methods. Adaptive control approaches are examined in detail, covering model reference adaptive control and neural network-based strategies. Emphasis is placed on kernel methods for system identification and synthesis of control laws. A hierarchical framework combining these three complementary approaches is proposed to develop reliable multi-level control architectures. Practical implementations in electromechanical systems and process control are illustrated. Future research directions for intelligent control system development are outlined.

Ключевые слова: нелинейные системы управления, адаптивные регуляторы, ядровые методы, синтез управления, теория Ляпунова, самонастраивающиеся системы.

Keywords: nonlinear control systems, adaptive regulators, kernel methods, control synthesis, Lyapunov theory, self-tuning systems.

Введение

Современные технические системы характеризуются высокой степенью нелинейности и параметрической неопределенностью. Классические линейные методы управления становятся неэффективными при работе с такими объектами. Потребность в универсальных методах синтеза регуляторов, способных функционировать при неполной априорной информации об объекте, определяет актуальность исследования.

За последнее время развиваются три основных направления: классическая теория нелинейных систем, адаптивное управление и методы машинного обучения. Первое обеспечивает строгое математическое обоснование, второе позволяет адаптировать параметры в реальном времени, третье открывает возможности аппроксимации сложных нелинейных зависимостей.

Теоретические основы нелинейных систем управления

Нелинейные системы управления отличаются невыполнением принципа суперпозиции: реакция на сумму воздействий не равняется сумме реакций на отдельные воздействия [1]. Это приводит к множественным режимам работы и возможности возникновения автоколебаний. Типовые нелинейности в технических системах: ограничения (насыщение), гистерезис, трение, релейные характеристики, статическую нелинейность.

Для работы с нелинейными системами применяются методы фазовой плоскости, гармонической и статистической линеаризации. Метод фазовой плоскости позволяет анализировать поведение систем второго порядка на фазовой плоскости, выявляя предельные циклы и области устойчивости. Метод гармонической линеаризации применяется для систем с периодическими режимами путем замены нелинейного элемента эквивалентной передаточной функцией [1]. Метод статистической линеаризации применим при наличии случайных воздействий. Ограничение всех методов линеаризации состоит в потере информации о нелинейных эффектах, требующей верификации результатов.

Для анализа устойчивости нелинейных систем применяется второй метод Ляпунова. Если для системы существует функция $V(x)$ с положительной определенностью и отрицательной производной вдоль траекторий, то система асимптотически устойчива. Метод применим к нелинейным системам любой размерности, для которых решение дифференциальных уравнений затруднительно, что делает его универсальным и важным с практической точки зрения, несмотря на сложность поиска функции. Критерии Попова и Гольдфарба представляют частотные методы анализа устойчивости систем с нелинейностями. Они широко используются при синтезе регуляторов, гарантирующих устойчивость замкнутой системы.

Адаптивные и самообучающиеся регуляторы

Синтез ПИД-регуляторов для нелинейных объектов основан на линеаризации в рабочих точках, расчете параметров для каждой линеаризованной

модели и интерполяции для промежуточных режимов [2]. Такой подход имеет ряд ограничений, например, потерю информации о нелинейных эффектах при переходах между режимами. Решением этой проблемы является адаптивное управление.

Адаптивное управление автоматически изменяет параметры регулятора в зависимости от характеристик объекта. Исторически первые самонастраивающиеся регуляторы разработаны в 1950-х годах. Современная теория опирается на строгий математический аппарат, обеспечивающий гарантии устойчивости и сходимости. Адаптивные системы разделяют на две категории: косвенного и прямого управления. В системах косвенного управления выполняется идентификация параметров объекта, затем корректируются параметры регулятора. В системах прямого управления адаптация происходит непосредственно в зависимости от ошибки управления [3].

Модельно-ориентированное адаптивное управление (MRAC) – один из развитых подходов в теории адаптивных систем. В MRAC поведение замкнутой системы соответствует поведению эталонной модели путем минимизации разности выходов реальной системы и модели [3].

Самообучающиеся системы – следующий этап развития адаптивных систем, включающий накопление знаний о поведении объекта и формирование стратегий управления. Нейронные сети обеспечивают аппроксимацию произвольных нелинейных зависимостей и адаптацию к изменениям объекта [4].

Ядровые методы в системах управления

Ядровый метод позволяет вычислять скалярные произведения в высокоразмерном пространстве без явного отображения [5]. Это снижает вычислительную сложность и расширяет применимость к задачам с большими объемами данных.

В системах управления ядровые методы применяют для идентификации объектов, классификации режимов работы и прогнозирования. Метод опорных векторов (SVM) обеспечивает высокую точность классификации и хорошую обобщающую способность [5].

Полиномиальные ядра отображают данные в пространство полиномов заданной степени. Радиально-базисные функции (RBF) – гауссовы ядра с бесконечной размерностью пространства отображения и высокой гибкостью аппроксимации. Сигмоидные ядра применяют при моделировании нейронных сетей. RBF-сети используют в системах управления для аппроксимации нелинейных характеристик объектов [5]. Каждый нейрон – радиально-базисная функция с центром в определенной точке пространства состояний, обеспечивающая локальную аппроксимацию. Гауссовские процессы, основанные на ядровых функциях, применяют для вероятностного моделирования систем с неопределенностью.

Синергия ядровых методов и адаптивного управления расширяет возможности создания самообучающихся систем. Ядровые методы идентифицируют нелинейные зависимости в объекте, а адаптивные алгоритмы корректируют параметры на основе полученных моделей.

Интеграция подходов: гибридные системы управления

Интеграция классической теории, адаптивного управления и ядровых методов создает многоуровневую устойчивую архитектуру с адаптивностью и способностью к обучению [2-5]. На нижнем уровне классические регуляторы обеспечивают базовую устойчивость в известных режимах. Средний уровень – адаптивный механизм, корректирующий параметры при изменениях объекта. Верхний уровень – ядровые методы для идентификации нелинейных зависимостей и формирования стратегий адаптации. Такая иерархия комбинирует строгое математическое обоснование классических методов, гибкость адаптивных алгоритмов и высокую вычислительную способность методов машинного обучения [2-5].

Обучение в гибридных системах происходит на нескольких временных масштабах. Быстрая адаптация параметров регулятора выполняется в реальном времени на основе текущей ошибки. Медленное обучение ядровой аппроксимации

проводится периодически по накопленным данным, улучшая качество модели и расширяя область применимости.

Методы машинного обучения с нелинейными ядрами автоматически определяют оптимальную структуру аппроксиматора. Это решает проблему переобучения и обеспечивает компактность модели, критичную для реализации в реальном времени.

Практические приложения

В электромеханических системах нелинейности обусловлены насыщением магнитных цепей, трением и другими факторами. Исследования селективно-инвариантных электромеханических систем показывают, что адаптивные регуляторы с ядровой аппроксимацией нелинейностей повышают точность позиционирования по сравнению с традиционными ПИД-регуляторами. Принципиально важна компенсация изменяющегося момента инерции и вязкого трения. Адаптивный регулятор на основе RBF-сетей обеспечивает стабильное качество управления во всем диапазоне рабочих режимов.

Технологические процессы характеризуются существенными нелинейностями, запаздываниями и взаимным влиянием переменных [6]. Гибридные системы управления интегрируют классические методы, адаптивные алгоритмы и ядровые методы для решения комплексных задач оптимизации. Система автоматически идентифицирует изменения характеристик процесса, адаптирует параметры регуляторов и прогнозирует отклонения от заданного режима, что значительно повышает эффективность и безопасность производства.

В робототехнике нелинейности обусловлены кинематическими особенностями, изменением нагрузки и взаимодействием с окружающей средой. Адаптивные системы управления манипуляторами используют ядровые методы для распознавания ситуаций и выбора стратегии управления. Такие системы демонстрируют автономность и способность к обучению в процессе эксплуатации. Методы машинного обучения позволяют роботам адаптироваться к новым задачам без полного перепрограммирования.

Заключение

Проведенный анализ демонстрирует активное развитие трех взаимодополняющих направлений управления нелинейными системами: классической теории, адаптивного управления и методов машинного обучения. Ключевой результат – концепция интеграции трех подходов в единую многоуровневую архитектуру управления. Такая интеграция позволит обеспечить одновременно робастность классических методов, гибкость адаптивных алгоритмов и вычислительные способности методов машинного обучения.

Открытыми остаются вопросы выбора оптимальной структуры ядровой аппроксимации, обеспечения реального времени при ограниченных вычислительных ресурсах и гарантии сходимости обучения в замкнутом контуре. Перспективные направления включают автоматический выбор ядра, создание распределенных систем управления и применение глубоких ядровых сетей для особо сложных нелинейных зависимостей.

Литература

1. Евсюков В.Н. Нелинейные системы автоматического управления: учебное пособие для студентов вузов / В.Н. Евсюков. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2007. - 172 с.
2. Гринкевич, В. А. Синтез регулятора для нелинейных объектов с запаздыванием методом разделения движений с применением критериев устойчивости / В. А. Гринкевич // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1(81). – С. 39-60. – DOI 10.17212/2782-2001-2021-1-39-60. – EDN YVGZVT.
3. Калдыбаев, Р. С. Адаптивные (самонастраивающиеся) системы автоматического управления / Р. С. Калдыбаев // Международный студенческий научный вестник. – 2020. – № 6. – С. 8. – EDN FWPAXS.
4. Воевода, А. А. Синтез нейросетевого регулятора управления нелинейной моделью перевернутого маятника на тележке / А. А. Воевода, В. И. Шипагин

// Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2020. – № 2-3(79). – С. 25-36. – DOI 10.17212/1814-1196-2020-2-3-25-36. – EDN MTQRCS.

5. Сидоров, И. Г. Алгоритм машинного обучения с использованием функций ядра в дифференциальной двухуровневой кооперативной игре N+1 лиц / И. Г. Сидоров // Устойчивое развитие: исследования, инновации, трансформация : Материалы XVIII Международного конгресса с элементами научной школы для молодых ученых. В 2-х томах, Москва, 08–09 апреля 2022 года / Отв. редакторы выпуска: А.В. Семёнов, П.Н. Кравченко. Том 1. – Москва: Московский университет им. С.Ю. Витте, 2022. – С. 490-499. – EDN WAVPEW.
6. Усманов, А. И. Анализ современных методов автоматизации неразрушающего контроля качества и диагностики электронных компонентов / А. И. Усманов, А. В. Козлова, В. Г. Мешков // Вестник МГТУ "Станкин". – 2024. – № 2(69). – С. 161-172. – EDN NQCPBQ.

Literature

1. Evsyukov, V.N. Nonlinear Automatic Control Systems: A Textbook for University Students. Orenburg: Orenburg State University, 2007, 172 p.
2. Grinkevich, V.A. Synthesis of a Controller for Nonlinear Plants with Delay by the Motion Separation Method Using Stability Criteria. V.A. Grinkevich: Data Analysis and Processing Systems. 2021, No. 1(81): 39–60. DOI 10.17212/2782-2001-2021-1-39-60. EDN YVGZVT.
3. Kaldybaev, R.S. Adaptive (Self-Adjusting) Automatic Control Systems. International Student Scientific Bulletin. – 2020. – No. 6. – P. 8. – EDN FWPAXS.
4. Voevoda, A. A. Synthesis of a neural network controller for controlling a nonlinear model of an inverted pendulum on a cart / A. A. Voevoda, V. I. Shipagin // Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University. – 2020. – No. 2-3(79). – P. 25-36. – DOI 10.17212/1814-1196-2020-2-3-25-36. – EDN MTQRCS.

5. Sidorov, I. G. Machine learning algorithm using kernel functions in a differential two-level cooperative game $N + 1$ persons / I. G. Sidorov // Sustainable development: research, innovation, transformation: Proceedings of the XVIII International Congress with elements of a scientific school for young scientists. In 2 volumes, Moscow, April 8–9, 2022 / Editors-in-Chief: A. V. Semenov, P. N. Kravchenko. Volume 1. – Moscow: Moscow University named after S. Yu. Witte, 2022. – Pp. 490–499. – EDN WAVPEW.
6. Usmanov, A. I. Analysis of modern methods for automation of non-destructive quality testing and diagnostics of electronic components / A. I. Usmanov, A. V. Kozlova, V. G. Meshkov // Bulletin of MSTU "Stankin". – 2024. – No. 2(69). – Pp. 161–172. – EDN NQCPBQ.