

Денисюк Алексей Валерьевич,
аспирант гр.ИВТм-22-1, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: 89025769005@mail.ru

Истомин Андрей Леонидович,
д.т.н., профессор, декан факультета управления и бизнеса,
Ангарский государственный технический университет,
e-mail: a.l.istomin@mail.ru

Кривов Максим Викторович,
к.т.н., доцент, заведующий кафедрой вычислительных машин и комплексов,
Ангарский государственный технический университет,
e-mail: vmk@angtu.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ В НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ

Denisiuk A.V., Istomin A.L., Krivov M.V.

CURRENT ISSUES IN OPTIMAL CONTROL OF NONLINEAR CONTROL SYSTEMS

Аннотация. Показаны основные проблемы оптимального управления нелинейными системами. Указаны современные подходы к преодолению этих проблем.

Ключевые слова: нелинейные системы управления, оптимальное управление, адаптивное управление, робастность, машинное обучение, вычислительная сложность.

Abstract. The main problems of optimal control of nonlinear systems are presented. Modern approaches to overcoming these problems are indicated.

Keywords: nonlinear control systems, optimal control, adaptive control, robustness, machine learning, computational complexity.

В условиях цифровой трансформации промышленности, энергетики и транспорта задачи синтеза оптимальных законов управления для нелинейных объектов приобретают особую актуальность, однако сопровождаются рядом принципиальных трудностей, что требует междисциплинарного подхода.

Ключевые проблемы современной теории оптимального управления нелинейными системами:

1. Модельная неопределённость. Получение точных моделей нелинейных объектов в условиях параметрической неопределённости и неизвестных нелинейностей остаётся критическим вызовом, особенно для сложных промышленных процессов. Отсутствие адекватных моделей ограничивает применимость классических методов – принципа максимума Понтрягина и динамического программирования Беллмана.

2. Вычислительная сложность. Алгоритмы оптимального управления сталкиваются с дилеммой между вычислительной эффективностью и качеством управления, что критично для систем с жёсткими временными ограничениями. Решение уравнения Гамильтона–Якоби–Беллмана для многомерных систем часто вычислительно неразрешимо.

3. Учёт физических ограничений. Практическая реализация оптимальных законов требует строгого соблюдения ограничений на управление и состояния на бесконечном горизонте, что создаёт трудности при синтезе регуляторов.

4. Робастность к возмущениям. Обеспечение устойчивости при наличии аддитивных, параметрических и структурных возмущений требует специализированных методов анти-возмущающего управления, сочетающих оптимальность с инвариантностью.

Современные подходы к преодолению проблем базируются на трёх направлениях:

- Адаптивное управление методами бэкстеппинга и избыточной параметризации обеспечивает экспоненциальную сходимость траекторий при ослабленных условиях возбуждения;
- Интеграция машинного обучения (многозадачное обучение, обучение с подкреплением) позволяет обходить необходимость явного решения уравнений Гамильтона–Якоби–Беллмана;
- Гибридные методы робастной оптимизации объединяют эволюционные алгоритмы с классическими подходами для формирования траекторий в условиях задержек и неопределённостей.

Особую перспективу представляют методы адаптивного динамического программирования (ADP), позволяющие находить оптимальные стратегии без полной информации о динамике системы. Однако остаются нерешёнными вопросы обеспечения устойчивости при использовании машинного обучения и масштабируемости алгоритмов для высокоразмерных промышленных объектов.

Современная теория оптимального управления нелинейными системами характеризуется переходом от аналитических методов к вычислительно-ориентированным гибридным подходам, объединяющим классическую теорию управления с методами ИИ. Ключевая задача будущих исследований – разработка строгой теоретической базы для гарантий устойчивости, робастности и оптимальности в условиях модельной неопределённости и вычислительных ограничений, что особенно востребовано в различных отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кориков А.М., Сорокин С.П.** «Оптимальное управление нелинейными объектами в нефтехимическом производстве». Автоматизация и современные технологии, 2021, № 8, с. 12 - 21.

2. **Xin Li, Xiangtong Li, Honggui Han** Adaptive optimal control for nonlinear networked systems under encoding-decoding mechanism: A generalized policy iteration approach – DOI 10.1016/j.ins.2025.122890. – Текст: электронный URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020025525010266> (дата обращения: 09.02.2026).