

## АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени «доктор философии» (PhD) по специальности 8D07101 – «Автоматизация и управление»

**НАЗЕНОВА ГАУХАР МЫРЗАБЕКҚЫЗЫ**

### **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКИХ ПОКРЫТИЙ**

**Основная идея данного исследования:** Диссертационная работа посвящена синтезу алгоритмов адаптивного управления роботом-манипулятором для задач аддитивного производства медицинских покрытий. Исследование направлено на повышение точности и скорости перемещения рабочего инструмента робота (плазмотрона) по заданной 3D-траектории, что является ключевым условием равномерности и качества наносимого покрытия.

В работе предложены и обоснованы:

- адаптивный метод управления последовательным манипулятором с силовым управлением, основанный на методе вычисляемых крутящих моментов;
- применение метода инверсной динамики (компенсации динамики объекта и возмущений) для траекторного управления;
- новый метод автоматической генерации траектории движения робота-манипулятора по данным 3D-модели поверхности, основанный на конструировании векторных полей на треугольных сетках.

Разработанные методы проверены как средствами математического моделирования, так и в ходе натурных экспериментов на роботизированном участке микроплазменного напыления покрытий. Полученные результаты демонстрируют улучшение точности управления и устойчивости к возмущениям по сравнению с традиционными решениями.

**Ключевые слова:** последовательный робот-манипулятор, адаптивное управление, инверсная динамика, траекторное управление, аддитивное производство, микроплазменное напыление покрытий.

**Актуальность.** В современных условиях развития робототехнических систем особое внимание уделяется автоматизации технологических процессов аддитивного производства, в частности нанесению покрытий на медицинские имплантаты. Использование роботов-манипуляторов в качестве исполнительных устройств позволяет реализовать высокоточную и воспроизводимую обработку сложных поверхностей по заранее построенной 3D-модели. Это открывает возможности для послойного формирования функциональных покрытий с заданными характеристиками, востребованных в медицине и биоинженерии.

В то же время ключевым вызовом остается задача управления движением многозвенного робота-манипулятора, обеспечивающего быстрое и точное следование траектории инструмента по сложным поверхностям. Применяемые в промышленных контроллерах алгоритмы управления, как правило, ограничены пропорционально-дифференциальными или линейными регуляторами по положению отдельных звеньев, что снижает эффективность при работе на высоких скоростях и не учитывает динамику объекта и возмущений. Современное производство требует более гибких и адаптивных методов управления, позволяющих синтезировать траектории движения инструмента без детального разложения по звеньям и компенсировать нелинейные эффекты.

В диссертационной работе предложены новые методы адаптивного управления, основанные на применении инверсной динамики и вычисляемых крутящих моментов, а также метод автоматической генерации траектории движения инструмента по данным 3D-сканирования объекта. Эти подходы позволяют повысить точность и скорость движения инструмента, а также производительность всего процесса нанесения покрытий.

Диссертационная работа выполнена в рамках проекта с госбюджетным (грантовым) финансированием Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (КН МНВО РК) № AP19679327 «Методы машинного обучения в задачах автоматического управления и инерциальной навигации мобильных роботов» по приоритету «Информационные, коммуникационные и космические технологии», по подприоритету «Интеллектуальные робототехнические системы».

**Объектом исследования** является робот-манипулятор с программируемым контроллером управления и реализуемый роботом технологический процесс аддитивного производства медицинских покрытий.

**Предметом исследования** является применение методов адаптивного управления к задачам контроля перемещения рабочего инструмента многозвенного робота-манипулятора, выполняющего напыление медицинских покрытий.

**Цель исследования:** разработка алгоритмов адаптивного управления роботом-манипулятором, обеспечивающих достаточно высокую скорость и точность перемещения рабочего инструмента робота по задаваемой траектории в процессе аддитивного производства медицинских покрытий.

**Задачи исследования:**

1. Изучить современные подходы к созданию робастных и адаптивных систем траекторного управления манипуляторами. Исследовать возможность модификации наиболее перспективных методов траекторного управления манипуляторами для повышения их робастности или создания адаптивных методов на их основе.

2. Выполнить анализ особенностей роботов-манипуляторов как объектов управления и выявить факторы неопределённости, влияющие на качество управления и траекторного слежения.

3. Синтезировать адаптивный алгоритм траекторного управления манипулятором, устойчивый к влиянию возмущений на основе метода компенсации динамики объекта и возмущений.

4. Провести экспериментальное исследование рабочих характеристик методов адаптивного управления манипуляторами, признанных наиболее перспективными, методами компьютерного моделирования. Определить степень устойчивости этих методов к воздействию возмущений и факторов неопределенности, возникающих в практических приложениях.

5. Сформулировать задачи планирования траектории манипулятора, применяемого для аддитивного нанесения медицинских покрытий. Провести анализ задачи автоматической генерации траектории манипулятора по 3D модели поверхности и заданным параметрам процесса нанесения покрытия.

6. Разработать алгоритм автоматического генерирования траектории рабочего инструмента робота-манипулятора, для применения в роботизированной системе нанесения медицинских покрытий.

7. Провести моделирование и экспериментальные исследования, исследовать эффективность предложенного подхода.

**Основные методы исследования:** Методы теории автоматического управления, методы математического компьютерного моделирования, включая симуляционный подход — тестирование разработанных алгоритмов в программах-симуляторах для определения качества переходных процессов, натурный эксперимент: апробация новых алгоритмов на опытном роботизированном технологическом участке плазменной обработки поверхности.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Адаптивный метод управления последовательным манипулятором с силовым управлением, построенный на основе метода вычисляемых крутящих моментов.

2. Применение метода инверсной динамики (метода компенсации динамики объекта и возмущений) к задаче траекторного управления последовательным манипулятором.

3. Метод автоматической генерации траектории робота-манипулятора для задач аддитивного производства покрытий, основанный на новом численном методе конструирования векторных полей на поверхностях, задаваемых треугольными сетками.

**Научная новизна работы** заключается в том, что:

Впервые метод траекторного управления последовательными манипуляторами с силовым управлением, известный как метод инверсной динамики, рассмотрен как метод траекторного управления плоскими системами особого класса и предложен общий адаптивный метод траекторного управления плоскими системами, являющийся обобщением метода вычисляемых моментов на широкий класс нелинейных объектов управления, включающий в себя различные виды манипуляторов. В работе впервые построен критерий устойчивости к воздействию возмущений, которому должен удовлетворять линейный регулятор, входящий в состав

схемы траекторного управления, реализующей классический или обобщенный метод вычисляемых моментов.

Впервые применен метод компенсации динамики объекта и возмущений к управлению двухзвенным плоским последовательным манипулятором, разработана математическая модель двухзвенного манипулятора с использованием уравнений Лагранжа в форме уравнений состояния с параметрами, зависящими от состояния (SDC-модель) и обоснована адаптивная природа методов инверсного моделирования применительно к управлению нелинейным многоканальным объектом-последовательным манипулятором с плоским входом.

Разработан новый метод автоматической генерации траектории робота-манипулятора для нанесения аддитивных покрытий на поверхности по 3D модели обрабатываемой поверхности. Впервые предложен новый метод конструирования векторных полей с заданными свойствами на треугольных сетке, представляющей модель обрабатываемой поверхности, и реализовано применение этого метода к процедуре автоматической генерации траектории рабочего инструмента манипулятора для нанесения покрытия на поверхность.

**Публикации.** Всего теме диссертационной работы опубликовано **12** работ, из их: **4** в изданиях, рекомендуемых Комитетом; **4** в международных рецензируемых журналах, индексируемых в базе в Scopus и имеющих проценты по CiteScore и (или) индексируемых в данных информационной компании Web of Science Core Collection, Clarivate Analytics и (или) имеющих ненулевой импакт-фактор, **4** в трудах международных конференций и **1** патент на полезную модель.

*Вклад в подготовку каждой публикации* состоял в анализе данных открытых литературных источников по теме исследования, в разработке и апробации моделей, в получении и описании экспериментальных результатов, в подготовке и обсуждении выводов, а также в представлении и обсуждении научных результатов на семинарах и конференциях.

**Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 6-ти международных конференциях:**

1) ACDSA International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications , 8 августа 2025 г., г. Анталья, Турция (онлайн);

2) 18th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas Joint event of the Hungarian Science Festival 2024 Organized by Óbuda University, 14 ноября 2024 г., г. Секешфехервар, Венгрия;

3) Международная конференция «Engineering Education: Challenges, Trends, Best Practices (EE: СТБП), 4 октября 2024 г., г. Усть-Каменогорск, Казахстан;

4) X Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых инновационному развитию Казахстана», посвященной 125-летию Каныша Сатпаева, 11-12 апреля 2024 г., г. Усть-Каменогорск, Казахстан;

5) Международная конференция «Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education (CITech-2023)», 2 октября 2023 г., г. Усть-Каменогорск, Казахстан;

6) IX Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых инновационному развитию Казахстана», посвященной 65-летию университета, 13-14 апреля 2023 г., г. Усть-Каменогорск, Казахстан.

**Основные научные результаты, доказанные в диссертации, а также в статьях по теме исследования, включают:**

1. Адаптивный метод управления последовательным манипулятором с силовым управлением, построенный на основе метода вычисляемых крутящих моментов. Последовательный манипулятор с силовым управлением рассматривается как плоская система с управлением особого типа, выход которой зависит только от вектора состояния системы. Метод вычисляемых крутящих моментов, известный также как метод инверсной динамики манипулятора, рассматривается как частный случай общего метода траекторного управления данной плоской системы.

2. Применение метода инверсной динамики (метода компенсации динамики объекта и возмущений) к задаче траекторного управления последовательным манипулятором.

3. Метод автоматической генерации траектории робота-манипулятора для задач аддитивного производства покрытий, основанный на новом численном методе конструирования векторных полей на поверхностях, задаваемых треугольными сетками.

**Диссертация имеет практическое значение:** результаты диссертации внедрены в учебный процесс ВКТУ им. Д. Серикбаева в образовательную программу «Автоматизация и управление», используются для преподавания дисциплины: «Основы теории оптимального управления» (Акт о внедрении научно-исследовательской работы в учебный процесс от 05.02.25).

**Для внедрения в практику предлагается:** патент Республики Казахстан № 8714 от 15.12.2023 на полезную модель «Способ напыления многослойных покрытий на имплантаты из титановых сплавов» по заявке 2023/0995.2 от 05.10.2023 (авторов Алонцева Д.Л., Прохоренкова Н.В., Красавин А.Л., Назенова Г.М.).

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5-ти разделов, выводов, заключения, списка использованных источников из 163 наименований, диссертация изложена на 142 страницах компьютерного текста, включает 51 рисунок, 1 таблицу и 2 приложения.