

На правах рукописи

**Чжу Лянлян**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ  
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ РОБОТОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ  
СТРУКТУРОЙ**

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

朱亮亮

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» на кафедре компьютерных систем автоматизации производства.

Научный руководитель: Гаврюшин Сергей Сергеевич  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Хейло Сергей Валерьевич**  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой теоретической и  
прикладной механики «Российского  
государственного университета им. А.Н.  
Косыгина»  
**Климов Даниил Дмитриевич**  
кандидат технических наук, заведующий  
лабораторией медико-роботических  
цифровых технологий НИИ «Технобиомед»,  
ФГБОУ ВО «Российский университет  
медицины» Минздрава»

Ведущая организация: «Московский политехнический  
университет»

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г. в \_\_\_\_\_  
на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 при Московском  
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:  
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим  
направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке  
МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Телефон для справок: 8 (499) 263-66-33\*40-57

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.331.02  
кандидат технических наук, доцент



Богданов А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Роботы с параллельной структурой обладают уникальными характеристиками, необходимыми при проведении высокоточных технологических операций захвата, перемещения, позиционирования и активно используются в операциях сборки, селекции, отбраковки, упаковки и т.д. Роботы с параллельной структурой характеризуются высокой скоростью выполнения операций с возможностью быстрой переналадки и визуального контроля. Имеется достаточно хорошо проработанное программное обеспечение. Точное позиционирование роботов с параллельной структурой востребовано при прецизионной сборке и обработке изделий.

Дельта-робот является одним из наиболее успешных параллельных роботов в современном производстве и крайне эффективен при выполнении высокоточных и высокоскоростных технологических операциях. Для повышения скорости работы робота Дельта и снижения энергопотребления, приводные рычаги и ведомые штанги изготавливаются из легких материалов и композитов на основе углеродного волокна. Однако облегченная конструкция приводит к увеличению податливости конструкции и, как следствие, к появлению дополнительных деформаций и вибраций робота, что в условиях высокоскоростной работы снижает точность позиционирования и ограничивает его применение в высокоточных операциях. К настоящему времени известны исследования, посвященные повышению точности параллельных роботов за счет планирования траектории и оптимизации алгоритмов управления. Однако в подавляющем большинстве исследований конструкция робота рассматривается как система твердых тел, без учета гибкой деформации ее компонентов.

Дальнейшее повышение точности позиционирования дельта-роботов связано с проблемой устранения объективно существующих погрешностей, влияющих на точность позиционирования: погрешность соединения, погрешность геометрии компонента, тепловая погрешность, погрешность управления, погрешность передачи и т.д. Эти погрешности трудно точно измерить, и между погрешностями существует взаимная связь, что очень затрудняет их устранение.

Дельта-робот представляет собой нелинейную механическую систему, суставы которой связаны друг с другом, что затрудняет точное отслеживание запланированной траектории. Облегченная конструкция с одной стороны уменьшает величины инерционных нагрузок, с другой стороны приводит к повышению гибкости робота Дельта. Резкий разгон и остановка робота связаны с появлением ударных нагрузок и вызывают нежелательную вибрацию робота в целом, что влияет на стабильность системы и приводит к снижению точности.

Основы расчета и проектирования роботов в тесной связи с теорией автоматического управления и проблемой автоматизации производства заложены в работах И.И. Артоболевского, М. Вукобратовича, В.Г. Градецкого,

А.Е. Кобринского, Д.Е. Охоцимского, Ю.В. Подураева, Е.П. Попова, Ф.Л. Черноусько, А.С. Ющенко и других. Большой вклад в создание и совершенствование роботов с параллельной структурой внесли Глазунов В.А., Диментберг Ф.М., Крайнев А.Ф., Лебедев П.А., Хейло С.В., Хант К.Х. (Hunt K.H.), Мерле Ж.П. (Merlet J.P), Д. Стюарт, Клавель Р., Хуан Чжэнь, Гао Фэн и др. Исследования включали вопросы создания механизмов с параллельной структурой нового типа, построение кинематической модели, динамический и силовой анализ, алгоритмы управления и т.д. Вместе с тем относительно небольшое число исследований посвящено проблеме компенсации погрешностей и повышения точности позиционирования роботов с параллельной структурой. Практические исследования показывают, что весьма существенное влияние на точность позиционирования оказывает упругая деформация элементов конструкции роботов.

По этой причине задача повышение точности позиционирования роботов за счет учета влияния упругой деформации его компонентов является актуальной.

**Целью диссертационной работы** является разработка методики учета деформативности исполнительных органов роботов с параллельной структурой при высокоскоростном выполнении технологических операций с требуемой точностью.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ и классификацию причин возникновения погрешностей, влияющих на точность позиционирования роботов с параллельной структурой.
2. Создать кинематические модели Робота Дельта, пригодные для уточненного решения прямых и обратных задач кинематики.
3. Провести анализ статической и динамической погрешностей Робота Дельта, вызванных упругой деформацией компонентов.
4. Исследовать процесс движения робота с целью определения рациональных траекторий, обеспечивающих минимизацию вибраций и максимизацию точности выполнения технологических операций.
5. Разработать методику, алгоритм и программу управления роботом Дельта, обеспечивающие высокоточное отслеживание запланированной траектории с учетом деформативности.
6. Экспериментально подтвердить разработанную методику на реальных моделях робота Дельта.

#### **Методы исследования**

При выполнении диссертационной работы в рамках системного подхода использовались классические положения теоретической механики, механики деформируемого твердого тела, теории колебаний, теории механизмов и машин, вычислительной механики, теоретические основы робототехники. Для решения прямой и обратной задачи кинематики разрабатывались алгоритмы с помощью программного обеспечения MATLAB. Для исследования статической погрешности позиционирования использовался конечно-элементный пакет ANSYS.

Для исследования динамической погрешности позиционирования

использовалось программное обеспечение Hypermesh, Adams и MATLAB. Для планирования траектории и моделирования системы управления использовалось программное обеспечение MATLAB.

### **Научная новизна**

На защиту выносятся следующие положения, обладающие элементами научной новизны.

1. Разработана методика анализа влияния упругой деформации компонентов на точность позиционирования робота Дельта в разных конфигурациях и при различных нагрузках.
2. Оценена динамическая погрешность Робота Дельта, вызванная упругой деформацией компонентов путем сравнения модели, учитывающей наличие жестко-упругих связей с моделью динамики робота как системы жестких тел.
3. Проанализирована зависимость динамической погрешности позиционирования от вида траектории движения на основе созданной жестко-упругой динамической модели и предложены траектории движения, обеспечивающие максимальную точность позиционирования и минимальную вибрацию робота Дельта.
4. Разработан алгоритм развязывающего управления роботом Дельта с учетом деформативности на базе технологии линейного управления с активным подавлением возмущения (LADRC).

### **Практическая значимость**

Практическая значимость диссертационной работы состоит в разработке методики точного позиционирования исполнительных органов Робота Дельта с учетом деформативности. На основании теоретических и численных исследований предложенных алгоритмов доказана их работоспособность и высокая точность. Разработанный метод и реализованные на его основе алгоритмы могут быть использованы при проектировании высокоточных роботов Дельта.

Материалы диссертации использованы при реализации научных исследовательских проектов на техническом предприятии Shenzhen Warsonco Technology Co. Ltd, КНР и в учебном процессе факультета «Робототехника и комплексная автоматизация» кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Достоверность результатов работы** достигается использованием общепринятых достоверных методов, строгостью математических выкладок, основанных на фундаментальных законах механики. Разработанные математические модели основываются на классических утверждениях и теоремах и не противоречат известным результатам. Численные результаты, полученные с помощью разработанной методики, показали хорошее согласование с результатами экспериментальных исследований проведенных на Дельта-роботе WSC-600DJ компании WARSONCO.

**Личный вклад** соискателя состоит в разработке методики анализа влияния упругой деформации компонентов на точность позиционирования робота Дельта в статике и динамике. Предложен алгоритм планирования

траектории Робота Дельта на основе комбинированных законов движения с минимальной вибрацией и максимальной точностью. Разработан алгоритм развязывающего управления роботом Дельта с учетом деформативности на базе технологии линейного управления с активным подавлением активных помех (LADRC – управление), имеющий более высокую точность, чем традиционный алгоритм на основе пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД – управление).

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на первой молодежной конференции с международным участием «Комплексная автоматизация проектирования и производства (КАПП(М)-2023)», посвященной 90-летию со дня рождения И.П. Норенкова; на Первой научно-практической конференции с международным участием «Комплексная автоматизация проектирования и производства 2023 (КАПП-2023)» в рамках конгресса «Русский инженер»; на The 4th International Symposium on Computer Science, Digital Economy and Intelligent Systems (CSDEIS2022), Wuhan, China (2022); на 2024 the 8th International Conference on Robotics, Control and Automation (ICRCA 2024), Shanghai, China (2024) и на The 13th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ACMAE 2022).

По результатам диссертационной работы опубликовано 7 научных работ, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, присутствующих в Перечне ВАК РФ. 3 статьи в Перечне международных научных изданий в системе Scopus.

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов и списка литературы. Содержит 169 страниц машинописного основного текста, включая 95 рисунков и 15 таблиц и список литературы из 144 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, приведена постановка задач и краткая аннотация содержания работы по разделам, дана оценка новизны и практической ценности полученных результатов, сформулированы защищаемые положения.

**В Главе 1** приведен обзор современных роботов с параллельной структурой, их преимуществ, недостатков и типичных применений. В качестве объекта исследования из ряда параллельных роботов выбран широко используемый Дельта-робот, обсуждена классическая конфигурация робота Дельта и его различные модифицированные модели.

Проанализированы причины, влияющие на точность позиционирования роботов. На основании различных стандартов составлена разноаспектная классификация погрешностей позиционирования (Рис. 1).

Представлен обзор методов обеспечения точности позиционирования робота. В основном рассмотрены два основных способа повышения точности позиционирования робота: предотвращение погрешностей и компенсация погрешностей, охарактеризованы условия их применения. Отмечена важность изучения закономерность упругой деформации компонентов для повышения

точности позиционирования Робота Дельта.



Рис. 1. Источники погрешностей роботов с параллельной структурой

**В Главе 2** приведено описание геометрической структуры Робота Дельта. В данной работе в качестве объекта исследования используется Дельта-робот WSC-600DJ фирмы WARSONCO (Рис. 2).

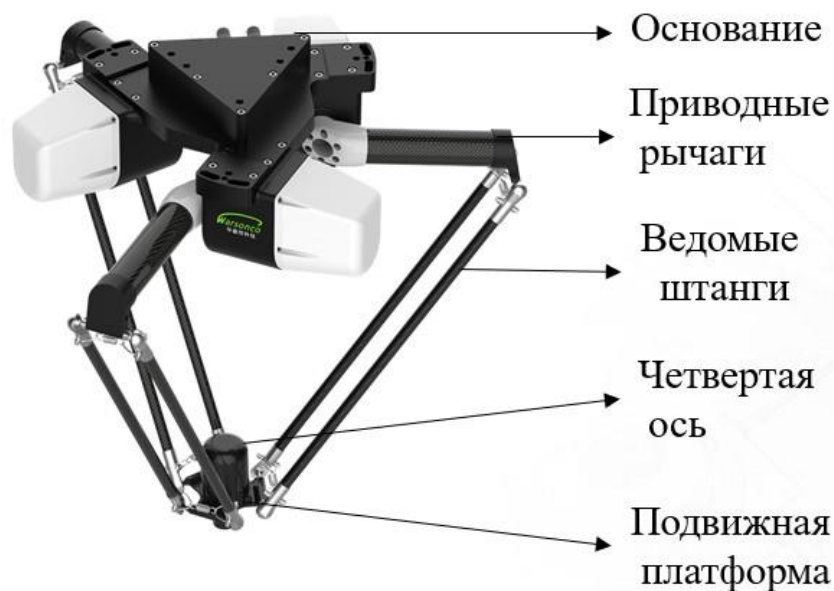


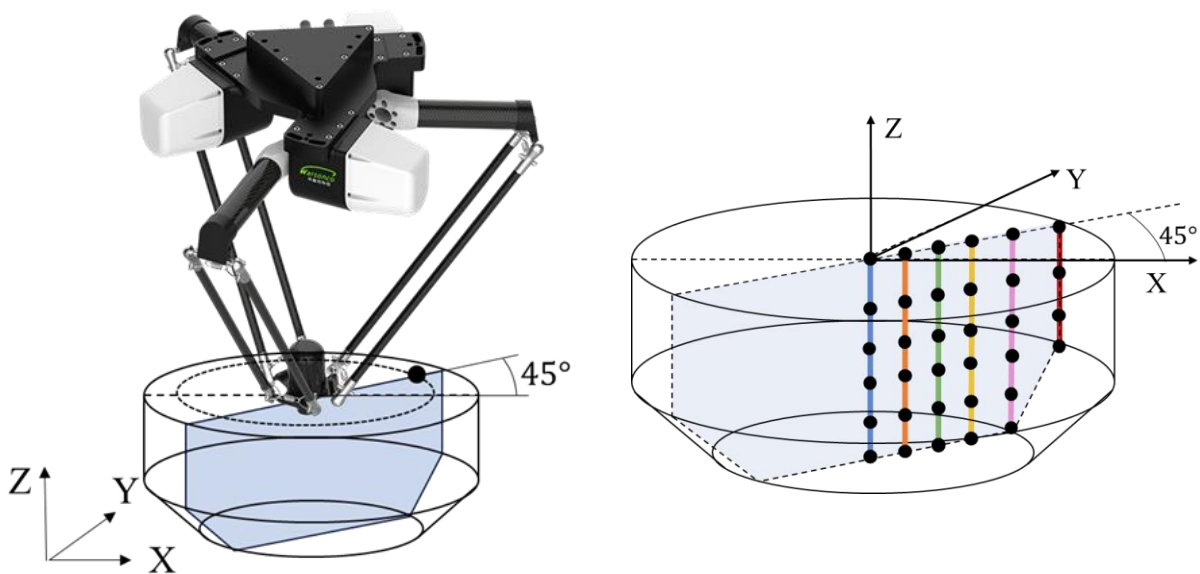
Рис. 2. Дельта-робот WSC-600DJ компании WARSONCO

Дельта-робот в основном состоит из неподвижно закрепленного основания, подвижной платформы, трех приводных рычагов и трех ведомых штанг. Между основанием и подвижной платформой состоят из трех равномерно распределенных кинематических цепей, каждая из разветвленной цепи включает приводной рычаг и ведомую штангу, состоящая из механизма

параллелограмма. Приводной рычаг соединяется с приводным двигателем, закрепленным на основании, через вращающую пару, а ведомая штанга соединяется с подвижной платформой через сферический шарнир. Три набора механизмов параллелограмма ограничивают направление движения подвижной платформы так, чтобы оно всегда было параллельно основанию, ограничивая вращение подвижной платформы, так что Дельта-робот совершает только поступательное движение в направлениях  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

Разработана математическая модель для решения прямой и обратной задачи кинематики Робота Дельта. В отличие от относительно сложных методов матричного расчета, используемых при решении задачи кинематики последовательных роботов, для роботов Дельта в диссертации использованы методы пространственной геометрии, позволившие создать упрощенную кинематическую модель Робота Дельта. Создан алгоритм решения прямой и обратной задачи кинематики в MATLAB для проверки.

В Главе 3 представлена конечно-элементная модель робота Дельта созданная в ПК ANSYS, примененная для выявления закономерностей потери точности, вызванной упругой деформацией при различных нагрузках в статическом положении. Для анализа деформационных перемещений робота Дельта подвижная платформа перемещалась в направлении оси  $Z$ . В рабочей области робота Дельта рассматривались окружные траектории окружности, расположенные на различных расстояниях от центра.



а) Контрольная точка в рабочем пространстве Робота Дельта

б) Контрольные точки и траектория движения центра тяжести

Рис. 3. Контрольные точки и траектория движения центра тяжести подвижной платформы Робота Дельта при выполнении статического анализа.

В качестве контрольных точек рассматривались точки пересечения окружностей с плоскостью проходящей через ось  $Z$  и равнонаклоненной к осям  $X$  и  $Y$  (см. Рис. 3, а) Выбор точек обосновывался симметрией конструкции робота Дельта и необходимостью исключить влияние несогласованных координат  $X$  и  $Y$  на деформационное смещение робота при движении



подвижной платформы по оси Z (см. Рис. 3, б). Рассмотрены характерные траектории, при которых центр тяжести подвижной платформы последовательно проходит через контрольные точки, а затем перемещается в отрицательном направлении оси Z. Для каждого контрольного положения, в центре тяжести подвижной платформы прикладывается усилие, изменяющееся от 10 N до 100 N. Таким образом, можно получить закономерности деформационных перемещений робота Дельта при движении подвижной платформы по оси Z.

Закономерности деформационных перемещений робота Дельта при движении подвижной платформы по оси Z, показаны на Рис. 4 и 5.

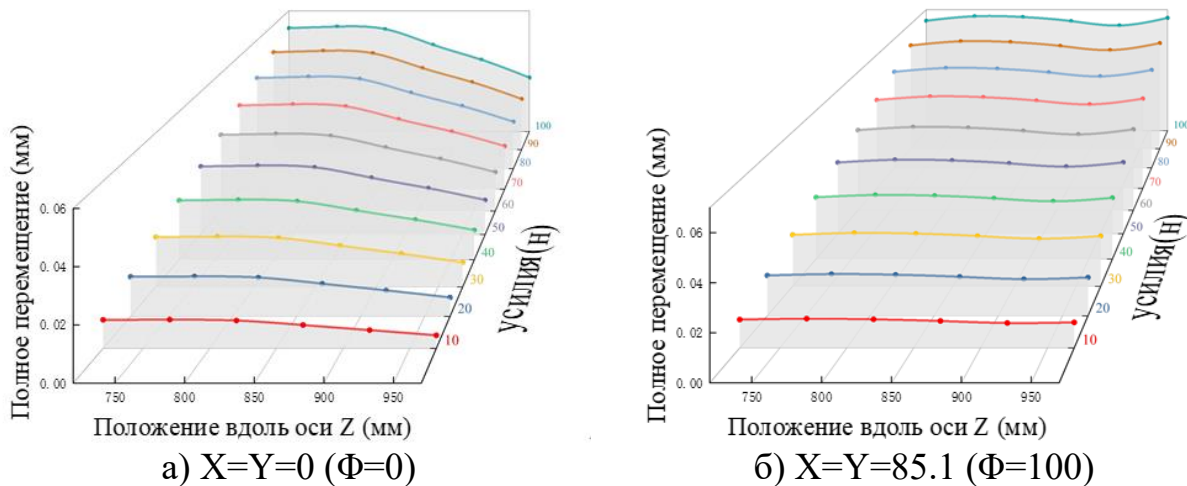


Рис. 4. Диаграмма изменения полных векторных перемещений робота Дельта при движении подвижной платформы в отрицательном направлении оси Z

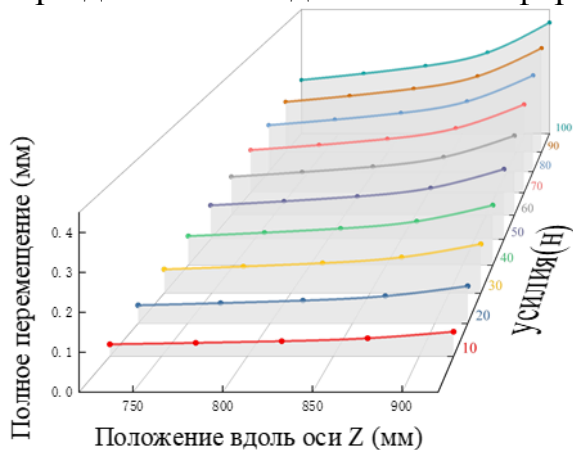


Рис. 5. Диаграмма изменения полных векторных перемещений робота Дельта при движении подвижной платформы в отрицательном направлении оси Z ( $X=Y=425.5$ )

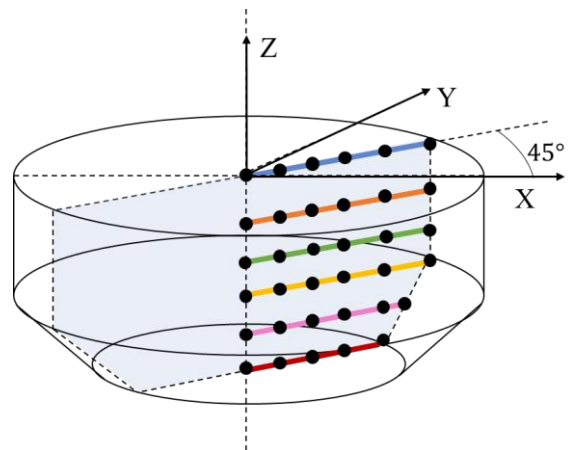


Рис. 6. Контрольные точки и траектория движения центра тяжести подвижной платформы подвижной платформы робота Дельта при выполнении статического анализа

Выявлены следующие закономерности изменения полных векторных перемещений робота Дельта при движении подвижной платформы по оси Z: 1. Когда центр масс подвижной платформы Робота Дельта находится близко к центру рабочей области (Рис. 4, а), полное векторное перемещение робота в направлении -Z сначала увеличивается, а затем уменьшается по мере удаления

подвижной платформы робота от основания. 2. Когда положение центра тяжести подвижной платформы робота постепенно отходит от центра рабочего пространства (Рис. 4, б), полное векторное перемещение механизма в отрицательном направлении оси  $Z$  сначала увеличивается, затем уменьшается, а затем снова увеличивается по мере удаления подвижной платформы от основания. 3. Когда положение центра тяжести подвижной платформы Робота Дельта удалено от центра рабочего пространства (Рис. 5), полное векторное перемещение механизма в отрицательном направлении оси  $Z$  увеличивается по мере удаления подвижной платформы от основания.

Аналогично, можно получить закономерность полных векторных перемещений робота Дельта, когда подвижная платформа робота перемещается в горизонтальном направлении (положение в направлении  $Z$  остается неизменным) (см. Рис. 6), как показано на Рис. 7.

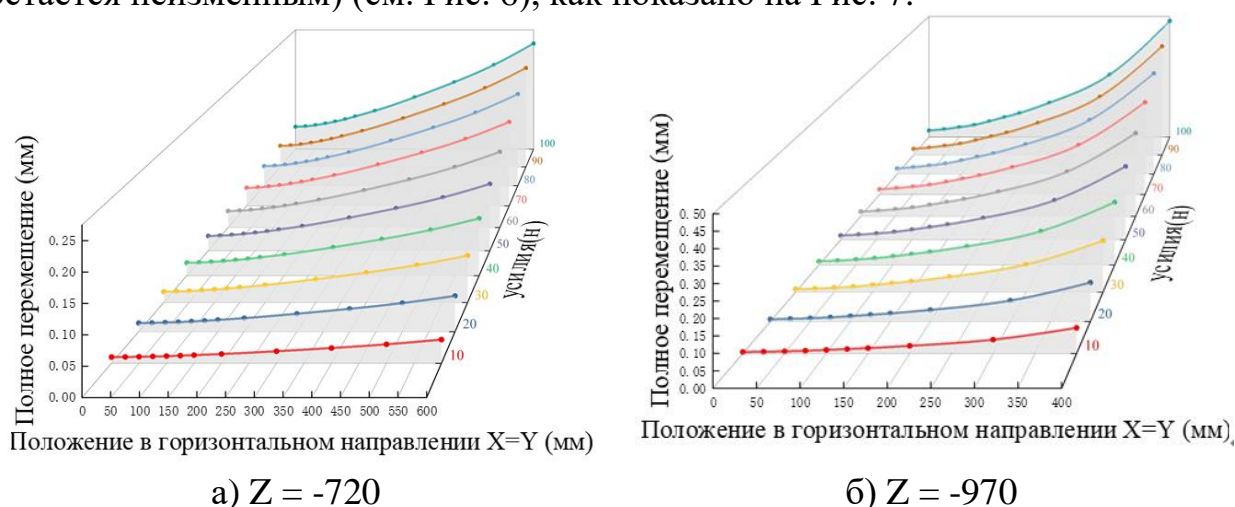


Рис. 7. Диаграмма изменения полных векторных перемещений Робота Дельта при движении механизма в горизонтальном направлении

Когда Дельта-робот движется в горизонтальном направлении, полное векторное перемещение робота продолжает увеличиваться по мере того, как центр масс подвижной платформы постепенно удаляется от центра рабочего пространства (Рис. 7).

В данной главе также приведен анализ динамической погрешности Робота Дельта, вызванных упругой деформацией компонентов. Для изучения влияния деформативности приводных рычагов и ведомых штанг на точность позиционирования робота Дельта, использовались различные динамические модели: модель 1 конструкции робота, как системы абсолютно жестких тел, модель 2 системы жестких тел, связанных упругими приводными рычагами, модель 3 системы жестких тел, связанных только упругими ведомыми штангами, и модель 4, учитывающая как упругость приводных рычагов, так и упругость ведомых штанг.

Программное обеспечение Hypermesh, Adams и Matlab было использовано для проведения анализа динамики системы жестких тел и динамики жестко-упругой связи на Дельта-роботе и получена кривые динамических погрешностей позиционирования при типичной траектории «дверь-образной» (Adept). Блок схема процесса работы показан в Рис. 8.

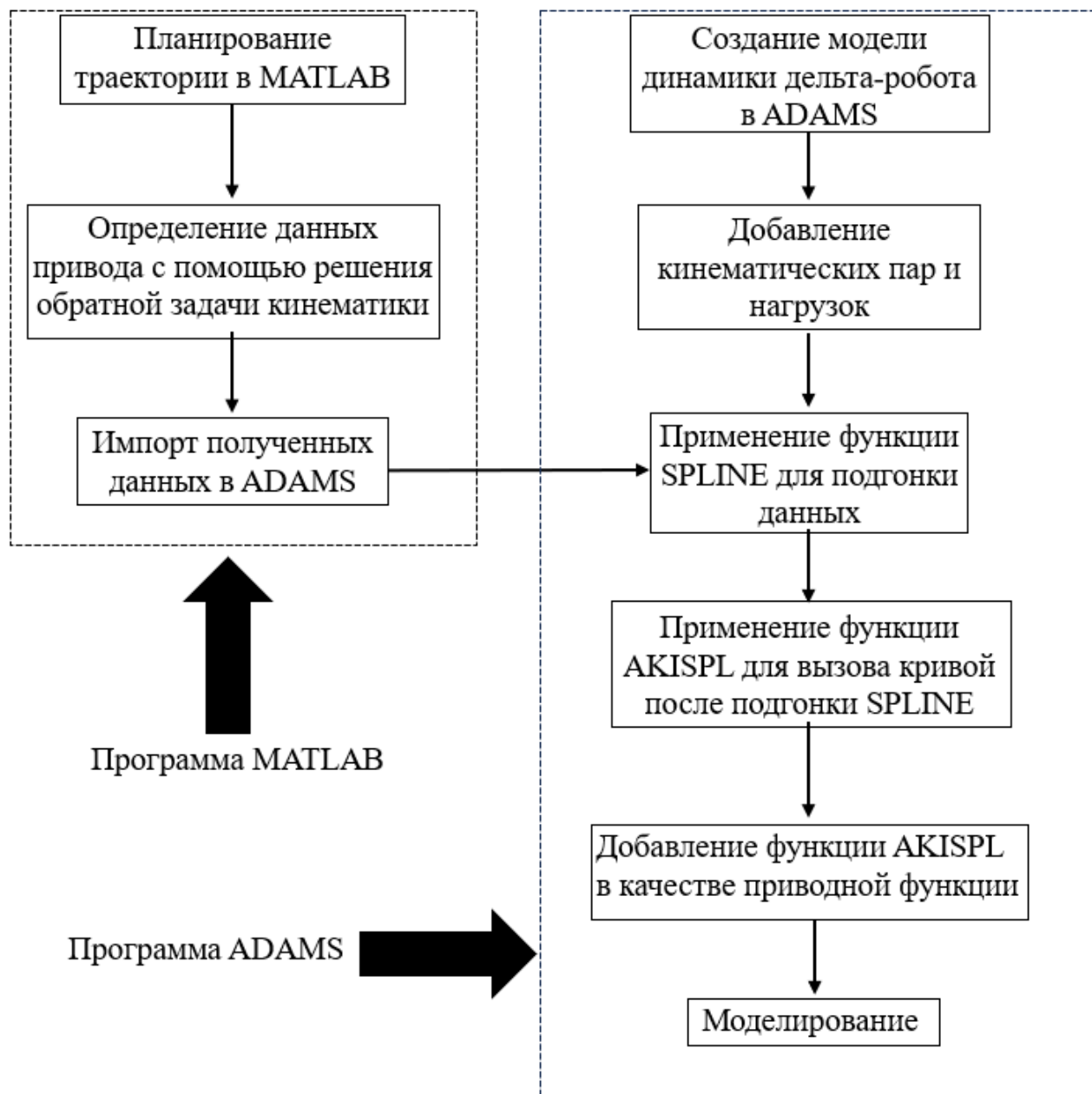


Рис. 8. Блок схема процесса работы

Кривые перемещения, полученные с помощью модели динамики жестко-упругой связи и кривые перемещения, полученные с помощью модели динамики системы жестких тел, вычитаются для получения кривых погрешностей (Рис. 9).

Представленные зависимости характеризуют величину погрешностей для используемых моделей. Кривая А – погрешность между моделями 1 и 2, кривая Б – погрешность между моделями 1 и 3, кривая В – погрешности между моделями 1 и 4.

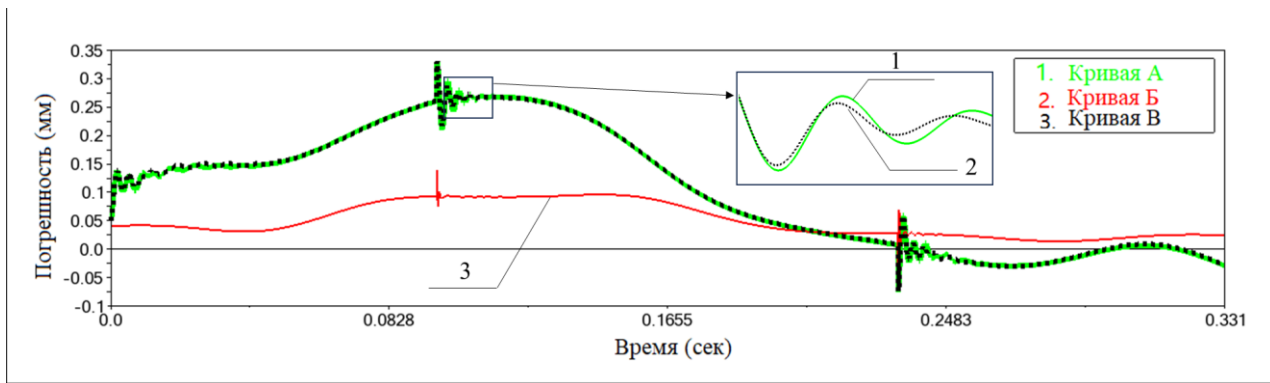


Рис. 9. Кривые полной векторной погрешности

Благодаря сравнению трех моделей жестко-упругой связи, можно увидеть, что влияние упругой деформации приводных рычагов и ведомых штанг на погрешность позиционирования исполнительного органа робота Дельта представляет собой не простую линейную суперпозицию, а сложный взаимосвязанный эффект. Когда рассматривается только деформируемость приводных рычагов или только деформируемость ведомых штанг, модель не может точно отразить влияние упругой деформации на точность позиционирования. В ситуациях, когда требуется высокая точность, нельзя игнорировать влияние упругой деформации приводных рычагов и ведомых штанг на точность позиционирования робота Дельта.

Полученные результаты позволяют оценить влияние податливости различных звеньев на точность позиционирования. Путем анализа кривых погрешностей траектории обнаружено, что влияние упругой деформации на точность позиционирования робота Дельта нельзя игнорировать.

**В Главе 4** проведен анализ зависимости динамической погрешности позиционирования от вида траектории движения с помощью созданной модели, учитывающая как упругость приводных рычагов, так и упругость ведомых штанг (Рис. 10). Виды траектории движения включают в себя: закон синусоидального движения (ЗСД); закон движения с синусоидальным модифицированным трапецевидным ускорением (ЗДСМТУ); улучшенный закон движения с синусоидальным модифицированным трапецевидным ускорением (УЗДСМТУ); 5-й полиномиальный закон движения (5ПЗД); 7-й полиномиальный закон движения (7ПЗД) и закон движения по кубическому сплайну (КСПЛАЙН).

Проведено планирование траектории Робота Дельта на основе вышеуказанных законов движения в MATLAB. Схема траектории движения показана на Рис. 11.

При рассмотрении трех критериев качества: плавности движения, цикла выполнения операции и погрешности позиционирования УЗДСМТУ и 7ПЗД лучше, чем другие законы движения.

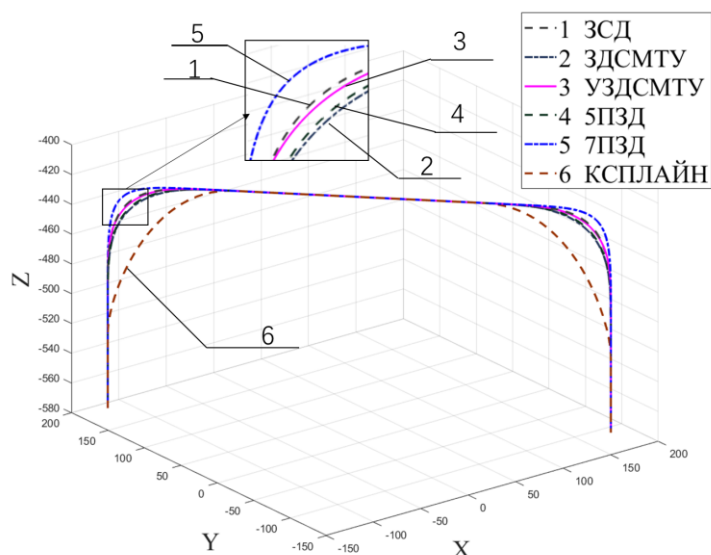
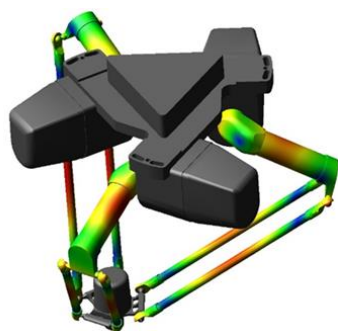


Рис. 10. Модели динамики жестко-упругой связи робота Дельта в Adams

Рис. 11. Планирование траектории при различных законах движения

Чтобы уменьшить остаточную вибрацию и повысить точность позиционирования, УЗДСМТУ и 7ПЗД можно использовать для планирования траектории в вертикальной поднимающейся части, горизонтальной части и вертикальной опускающейся части соответственно. Разработан алгоритм планирования траектории с использованием комбинированного закона движения.

Кривые изменения рывка и кривые погрешности траектории при использовании алгоритма комбинированного закона движения представлены на Рис. 12 и 13.

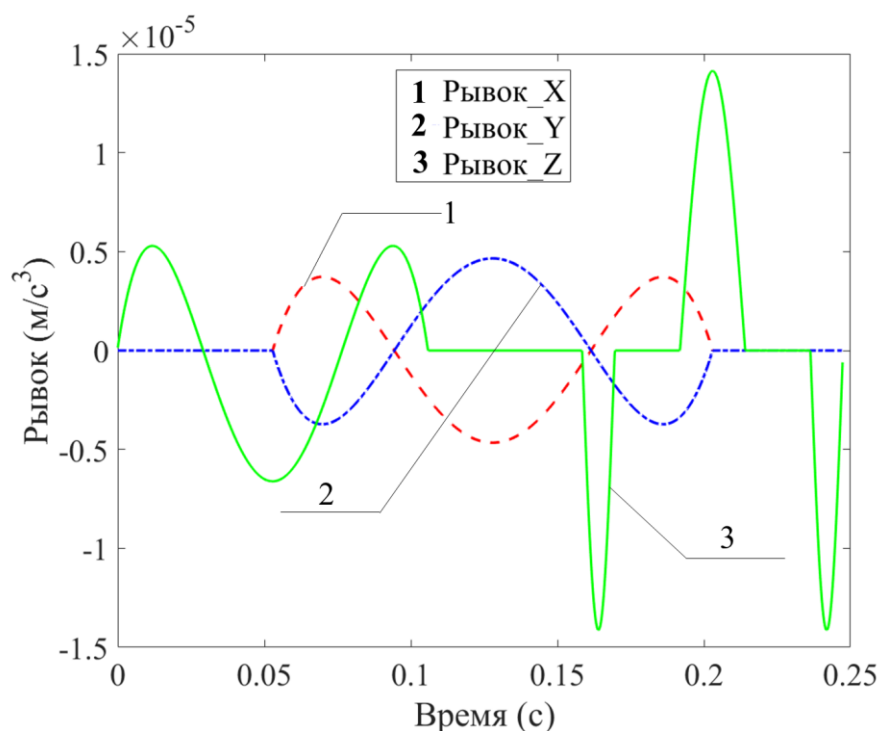


Рис. 12. Кривые изменения рывка

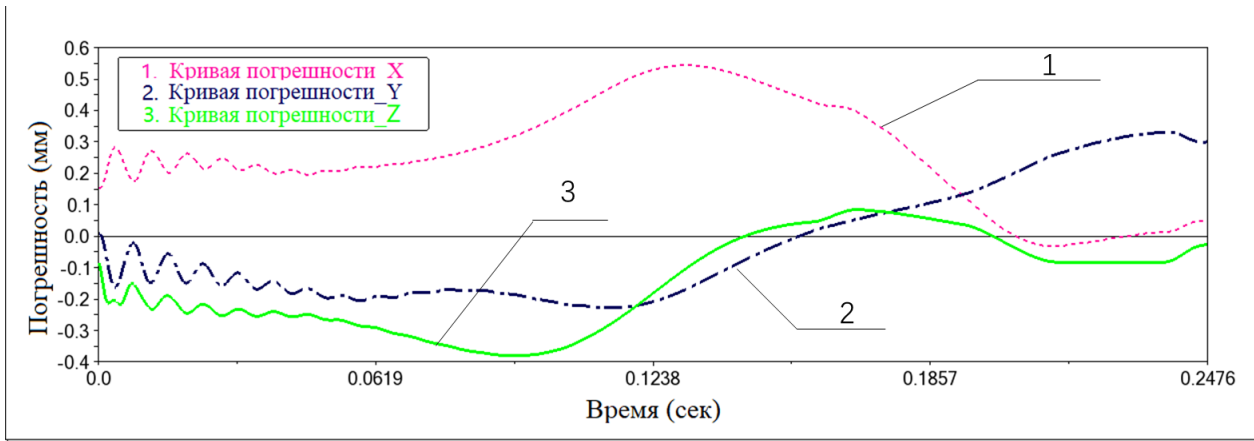


Рис. 13. Кривые погрешности

По сравнению с УЗДСМТУ и 7ПЗД при использовании алгоритма комбинированного закона движения полная векторная погрешность на конечном этапе снизилась на 0,46% и 0,49% соответственно. Максимальный рывок в направлениях X и Y уменьшился на 53,2% по сравнению с УЗДСМТУ.

**В Главе 5** представлена динамическая модель системы жестких тел Робота Дельта, основанная на принципе виртуальной работы.

Разработан алгоритм ПИД - управления и алгоритм управления LADRC для робота Дельта, основанный на модели динамики системы жестких тел. Базовая структура регулятора LADRC показана на Рис. 14 и в основном включает в себя линейный расширенный наблюдатель состояния (LESO) и регулятор ПД.

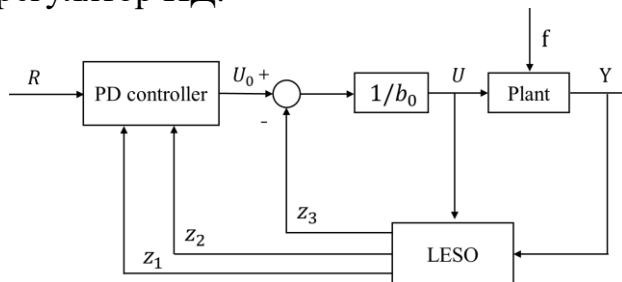


Рис. 14. Базовая структурная схема регулятора LADRC

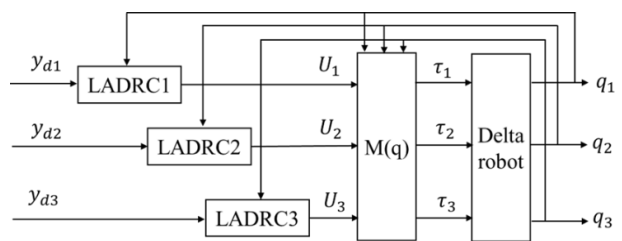


Рис. 15. Блок-схема процесса развязки системы Робота Дельта

Динамическое уравнение системы жестких тел Робота Дельта можно преобразовываться в виде:

$$\ddot{q} = -M(q)^{-1}(C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)) + M(q)^{-1}\tau = f(q, \dot{q}, t) + B(q)\tau, \quad (1)$$

где  $M(\theta)$  – эквивалентная матрица масс;  $C(\theta, \dot{\theta})$  – Матрица сил Кориолиса;  $G(\theta)$  – гравитационный член.

Пусть  $x_1 = q$ ,  $x_2 = \dot{q}$ ,  $x_3 = f(q, \dot{q}, t)$ , тогда выражение расширенного пространства состояний системы равно:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \dot{x}_2 = f(q, \dot{q}, t) + B\tau; \\ \dot{x}_3 &= \dot{f}(q, \dot{q}, t); y = x_1 \end{aligned}, \quad (2)$$

где  $q = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ ,  $B\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ .

Технология LADRC может использоваться для развязанного управления



роботом Дельта (Рис. 15). Соотношение ввода-вывода  $i$ -го канала в системе Робота Дельта становится:

$$\begin{cases} \ddot{q}_i = f_i(q_1, \dot{q}_1, q_2, \dot{q}_2, q_3, \dot{q}_3) + U_i, \\ y_i = q_i \end{cases} \quad (3)$$

где  $f_i(q_1, \dot{q}_1, q_2, \dot{q}_2, q_3, \dot{q}_3)$  – возмущение, действующее на  $i$ -й канал, которое может быть оценено в режиме реального времени наблюдателем LESO, а затем компенсировано.

Наблюдатель LESO спроектирован следующим образом:

$$\begin{aligned} e &= z_1 - y; \quad \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e; \\ \dot{z}_2 &= z_3 - \beta_2 e + b_0 U; \quad \dot{z}_3 = -\beta_3 e \end{aligned} \quad (4)$$

где  $z_1, z_2, z_3$  – оценочные значения  $q, \dot{q}, f_i(q_1, \dot{q}_1, q_2, \dot{q}_2, q_3, \dot{q}_3)$  соответственно,  $b_0$  – коэффициент усиления управляющей величины системы, в нашей случае  $b_0 = 1$ .  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – коэффициенты усиления наблюдателя LESO.

После оценки возмущения можно разработать закон управления компенсацией  $U = \frac{U_0 - z_3}{b_0} = \frac{k_p(R - z_1) - k_d z_2 - z_3}{b_0}$  для динамической компенсации. Тогда можно получить следующее уравнение.

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i &= f_i(q_1, \dot{q}_1, q_2, \dot{q}_2, q_3, \dot{q}_3) + \frac{U_0 - z_3}{b_0} \\ &= U_0 + (f_i(q_1, \dot{q}_1, q_2, \dot{q}_2, q_3, \dot{q}_3) - z_3) \approx U_0 \end{aligned} \quad (5)$$

где  $U_0$  – величина управляющего сигнала, выдаваемого регулятором ПД,  $U_0 = k_p(R - z_1) - k_d z_2$ ;  $R$  – целевая траектория,  $z_1, z_2$  – статус наблюдателя LESO;  $k_p, k_d$  – пропорциональный и дифференциальный коэффициенты усиления соответственно.

Кроме того, алгоритм управления LADRC используется для проектирования систем управления Робота Дельтами с учетом деформативности, основанный на модели динамики жестко-упругой связи робота, созданной в Adams (Рис. 16). С помощью алгоритма управления LADRC упругая деформация компонентов Робота Дельта рассматривается как возмущение, и линейный расширенный наблюдатель состояния (LESO) используется для наблюдения и компенсации деформации робота.

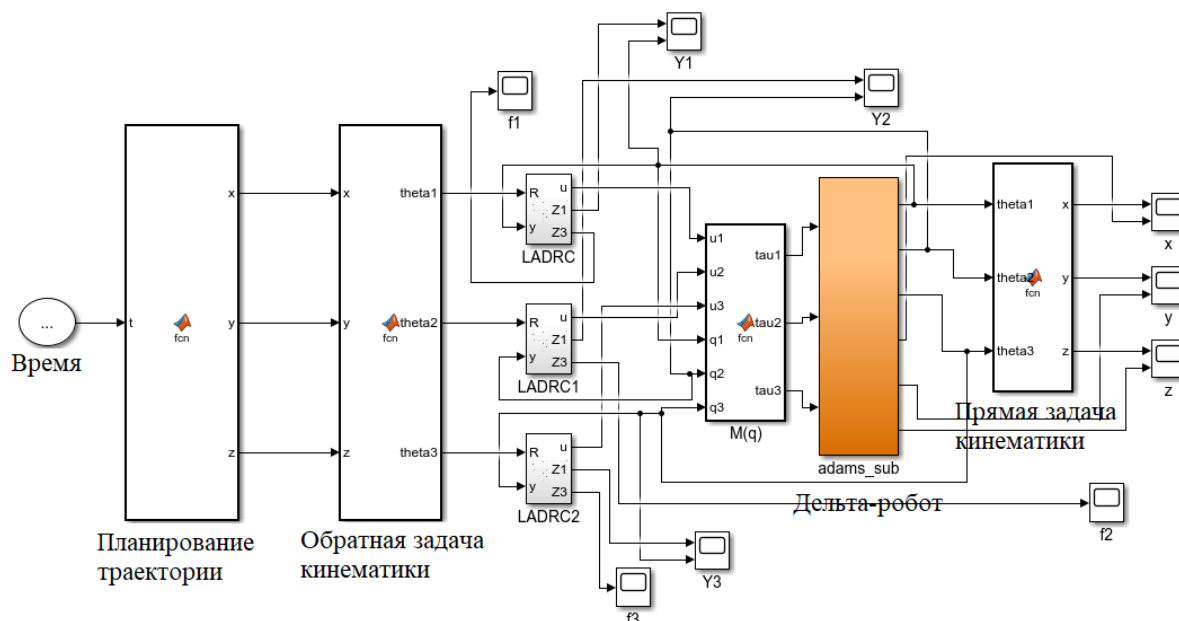


Рис. 16. Система управления LADRC Дельта-роботом

Дано сравнение результатов моделирования системы управления LADRC и системы управления ПИД для управления моделью жестко-упругой связи Робота Дельта при различных траекториях (Рис.17 ).

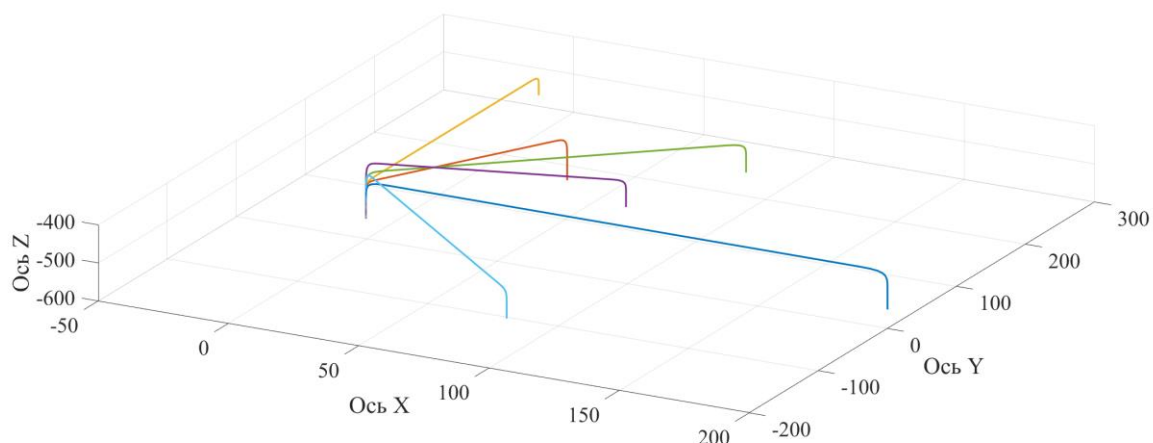
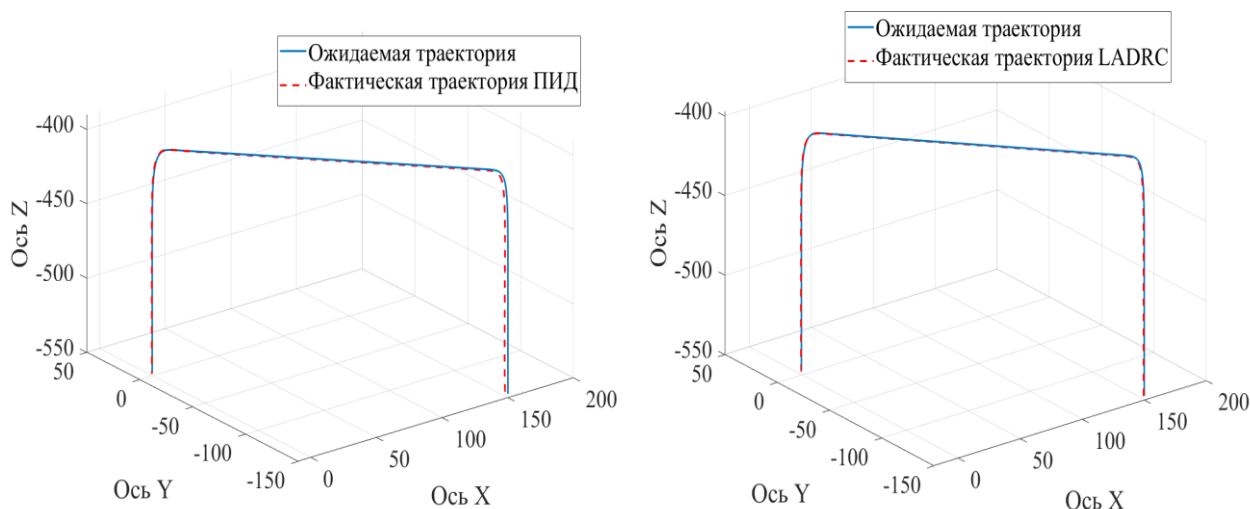


Рис. 17. Испытательные траектории в декартовом пространстве

Результат моделирования одной из испытательных траекторий представлены на Рис. 18. Конкретные параметры этой траектории таковы: начальное положение Робота Дельта равно (0, 0, -501.7756), координаты начальной точки траектории Adept равны (0, 0, -501.7756), координаты конечной точки равны (-150, 150, -500), а расстояние подъема по вертикали равно 101.7756/-100 мм.

Из Рис. 18 видно, что при учете упругой деформации компонентов Робота Дельта фактическая траектория исполнительного органа робота при использовании алгоритма управления LADRC оказывается ближе к заданной теоретической траектории по сравнению с использованием алгоритма управления ПИД.





а) Система управления ПИД

б) Система управления LADRC

Рис. 18. Сравнительная диаграмма теоретической траектории и фактической траектории робота Дельта с учетом деформативности

Результаты сравнения подтверждают, что точность позиционирования робота увеличена в среднем более чем на 30% по сравнению с традиционным алгоритмом ПИД-регулирования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен статический анализ Робота Дельта с помощью ПО «ANSYS» и получены закономерности изменения его полного векторного перемещения при различных нагрузках и различных положениях.
2. Проведен динамический анализ Робота Дельта с помощью программного обеспечения «Hypermesh», «Adams» и «MATLAB» по расчетной схеме жестко-упругой конструкции. Полученные результаты позволяют оценить влияние податливости различных звеньев на точность позиционирования.
3. Проанализирована зависимость динамической погрешности позиционирования от вида траектории движения с помощью созданной жестко-упругой модели Робота Дельта, которой всесторонне учитывает упругость приводных рычагов и ведомых штанг.
4. Разработан алгоритм планирования траектории с использованием комбинированного закона движения. По сравнению с УЗДСМТУ и 7ПЗД точность позиционирования повысилась на 0,46% и 0,49% соответственно, а максимальный рывок в направлениях X и Y уменьшился на 53,2%.
5. Разработан алгоритм управления LADRC для Робота Дельта с учетом деформативности, основанный на модели динамики жестко-упругой связи робота, созданной в Adams. Точность позиционирования робота при использовании созданной алгоритм управления LADRC увеличена в среднем более чем на 30% по сравнению с традиционным алгоритмом ПИД-регулирования.

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Чжу Лянлян. Анализ причин погрешностей и методы повышения точности позиционирования роботов // Политехнический молодежный журнал. 2022. № 5(70). С. 1-11. (1,27 п.л./0,64 п.л.).
2. Чжу Лянлян, Гаврюшин С.С. Влияние деформативности робота Дельта на точность позиционирования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 12, С. 63-72. (ВАК, К1). (1,16 п.л./0,58 п.л.).
3. Чжу Лянлян, Гаврюшин С.С. Анализ динамических погрешностей Робота Дельта, вызванных упругой деформацией компонентов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение 2024. № 6, С. 55-65. (ВАК, К1). (1,96 п.л./0,63 п.л.).
4. Zhu L.L, Gavriushin S. S., Zheng J.Z. Review on the Positioning Error Causes Analysis and Methods to Improve Positioning Accuracy of Parallel Robot // The International Symposium on Computer Science, Digital Economy and Intelligent Systems. CSDEIS 2022: Advances in Intelligent Systems, Computer Science and Digital Economics IV Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. P. 712-721. (Scopus). (1,1 п.л./0,73 п.л.).
5. Zhu L.L, Gavriushin S. S., Zheng J.Z., Chi G.N. Motion error analysis of high-speed parallel robots // 2024 the 8th International Conference on Robotics, Control and Automation (ICRCA 2024) IEEE. 2024. P. 68-72. (Scopus). (0,58 п.л./0,51 п.л.).
6. Zheng J., Selezneva M.S., Yi J., Zhu L. Attitude Control of a Moving Mass-Actuated Fixed-Wing UAV Based on LADRC // The 13th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ACMAE 2022). Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2023. Vol. 2472. № 1. P. 012045. (Scopus). (0,7 п.л./0,4 п.л.).
7. Чжу Лянлян, Гаврюшин С.С. Анализ статической погрешности позиционирования робота с параллельной структурой // Первая молодежная конференция с международным участием «Комплексная автоматизация проектирования и производства (КАПП(М)-2023)», посвященной 90-летию со дня рождения И.П. Норенкова: сб. науч. ст./ Под ред. А.П. Карпенко. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. С. 122- 125. (0,46 п.л./0,16 п.л.).