

**Цзэн Вэйчжи**

Магистр

Южно-Уральский государственный университет (национальный

исследовательский университет)

Челябинск, Россия

**Сравнительный анализ методов обратной связи в системах  
автоматического управления мехатронных устройств**

**Аннотация:** В статье представлен систематический сравнительный анализ методов обратной связи в системах автоматического управления мехатронных устройств. Исследование охватывает как классические подходы, включая ПИД-регулирование и компенсацию возмущений, так и современные адаптивные методы, такие как алгоритмы скользящего режима, наблюдатели состояния и системы на основе нечеткой логики и нейронных сетей. Разработана комплексная система критериев для оценки эффективности методов, включающая точность, быстродействие, устойчивость, робастность, помехозащищенность и сложность практической реализации. Установлены фундаментальные компромиссы между рассматриваемыми критериями. Определены области эффективного применения различных методов в зависимости от динамических характеристик и условий эксплуатации мехатронных систем. Показано, что выбор оптимального метода требует учета специфических требований проекта и имеющихся аппаратных ограничений.

**Ключевые слова:** мехатронные системы, системы автоматического управления, обратная связь, сравнительный анализ, ПИД-регулятор

**Zeng Weizhi**

Master

South Ural State University (National Research University)

Chelyabinsk, Russia

**Comparative analysis of feedback methods in automatic control systems of  
mechatronic devices**

**Abstract:** This article presents a systematic comparative analysis of feedback methods in automatic control systems for mechatronic devices. The study covers both classical approaches, including PID control and disturbance compensation, and modern adaptive methods, such as sliding mode algorithms, state observers, and systems based on fuzzy logic and neural networks. A comprehensive system of criteria for evaluating the effectiveness of the methods is developed, including accuracy, performance, stability, robustness, noise immunity, and the complexity of practical implementation. Fundamental trade-offs between the criteria considered are identified. Areas of effective application of various methods are determined depending on the dynamic characteristics and operating conditions of mechatronic systems. It is shown that selecting the optimal method requires consideration of specific project requirements and existing hardware limitations.

**Keywords:** mechatronic systems, automatic control systems, feedback, comparative analysis, PID controller

### **Введение**

Совершенствование динамических характеристик мехатронных систем непосредственно связано с оптимизацией структур управления, где центральное место занимает проблема синтеза контуров обратной связи. Возрастающие требования к точности позиционирования исполнительных механизмов, быстродействию переходных процессов и энергетической эффективности функционирования обуславливают принципиальную важность выбора адекватных методов формирования управляющих воздействий [1]. В контексте современных тенденций развития робототехнических комплексов, аэрокосмических систем и прецизионного промышленного оборудования наблюдается парадигмальный сдвиг в подходах к проектированию систем управления, где традиционные методы все чаще дополняются современными алгоритмическими решениями.

Многообразие существующих подходов к организации обратной связи порождает существенные методологические трудности при проектировании конкретных мехатронных применений. Противоречивая природа взаимосвязи

ключевых показателей качества систем управления – точности и быстродействия, устойчивости и робастности – требует глубокого анализа фундаментальных компромиссов при выборе управляющих структур. Особую сложность представляет учет нелинейных эффектов, характерных для реальных мехатронных устройств, где традиционные методы линейного анализа демонстрируют ограниченную эффективность. Необходимость систематизации накопленного теоретического и практического опыта в данной области представляет собой значимую научную проблему, требующую комплексного исследования.

Целью настоящего исследования является разработка методологии сравнительного анализа методов обратной связи, ориентированной на применение в мехатронных системах различного функционального назначения. Научная новизна работы заключается в создании комплексной системы критериев оценки, учитывающей как классические показатели качества, так и специфические требования мехатронных применений. Практическая значимость определяется возможностью использования результатов исследования для оптимизации проектных процедур при создании перспективных мехатронных устройств. Проводимый анализ направлен на установление корреляционных зависимостей между структурными особенностями методов обратной связи и достигаемыми динамическими характеристиками систем управления, что составляет теоретическую основу для последующих прикладных разработок в данной области.

### **Классификация и описание методов обратной связи**

Классификация методов обратной связи в системах автоматического управления мехатронных устройств требует системного подхода, учитывающего как исторически сложившиеся принципы управления, так и современные алгоритмические решения. В основе традиционных методов лежат положения классической теории автоматического управления, доказавшие свою эффективность для систем с детерминированными параметрами и слабовыраженными нелинейностями. Фундаментальную роль играет

применение отрицательных обратных связей по основным координатам состояния - положению, скорости и ускорению. Эти связи образуют структурный каркас системы регулирования, обеспечивающий базовые показатели точности и устойчивости. Значительное распространение в промышленных мехатронных системах получили пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы и их усовершенствованные модификации. К последним относятся алгоритмы с ограничением интегральной составляющей, каскадные структуры управления, а также системы с прогнозирующими моделями. Практическая ценность ПИД-регуляторов обусловлена относительной простотой их реализации и способностью эффективно компенсировать установившиеся ошибки при соблюдении условий параметрической определенности объекта управления.

Принцип инвариантности, реализуемый через компенсацию возмущений, представляет особый интерес для систем, функционирующих в условиях существенных внешних воздействий [2]. Теоретической основой данного подхода является обеспечение независимости регулируемой координаты от возмущающих факторов, что достигается введением дополнительных компенсирующих связей. Однако практическая реализация этого метода требует наличия точной математической модели объекта и возможности измерения возмущений, что ограничивает область его применения системами с детерминированной структурой.

Современные методы управления отражают эволюционный переход к сложным алгоритмическим решениям, способным адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования и параметрической неопределенности. Особое место занимают наблюдатели состояния, в частности наблюдатель Люэнбергера, позволяющие восстанавливать недоступные непосредственному измерению переменные состояния системы. Этот подход существенно расширяет возможности синтеза законов управления, поскольку обеспечивает информационную полноту при формировании управляющих воздействий. Алгоритмы скользящего режима демонстрируют исключительную

робастность к вариациям параметров системы и внешним возмущениям, хотя сопровождаются характерным явлением высокочастотных колебаний - так называемым "джиттером", требующим специальных методов подавления.

Адаптивные системы с идентификацией параметров в реальном времени представляют собой дальнейшее развитие методов управления в условиях неопределенности. Способность автоматически настраивать параметры регулятора при изменении динамических характеристик объекта позволяет сохранять требуемое качество управления в широком диапазоне рабочих условий [3]. Наиболее перспективными направлениями являются методы, основанные на теории нечеткой логики и искусственных нейронных сетях, открывающие возможности для создания интеллектуальных систем управления. Эти подходы демонстрируют высокую эффективность при управлении объектами со сложными нелинейностями, параметрической неопределенностью и переменной структурой.

Вопросы практической реализации рассмотренных методов в мехатронных устройствах заслуживают отдельного анализа. Процесс дискретизации непрерывных алгоритмов управления вносит принципиальные ограничения, связанные с выбором частоты квантования и метода дискретизации. Эти факторы непосредственно влияют на устойчивость и точность цифровой системы, формируя дополнительные требования к синтезу алгоритмов. Характеристики используемых датчиков, включая их дискретность, помехоустойчивость, инерционность и метрологические параметры, становятся определяющими для достижения заданного качества обратной связи. Существенное значение имеют аппаратные ограничения вычислительных модулей, накладывающие естественные ограничения на сложность реализуемых алгоритмов. Это особенно актуально для адаптивных систем и методов, основанных на искусственном интеллекте, требующих значительных вычислительных ресурсов. Таким образом, выбор конкретного метода обратной связи представляет собой сложную инженерную задачу, требующую нахождения оптимального компромисса между теоретическими возможностями алгоритма и практическими ограничениями его

реализации в конкретном мехатронном устройстве.

### **Критерии сравнительного анализа**

Разработка системы критериев для сравнительного анализа методов обратной связи требует комплексного подхода, учитывающего как классические показатели качества систем управления, так и специфические требования, предъявляемые к мехатронным устройствам. основополагающим критерием выступает точность функционирования системы, оцениваемая через статические и динамические ошибки слежения. Статическая точность характеризует способность системы поддерживать заданное значение регулируемой величины в установившемся режиме, тогда как динамическая точность определяет поведение системы в переходных процессах. Для мехатронных устройств, работающих в условиях изменения рабочих режимов и внешних воздействий, существенное значение приобретает анализ интегральных показателей точности, учитывающих как систематические, так и случайные составляющие ошибки управления.

Быстродействие системы управления, определяемое длительностью переходного процесса, представляет собой второй фундаментальный критерий оценки. При этом необходимо учитывать не только временные характеристики, но и такие параметры переходного процесса, как перерегулирование, колебательность и время достижения первого максимума. Для мехатронных систем, работающих в динамичных режимах, особую важность приобретает быстродействие контура обратной связи, определяемое полосой пропускания системы и быстродействием используемых датчиков и исполнительных механизмов. Устойчивость и робастность системы образуют комплексный критерий, требующий многоаспектного анализа. Классические показатели запасов устойчивости по фазе и амплитуде должны дополняться оценкой чувствительности системы к вариациям параметров объекта управления и воздействию внешних возмущений [4]. Робастные свойства системы определяют ее способность сохранять работоспособность при отклонениях реальных характеристик объекта от расчетных значений, что особенно актуально для

мехатронных устройств, работающих в условиях изменения массо-инерционных параметров и переменных нагрузок.

Помехозащищенность системы обратной связи характеризует ее устойчивость к воздействию шумов измерений и электромагнитных помех. Этот критерий требует анализа как аппаратных решений по фильтрации сигналов, так и алгоритмических методов повышения помехоустойчивости. Для мехатронных систем, использующих датчики с различными принципами действия и точностью, существенное значение приобретает оптимизация соотношения между быстродействием системы и уровнем фильтрации измерительных сигналов. Критерий сложности практической реализации охватывает несколько взаимосвязанных аспектов: вычислительную нагрузку на процессорную систему, требования к аппаратному обеспечению, а также трудоемкость настройки и калибровки системы управления. Вычислительная сложность алгоритма определяет требования к быстродействию и объему памяти микропроцессорной системы, что непосредственно влияет на стоимость и энергопотребление устройства [5]. Трудоемкость настройки характеризует временные затраты на отладку системы и достижение требуемых показателей качества, тогда как сложность калибровки определяет необходимость проведения регулярных процедур юстировки и тестирования системы в процессе эксплуатации.

При сравнительном анализе методов обратной связи необходимо учитывать взаимосвязь и возможную противоречивость указанных критериев. Повышение быстродействия системы часто приводит к уменьшению запасов устойчивости, а увеличение точности может потребовать применения более сложных алгоритмов, реализация которых ограничена вычислительными ресурсами. Поэтому выбор оптимального метода обратной связи всегда представляет собой поиск разумного компромисса между рассматриваемыми критериями с учетом конкретных требований и условий работы мехатронного устройства. Особое значение приобретает разработка интегральных показателей эффективности, позволяющих количественно оценивать степень соответствия системы всем перечисленным критериям одновременно.

## **Сравнительный анализ методов обратной связи**

Проведенный сравнительный анализ методов обратной связи в системах автоматического управления мехатронных устройств позволяет выявить существенные различия в их эксплуатационных характеристиках и областях эффективного применения. Классические методы регулирования, в частности пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы и их модификации, демонстрируют высокую эффективность в системах со стабильными параметрами и детерминированными возмущениями. Основное преимущество этих методов заключается в относительной простоте реализации и настройки, что обусловило их широкое распространение в промышленных мехатронных системах. Однако при существенных изменениях параметров объекта управления или наличии выраженных нелинейностей эффективность традиционного ПИД-регулирования заметно снижается. Методы, основанные на компенсации возмущений по принципу инвариантности, позволяют достичь высокой точности управления в условиях детерминированных внешних воздействий, но требуют построения точной математической модели объекта и обеспечения возможности измерения возмущающих факторов.

Современные адаптивные методы управления проявляют значительно более высокую робастность в условиях параметрической неопределенности и изменяющихся внешних воздействий. Алгоритмы скользящего режима демонстрируют исключительную устойчивость к вариациям параметров системы и внешним возмущениям, хотя их практическая реализация сопряжена с проблемой возникновения высокочастотных колебаний [6]. Системы с наблюдателями состояния расширяют возможности синтеза законов управления за счет восстановления недоступных непосредственному измерению переменных, но требуют разработки точной модели объекта для обеспечения корректности оценки. Наиболее сложные в реализации адаптивные системы с идентификацией параметров в реальном времени способны поддерживать высокое качество управления при значительных изменениях динамических характеристик объекта, однако предъявляют повышенные требования к

вычислительным ресурсам системы управления.

Особого внимания заслуживают методы, основанные на принципах нечеткой логики и искусственных нейронных сетей. Эти подходы демонстрируют высокую эффективность при управлении объектами со сложными нелинейностями и параметрической неопределенностью. Способность таких систем к обучению и самонастройке открывает новые возможности для создания интеллектуальных систем управления, способных адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации. Однако практическое применение этих методов ограничивается существенными вычислительными затратами и сложностью процедур начального обучения алгоритмов.

Анализ компромиссов между различными критериями качества выявляет фундаментальные ограничения, присущие каждому из рассмотренных методов. Повышение быстродействия системы управления часто достигается за счет уменьшения запасов устойчивости, что особенно заметно проявляется в системах с обратной связью по ускорению. Увеличение точности отслеживания требует применения более сложных алгоритмов, что неизбежно ведет к росту вычислительной нагрузки и усложнению процедур настройки. Помехозащищенность системы находится в обратной зависимости от ее быстродействия, поскольку эффективное подавление высокочастотных шумов требует уменьшения полосы пропускания контура управления.

Выбор оптимального метода обратной связи должен основываться на тщательном анализе приоритетов проектирования для конкретного мехатронного устройства с учетом доминирующих критериев качества и эксплуатационных ограничений. Для систем, работающих в стационарных условиях с невысокими требованиями к точности, наиболее целесообразным представляется использование классических ПИД-регуляторов. В условиях значительных параметрических неопределенностей и внешних возмущений предпочтение следует отдавать алгоритмам скользящего режима и адаптивным системам управления. Для сложных нелинейных объектов с переменной структурой наиболее перспективными являются методы, основанные на принципах

искусственного интеллекта. При этом важнейшим аспектом выбора остается учет возможностей практической реализации метода, включая доступные вычислительные ресурсы, точность измерительной аппаратуры и требования к надежности системы в целом.

### **Заключение**

Проведенное исследование позволило систематизировать методы обратной связи в системах автоматического управления мехатронных устройств и установить критерии их сравнительной оценки. Анализ выявил существование принципиального компромисса между сложностью реализации методов и их адаптивными возможностями. Классические подходы, в частности ПИД-регулирование, сохраняют свою актуальность для систем со стабильными параметрами, однако демонстрируют ограниченную робастность при существенных изменениях динамических характеристик объектов управления.

Основным выводом исследования является обоснование целесообразности применения современных методов управления для высокодинамичных мехатронных систем, функционирующих в условиях параметрической неопределенности. Методы с наблюдателями состояния эффективно решают задачу компенсации невозмущаемых возмущений, а алгоритмы скользящего режима обеспечивают повышенную робастность. Адаптивные системы с идентификацией параметров демонстрируют наилучшие результаты при управлении объектами с переменной структурой и существенными нелинейностями. Перспективным направлением дальнейших исследований представляется разработка гибридных методов, сочетающих достоинства классических и современных подходов. Особый интерес представляет создание алгоритмов автоматической настройки параметров регуляторов в процессе эксплуатации, а также анализ методов обратной связи для многосвязных и сетевых мехатронных систем. Решение этих задач позволит существенно расширить функциональные возможности мехатронных устройств и повысить эффективность их применения в сложных технологических процессах.

### **Список литературы**

1. Тарарыкин С.В., Тихомирова И.А., Копылова Л.Г. Сравнительный анализ эффективности селективно-инвариантных электромеханических систем // Электротехника. 2017. № 3. С. 77-84.
2. Лохин В.М. Развитие технологий интеллектуального управления в Институте кибернетики МИРЭА // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 3-1. С. 30-40.
3. Дудкина И.М. Системы автоматизированного проектирования: учебное пособие. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2007. 135 с.
4. Аман К.П., Мусина А.А., Елубаева Д.Д. Разработка интеллектуальной системы управления для станка резки орнаментов на базе мехатроники // Вестник Университета Шакарима. Серия: Технические науки. 2025. № 3. С. 173-182.
5. Дайнович А.М. Сравнительный анализ способов демодуляции сигналов в электроприводе с фазовой синхронизацией // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 73-78.
6. Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Пчелинцева С.В. и др. Концепция проектирования класса прецизионных поворотных стендов с инерциальными чувствительными элементами в цепи обратной связи // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30, № 3. С. 118-132.