

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук

На правах рукописи



Антипов Алексей Семенович

**Блочный метод синтеза
сигмоидальных обратных связей
для мехатронных систем
при действии возмущений**

Специальность 2.3.1 – «Системный анализ,
управление и обработка информации»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институте проблем управления
имени В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН)

- Научный руководитель:** **Краснова Светлана Анатольевна**,
доктор технических наук
- Официальные оппоненты:** **Макаров Дмитрий Александрович**,
кандидат физико-математических наук,
Институт системного анализа ФИЦ ИУ
РАН, старший научный сотрудник
Темкин Игорь Олегович, доктор
технических наук, профессор,
Национальный исследовательский
технологический университет
«МИСиС», заведующий кафедрой
«Автоматизированные системы
управления»
- Ведущая организация:** Институт проблем механики им. А.Ю.
Ишлинского РАН.

Защита состоится «22» ноября 2021 г. в 14.00 на заседании
диссертационного совета 24.1.107.01 при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Институте проблем управления им. В.А.
Трапезникова РАН по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65, ИПУ
РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПУ РАН
<https://www.ipu.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета 24.1.107.01,
кандидат технических наук

Е.Ф. Жарко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Мехатронные объекты управления – это системы, состоящие из нескольких модулей разной физической природы, синергетически связанных между собой и предназначенных для выполнения конкретных функциональных задач. В ходе решения различных задач управления мехатронными объектами нужно удовлетворить ограничения на переменные состояния, которые вызваны технологическими требованиями и соображениями безопасности, обеспечить заданные показатели качества замкнутой системы при воздействии внешних неконтролируемых возмущений. Следует также учитывать, что информация о параметрах и переменных состояния объекта может быть не полной, а ресурсы управления всегда являются ограниченными. Для эффективного управления мехатронными объектами, функционирующими в условиях неопределенности, требуется разработка новых подходов, направленных на комплексное решение указанных проблем, что свидетельствует об актуальности темы диссертационного исследования.

Большой класс мехатронных систем составляют механические и электромеханические объекты управления, их модели существенно нелинейные и многосвязные. Математические аспекты диффеоморфных преобразований нелинейных моделей в различные канонические формы рассматривались в работах Крищенко А.П., Канатникова А.Н., Ткачева С.Б., Рапопорта Л.Б., Пестерева А.В. и др. Построению законов управления для механических систем в условиях внешних возмущений посвящены работы Черноусько Ф.Л., Болотника Н.Н., Решмина С.А., Аняевского И.М., Spong М. и др., в которых применяются игровые подходы, методы оптимального и терминального управления. Алгоритмы робастного управления и компенсации возмущений предложены в работах Поляка Б.Т., Хлебникова М.В., Никифорова В.О., Фургата И.Б. и др. Эффективным инструментом выступает ПИД-регулятор, который при параметрической неопределенности модели дополняется алгоритмами идентификации (Александров А.Г., Romero J.G., Donige A., Utrca C. и др.). Но, как правило, в рамках указанных подходов рассматривается конкретный вид, а не комплекс сопутствующих объекту неопределенностей.

При управлении мехатронными системами, состоящими из связанных модулей, актуально разделение движений на разнотемповые составляющие (Дмитриев М.Г., Юркевич В.Д., Naidu S. и др.). Декомпозицию обеспечивают и методы систем с разрывными управлениями, функционирующих в скользящем режиме (Уткин В.И., Пятницкий Е.С., Матюхин В.И., Slotine J.E. и др.). Организация скользящего режима обеспечивает также инвариантность всего вектора состояния по отношению к согласованным возмущениям, действующим в пространстве управления, без необходимости восстановления внешних сигналов. На практике разрывные управления естественно использовать в электрических исполнительных устройствах, работающих в ключевом режиме. Но формирование разрывных управляющих сил и

моментов для подавления возмущений, действующих на механическую подсистему и несогласованных с истинным управлением, недопустимо.

Для подавления с заданной точностью воздействия на выходные (регулируемые) переменные внешних несогласованных возмущений удобной методологической базой является блочный принцип управления (Лукьянов А.Г., Уткин В.А., Краснова С.А. и др.) с организацией локальных связей (фиктивных управлений) в виде линейных функций с большими коэффициентами усиления (Мееров М.В.). Но это приводит к сильному перерегулированию и недопустимо в практических приложениях. Таким образом, существующие методы обеспечения инвариантности регулируемых переменных по отношению к внешним несогласованным возмущениям недостаточно разработаны применительно к мехатронным системам, где имеются физические ограничения на переменные состояния и управления.

Если мехатронный объект имеет неполный комплект датчиков, то для оценивания неизмеряемых переменных требуется построение нелинейного наблюдателя состояния. При неопределенных входах в наблюдателе также используют глубокие обратные связи (Khalil Н.К., Фомичев В.В. и др.), что приводит к всплескам оценочных сигналов. Наблюдатели на скользящих режимах (Уткин В.А., Levant А., Edwards С. и др.) обеспечивают ограниченность оценочных сигналов, но требовательны к вычислительным ресурсам. В современных публикациях Красновой С.А. и Уткина А.В. представлены каскадные алгоритмы синтеза наблюдателей состояний и возмущений с непрерывными корректирующими воздействиями в виде S-образных, гладких и ограниченных сигма-функций, которые в допредельной ситуации обеспечивают преимущества систем с разрывными управлениями, функционирующих в скользящем режиме, а также лучшее качество (гладкость) оценочных сигналов. Представляется перспективным распространение этих методов на задачи синтеза инвариантных локальных связей при проектировании регуляторов для мехатронных объектов при действии несогласованных возмущений, не подлежащих дифференцированию.

Объект исследования – нелинейные многомерные системы, представимые в блочной форме вход–выход и используемые для описания электромеханических систем автоматического управления, функционирующих в условиях параметрической неопределенности, действия внешних несогласованных возмущений и неполных измерений.

Предмет исследования – синтез инвариантных реализуемых обратных связей, обеспечивающих заданное поведение мехатронных объектов с учетом специфики их описания и функционирования.

Цель диссертационного исследования – разработка метода блочного синтеза сигмоидальных обратных связей для различных мехатронных объектов, обеспечивающих подавление с заданной точностью воздействия на выходные переменные несогласованных возмущений и не требующих восстановления внешних сигналов.

Данная цель определила следующие, основные **задачи работы**:

1) формализовать новый тип сигмоидальной обратной связи, для нелинейной неопределенно заданной системы первого порядка с аддитивными возмущениями обосновать выбор параметров сигмоидальной обратной связи, обеспечивающей стабилизацию с заданной точностью за заданное время;

2) для нелинейных одноканальных объектов управления в рамках блочного подхода разработать декомпозиционную процедуру синтеза сигмоидальных локальных связей, обеспечивающих отслеживание выходной переменной целевого сигнала с заданной точностью за заданное время при действии несогласованных ограниченных возмущений;

3) разработать метод синтеза редуцированного наблюдателя с сигмоидальными корректирующими воздействиями для оценивания обобщенных скоростей по измерениям обобщенных координат в условиях параметрической неопределенности мехатронной системы и действия на нее внешних возмущений;

4) для многоканальных систем с неопределенными матрицами фиктивных управлений разработать иерархическую процедуру настройки амплитуд сигмоидальных обратных связей с применением к задаче управления движением конечной точки робота-манипулятора;

5) разработать процедуру синтеза сигмоидальных локальных связей с учетом ограничений на переменные состояния с применением к задаче слежения для двухроторной электромеханической системы при действии сил сухого трения;

6) для механических систем с недостатком управлений на основе свойства пассивности разработать комбинированную (линейную и сигмоидальную) локальную связь с применением к задаче стабилизации положения ходовой тележки однобалочного мостового крана с неопределенными массо-инерционными характеристиками.

Методами исследования диссертационной работы являются методы линейной алгебры и математического анализа; методы математической теории управления – разделения движений в классах систем с большими коэффициентами и разрывными управлениями, функционирующими в скользящем режиме, блочного подхода, теории наблюдателей состояния, инвариантности и устойчивости.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1) предложен новый тип нелинейных обратных связей в виде S-образных сигма-функций, которые обеспечивают в замкнутой системе подавление несогласованных возмущений с заданной точностью и позволяют учитывать имеющиеся ограничения на переменные состояния и управления;

2) разработана процедура блочного синтеза сигмоидальных локальных связей с заданной точностью и временем стабилизации ошибки слежения для одноканальных систем слежения при действии несогласованных возмущений;

3) разработан метод синтеза редуцированного наблюдателя с сигмоидальной коррекцией для оценивания обобщенных скоростей по измерениям обобщенных координат, не требующий точного знания массо-

инерционных характеристик механической подсистемы;

4) разработаны иерархическая процедура настройки амплитуд сигмоидальных управлений с неопределенной матрицей и алгоритм синтеза сигмоидальных обобщенных моментов в задаче управления движением конечной точкой трехзвенного манипулятора с учетом сектора цилиндрического объема, в котором находится конечная точка в текущий момент времени;

5) разработана процедура блочного синтеза сигмоидальных обратных связей с учетом ограничений на переменные состояния и управления на примере двухроторной электромеханической системы с относительным порядком равным трем;

6) разработан комбинированный закон управления с линейной и сигмоидальной составляющими для механической системы с недостатком управлений, обеспечивающий лучшие по сравнению с ПД-регулятором показатели переходных процессов в условиях воздействия внешних неконтролируемых возмущений.

Достоверность полученных научных результатов обеспечивается строгостью применяемого математического аппарата и подтверждается результатами численного моделирования в среде MATLAB-Simulink.

Области исследований. Работа соответствует специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации» в части системного анализа, управления и обработки информации по пунктам паспорта специальности: 1) теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; 2) формализация и постановка задач системного анализа, управления, принятия решений и обработки информации; 3) разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; 4) разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; 5) разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

Практическая значимость. При синтезе следящих мехатронных систем с сигмоидальными обратными связями не требуется точное знание параметров объекта и внешних воздействий, а также индивидуальная настройка параметров регулятора для каждого рабочего режима при изменении формы возмущений и задающих воздействий, если их величины не превышают заранее установленных диапазонов.

По сравнению с традиционными глубокими обратными связями использование ограниченных сигмоидальных управлений в системах с несогласованными возмущениями обеспечивает меньшее перерегулирование и снижает требуемый ресурс управления, что позволит использовать исполнительные электроприводы меньшей мощности. Использование в

контуре обратной связи редуцированных наблюдателей позволит отказаться от установки датчиков обобщенных скоростей, что облегчит конструкцию механизма и снизит стоимость системы управления без потери качества.

Реализация результатов работы. Разработанные алгоритмы для мехатронных систем с недостатком управлений приняты к испытаниям ООО «Меридиан» для системы управления однобалочными мостовыми кранами типа СХТС10-ТОН, используемыми для перемещения грузов на складском логистическом комплексе в Астраханской области (Черноярский район, с. Солонники), что подтверждается актом о внедрении результатов диссертационной работы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) метод подавления аддитивных возмущений с помощью гладких и ограниченных сигмоидальных управлений, не требующий восстановления внешних сигналов;

2) процедура блочного синтеза сигмоидальных локальных связей для нелинейных одноканальных систем при действии несогласованных возмущений, обеспечивающая стабилизацию ошибки слежения с заданной точностью за заданное время;

3) метод синтеза редуцированных наблюдателей с сигмоидальной коррекцией, гарантирующий оценивание обобщенных скоростей по измерениям положений с заданной точностью за заданное время при неопределенных массо-инерционных характеристиках мехатронного объекта и действия на него неконтролируемых сил;

4) комплексные конструктивные решения по синтезу динамической обратной связи с использованием сигма-функций применительно к конкретным мехатронным объектам, функционирующим в условиях параметрической неопределенности, действия внешних возмущений, а также без измерения обобщенных скоростей:

– в задаче управления движением конечной точки манипулятора с неопределенной матрицей управляющих моментов;

– в задаче отслеживания заданных сигналов угловыми положениями двухроторной электромеханической системы при наличии ограничений на переменные состояния и управление;

– в задаче стабилизации заданного положения ходовой тележки однобалочного мостового крана с прикрепленным грузом.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на международных научных конференциях: Международная конференция им. Е.С. Пятницкого «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (Москва, 2016, 2018, 2020), Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ (Москва, 2019), Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» ПУМСС-2019 (Самара, 2019), Международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD (Москва, 2018, 2020), Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного

приборостроения» АПЭП (Новосибирск, 2016), Международная научно-техническая конференция «Автоматизация» RusAutoCon (Сочи, 2019, 2020), IFAC 2017 World Congress (Toulouse, 2017), а также на семинарах ИПМех РАН, ИПУ РАН.

Связь с планами научных исследований. Работа проводилась в рамках плановых фундаментальных научных исследований ИПУ РАН, поддержана грантами РФФИ 15-08-01543 А, 18-01-00846 А, 20-01-00363 А.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе: 11 – в изданиях, проиндексированных в WoS и Scopus [1-11], 3 – в рецензируемых журналах, входящих в RSCI [12-14].

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (142 наименования), приложения, подтверждающего внедрение полученных результатов. Работа изложена на 149 страницах, содержит 27 иллюстраций, 10 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, представлены: краткий обзор современного состояния исследований; цель и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость, структура и краткое содержание глав.

В первой главе выделен тип рассматриваемых в работе мехатронных объектов управления и учитываемых неопределенностей. Приведен краткий обзор современных методов управления мехатронными системами. Обоснована необходимость в разработке реализуемых на практике методов обеспечения инвариантности регулируемых переменных по отношению к негладким возмущениям, несогласованным с истинными управлениями.

Во второй главе проведен анализ особенностей сигма-функции и возможностей ее использования в качестве инвариантной обратной связи.

В разделе 2.1 вводится гладкая и ограниченная сигма-функция

$$\sigma(kx) = 2 / (1 + \exp(-kx)) - 1, \quad k = \text{const} > 0, \quad D(\sigma(kx)) = R, \quad (1)$$

$\sigma(-kx) = -\sigma(kx)$, $\sigma(kx) \underset{x \rightarrow 0}{\sim} kx/2$, $\sigma(kx) \underset{k \rightarrow +\infty}{\sim} \text{sign}(x)$. Множитель k в аргументе играет роль большого коэффициента усиления в малой окрестности нуля.

Идея использования сигмоидальной обратной связи и выбора ее параметров пояснена на примере элементарной возмущенной системы

$$\dot{x} = f(t) + u, \quad (2)$$

где $x \in R$ – измеряемое состояние, $f(t)$ – внешнее детерминированное возмущение. Для системы (2) с сигмоидальной обратной связью

$$\dot{x} = f(t) + u, \quad (3)$$

с постоянной амплитудой $m = \text{const} > 0$ доказаны следующие утверждения.

Лемма 2.1. Если в системе (2), (3) внешнее возмущение ограничено известной константой $|f(t)| \leq F = \text{const} > 0, t \geq 0$, то тогда для любых сколь угодно малых $\Delta > 0, T > 0$ и любого начального значения $x(0)$ найдутся

такие положительные действительные числа \bar{k} и \bar{m} , что при любых $k \geq \bar{k}$, $m \geq \bar{m}$ выполнится неравенство $|x(t)| \leq \Delta$, $t \geq T$.

Лемма 2.2. Если в системе (2), (3) внешнее возмущение и его производная ограничены известными константами $|f(t)| \leq F = \text{const} > 0$, $|\dot{f}(t)| \leq F_1 = \text{const} > 0$, $t \geq 0$, то тогда для любых сколь угодно малых $\Delta > 0$, $\Delta_1 > 0$, $T_1 > T > 0$ и любого начального значения $x(0)$ найдутся такие положительные действительные числа \bar{k} и \bar{m} , что при любых $k \geq \bar{k}$, $m \geq \bar{m}$ выполняются

$$|x(t)| \leq \Delta, t \geq T, |\dot{x}(t)| = |f(t) - m\sigma(kx(t))| \leq \Delta_1, t \geq T_1 > T > 0.$$

Следствие из леммы 2.2. Стабилизация производной с заданной точностью позволяет получить оценку внешнего возмущения с помощью управляющего сигнала $u(t) = -f(t) \pm \Delta_1$, $t \geq T_1$. Данный результат использован в главах 3, 4, 5 для оценивания с заданной точностью неизвестных сигналов без использования их динамической модели при построении редуцированного наблюдателя обобщенных скоростей с сигмоидальной коррекцией.

В разделе 2.2 в качестве объекта управления рассматривается нелинейная одноканальная система, функционирующая при действии внешних несогласованных возмущений, представляемая в треугольной (по составу аргументов функций ее подсистем) форме «вход–выход»:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= f_i(x_1, x_2, \dots, x_i, t) + b_i(x_1, x_2, \dots, x_i, t)x_{i+1}, i = \overline{1, n-1}, \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t) + b_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t)u, \end{aligned} \quad (4)$$

где $x = \text{col}(x_1, \dots, x_n) \in X \subset R^n$ – измеряемый вектор состояния с известными начальными условиями $x_i(0)$, $i = \overline{1, n}$, X – открытая ограниченная область изменения переменных состояния, определяемая физикой процесса; $x_i \in X_i \subset R$ – регулируемая переменная (выход), $u \in R$ – управляющее воздействие (вход); $f_i(x_1, \dots, x_i, t)$ – функции от переменных вектора состояния и внешних возмущений, которые полагаются неизвестными функциями времени, ограниченными по модулю известными константам:

$$|f_i(x_1(t), \dots, x_i(t), t)| \leq F_i = \text{const} > 0, t \geq 0, i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Система (4) является управляемой: $b_i(x_1(t), \dots, x_i(t), t) \neq 0, t \geq 0$, $i = \overline{1, n}$. Данные функции также могут содержать неопределенности, но известными считаются их знаки $\text{sign}(b_i(x_1(t), \dots, x_i(t), t)) = \text{const}, t \geq 0$ и диапазоны изменения

$$0 < b_{i,\min} \leq |b_i(x_1(t), \dots, x_i(t), t)| \leq b_{i,\max}, t \geq 0, i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

В общем случае требование гладкости к функциям $f_i(t), b_i(t), i = \overline{1, n}$ системы (4) не предъявляется, достаточно, чтобы они были кусочно-непрерывными с конечным числом точек разрыва первого рода.

Для системы (4) ставится задача синтеза обратной связи, обеспечивающей

отслеживание выходной переменной $x_1(t)$ заданного сигнала $g(t)$, аналитическое описание которого отсутствует, известны только его текущие значения и область изменения первой производной:

$$g(t) \in G \subseteq X_1, |\dot{g}(t)| \leq G_1, t \geq 0. \quad (7)$$

В сделанных предположениях и без ввода генераторов внешних воздействий задача слежения, а именно, стабилизация ошибки слежения $e_1(t) = x_1(t) - g(t)$, может быть решена только с некоторой точностью. Пусть заданы точность стабилизации $\Delta_1 > 0$ и время $t_1 > 0$ ее достижения. Цель управления – обеспечить в замкнутой системе

$$|e_1(t)| \leq \Delta_1, t \geq t_1 \quad (8)$$

и ограниченность остальных переменных.

В разделе 2.3 в рамках блочного принципа управления для объекта (4) формируются сигмоидальные локальные связи

$$x_i^* = -\text{sign}(b_{i-1})m_{i-1}\sigma(k_{i-1}e_{i-1}), k_{i-1}, m_{i-1} = \text{const} > 0, i = \overline{2, n}, \quad (9)$$

где e_1 – ошибка слежения, e_{i-1} ($i = \overline{3, n+1}$) – невязки между переменными x_i и выбранными фиктивными управлениями (9):

$$e_i = x_i - g, e_i = x_i - x_i^* = x_i + \text{sign}(b_{i-1})m_{i-1}\sigma(k_{i-1}e_{i-1}), i = \overline{2, n}. \quad (10)$$

В замкнутой системе с помощью истинного управления

$$u = -\text{sign}(b_n)m_n\sigma(k_n e_n), k_n, m_n = \text{const} > 0, \quad (11)$$

требуется обеспечить стабилизацию невязок (10), в том числе, ошибки слежения e_1 , что отвечает цели управления (8).

Замкнутая система (4), (11) относительно невязок (10) принимает вид:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= -|b_1| m_1 \sigma(k_1 e_1) + f_1 - \dot{g} + b_1 e_2; \\ \dot{e}_i &= -|b_i| m_i \sigma(k_i e_i) + f_i + \Lambda_{i-1} + b_i e_{i+1}, i = \overline{2, n-1}; \\ \dot{e}_n &= -|b_n| m_n \sigma(k_n e_n) + f_n + \Lambda_{n-1}, \end{aligned} \quad (12)$$

где слагаемые $\Lambda_i = \text{sign}(b_i)m_i k_i \left((1 - \sigma^2(k_i e_i)) / 2 \right) \dot{e}_i, i = \overline{1, n-1}$ являются производными соответствующих фиктивных управлений (9), которые возникают при переходе к новому координатному базису (10). Доказана

Теорема 2.1. Если в системе (12) выполняются условия (5)–(7), то тогда для любых начальных условий $x(0) \in X$ и любых, сколь угодно малых $\Delta_1 > 0$, $t_1 > 0$ найдутся такие действительные числа $\bar{k}_i > 0, i = \overline{1, n}, 0 < \bar{m}_i < \bar{\bar{m}}_i, i = \overline{1, n-1}, \bar{m}_n > 0$, что при любых $k_i \geq \bar{k}_i, m_i : \bar{m}_i < m_i \leq \bar{\bar{m}}_i, m_n \geq \bar{m}_n$ неравенство (8) выполнится.

В ходе доказательства с использованием второго метода Ляпунова и метода разделения движений получена иерархическая система неравенств для выбора коэффициентов обратных связей, которые не требуют перенастройки при изменении неопределенных функций системы в допустимых пределах.

Таким образом, в замкнутой системе обеспечивается Δ_1 -инвариантность выходной переменной по отношению к несогласованным возмущениям с помощью гладких и ограниченных нелинейных обратных связей, при этом устраняется проблема всплесков в начале переходных процессов, характерных для систем с линейными управлениями с большими коэффициентами.

В разделе 2.4 приведены результаты моделирования разработанного алгоритма применительно к задаче синтеза системы управления перевернутым маятником, функционирующим в условиях неопределенности. Данные результаты подтвердили эффективность разработанного подхода.

В третьей главе в качестве объекта управления рассматривается полноприводная электромеханическая система с n степенями свободы, функционирующая в условиях неопределенности. **В разделе 3.1** дано описание математической модели объекта управления:

$$\dot{q}_1 = q_2, \quad \dot{q}_2 = I^{-1}(q_1)[v - C(q_1, q_2)q_2 - G(q_1) + \eta(t)], \quad (13)$$

$$\dot{v} = -Av - Dq_2 + Bu, \quad (14)$$

где (13) – динамика лагранжевой механической подсистемы (манипулятора), $q_1 = \text{col}(q_{11}, \dots, q_{1n}) \in Q_1 \subset R^n$, $q_2 = \text{col}(q_{21}, \dots, q_{2n}) \in Q_2 \subset R^n$ – векторы обобщенных координат и скоростей; $I_{n \times n}(q_1) > 0$ – нелинейная положительно определенная матрица инерции, $\det I^{-1}(q_1) \neq 0$; $C_{n \times n}(q_1, q_2)$ – матрица центробежных и кориолисовых сил; $G_{n \times 1}(q_1)$ – вектор гравитационных сил; $\eta(t) = \text{col}(\eta_1, \dots, \eta_n) \in R^n$ – вектор внешних возмущений. Уравнение (14) – учитываемая динамика исполнительных устройств (ИУ) – двигателей постоянного тока (ДПТ) с жестким типом сочленений, $v = \text{col}(v_1, \dots, v_n) \in R^n$ – вектор обобщенных моментов, A, D, B – диагональные матрицы с положительными постоянными коэффициентами передачи, в частности $B = \text{diag}(b_i)$, $b_i = \text{const} > 0$ $i = \overline{1, n}$; $u \in R^n$ – вектор напряжений питания якорной цепи ДПТ – разрывные ограниченные управления, $|u_i| \leq k_{3i}$, $i = \overline{1, n}$.

Многозвенная конструкция манипулятора заканчивается сменным рабочим органом или схватом, удерживающим груз. Координаты вектора пространственной ориентации схвата $y_1 \in Y_1 \subset R^m$, где $m = 1 \div 6 \leq n$, однозначно выражаются через обобщенные координаты, $y_1 = h(q_1(t))$ – известная вектор-функция, ее элементы и их производные ограничены:

$$|y_{ij}^{(j)}(t)| \leq Y_{ji} = \text{const} > 0, \quad t \geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{0, 3}.$$

Значения Y_{ji} считаются известными из предметной области – конструктивных ограничений и соображений безопасности. Рассматриваются манипуляторы с избыточным числом степеней свободы $m = n$, матрица частных производных $J(q_1)_{n \times n} = (\partial h / \partial q_1)$ имеет полный ранг: $\text{rank} J_{n \times n}(q_1) = n$, $q_1 \in Q_1$.

Ставится задача отслеживания выходными переменными $y_1 = h(q_1) \in R^n$ системы (13)–(14) допустимых траекторий $g(t) \in R^n$, заданных в системе координат рабочего органа $g \in Y_1$, в следующих предположениях:

1) аналитический вид задающих воздействий не известен, имеются только их текущие значения, $g = \text{col}(g_1, \dots, g_n)$ – ограниченные функции времени с ограниченными производными: $|g_i^{(j)}(t)| \leq Y_{ji}$, $t \geq 0$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{0, 3}$;

2) прямым измерениям доступны обобщенные координаты $q_1(t)$ и токи якорей электроприводов, пересчитанные в электрические моменты $v(t)$;

3) масса схвата с грузом – неизвестная, ограниченная кусочно-гладкая функция времени с ограниченной производной, как следствие, матрицы I , C , G механической подсистемы (13) параметрически неопределенные;

4) внешние возмущения $\eta(t)$ – неизвестные, ограниченные, кусочно-гладкие функции времени с ограниченными производными: $|\eta_i^{(j)}(t)| \leq H_{ji} = \text{const}$, $t \geq 0$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{0, 1}$.

Цель управления – обеспечить стабилизацию ошибки слежения:

$$e_1 = y_1 - g \in R^n, |e_{1i}(t)| \leq \delta_1, t \geq T, i = \overline{1, n}. \quad (15)$$

В разделе 3.2 на основе блочного подхода представлено решение задачи слежения в механической подсистеме, где фиктивными управлениями полагаются обобщенные скорости и обобщенные моменты. Чтобы избежать решения обратных задач кинематики и динамики, система (13)–(14) записана относительно регулируемых переменных $y_1 = h(q_1(t))$ и их производных:

$$\dot{y}_1 = J(q_1)q_2 = y_2, \dot{y}_2 = J'(q_1, q_2)q_2 + J(q_1)\dot{q}_2 = A_2(q_1, q_2, t) + B_2(q_1)v, \quad (16)$$

где $J_{n \times n} = (\partial h / \partial q_1) = (J_{ij})$, $J'_{n \times n} = (J'_{ij})$, $J'_{ij} = (\partial J_{ij} / \partial q_1)q_2$; $B_2 = J(q_1)I^{-1}(q_1)$, $\det B_{2(n \times n)}(q_1) \neq 0$, $q_1 \in \overline{Q}_1$; $A_2 = J'(q_1, q_2)q_2 - B_2(q_1)[C(q_1, q_2)q_2 + G(q_1) - \eta(t)]$ и элементы B_2 содержат неизвестные, ограниченные составляющие.

В системе (16) фиктивными управлениями полагаются векторы скоростей y_2 и моментов v . Желаемое значение фиктивного управления y_2 выбирается в виде линейной локальной связи $y_2^* = \dot{g} - K_1 e_1$, где $K_1 = \text{diag}(k_{1i})$, $k_{1i} = \text{const} > 0$, $i = \overline{1, n}$, с целью обеспечения экспоненциальной сходимости ошибки слежения e_1 в окрестность (15), которая достигается за счет выбора K_1 . С учетом невязки $e_2 = y_2 - y_2^* = y_2 - \dot{g} + K_1 e_1$ система (16) с линейной локальной связью принимает вид

$$\dot{e}_1 = -K_1 e_1 + e_2, \dot{e}_2 = \phi(t) + B_2(q_1)v, \quad (17)$$

где элементы вектор-функции $\phi(t) = A_2(q_1, q_2, t) - g_2(t) - K_1^2 e_1(t) + K_1 e_2(t)$ и их производные в силу априорных предположений ограничены:

$$|\phi_i^{(j)}(t)| \leq F_{ji} = \text{const}, t \geq 0, i = \overline{1, n}, j = 0, 1.$$

Задача синтеза фиктивного управления $v \in R^n$ с целью стабилизации e_2 в (17) нетривиальна: входные каналы действия v представлены матрицей $B_2 = J(q_1)I^{-1}(q_1)$, которая зависит от неопределенных параметров и в отличие от матрицы $I^{-1}(q_1) > 0$ не является знакоопределенной.

В разделе 3.3 на основе метода иерархии управлений разработана процедура синтеза сигмоидальных обобщенных моментов

$$v_i^* = -m_{2i} \text{sign}(\tilde{b}_{ii}) \sigma(k_{2i} e_{2i}), m_{2i}, k_{2i} = \text{const} > 0, i = \overline{1, n}, \quad (18)$$

где $\tilde{b}_{11} = b_{11} = \Delta_1$, $\tilde{b}_{ii} = \Delta_i / \Delta_{i-1} \neq 0$, $\sigma(k_{2i} e_{2i})$ – сигма-функция от указанного аргумента (1), Δ_i – миноры матрицы B_2 различных порядков, $i = \overline{2, n}$. Суть процедуры заключается в организации определенной последовательности сходимости компонент вектора e_2 , например, следующей:

$$|e_{21}| \leq \delta_{21}, t > t_{21} > 0 \Rightarrow |e_{22}| \leq \delta_{22}, t > t_{22} > t_{21} \Rightarrow \dots \Rightarrow |e_{2n}| \leq \delta_{2n}, t > t_{2n} > t_{2, n-1}.$$

Эта организация осуществляется за счет выбора параметров локальных связей m_{2i}, k_{2i} , $i = \overline{1, n}$ в зависимости от знакопостоянства миноров матрицы B_2 . Разработанная иерархическая процедура синтеза фиктивных сигмоидальных управлений в условиях неопределенности входных каналов позволяет распространить результат теоремы 2.1 на многоканальные системы, приводимые к блочному виду и сохраняющие структурные свойства управляемости при допустимой вариации параметров и внешних возмущений.

В разделе 3.4 для оценивания смешанной переменной $e_2(t) = y_2 - \dot{g} + K_1 e_1$ на основе первой подсистемы (17) построен редуцированный наблюдатель

$$\dot{z} = -K_1 z + v, \quad (19)$$

где $z \in R^n$ – вектор состояния, $v \in R^n$ – вектор корректирующих воздействий наблюдателя. Задача наблюдения сводится к задаче стабилизации системы, записанной относительно ошибки наблюдения $\varepsilon = e_1 - z$, $\varepsilon \in R^n$, которая в силу (17), (19) имеет вид

$$\dot{\varepsilon} = -K_1 \varepsilon + e_2 - v. \quad (20)$$

Показано, что выбором параметров $m_i, k_i = \text{const} > 0, i = \overline{1, n}$ сигмоидальных корректирующих воздействий

$$v = M \sigma(K \varepsilon), M = \text{diag}(m_i), \quad (21)$$

$$K = \text{diag}(k_i), \sigma(K \varepsilon) = \text{col}(\sigma(k_1 \varepsilon_1), \dots, \sigma(k_n \varepsilon_n))$$

в замкнутой системе (20), (21) за заданное время $t > t_0 > 0$ обеспечивается стабилизация ошибки наблюдения и ее производной с заданной точностью: $|\varepsilon_i(t)| \leq \alpha_i$, $|\dot{\varepsilon}_i| \leq k_{1i} \alpha_i + \beta_i \Rightarrow |e_{2i} - v_i| \leq \beta_i \ll \delta_{2i}, i = \overline{1, n}$. При этом оценками неизмеряемых сигналов $e_2(t)$ служат сигмоидальные корректирующие

воздействия $v(t) \approx e_2(t)$, $t > t_0$. Для построения наблюдателя (19) не требуется точное знание массо-инерционных характеристик механической подсистемы.

В разделе 3.5 решается задача стабилизации ошибки слежения $e_3 = v - v^* \in \mathbb{R}^n$ (18) в электрической подсистеме $\dot{e}_3 = -Ae_3 + f(t) + Bu$, где элементы вектор-функции $f(t) = -Av^*(t) - Dq_2(t) - \dot{v}^*(t)$ ограничены, с помощью закона разрывного управления $u = -K_3 \text{sign}(e_3)$, где $K_3 = \text{diag}(k_{3i})$, $k_{3i} = \text{const} > 0$, $i = \overline{1, n}$, $\text{sign}(e_3) = \text{col}(\text{sign}(e_{31}), \dots, \text{sign}(e_{3n}))$, который в системе с наблюдателем (19) реализуется в виде $u = -K_3 \text{sign}(v(t) - v^*(v))$.

В разделе 3.6 представлены результаты моделирования разработанных алгоритмов применительно к трехзвенному манипулятору типа UMS-2. Особенность данного объекта: в его модели, представленной в блочной форме вход – выход, состав базисных миноров матрицы B_2 перед обобщенными моментами зависит от сектора цилиндрического объема, в котором находится конечная точка манипулятора.

В главе 4 в качестве объекта управления рассматривается двухроторная электромеханическая система с перекрестными связями и сухим трением. **В разделе 4.1** представлена математическая модель механической подсистемы

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \quad \dot{x}_2 = [(1 - K_{gy} x_3 \cos x_1) \tilde{\tau}_1 - f_1] / I_1, \\ \dot{x}_3 &= x_4, \quad \dot{x}_4 = [\tilde{\tau}_2 - f_2] / I_2, \\ \dot{x}_5 &= k_c \frac{(T_0 T_{10} + T_{11})}{T_p T_{11}} \tau_1 - \frac{1}{T_p} x_5 - \frac{k_c T_0 k_1}{T_p T_{11}} u_1, \end{aligned} \quad (22)$$

где $x_1 = \psi$, $x_3 = \varphi$ – углы тангажа и рысканья (выходные, регулируемые переменные), $-\pi/2 < x_1(t) < \pi/2$, $0 \leq x_3(t) \leq 2\pi$, x_2 , x_4 – угловые скорости, I_1 , I_2 – моменты инерции основного и хвостового винтов, K_{gy} – параметр гироскопического момента, $0 < K_{gy} < 1/(2\pi) \Rightarrow 1 - K_{gy} x_3 \cos x_1 > 0$, $f_1 = M_{FG} + M_{B\psi} + \eta_1$ – сумма моментов, приложенных к основному винту, $M_{FG} = M_g \sin x_1$, $M_{B\psi} = B_{1\psi} x_2 + B_{2\psi} \text{sign} x_2$, M_g – параметр гравитационного момента, $B_{1\psi}$ и $B_{2\psi}$ – параметры момента силы трения, $f_2 = M_{B\varphi} + M_R + \eta_2 = B_{1\varphi} x_4 + B_{2\varphi} \text{sign} x_4 + x_5 + \eta_2$ – сумма моментов, приложенных к хвостовому винту, $M_{B\varphi} = B_{1\varphi} x_4 + B_{2\varphi} \text{sign} x_4$, $B_{1\varphi}$ и $B_{2\varphi}$ – параметры момента силы трения, η_i – часть обобщенных моментов, трактуемых как неизвестные ограниченные возмущения, $|\eta_i(t)| \leq H_i$, $t \geq 0$, $\tilde{\tau}_i = a_i \tau_i^2 + b_i \tau_i$ – моменты, создаваемые приводами на основном и хвостовом винтах соответственно, a_i , b_i – коэффициенты передачи, $i = 1, 2$.

Учитываемая динамика электрических ИУ описывается уравнениями:

$$\dot{\tau}_i = -\frac{T_{i0}}{T_{i1}} \tau_i + \frac{k_i}{T_{i1}} u_i, \quad i=1,2, \quad (23)$$

где τ_i – моменты сил на валу основного и хвостового двигателей; T_{i0} , T_{i1} , k_i – параметры исполнительных устройств, u_i – разрывные управления (напряжения питания якорной цепи электроприводов), $i=1,2$. В уравнениях (22)–(23) все конструктивные коэффициенты положительные.

Для объекта (22)–(23) ставится задача синтеза закона разрывного управления в форме обратной связи, обеспечивающего отслеживание выходными переменными $x_1(t)$ и $x_3(t)$ заданных сигналов $g_1(t)$ и $g_2(t)$

$$|e_{1i}(t)| \leq \Delta_{1i}, \quad i=1,2, \quad t > t_{1i} > 0, \quad (24)$$

где $e_{11}(t) = x_1(t) - g_1(t)$, $e_{12}(t) = x_3(t) - g_2(t)$ – ошибки слежения, с учетом проектных ограничений на угловые скорости, моменты, развиваемые исполнительными устройствами, и управления

$$\begin{aligned} |x_2(t)| \leq X_{21}, \quad |x_4(t)| \leq X_{22}, \quad |\tau_i(t)| \leq T_i < b_i / (2a_i), \\ |\tilde{\tau}_i(t)| \leq \tilde{T}_i < b_i^2 / (4a_i), \quad |u_i(t)| \leq U_i, \quad t \geq 0, \quad i=1,2, \end{aligned} \quad (25)$$

выполнение которых надо обеспечить в замкнутой системе в предположениях:

1) измерениям доступны угловые положения $x_1(t)$, $x_3(t)$, задающие воздействия $g_1(t)$, $g_2(t)$ и токи якорей приводов, по которым восстанавливаются текущие значения моментов сил $\tilde{\tau}_1(t)$, $\tilde{\tau}_2(t)$;

2) генератор задающих воздействий отсутствует, их производные трактуются как ограниченные возмущения $|\dot{g}_i(t)| \leq G_{1i}$, $t \geq 0$;

3) значения коэффициентов передачи a_i, b_i , $i=1,2$ известны, остальные конструктивные коэффициенты точно не известны, имеются только диапазоны их изменения $0 < *_{\min} \leq *(t) \leq *_{\max}$, $t \geq 0$ (под символом $*(t)$ понимаются неопределенные параметры системы (22)–(23), которые могут изменяться в процессе эксплуатации), в частности $0 < \xi_{\min} \leq \xi \leq \xi_{\max}$, $\xi = 1 - K_{gy} x_3 \cos x_1$;

4) тот факт, что в замкнутой системе целенаправленно будет обеспечиваться выполнение ограничений (25), позволяет принять для целей анализа следующие оценки суммарных моментов

$$\begin{aligned} |f_1(x_1, x_2, t)| \leq F_1 = M_{g, \max} + B_{1\psi, \max} X_{21} + B_{2\psi, \max} + H_1, \\ |f_2(x_4, x_5, t)| \leq F_2 = B_{1\varphi, \max} X_{22} + B_{2\varphi, \max} + X_5 + H_2 \end{aligned}$$

и трактовать их как неизвестные ограниченные возмущения;

5) система (22)–(23) управляемая: $d\tilde{\tau}_i / d\tau_i \neq 0$, $2a_i \tau_i(t) + b_i > 0$, $t \geq 0$.

В разделе 4.2 в рамках блочного подхода с сигмоидальными локальными связями, невырожденная замена переменных $e_{21} = x_2 - x_2^* = x_2 + m_{11} \sigma(k_{11} e_{11})$, $e_{22} = x_4 - x_4^* = x_4 + m_{12} \sigma(k_{12} e_{12})$, $e_{31} = \tilde{\tau}_1 - \tilde{\tau}_1^* = \tilde{\tau}_1 + m_{21} \sigma(k_{21} e_{21})$, $e_{32} = \tilde{\tau}_2 - \tilde{\tau}_2^* = \tilde{\tau}_2 + m_{22} \sigma(k_{22} e_{22})$ приводит к следующей замкнутой системе:

$$\begin{aligned}\dot{e}_{1i} &= e_{2i} - \dot{g}_i - m_{1i}\sigma(k_{1i}e_{1i}), \quad \dot{e}_{2i} = [\zeta_i(e_{3i} - m_{2i}\sigma(k_{2i}e_{2i})) - f_i]/I_i + \Lambda_{1i}, \\ \dot{e}_{3i} &= (2a_i\tau_i + b_i) \cdot \left(-\frac{T_{i0}}{T_{i1}}\tau_i + \frac{k_i}{T_{i1}}u_i \right) + \Lambda_{2i}, \quad i = 1, 2,\end{aligned}\quad (26)$$

где $\Lambda_{1i} = 0, 5m_{1i}k_{1i}(1 - \sigma^2(k_{1i}e_{1i}))\dot{e}_{1i}$, $\Lambda_{2i} = 0, 5m_{2i}k_{2i}(1 - \sigma^2(k_{2i}e_{2i}))\dot{e}_{2i}$, $\zeta_2 = 1$, $\zeta_1 = \xi(x_1, x_3)$. В системе (26) сформирован закон разрывного управления, характерный для электрических ИУ, работающих в ключевом режиме:

$$u_i = -m_{3i}\text{sign}(e_{3i}), \quad m_{3i} > 0, \quad i = 1, 2. \quad (27)$$

Разработана процедура выбора параметров обратных связей, где нижние границы на выбор амплитуд получены из достаточных условий сходимости (24) с помощью второго метода Ляпунова, в то время как ограничения (25) приводят к верхним границам на выбор амплитуд. Получена предельная точность слежения, которая может быть достигнута при имеющихся ограничениях.

Возможность выполнения проектных ограничений (25) на стадии синтеза в рамках данного подхода связана с тем, что за счет стабилизации невязок фиктивные управления $x_2(t), x_4(t), \tilde{r}_1(t), \tilde{r}_2(t)$ отслеживают всюду ограниченные сигмоидальные сигналы, амплитуды которых не превосходят верхних границ в проектных ограничениях.

В разделе 4.3 на основе кинематических соотношений механической подсистемы (22) $\dot{q}_1 = q_2$, где $q_1 = \text{col}(x_1, x_3)$, $q_2 = \text{col}(x_2, x_4)$ – векторы угловых положений и скоростей, для оценки угловых скоростей строится наблюдатель

$$\dot{z} = v, \quad (28)$$

где $z = \text{col}(z_1, z_2) \in R^2$ – вектор состояния наблюдателя, $v = P\sigma(L\varepsilon)$ – вектор сигмоидальных корректирующих воздействий, $\varepsilon = q_1 - z \in R^2$ – вектор ошибок наблюдения, $P = \text{diag}(p_i)$, $L = \text{diag}(l_i)$, $p_i = \text{const} > 0$, $l_i = \text{const} > 0$, $i = 1, 2$, $\sigma(L\varepsilon) = \text{col}(\sigma(l_1\varepsilon_1), \sigma(l_2\varepsilon_2))$.

Задача наблюдения сводится к стабилизации ошибок наблюдения и их производных и решается на основе виртуальной системы

$$\dot{\varepsilon} = q_2 - v = q_2 - P\sigma(L\varepsilon), \quad \ddot{\varepsilon} = \dot{q}_2 - P\frac{\partial\sigma(L\varepsilon)}{\partial\varepsilon}\dot{\varepsilon},$$

где $\partial\sigma(L\varepsilon)/\partial\varepsilon = \text{diag}(\partial\sigma(l_i\varepsilon_i)/\partial\varepsilon_i)$, $i = 1, 2$.

Зададимся точностью стабилизации ошибки наблюдения $\delta_{1i} = \text{const} > 0$ вместе с ее производной $\delta_{2i} = \text{const} > 0$:

$$\begin{aligned}|\varepsilon_i(t)| \leq \delta_{1i}, \quad |\dot{\varepsilon}_i(t)| = |q_{2i}(t) - v_i(t)| \leq \delta_{2i} &\Rightarrow v_i(t) = q_{2i}(t) \pm \delta_{2i}, \\ t > t_{0i}, \quad 0 < t_{0i} < t_{1i}, \quad i = 1, 2.\end{aligned}\quad (29)$$

Требования к процессу оценивания (29) достигаются выбором параметров коррекции p_i, l_i , $i = 1, 2$. В замкнутой системе с наблюдателем (28) управление

(27) реализуется в виде $u_i = -m_{3i} \text{sign}(\hat{e}_{3i})$, $i = 1, 2$, где $\hat{e}_{2i}(t) = v_i(t) + m_{1i} \sigma(k_{1i} e_{1i}(t))$, $\hat{e}_{3i}(t) = \tilde{\tau}_i(t) + m_{2i} \sigma(k_{2i} \hat{e}_{2i}(t))$, $i = 1, 2$.

Использование наблюдателя (28) с сигмоидальной коррекцией по сравнению с наблюдателем с разрывной коррекцией, где для получения искомым оценок необходимо отфильтровать высокочастотную составляющую полезного сигнала, позволяет снизить вычислительную сложность и обеспечить лучшее качество оцениваемых сигналов (гладкость). Но недостатком обоих наблюдателей является потеря работоспособности при наличии шумов в измерениях, которые требуют предварительной фильтрации.

В разделе 4.4 представлены результаты численного моделирования разработанных алгоритмов. Показано, что по сравнению с системой с линейными фиктивными управлениями, при использовании сигмоидальных локальных связей величина перерегулирования меньше в 2,5 – 4 раза. Однако в рамках разработанной процедуры, в общем случае, не гарантируется тотальное выполнение ограничений по угловым скоростям в начале переходных процессов. Для их обеспечения потребуется уточнение процедуры настройки параметров регулятора с учетом области допустимых начальных условий и оценки времени переходных процессов.

В главе 5 в качестве объекта управления рассматривается ходовая тележка однобалочного мостового крана (ОМК), перемещающая грузы, закрепленные на стержне. Особенность объекта заключается в наличии одного управления при двух степенях свободы, неопределенных массо-инерционных характеристиках и воздействии внешнего неконтролируемого возмущения.

В разделе 5.1 представлена математическая модель объекта

$$\dot{q}_1 = q_2, \quad \dot{q}_2 = f_1(q_1, q_2) + f_2(q_1, q_2)(u + \eta(t)),$$

где $q_1 = \text{col}(q_{11}, q_{12}) \in \mathbb{R}^2$, $q_2 = \text{col}(q_{21}, q_{22}) \in \mathbb{R}^2$ – векторы обобщенных координат и скоростей, $f_1 = \text{col}(f_{11}, f_{12})$, $f_2 = \text{col}(f_{21}, f_{22})$,

$$f_{11} = \left[-m \sin q_{12} (l q_{22}^2 + g \cos q_{12}) \right] / \left[M + m \sin^2(q_{12}) \right],$$

$$f_{12} = \left[-\sin q_{12} ((M + m)g + ml \cos q_{12} \cdot q_{22}^2) \right] / \left[l(M + m \sin^2(q_{12})) \right],$$

$$f_{21} = 1 / \left[M + m \sin^2(q_{12}) \right], \quad f_{22} = \cos q_{12} / \left[l(M + m \sin^2(q_{12})) \right],$$

g – ускорение свободного падения, M – масса тележки, к которой на стержне длиной l прикреплен груз с массой m , $\eta(t)$ – неизвестное ограниченное возмущение, u – управляющая сила. Предположения:

1) $\eta(t)$ – кусочно-гладкая ограниченная функция с ограниченными производными, $|\eta(t)| \leq H$, $|\dot{\eta}(t)| \leq H_1$, $t \geq 0$, H, H_1 – известные константы;

2) параметры l, m, M точно не известны;

3) груз рассматривается как точечная масса, жесткость и масса стержня не учитываются;

4) измерению подлежит положение тележки $q_{11}(t)$, шумы в измерениях

отсутствуют.

Ставится задача синтеза закона управления u в форме обратной связи, обеспечивающего заданное положение тележки ОМК $q_{11d} = \text{const}$ и стабилизацию остальных переменных состояния. В условиях неопределенности данная задача решается с заданной точностью:

$$e_{11} = q_{11} - q_{11d}, \quad |e_{11}(t)| \leq \Delta_{11}, \quad |q_{2i}(t)| \leq \Delta_{2i}, \quad t > T > 0.$$

В разделе 5.2 для решения поставленной задачи предложен комбинированный закон управления, который содержит линейное и сигмоидальное слагаемые:

$$u = -k_1 e_{11} - M_2 \sigma(k_2 q_{21}), \quad (30)$$

где $k_2, M_2 = \text{const} > 0$. Линейная часть служит для стабилизации ошибки регулирования e_{11} , скорость сходимости зависит от выбора $k_1 > 0$, а сигмоидальная – для обеспечения инвариантности по отношению к внешнему возмущению. Параметры управления (30) были приняты с учетом свойства пассивности системы. Для реализации базового закона (30) построен наблюдатель состояния, аналогичный (28), который в данном случае имел первый порядок и с заданной точностью предоставлял оценку скорости тележки ОМК q_{21} .

В разделе 5.3 представлены результаты моделирования разработанных алгоритмов в системе Matlab-Simulink с использованием параметров промышленного однобалочного мостового крана СХТС10-ТОН. Масса грузов, переносимых данным краном, варьируется в пределах от 500 до 9071,84 [кг]. Моделирование проводилось при следующих числовых значениях: $M = 612,35$ [кг] – масса тележки, $l = 6$ [м] – длина стержня. Внешние возмущения описывались кусочно-гладкой периодической функцией $\eta(t) = 0,2t$ с главным периодом $T = 1$ [с]. Требовалось решить типовую задачу для данного объекта управления – переместить тележку с подвешенным грузом из положения $q_{1i}(0) = 0, q_{2i}(0) = 0, i = 1, 2$, которое соответствовало началу пролета, в положение $q_{11d} = 13,31$ [м] – конец пролета с точностью 0,1 [м]. Для достижения цели управления и исходя из предельной допустимой массы груза $m = 9071,84$ [кг] были приняты следующие параметры закона управления (30):

$$k_1 = 20, \quad k_2 = 10, \quad M_2 = 200. \quad (31)$$

Было проведено 3 эксперимента с различными массами груза 500, 4785,92 и 9071,84 [кг], но с одинаковыми параметрами регулятора (31). Во всех экспериментах цель управления достигалась с обеспечением практически монотонных переходных процессов для ошибки регулирования, а максимальная амплитуда колебаний груза составила 0,0245 [рад].

Было также проведено моделирование с параметрами регулятора (31) и массой груза $m = 5500$ [кг], а для сравнения был построен классический закон

управления в виде ПД-регулятора $u = -k_{p1}e_{11} - k_{p2}q_{21}$, где параметры $k_{p1} = 20$, $k_{p2} = 330$ были приняты из условий обеспечения заданной точности.

Для оценки скорости тележки q_{21} и реализации законов управления строился наблюдатель состояния пониженного порядка с сигмоидальным корректирующим воздействием с амплитудой $U = 5$ и большим коэффициентом $k = 250$, выбранными исходя из точности оценивания 0,01 [м/с]. Для численного интегрирования замкнутой системы использовался метод Эйлера с постоянным шагом 10^{-3} .

На рис. 1, 2 для замкнутых систем представлены графики ошибок оценивания скорости $q_{21}(t)$ с помощью корректирующего воздействия наблюдателя $v(t)$ и ошибок регулирования заданного положения $e_{11}(t) = q_{11}(t) - q_{11d}$ соответственно. На рис. 3 приведены графики угла отклонения стержня от вертикальной оси $q_{12}(t)$. На рис. 4 представлены графики управляющих воздействий $u(t)$.

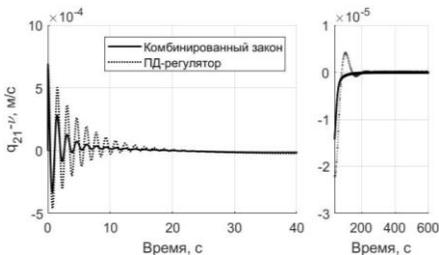


Рис. 1. График ошибки оценивания скорости $q_{21}(t) - v(t)$

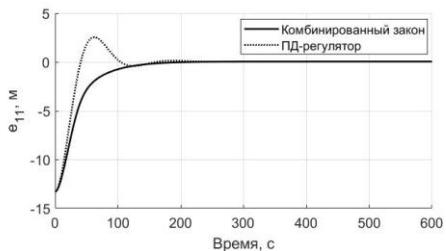


Рис. 2. График ошибки регулирования $e_{11}(t)$

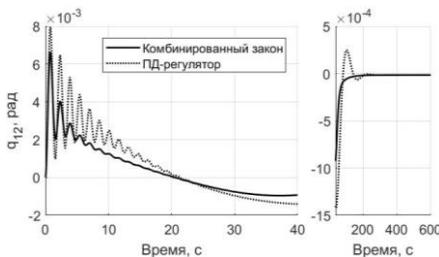


Рис. 3. График угла отклонения стержня от вертикальной оси $q_{12}(t)$

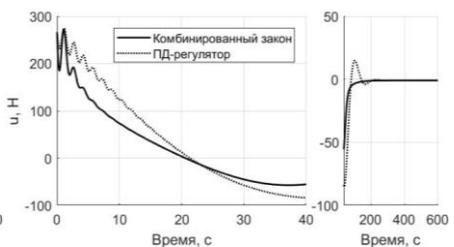


Рис. 4. График управления $u(t)$

Результаты моделирования подтвердили эффективность разработанного подхода (рис. 1, 2). Достигнутая точность стабилизации заданного положения составила 0,0499 [м] для обоих законов управления. Из рис. 3, 4 следует, что

благодаря использованию ограниченной сигмоидальной функции, комбинированный закон управления обеспечивает меньшую величину перегулирования $e_{11}(t)$, $q_{12}(t)$ с меньшей амплитудой управления $u(t)$ в переходном процессе (до 4-х раз) при воздействии внешнего возмущения.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе в рамках решения фундаментальной проблемы теории и практики автоматического управления – подавления воздействия на регулируемые переменные несогласованных возмущений – разработан метод блочного синтеза сигмоидальных обратных связей для систем общего вида и для конкретных мехатронных объектов управления с учетом их особенностей. Получены робастные и универсальные алгоритмы управления, обеспечивающие заданные характеристики процесса слежения при различных режимах работы и не требующие перенастройки при изменении условий эксплуатации и внешних факторов в допустимых пределах.

Получены следующие основные результаты.

1. Формализован новый тип гладких ограниченных сигмоидальных обратных связей и выбор их параметров. Данные обратные связи подавляют действие аддитивных несогласованных возмущений и сочетают преимущества линейных управлений с большими коэффициентами и разрывных управлений, но, в отличие от них, реализуемы в практических приложениях.

2. Разработана декомпозиционная процедура синтеза сигмоидальных обратных связей, обеспечивающая в нелинейных одноканальных объектах заданную точность стабилизации ошибки слежения за заданное время при действии внешних несогласованных возмущений.

3. Разработан метод синтеза редуцированного наблюдателя с сигмоидальными корректирующими воздействиями для оценивания обобщенных скоростей по измерениям обобщенных координат неопределенно заданных мехатронных систем.

4. Разработана иерархическая процедура настройки амплитуд сигмоидальных управлений с неопределенной матрицей. Решена задача отслеживания траекторий, заданных в системе координат конечной точки робота-манипулятора с неопределенными массо-инерционными характеристиками.

5. Разработана процедура синтеза следящей системы с сигмоидальными обратными связями с учетом ограничений на переменные состояния и управления для двухроторной электромеханической системы с перекрестными связями, при наличии сухого трения и других несогласованных возмущений. Показано, что по сравнению с линейными фиктивными управлениями сигмоидальные локальные связи позволяют уменьшить величину перегулирования переменных состояния.

6. Построен закон с линейной и сигмоидальной частью, решающий задачу

стабилизации заданного положения ходовой тележки ОМК. Показано, что при действии внешних возмущений предложенный подход позволяет снизить амплитуду колебаний груза по сравнению с ПД-регулятором, что повышает надежность и безопасность процесса транспортировки.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, проиндексированные в Web of Science/Scopus

1. Kochetkov S.A., Krasnova S.A., Antipov A.S. Cascade Synthesis of Electromechanical Tracking Systems with Respect to Restrictions on State Variables // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50. No. 1. P. 10142–10147.
2. Krasnova S.A., Antipov A.S. Hierarchical Design of Sigmoidal Generalized Moments of Manipulator under Uncertainty // Automation and Remote Control. 2018. Vol. 79. No. 3. P. 554–570.
3. Antipov A.S., Krasnov D.V., Utkin A.V. Decomposition Synthesis of the Control System of Electromechanical Objects in Conditions of the Control System of Electromechanical Objects in Conditions of Incomplete Information // Mechanics of Solids. 2019. Vol. 54. No. 5. P. 47-60.
4. Krasnova S.A., Antipov A.S. Block Synthesis of Invariant Electromechanical Systems Subject to the Restrictions on the State Variables // Proc. of 2016 International Conference Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems. 2016. P. 3–6.
5. Antipov A.S., Krasnova S.A. Decomposition synthesis of invariant systems with nonlinear local feedbacks // Proc. of 2018 14th International Conference Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems. 2018. P. 1–4.
6. Antipov A.S., Krasnova S.A. Block Approach to Controlling a Twin Rotor Electromechanical System // Proc. of the 15th International Conference Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems. 2020. P. 1–4.
7. Krasnova S.A., Antipov A.S. Block synthesis of tracking system for inverted pendulum via sigmoidal feedbacks // Proc. of 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2019. P. 1–5.
8. Antipov A.S., Krasnova S.A. Block Approach with Sigmoidal Feedbacks for Twin Rotor MIMO System Control // Proc. of 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2020. P. 519–524.
9. Antipov A.S., Krasnova S.A. The block synthesis of the tracking system with sigmoidal local feedbacks // Proc. of the 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development". 2018. P. 1–5.
10. Antipov A.S., Krasnova S.A., Pivneva S.V. Decomposition Method for Control of Twin Rotor Electromechanical System // Proc. of 13th International Conference "Management of Large-Scale System Development". 2020. P. 1–5.
11. Krasnova S.A., Antipov A.S. Cascade design of electromechanical systems considering restrictions on the state variables // Proc. of 13th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2016, Novosibirsk). 2016. Vol. 10. P. 208–215.

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в RSCI

12. Антипов А.С., Краснова С.А. Система стабилизации положения тележки крана с использованием сигмоидальной функции // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20. № 10. С. 609–614.

13. Антипов А.С., Краснова С.А. Управление двухроторным механизмом в условиях неполной информации // Информационные технологии и вычислительные системы. 2020. № 1. С. 65–75.

14. Антипов А.С., Краснова С.А. Блочный синтез системы слежения для двухроторной электромеханической системы при ограничениях на переменные состояния // Прикладная математика и механика. 2021. Т. 85. № 1. С. 3–20.

Доклады

15. Антипов А.С., Краснова С.А. Декомпозиционный синтез инвариантных систем с нелинейными локальными связями // Материалы 14-й Международной конференции «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого). М.: ИПУ РАН, 2018. С. 36–39.

16. Антипов А.С., Краснова С.А. Блочный подход к управлению двухроторной электромеханической системой // Материалы 15-й Международной конференции «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого). М.: ИПУ РАН, 2020. С. 46–49.

17. Антипов А.С., Краснова С.А. Блочный синтез системы слежения с сигмоидальными локальными связями // Материалы 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018). М.: ИПУ РАН, 2018. Т. 1. С. 341–343.

18. Антипов А.С., Краснова С.А., Пивнева С.В. Стабилизация двухроторной электромеханической системы на основе принципа декомпозиции // Труды 13-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2020, Москва). М.: ИПУ РАН, 2020. С. 622–632.

19. Антипов А.С., Краснова С.А. Стабилизация положения тележки крана в условиях неопределенности // Труды 13-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ XIII). М.: ИПУ РАН, 2019. С. 687–691.

20. Антипов А.С., Краснова С.А. Стабилизация положения тележки крана в условиях неполной информации // Труды 21-й Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (ПУМСС-2019, Самара). Самара: ООО «Офорт», 2019. Т. 2. С. 59–62.

Вклад автора в совместные публикации.

В работе [3] – результаты численного моделирования в среде MATLAB-Simulink;

в работах [6, 8-10, 12-14, 16-20] – формализация математических моделей объектов управления, постановка задач и обоснование методов решения, результаты численного моделирования;

в работах [1, 2, 4, 5, 7, 11, 15] – методы решения задач управления и наблюдения, результаты численного моделирования.