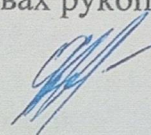


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи



Суслин Николай Александрович

**Синтез и исследование системы управления
электропривода мехатронного модуля промышленного
робота**

Направление подготовки

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2026

Никитина
Елена Николаевна

Проверено

23.03.2026 Зачтено Библиотека

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»

Научный руководитель

Кандидат технических наук,
доцент кафедры Горькавый Александр
Иванович

Рецензент

Кандидат технических наук,
доцент кафедры "Электротехника,
электроника и электромеханика"
ФГБОУ ВО ДВГУПС Малышева О.А.

Защита состоится «19» марта 2026 года в 10 часов 00 мин на
заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению
подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в
Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681913,
г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 104/3.

Автореферат разослан 13 марта 2026 г.

Секретарь ГЭК



А.В. Бузикаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Современные промышленные роботы представляют собой сложные мехатронные системы, эффективность функционирования которых во многом определяется качеством управления электроприводами. Традиционные подходы к настройке регуляторов, основанные на методах подчиненного регулирования и классических ПИД-алгоритмах, обладают рядом недостатков: снижение быстродействия при увеличении числа контуров, необходимость экспериментальной настройки, ограниченные возможности обеспечения требуемых динамических характеристик в условиях действия возмущений. Особую актуальность приобретает разработка методов синтеза регуляторов, позволяющих формировать заданные динамические свойства системы на основе математической модели объекта, а также применение интеллектуальных технологий управления, способных учитывать неопределенность параметров и неполноту исходной информации. В этой связи представляется актуальным исследование возможностей модального управления и нечеткой логики для синтеза систем управления электроприводами мехатронных модулей промышленных роботов.

Целью данной работы является синтез и исследование системы управления электропривода мехатронного модуля промышленного робота на основе модальных и нечетких регуляторов, обеспечивающих повышение быстродействия, точности и устойчивости при отработке управляющих воздействий и подавлении возмущений.

Основные задачи магистерской диссертации заключаются в анализе существующих подходов к настройке регуляторов электроприводов и выявлении их недостатков; разработке методики синтеза модальных ПИ- и ПИД-регуляторов для электропривода мехатронного модуля; исследовании альтернативного способа настройки модального ПИД-регулятора с токовой

компенсацией дифференциального канала; реализации нечетких регуляторов с алгоритмами вывода Мамдани и Сугено для контура скорости; проведении сравнительного анализа динамических характеристик разработанных систем и оценке эффективности предложенных решений.

Характеристика объекта и предмета исследования. Объектом исследования является электропривод мехатронного модуля промышленного робота на основе двигателя постоянного тока. Предметом исследования представляются методы и алгоритмы управления, реализуемые модальными и нечеткими регуляторами, а также динамические характеристики синтезированных систем электропривода.

Характеристика методологического аппарата. При исследовании используются методы теории автоматического управления, модального синтеза, математического моделирования, а также теория нечетких множеств и нечеткого логического вывода. Моделирование динамических процессов выполняется в среде Matlab.

Научную новизну в данной работе можно определить как развитие методов модального синтеза для настройки ПИ- и ПИД-регуляторов применительно к электроприводам мехатронных модулей, позволяющее формировать заданные динамические характеристики без необходимости экспериментальной настройки; разработку альтернативной структуры модального ПИД-регулятора с токовой компенсацией дифференциального канала, упрощающей алгоритмизацию процесса настройки; а также обоснование эффективности применения нечетких регуляторов Мамдани и Сугено для повышения качества управления скоростью электропривода.

Практическая значимость подтверждается возможностью использования разработанных методов и моделей при проектировании и модернизации

систем управления промышленных роботов, а также апробацией результатов на всероссийских и международных научно-практических конференциях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе рассмотрены промышленные роботы как исполнительные элементы автоматизированных систем управления технологическими процессами. Проведена классификация промышленных роботов по типу выполняемых операций, степени специализации, системе координат перемещений, количеству степеней свободы и грузоподъемности. Проанализированы основные технические характеристики, определяющие эффективность их работы: рабочая зона, скорость перемещения, точность позиционирования. Представлена структурная модель системы электропривода мехатронного модуля, включающая управляющую и электромеханическую подсистемы, силовой преобразователь, электродвигатель, датчики обратной связи и интерфейсные устройства.

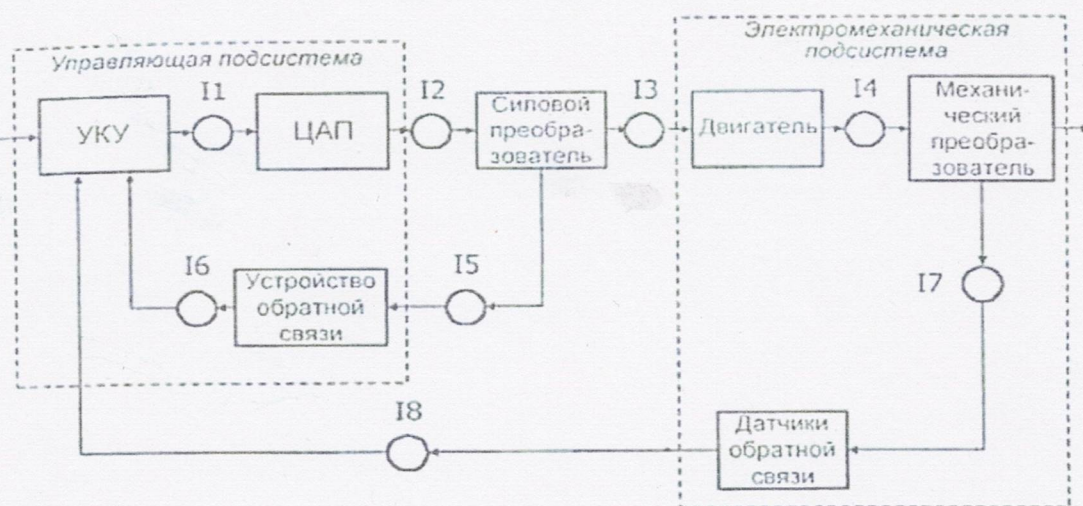


Рисунок 1 - Структура традиционного электропривода

Во второй главе выполнен анализ существующих подходов к настройке регуляторов электроприводов. Рассмотрены особенности применения ПИ-регуляторов в системах подчиненного регулирования, их преимущества и недостатки. Показано, что такие системы обеспечивают высокую точность, однако обладают относительно низким быстродействием из-за последовательного взаимодействия контуров регулирования. Исследованы ПИД-регуляторы и методы настройки их параметров, включая методы Зиглера-Никольса и CHR.

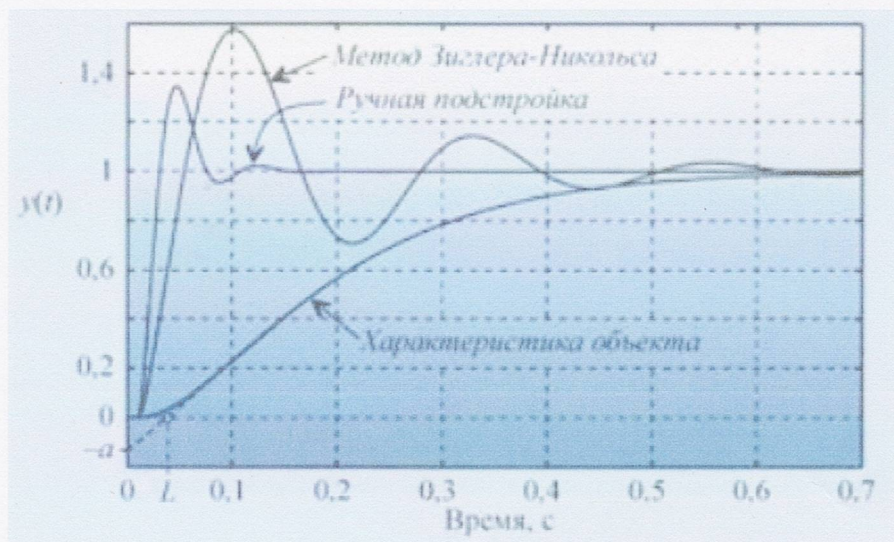


Рисунок 2 – Результат настройки ПИД-регулятора для объекта

Выявлены недостатки традиционных методов, связанные с использованием упрощенных моделей объекта управления и необходимостью последующей ручной настройки. Обоснована необходимость разработки более универсальных и эффективных подходов к синтезу регуляторов.

В третьей главе выполнен расчет и исследование функционирования систем электропривода с модальными регуляторами. Рассмотрена методика синтеза модального ПИ-регулятора для электропривода мехатронного модуля на основе двигателя постоянного тока.

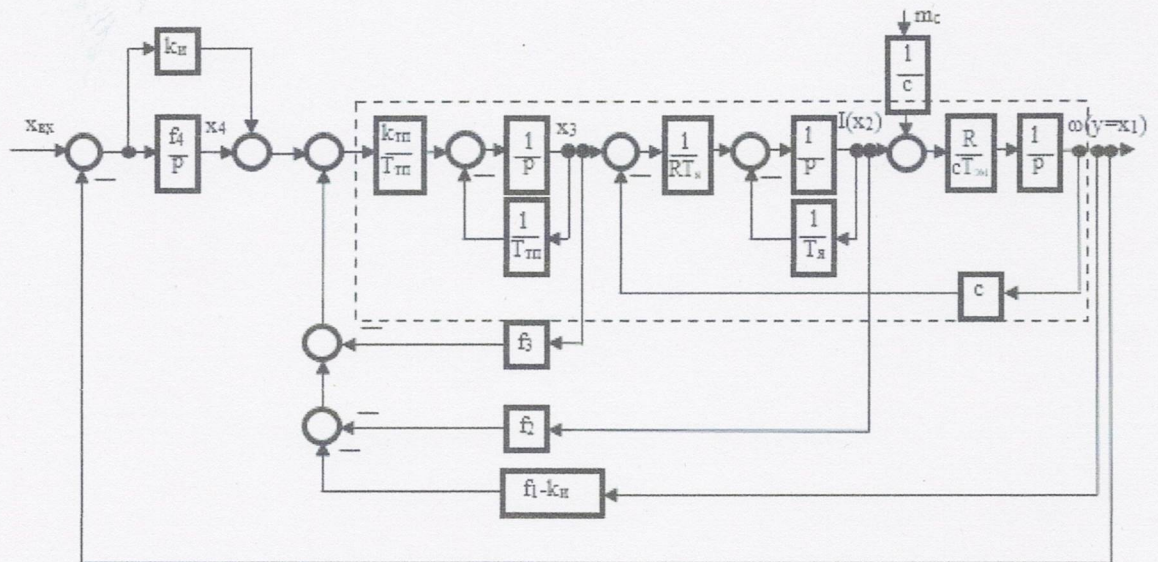


Рисунок 3 - Структурная схема электропривода мехатронного модуля с модальным ПИД-регулятором

Приведено математическое описание системы в пространстве состояний и выполнен расчет параметров регулятора с использованием биномиальной формы характеристического уравнения. На основе полученных результатов построена математическая модель системы в среде Matlab и проведено моделирование переходных процессов. Анализ графиков показал, что система обладает астатизмом как по задающему, так и по возмущающему воздействию, и характеризуется малой динамической ошибкой.

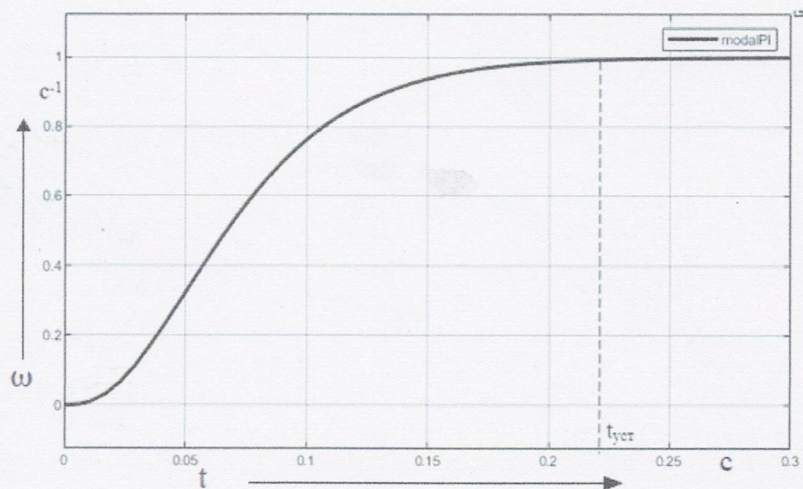


Рисунок 4 - Переходный процесс системы с модальным ПИ-регулятором по задающему воздействию

Далее рассмотрен синтез модального ПИД-регулятора, обеспечивающего повышение быстродействия системы благодаря использованию дифференциального канала. Показано, что применение модального управления позволяет гибко настраивать динамические характеристики системы и улучшать качество переходных процессов.

В четвертой главе рассмотрен альтернативный способ настройки модального ПИД-регулятора с токовой компенсацией дифференциального канала.

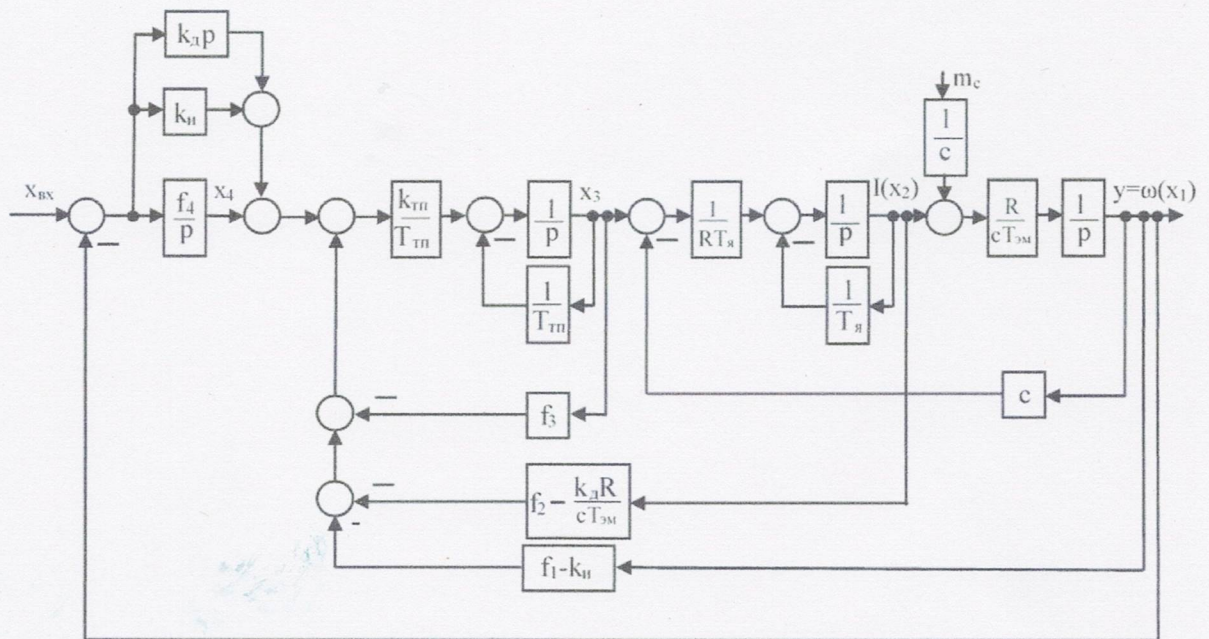


Рисунок 5 - Структурная схема с модальным ПИД-регулятором с альтернативной компенсацией дифференциального канала

Предложенный метод предполагает перенос компенсации дифференциального канала в канал обратной связи по второй координате, что позволяет упростить расчет параметров регулятора и повысить удобство алгоритмизации процесса настройки. Выполнен расчет параметров системы и проведено моделирование переходных процессов.

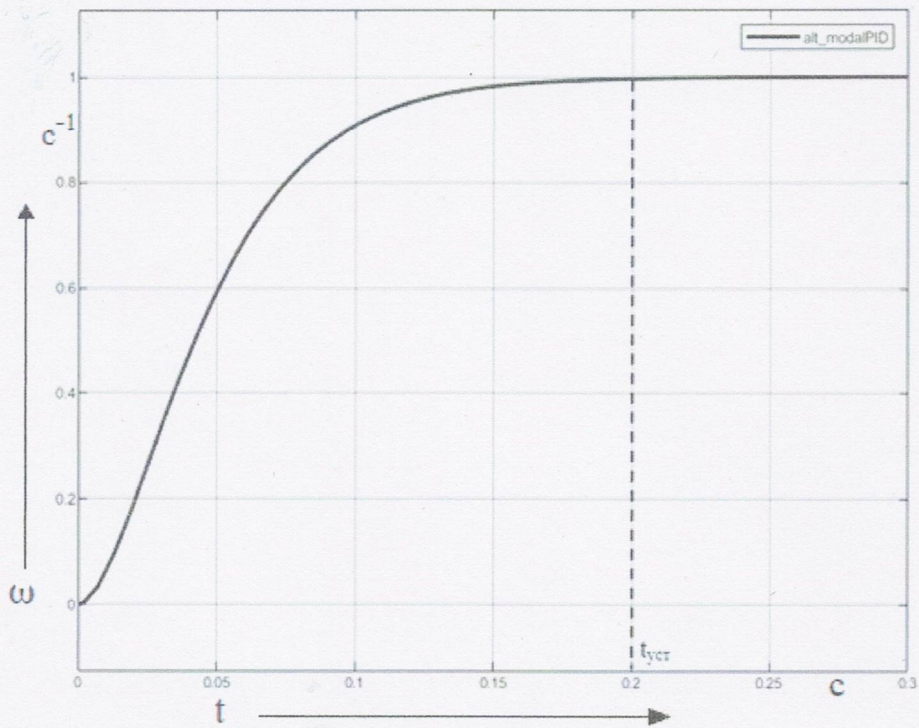


Рисунок 6 - Переходный процесс системы с модальным ПИД-регулятором по задающему воздействию

Результаты показали, что предложенная структура регулятора обеспечивает динамические характеристики, аналогичные предыдущему варианту, при этом отличается более простой реализацией и создает предпосылки для построения комбинированных систем управления.

В пятой главе исследована система управления электроприводом с применением нечетких регуляторов. Рассмотрена настройка внутреннего контура тока на модульный оптимум. Выполнен синтез нечеткого регулятора скорости на основе алгоритмов Мамдани и Сугено.

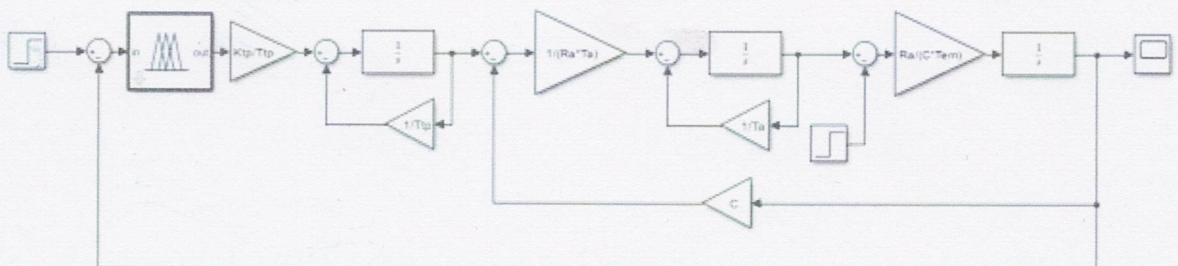


Рисунок 7 - Двухконтурная система с нечетким регулятором скорости

Описан процесс формирования функций принадлежности и базы правил нечеткого вывода. Проведено моделирование системы и сравнение переходных процессов для классических и нечетких регуляторов.

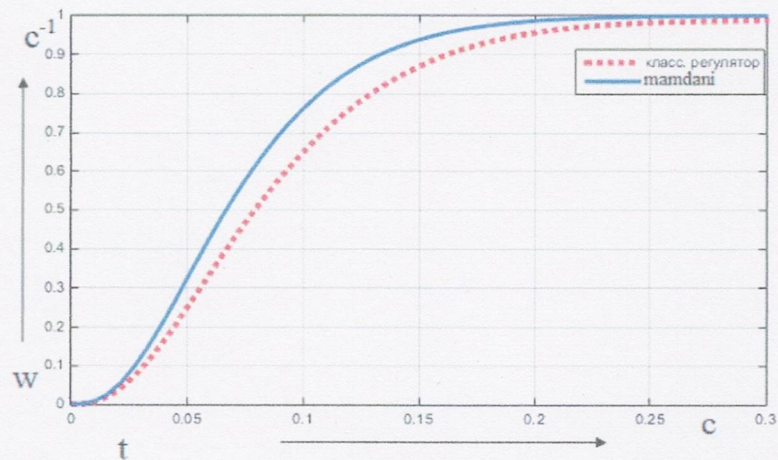


Рисунок 8 - График переходного процесса по скорости с классическим и нечетким (mamdani) регуляторами

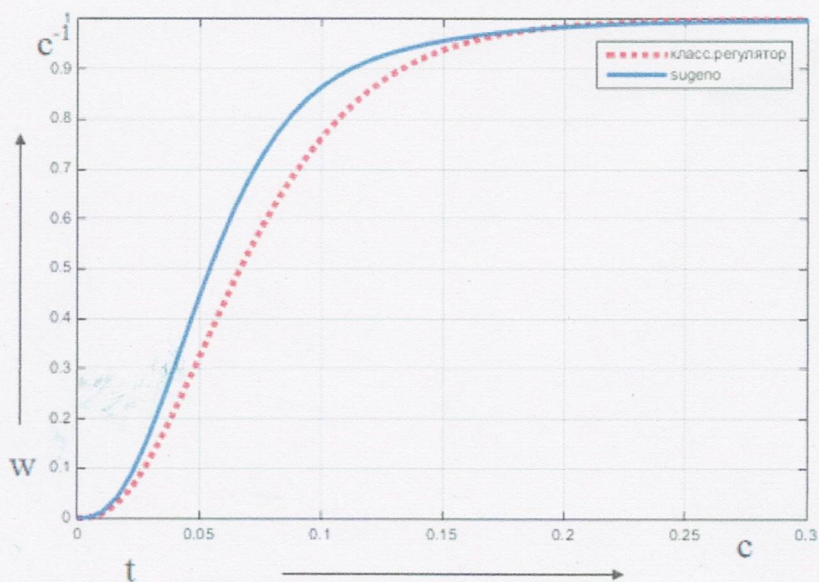


Рисунок 9 - График переходного процесса по скорости с классическим и нечетким (sugeno) регуляторами

Полученные результаты показали, что применение нечетких алгоритмов позволяет уменьшить время переходного процесса с 0,25 до 0,2 секунды и повысить качество регулирования скорости электропривода. Оба типа нечетких регуляторов продемонстрировали работоспособность и эффективность в составе системы управления.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ существующих подходов к настройке регуляторов электроприводов, выявлены их основные недостатки: снижение быстродействия при увеличении числа контуров, необходимость экспериментальной настройки, ограниченные возможности обеспечения требуемых динамических характеристик.
2. Разработана методика синтеза модальных ПИ- и ПИД-регуляторов для электропривода мехатронного модуля промышленного робота, позволяющая формировать заданные динамические характеристики на основе математической модели объекта без необходимости экспериментальной настройки.
3. Предложен альтернативный способ настройки модального ПИД-регулятора с токовой компенсацией дифференциального канала, упрощающий алгоритмизацию процесса настройки и создающий предпосылки для построения комбинированных систем управления.
4. Реализованы нечеткие регуляторы с алгоритмами вывода Мамдани и Сугено для контура скорости электропривода. Показано, что применение нечетких алгоритмов позволяет уменьшить время переходного процесса на 20 % по сравнению с классическим регулятором.
5. Проведено имитационное моделирование разработанных систем в среде Matlab, подтвердившее их работоспособность и эффективность. Полученные переходные процессы соответствуют требуемым показателям качества, системы обладают астатизмом и малой динамической ошибкой при воздействии возмущений.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Суслин Н.А. Повышение быстродействия системы управления электроприводом с использованием модального регулятора / Н.А. Суслин, // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы IX Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06–10 апреля 2026 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2026

2. Суслин Н.А. Синтез и исследование системы управления электропривода мехатронного модуля промышленного робота / Н.А. Суслин // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы IX Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 06–10 апреля 2026 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2026