

Восточно-Казахстанский технический
университет им. Д. Серикбаева

УДК 681.51; 62-94; 004.896

На правах рукописи

ҚҰСАЙЫН-МҰРАТ ӘСЕЛ ТҮГЕЛБАЙҚЫЗЫ

Синтез системы автоматического управления движением робота-манипулятора для задач 3D сканирования объектов сложной геометрической формы

6D070200 – Автоматизация и управление

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (Ph.D.)

Отечественный научный
консультант:
к.ф.-м.н. (д.ф.-м.н. РФ),
профессор,
Алонцева Дарья Львовна

Зарубежный научный
консультант:
Ph.D., ассоц. профессор,
Tamas Haidegger

Республика Казахстан
Усть-Каменогорск, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ СКАНИРОВАНИЯ.	8
1.1 Постановка задачи роботизированного 3D сканирования применительно к процессам плазменного напыления. Робот-манипулятор.	8
1.2 Анализ современного состояния существующих систем роботизированного 3D сканирования.....	12
1.3 Методы синтеза систем автоматического управления (САУ)	22
1.4 Задачи автоматизации процессов плазменной обработки поверхности	29
Выводы по разделу 1, постановка цели и задач диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту:	35
2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА	37
2.1 Оборудование, материалы и методы роботизированного микроплазменного напыления	37
2.2 Оборудование и методики роботизированного 3D сканирования	48
Выводы по разделу 2	56
3 ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА КОМПЕНСАЦИИ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТА И ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА	58
3.1 Применение алгоритма для создания системы автоматического регулирования движения робота в одном направлении	58
3.1.1 Постановка задачи синтеза САУ	59
3.1.2 Определение уравнений регулятора	60
3.1.3 Общий анализ полученной системы управления	62
3.1.4 Разработка системы автоматического регулирования движения манипуляционного робота.....	64
3.2 Разработка алгоритма управления углом поворота звена аналитическим методом компенсации динамики объекта и возмущений	70
3.2.1 Разработка математической модели объекта управления	70
3.2.2 Получение обратных моделей объекта управления и фильтров-эталонов	72
3.2.3 Определение алгоритма управления и анализ полученной системы управления.	74
Выводы по разделу 3:	80
4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РОБОТИЗИРОВАННОГО 3D СКАНИРОВАНИЯ	81
4.1 Разработка алгоритмов управления роботом-манипулятором Kawasaki для 3D сканирования с последующим плазменным напылением покрытий промышленных изделий	81
4.2 Параметрическая идентификация объекта управления и исследование системы управления в программе симуляторе	91
4.3 Разработка ПО для реализации разработанных алгоритмов управления	100
Выводы по разделу 4	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	105
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	106
ПРИЛОЖЕНИЕ А	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	121
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	124

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В тексте диссертационной работы использованы следующие сокращения:

3D	- 3-Dimensional
ИКТ	- Информационно-коммуникационные технологии
МОиН РК	- Министерство образования и науки Республики Казахстан
ВКТУ	- Восточно-Казахстанский технический университет
НИР	- Научно-исследовательская работа
DLP	- Digital Light Processing (Цифровая обработка света)
PCL	- Point Cloud Library (Библиотека облака точек)
КИМ	- Координатно-измерительные машины
LTS	- Laser triangulation sensor (Лазерный триангуляционный датчик)
AACMM	- Articulated Arm Coordinate Measuring Machines (Интегрированная в координатно-измерительную машину с шарнирно-сочлененной рукой машина)
CCD	- Charge-Coupled Device (Прибор с зарядовой связью)
ПИД-регулятор	- Пропорционально-интегральный регулятор
САУ	- Система автоматического регулирования
ЛАЧХ	- Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика
АФХ	- Амплитудно-фазовая характеристика
РЧХ	- Расширенная частотная характеристика
АКР	- Аналитическое конструирование регуляторов
LQ	- Linear quadratic (Линейно-квадратичная)
АКОР	- Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов
АС	- Автоматическая система
СТС	- Computed Torque Control (Расчетное управление крутящим моментом)
СУ	Система управления
SDC	- State Dependent Coefficient (Коэффициент зависимости от состояния)
SDRE	- State Dependent Riccati Equation (Зависимое от состояния уравнение Риккати)
КДОВ	- Компенсация динамики объекта и возмущений
ИЭС	- Институт электросварки им. Е.О. Патона
МПН	- Микроплазменное напыление
КазНИИТО	- Научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии
AS	- Advanced Superior (Расширенный улучшенный)
SISO	- Single input- Single output (Объект управления с одним входом и одним выходом)
ОУ	Объект управления
ПФ	Передаточная функция

ВВЕДЕНИЕ

Основная идея данного исследования: диссертационная работа посвящена синтезу системы автоматического управления движением робота-манипулятора для задач 3D сканирования объектов сложной геометрической формы, на поверхность которых затем проводится плазменное напыление покрытий при помощи того же робота-манипулятора. Для управления роботом, выполняющим технологическую операцию плазменного напыления покрытий, нужно использование готовой или создание новой определенной модели траектории робота и задание ее в понятном для робота виде. В диссертационной работе предлагается предварительно провести роботизированное сканирование объекта при помощи закрепленных на роботе датчиков расстояния и по данным сканирования получить 3D модель объекта, по которой затем будет перемещаться рука робота с закрепленным на ней плазмотроном. Планирование траектории перемещения рабочего инструмента робота-манипулятора, выполняющего последовательно процедуру сканирования объекта, а затем его обработку плазменной струей, а также обеспечение согласованного движения звеньев манипулятора в обоих этих процессах, что включает согласование скоростей и ускорений различных звеньев, являются основными задачами управления в данном исследовании. Эти задачи управления решаются на двух уровнях. На первом уровне управление реализуется путем синтеза системы управления звеньями робота с использованием методов теории автоматического управления. На втором уровне управление реализуется путем программирования контроллера робота, для чего разрабатываются алгоритмы управления роботом, выполняющим процедуру 3D сканирования, с последующим планированием траектории и автоматической генерацией программы перемещения робота по построенной в результате сканирования 3D модели.

Ключевые слова: синтез системы управления, 3D сканирование, 3D модели объектов, рабочий инструмент робота-манипулятора, бесконтактные датчики расстояния, планирование траектории, плазменное напыление покрытий.

Актуальность. Решению задачи управления движением робота-манипулятора и планирования его траектории за последнее время посвящено много исследований, одно из наиболее актуальных направлений - это использование робота-манипулятора в качестве базового компонента системы 3D сканирования, чтобы воссоздать модель обрабатываемого роботом изделия. 3D сканеры на основе промышленных роботов применяются в системах контроля качества, в автоматических линиях упаковки, системах сборки и проч., область их применения с течением времени неуклонно расширяется. В настоящее время роботы-манипуляторы начали применять для операций плазменного напыления покрытий в условиях опытных производственных участков и лабораторий, но промышленное внедрение роботизированных технологий плазменного напыления затруднено из-за сложностей, связанных как со спецификой процесса напыления (например, применение технологий

термического плазменного напыления для медицины – это инновационная задача, требующая обеспечения прецизионной точности процессов применительно к биосовместимым материалам), так и с вопросами управления роботами-манипуляторами.

Разработка и апробация нового метода синтеза системы автоматического управления движением робота-манипулятора для задач 3D сканирования объектов сложной геометрической формы, в совокупности с применением новых алгоритмов воссоздания 3D-моделей отсканированных объектов и планирования траектории робота позволит создать роботизированную систему 3D сканирования объектов сложной геометрической формы для последующего выполнения технологических операций плазменного напыления покрытий с перемещением плазмотрона вдоль реконструированной 3D модели объекта с прецизионным соблюдением таких ключевых параметров, как линейная скорость перемещения и дистанция до поверхности объекта, что даст преимущества по сравнению с существующими решениями.

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению науки в области ИКТ и Государственной программе "Цифровой Казахстан". Диссертационная работа выполнена в рамках проекта № AP05130525 «Интеллектуальная роботизированная система для плазменной обработки и резки крупногабаритных изделий сложной формы» с грантовым финансированием Комитета науки МОН РК на 2018-2020 годы, по приоритету «Информационные, телекоммуникационные и космические технологии, научные исследования в области естественных наук», руководитель проекта д. ф.-м. н., профессор Алонцева Д.Л.

Объектом исследования диссертационной работы представлена система автоматического управления движением промышленного робота-манипулятора, выполняющего последовательно операции 3D сканирования и плазменного напыления покрытий на поверхность отсканированных объектов.

Предметом исследования является синтез системы автоматического управления движением робота-манипулятора для задач 3D сканирования объектов сложной геометрической формы и алгоритмы управления промышленным роботом-манипулятором, который воспроизводит 3D сканирование с определенной последовательностью, а также выполняет плазменное напыление покрытий на поверхность отсканированных объектов.

Цель исследования: синтез системы 3D сканирования на базе робота-манипулятора и установленных на роботе бесконтактных датчиков расстояния и апробация роботизированной системы 3D сканирования на модельных и реальных объектах.

Задачи исследования:

1) Анализ современного состояния проблем разработки и использования роботизированных систем сканирования и синтеза систем управления ими на основе обзора открытых литературных источников, с учетом специфики процессов плазменной обработки промышленных изделий, которым предшествует 3D сканирование;

2) Разработка методики синтеза системы автоматического управления роботом-манипулятором на основе алгоритма компенсации динамики объекта и возмущений и разработка программного обеспечения, предназначенного для управления роботом в соответствии с выбранными параметрами системы автоматического управления;

3) Разработка алгоритмов управления роботом-манипулятором, выполняющим процедуру 3D сканирования поверхности промышленного изделия;

4) Апробация разработанной системы 3D сканирования на базе робота-манипулятора и установленных на роботе бесконтактных датчиков расстояния на модельных и реальных объектах.

Основные методы исследования: методы теории автоматического управления и линейной алгебры, математическое компьютерное моделирование, тестирование алгоритмов управления в программе-симуляторе и методики сканирования на модельных объектах, натурный эксперимент: 3D сканирование и плазменная обработка реальных объектов сканирования на опытном производственном участке с оценкой результата с точки зрения требований к конечному продукту (покрытию).

Научные положения, выносимые на защиту:

1) синтез системы автоматического управления движением в данном направлении инструмента и звена робота-манипулятора, в основе которого заключен алгоритм компенсации динамики объекта и возмущений;

2) результаты разработки и тестирования на модельных и реальных объектах новой системы 3D сканирования на базе робота-манипулятора и установленных на роботе бесконтактных датчиков расстояния.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1) выполнен синтез системы автоматического управления движением в данном направлении инструмента и звена робота-манипулятора на основе алгоритма компенсации динамики объекта и возмущений;

2) разработан алгоритм управления, обеспечивающий генерацию программы перемещения промышленного робота-манипулятора Kawasaki, выполняющего процедуру 3D сканирования бесконтактным лазерным датчиком расстояния с заданными параметрами процесса сканирования (шаг, скорость, точность прохождения траектории);

3) получена совокупность результатов апробации на модельных и реальных объектах системы автоматического управления движением робота-манипулятора, выполняющего задачи 3D сканирования объектов сложной геометрической формы с последующим плазменным напылением их поверхности, обладающая преимуществами в точности выполнения технологических процессов по сравнению с существующими решениями.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 5-ти международных конференциях:

1) 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 22-24 сентября 2021 г., г. Краков, Польша (онлайн);

2) 14th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas, 14 ноября 2019 г., г. Секешфехервар, Венгрия;

3) VII Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых инновационному развитию Казахстана», 8, 9 апреля 2021 г., г. Усть-Каменогорск, Казахстан;

4) Communications in Computer and Information Science (CITech-2018), 12 -13 сентября 2018 г., г. Усть-Каменогорск, Казахстан;

5) Global Science and Innovations 2018: Central Asia», 7 декабря 2018 г. Астана, Казахстан.

Публикации. Всего по теме диссертационной работы опубликовано **14** работ, из их: **4** в изданиях, рекомендуемых Комитетом; **4** в международных рецензируемых журналах, индексируемых в базе в Scopus и имеющих процентиль по CiteScore и (или) индексируемых в данных информационной компании Web of Science Core Collection, Clarivate Analytics и (или) имеющих ненулевой импакт-фактор, **5** в трудах международных конференций и **1** свидетельство о государственной регистрации на объект авторского права.

Диссертация имеет практическое значение:

- результаты диссертации внедрены в учебный процесс ВКТУ им. Д. Серикбаева в образовательную программу «Автоматизация и управление», используются для преподавания дисциплин: «Нелинейные системы автоматического регулирования» и «Экспериментально-статистические методы построения математических моделей» (АКТ от 30.11.21 о внедрении НИР в учебный процесс);

- в «ИП Абакумов Р.А.» проведены производственные испытания промышленного изделия (дробилки щековой), на поверхность которого наносилось покрытие с использованием робота-манипулятора, перемещающегося по 3D модели изделия, полученной в результате предварительного 3D - сканирования, подтверждающие увеличение срока службы плиты щековой дробилки с плазменным покрытием изношенной поверхности (Акт производственных испытаний «ИП Абакумов Р.А.», № 1 от 01.10.2020).

Для внедрения в практику предлагается: свидетельство о государственной регистрации на объект авторского права № 5803 от 15 октября 2019 г. Вид объекта: программа для ЭВМ. Название объекта: «Расчет коэффициентов алгоритма управления однозвенным роботом-манипулятором» Авторы: Д.Л. Алонцева, Г.К. Шадрин, **Құсайын-Мұрат Ә. Т.**

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ СКАНИРОВАНИЯ.

1.1 Постановка задачи роботизированного 3D сканирования применительно к процессам плазменного напыления. Робот-манипулятор.

Инновационные технологии и автоматизация технологических процессов дают каждому предприятию прекрасную возможность выйти на абсолютно новый, наиболее высокий уровень совершенствования, прогресса и конкурентоспособности. Автоматизация технологического процесса с использованием принципов робототехники может исключить нежелательные отклонения от заданных параметров работы системы, что приведет к повышению качества продукции, а параметры процесса, касающиеся производительности и качества, могут быть дополнительно улучшены [1].

Робототехника - «прикладная наука, которая занимается разработкой автоматизированных технических систем, и представляет из себя центральное техническое «ядро» интенсификации производства. Робототехника опирается на такие дисциплины, как электроника, механика, кибернетика, телемеханика, мехатроника, информатика, а также радиотехника и электротехника» [2, с. 12], в соответствии с рисунком 1.1.



Рисунок 1.1 – Схематическое изображение комплекса дисциплин, на которые опирается робототехника

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [3, р. 23]

Разработка и реализация систем мехатроники являются одними из главных операций, которые оказывают существенное влияние на повышение уровня эффективности технологического процесса, и позволяют упростить труд человека в современном мире. Таким образом, имеется возможность использования роботов промышленного назначения с целью решений вышеупомянутых задач. Необходимо также отметить, что значительная часть из классификаций роботов включают в себя ПО, механические конструкции и электронику одновременно. Среди наиболее востребованных примеров мехатронной системы выделяются роботы-манипуляторы.

Роботы-манипуляторы представляют собой сложный электромеханический объект. Для разработки роботизированных систем на их основе необходимо учитывать некоторые особенности роботов-манипуляторов. Во-первых, их отличительная особенность - это сложная кинематическая структура, которая содержит множество независимых друг от друга, либо, напротив, взаимосвязанных звеньев. Во-вторых, моменты физических сил, которые действуют на звенья манипулятора, меняются при изменении положений звеньев в пространстве. В-третьих, существует необходимость одновременного управления большим числом двигателей.

Робот-манипулятор - это автоматическая машина (стационарная или подвижная), которая включает исполнительное устройство (манипулятор) и программное управление (функции перемещения и управления) [4].

Робот может попасть во множество классификационных систем в зависимости от операций, которые он выполняет, а также от особенностей его конструкции. Некоторые общие способы классификации роботов включают их назначение, специализацию, тип привода, грузоподъемность, метод программирования, тип системы управления, систему координат, мобильность, конструкцию манипулятора.

Ключом к улучшению управления современными роботами является модернизация их средств управления и разработка алгоритмов движения ими для перемещения интегрированных объектов в трехмерном пространстве. Планирование движения включает в себя упрощение последовательности действий и согласование цели управления для каждого действия.

Постоянно нужно учитывать при формализации целей управления мехатронными системами то, что:

- объект может описываться алгебраическими и/или дифференциальными векторными уравнениями, системой неравенств;
- выбор метода формализации носит субъективный характер и зависит от опыта разработчика и поставленной задачи.

Роботизированные системы 3D сканирования, в составе которых основным компонентом выступают роботы-манипуляторы с закрепленным в качестве рабочего инструмента устройством для 3D сканирования, дают возможность решения многих производственных и технических задач [5-14]. Например, при контроле качества готовых изделий во многих случаях используется лазерное сканирование с использованием роботов [12, р. 155-156],

позиционный контроль заготовок для покраски и нанесения лакокрасочных покрытий также производится методом роботизированного сканирования [13, р. 2]. Кроме этого, роботизированные системы сканирования широко применяются в медицине [7, р. 1-10; 8, р. 23], в строительстве [9, р. 59], а усовершенствование технологий, таких как дополнительное оснащение системами машинного зрения [10, р. 128] и новая конструкция захватов, позволяет расширить диапазон применения логистических роботов [14, с. 32].

Существует ряд причин, по которым принято решение разработать роботизированную систему сканирования в данной работе. Среди них можно выделить следующие: полученные результаты, в ходе анализа научной проблемы, с которой столкнулась исследовательская группа ВКТУ им. Д. Серикбаева, выполняя исследования, описанные в работах [15-16], которые показали, что можно использовать промышленный робот Kawasaki (см. рис. 1.2) как главный компонент в системе сканирования, позволяющим решить многофункциональный ряд задач, в том числе плазменную обработку поверхностей. Следовательно, появилась необходимость предложения беспрецедентного решения.



а



б

а – робот, выполняющий операцию микроплазменного напыления покрытия; б - система управления роботом (контроллер E40) с multifunctional панелью MFP

Рисунок 1.2 – Манипуляционный робот, или робот-манипулятор Kawasaki RS010L (Kawasaki Heavy Industries, Япония)

В соответствии с рисунком 1.2а процесс микроплазменного напыления покрытия проводился в условиях опытно-производственного участка ВКТУ им. Д. Серикбаева с использованием производственного манипуляционного робота Kawasaki RS010L (Kawasaki Heavy Industries, Япония). Этот робот выступает в роли устройства с 6-ю степенями свободы для перемещения рабочего инструмента (плазмотрона), установленного на нем, управление

манипулятором осуществляется посредством программируемого контроллера E-40, в соответствии с рисунком 1.2б.

Технологические процессы плазменной резки и плазменного напыления покрытий, предметом автоматизации которых явилась данная работа, оба в определенной (разной) степени опасны для человека: они высокотемпературные (температура плазмы составляет $>20000\text{ K}$), вредные для зрения (требуются защитные очки, щитки), шумные, сопровождающиеся выделением газов и пыли. Массы плазмотрона или плазмореza существенные (до 10 кг), держать их в руках во время выполнения операций резки или напыления утомительно. Очевидно, что замена человека, выполняющего основные операции резки или напыления, роботом делается для защиты человека и облегчения его труда.

Точность выполнения операций резки и напыления роботом также очевидно выше, чем у человека, к тому же робот может выполнять операции по заданной программе в течение длительного, фактически неограниченного времени, при этом точность выполнения операций не меняется, точность определяется только конструктивными особенностями робота. Робот сконструирован таким образом, что при эксплуатации с соблюдением условий, указанных в его техническом паспорте, точность, также указанная в техническом паспорте, является гарантированной.

Робот управляется при помощи программируемого контроллера, таким образом, основной задачей управления роботом при выполнении любых технологических операций является планирование траектории перемещения [17-21] рабочего инструмента робота и программирование контроллера робота таким образом, чтобы осуществить движение рабочего инструмента робота по заданной траектории. То есть для управления роботом нужно использование готовой или создание новой определенной модели траектории робота и задание ее в понятном для робота виде, то есть на языке программирования определенного контроллера.

Основная идея задачи роботизированного 3D сканирования в данной работе заключается в использовании робота-манипулятора в качестве базового компонента системы 3D сканирования, чтобы по данным сканирования воссоздать 3D модель обрабатываемого роботом изделия и обеспечить перемещение плазмотрона (т.е. рабочего инструмента того же робота-манипулятора) вдоль реконструированной 3D модели изделия при последующем выполнении технологической операции плазменного напыления покрытия на поверхность отсканированного изделия. Таким образом, планирование траектории движения руки робота будет осуществляться вдоль реконструированной роботом 3D модели изделия. Автоматическая генерация программы перемещения робота по полученной в результате сканирования 3D траектории обеспечит прецизионное соблюдение такого основного для процесса напыления параметра, как расстояние от сопла плазмотрона до поверхности изделия, то есть дистанцию напыления.

Планирование и программирование траектории перемещения рабочего инструмента робота-манипулятора, выполняющего последовательно процедуру сканирования объекта, а затем его обработку плазменной струей, а также обеспечение согласованного движения звеньев манипулятора в обоих этих процессах, что включает согласование скоростей и ускорений различных звеньев, являются довольно трудными задачами. Эти задачи управления будут решаться на двух уровнях. На первом уровне управление низшего порядка будет реализовываться путем синтеза системы управления звеньями робота с использованием методов теории автоматического управления. На втором уровне управление высшего порядка будет реализовано путем программирования контроллера робота, для чего будут использованы универсальные алгоритмы сканирования и планирования траектории с автоматической генерацией программы траектории робота по реконструированной 3D модели изделия.

В представленной главе рассматриваются основные задачи внедрения роботов-манипуляторов в системы 3D сканирования, а также вопросы синтеза систем управления для роботизированных систем и непосредственно требования к роботизированному микроплазменному напылению покрытий. В конце данной главы будут поставлены цель и задачи диссертационного исследования, кратко отмечены основные методы исследования, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

1.2 Анализ современного состояния существующих систем роботизированного 3D сканирования

Под обозначением 3D подразумевается набор координат в трехмерном пространстве. В графическом виде эти координаты представляются как точки на осях X, Y, Z декартовой системы координат [22].

В журнальном проспекте американской компании Texas Instruments [23], описывающем технологии DLP (Digital Light Processing) для 3D сканирования, говорится, что 3D сканирование дает возможность получения объемной информации. «Добавляя» к простым двумерным системам Z-измерение, получаем информацию, например, об объеме тела или шероховатости его поверхности.

Одной из основных технологий 3D сканирования является метод триангуляции. Это метод определения расстояний, основанный на том, что, имея ограниченный набор углов и длин треугольника, математически мы можем рассчитать и найти остальные неизвестные значения длин его сторон. Этот метод использовался для построения карт и дорог на протяжении нескольких лет геодезистами. Он получил название «триангуляция» и способствовал развитию технологий 3D сканирования для определения размеров и формы объектов. Метод триангуляции применяется в оптических системах сканирования с одной камерой, в системах стереозрения, где используются устройства с несколькими камерами, а также в методах сканирования, использующих датчики расстояния. Для технологий 3D

сканирования расстояния и углы между изображениями и проецируемым источником света или сигналом лазерного датчика расстояния, создают основу треугольника, благодаря которому могут быть рассчитаны 3D координаты сканируемого объекта и воссоздано его 3D изображение.

Путем сбора информации об объекте с использованием устройств 3D сканирования, возможно 3D измерение, а затем и 3D визуализация. Точные 3D измерения сканированного объекта, используются для проверки материалов и контроля качества. Если технология 3D сканирования способна собирать 3D данные сканируемого объекта, то возможно воссоздание 3D модели объекта с высокой точностью и разрешающей способностью.

Кугуле (Chougule) и др. [24] отмечают, что 3D сканирование – это один из широко используемых процессов для создания цифрового 3D изображения. Главной целью такого сканирования, как считают авторы [24, р. 41], является создание трехмерной модели на основе полученных данных от средства сканирования, представляющих собой комплекс координат точек поверхности объекта. Другими словами, создание 3D модели объекта основывается на использовании так называемого «облака точек» («point cloud»).

С развитием аппаратного обеспечения и библиотеки облака точек (Point Cloud Library (PCL)) - для обработки двух-трехмерных изображений и «point cloud») [25], использование последних становится все более привлекательным для 3D сканирования. Данная платформа включает в себя широкий спектр современных алгоритмов, в том числе фильтрацию, воссоздание поверхности, сегментацию и многое другое.

Анализ сцены 3D сканирования в различных аспектах включает обнаружение и распознавание объектов, сегментацию и классификацию объектов.

Распознавание объектов - это процесс, при котором одна точка или группа точек помогают обнаружить определенный тип поверхности на основе атрибутов низкого уровня. «Атрибуты низкого уровня» в этом случае относятся к информации без семантики (например, местоположение, высота, геометрия, цвет, интенсивность, плотность точек и т. д.), которая обычно может быть получена из данных облака точек.

Сегментация относится к процессу группировки точек на основе вышеупомянутых низкоуровневых атрибутов в сегмент или объект, то есть сложная поверхность разбивается на геометрически однородные с незамысловатым аналитическим описанием. Данный процесс позволяет проводить дальнейшую обработку и анализ на основе предварительных знаний.

Классификация - это процесс, аналогичный распознаванию объектов, который присваивает класс или идентификацию каждой точке, сегменту или объекту для представления определенных типов объектов (например, знака, дороги, разметки или здания). Разница между распознаванием объектов и классификацией облака точек заключается в том, что подход к распознаванию объектов разработан для того, чтобы отличить несколько конкретных объектов

от других, тогда как цель обычно состоит в том, чтобы обозначить всю сцену семантически [26-28].

Можно выделить огромное количество технологий для цифрового «извлечения» формы 3D объекта. По систематизированию [29] они делятся на контактные и бесконтактные. Бесконтактные технологии же «разбиваются» еще на две основные категории: активные и пассивные. В каждую из этих категорий попадает множество некоторых разновидностей технологий.

Требуна (Trebuña) и др. [30] особое внимание уделили классификации технологий 3D сканирования, при этом выделили категорию активных методов сканирования, подразумевающую, что используется активный источник какого-либо излучения для получения информации об объекте и подробно описали координатно-измерительную машину, как пример контактного типа сканирования.

Координатно-измерительные машины (КИМ) выступали одним из первых промышленных решений для сбора 3D информации. Работа КИМ основана на фиксировании «одной за другой» координат характерного числа точек поверхности объекта и дальнейших вычислений линейных и угловых величин, aberrаций размера, формы и позиции в соответствующих системах координат [31]. При соприкосновении щупа с поверхностью объекта регистрируется его позиции по осям X, Y, Z, в дальнейшем образующие облако точек, которое можно использовать для расчета трехмерной сетки. Несмотря на такие преимущества, как высокий уровень управления этапом дигитализации оператором и низкая стоимость измерительного оборудования, у контактно-измерительных машин имеются также и недостатки, такие как невозможность (чаще всего) сканирования малых отверстий, затруднение при сканировании совсем мелких объектов (точность измерения изменяется от 3 м до 1,8 мкм [32]), а также большая длительность сканирования. Например, у КИМ Carl Zeiss Contura G2 точность контроля по времени от 15 до 68 сек. [31, с. 37]). Таким образом, основным недостатком КИМ является большая длительность их работы, то есть время, необходимое для получения большого количества точек в процессе сканирования. Чем больше поверхность, тем дольше процесс. [33, 34].

В случае выбора бесконтактной активной технологии, в качестве источника излучения задействуется ультразвук, лазерный либо рентгеновский луч. Трехмерное лазерное сканирование, как следует из названия, выполняется с помощью лазера, кроме этого может выполняться на малых или больших расстояниях от объектов. Такое сканирование поверхности используется для быстрого «охвата» поверхности, зданий или ландшафтов [35-37] и для задач обнаружения дефектов [38].

3D сканер - это устройство, исследующее реальный объект или среду, собирает информацию о его форме и, возможно, его конфигурации для дальнейшего создания цифровых 3D моделей [39].

Оптический лазерный 3D сканер работает с использованием видеокамеры по принципу триангуляции, когда камера находит изображение лазерной

полосы на поверхности объекта и определяет расстояния до него. После создания облака точек, каждая из которых характеризуется набором координат в пространстве, строится трехмерная модель объекта. Такой сканер имеет точность, которая обычно находится в пределах ± 2 мм при измерении расстояний в диапазоне от 10 до 25 метров [40]. Их преимущества «выделяются» низкой стоимостью и элементарностью в применении в совокупности наряду с высокой точностью сканирования.

В статье Еслами (Eslami) и др. [41] предлагается новый подход, основанный на методе грубой и точной регистрации фотограмметрических изображений и набора данных облака точек лазерного сканера. Метод не только использует преимущества точной коррекции деформации фотограмметрической модели без каких-либо наземных опорных точек, линий и плоскостей, но также демонстрирует широкий диапазон применимости для грубой и точной регистрации различных типов облака точек и изображений. Вместо обычного математического моделирования в их методе используется план физического интерпретационного моделирования, в котором одно уравнение ограничения сдвига применяется к дифференциальным плоскостям изображения и облакам точек.

Следующий вид оптических 3D сканеров, это сканеры, использующие структурированный и модулированный свет [39, р. 328], а также фиксирующие камерой (или же камерами) объект, подсвеченный с разных сторон проектором. Результат фиксируется с помощью камер, а трехмерная информация об объекте восстанавливается программным обеспечением ПК с использованием принципа триангуляции [42, 43]. Таким методом могут быть получены очень плотные и точные облака точек. Используемая конфигурация и подход позволяют регулировать разрешение поверхности, используя многократную экспозицию или регулировать поле зрения системы. Модулированный свет дает возможность сканеру замечать только свет от лазера, чтобы не было затруднений. Эти технологии востребованы в медицинской сфере, ювелирном деле и реверс инжиниринге [44].

Лазерные датчики расстояния или дальномеры отличаются способностью захватывать малые геометрические, а также сложные формы, высокой скоростью получения информации об объекте, портативностью, то есть возможностью встраивать оборудование для сканирования в различные другие технические устройства, например, встраивать в робот-манипулятор [45].

К неконтактным активным технологиям 3D сканирования с использованием дальномеров можно отнести технологии с использованием датчиков, работающих на разных физических принципах: времяпролетные, с фазовым сдвигом и триангуляционные.

В основе времяпролетных 3D лазерных сканеров лежит времяпролетный лазерный дальномер, фиксирующий расстояние до поверхности исходя из времени перемещения светового импульса. Точность времяпролетного 3D лазерного сканера зависит от того, насколько точно измеряется время прохождения светового импульса «there and back». Типичные времяпролетные

лазерные 3D сканеры имеют скорость сканирования от 10 000 до 100 000 точек в секунду. Недостатком этого типа лазерного сканера является относительно невысокая точность измерения расстояния, порядка нескольких миллиметров [46].

Лазерные датчики с фазовым сдвигом выполняют функции по принципу сравнения фазового сдвига в отраженном лазерном свете с эталонной фазой [39, р. 327]. Диапазон измерения лазерных датчиков, использующих метод времени пролета составляет 200-300 м, что больше, чем диапазон измерения датчиков, использующих метод разности фаз (70-80 м), а скорость сканирования второго метода в 10 раз выше (500000 точек в секунду) [47, 48].

Лазерные триангуляционные датчики расстояния предназначены для непростой задачи по исследованию поверхности крупногабаритных объектов без потери сигнала [49, 51]. Измерение с помощью методики лазерной триангуляции основано на простых геометрических соотношениях. Лазерный луч излучается лазерным диодом в направлении поверхности. Затем отраженный луч передается через линзу на чувствительный к положению элемент детектора (PSD), как показано на рисунке 1.3, который способен измерять положение светового пятна. Расстояние до поверхности компонента измеряется с помощью простых тригонометрических вычислений, с учетом с известного положения лазерного источника и элемента PSD внутри датчика [52].

Триангуляционный лазерный датчик обладает высокой надежностью, высоким разрешением, простой архитектурой и низкой стоимостью. Триангуляционные 3D сканеры, имеют рабочий диапазон измерений от 5 мм до 1000мм и высокую относительную точность измерений вплоть до микрометрического уровня, их разрешение составляет около 7 мкм, могут работать с любой поверхностью и обычно оснащаются лазером класса 1, что делает их безопасными для глаз [53]. Необходимым требованием к сканируемой поверхности является наличие определенной шероховатости, чтобы обеспечить рассеяние лазерного пучка, т.е. попадание отраженного пучка в детектор, как видно по рисунку 1.3.

В настоящее время описанные выше методики 3D сканирования достаточно востребованы и продолжают совершенствоваться, находя применение в роботизированных системах сканирования, как можно судить по анализу современных научных публикаций.

В статье Броуз (Brosed) и др. [54] рассмотрено математическое моделирование лазерного триангуляционного датчика, встроенного в шестиосевой манипулятор для измерения деталей сложной геометрии. Показана интегрированная модель системы, охватывающая лазерный триангуляционный датчик, геометрию манипулятора и взаимное расположение компонентов в процессе измерения.

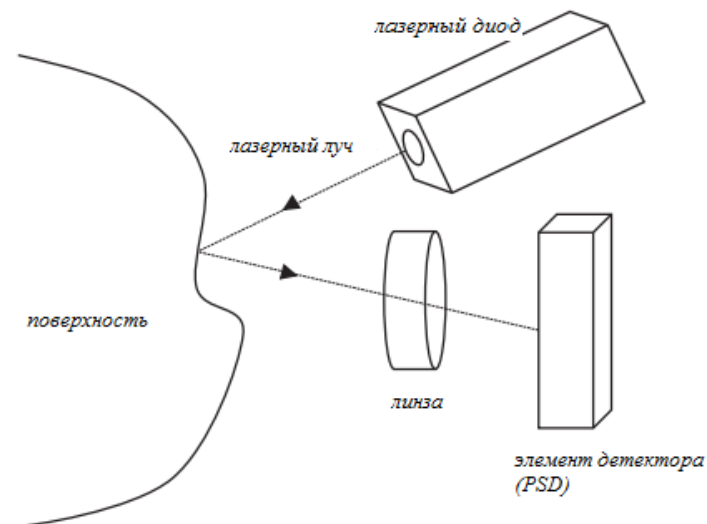


Рисунок 1.3 – Принцип измерения лазерного триангуляционного датчика

Примечание - Рисунок адаптирован из работы [52, р. 74]

Холуяев (Kholhujayev) и др. [55] разработали надежную маломасштабную модель-прототип роботизированной бесконтактной точечной измерительной системы. Была разработана математическая модель для анализа кинематики движения руки робота. Затем для проведения измерений была разработана прототипная модель системы сканирования, объединяющая манипулятор и лазерный датчик. Идея была основана на принципе работы координатно-измерительной машины, при которой центр инструмента («щуп») помещается в известное положение с необходимой точностью. Такой роботизированный манипулятор на основе бесконтактной КИМ помогает справиться с проблемой обеспечения быстрого измерения поверхностей сложной формы.

В статье Жил Бойе ди Соуза (Gil Boyé de Sousa) и др. [56] представлена система 3D измерения поверхности с помощью лазерного триангуляционного датчика, установленного на роботе-манипуляторе. Лазерный датчик может быть жестко закреплен на руке робота или может быть присоединен к роботу с помощью устройства смены инструмента. Использование устройства смены инструмента повысит гибкость, позволяя выполнять совершенно разные задачи с одним и тем же роботом. Результаты экспериментов показывают, что с помощью робота можно проводить точные метрологические исследования с погрешностью 0,05 мм по определению радиуса сферы, а также диаметра цилиндра. Эти формы были выбраны для измерения, поскольку они являются простыми формами, размеры которых были известны. Для выполнения 3D измерения более сложных форм необходимо учитывать шумы измерений и выбирать точки на поверхности с учетом геометрии объекта.

В статье Сантолари (Santolaria) и др [57] представлена методика внутренней и внешней калибровки лазерного триангуляционного датчика

(LTS), интегрированного в координатно-измерительную машину с шарнирно-сочлененной рукой (ААСММ). Методика была разработана с применением нового подхода к задаче идентификации кинематических параметров ААСММ, для одного калибровочного объекта-датчика и одношагового метода калибровки для получения как внутренних (лазерная плоскость, CCD-датчик и геометрия камеры), так и внешних параметров, связанных с основными параметрами ААСМ. Данный подход позволяет интегрировать математические модели LTS и ААСММ без необходимости использования дополнительных методов оптимизации после предварительной калибровки датчика, обычно выполняемой в координатно-измерительной машине (КИМ). Результаты экспериментальных испытаний на точность и повторяемость показали подходящие характеристики этого метода калибровки для конечного пользователя ААСММ. Представленный метод также применим для интеграции датчиков в манипуляторы роботов и КИМ.

Однако, наиболее популярен в настоящее время для 3D сканирования бесконтактный метод стереозрения (stereo-vision), так как он позволяет извлекать данные достаточно быстро или даже в реальном времени [58]. В технологии стереозрения 3D изображения получаются на основе пары изображений. Системы стереозрения используют две камеры, расположенные недалеко друг от друга и «глядящие» на тот же объект (или поверхность), который находится в разных координатах в изображениях, полученных разными камерами. Анализируя различия между изображениями, полученными двумя камерами, с использованием триангуляции расстояния между камерами и расстояния от сканируемого объекта, можно получить набор точек в трехмерном пространстве для формирования трехмерного изображения [59, 60]. Точность метода зависит от положения и ориентации камер относительно объекта, параметров конфигурации, геометрии детали, оптических свойств материала (например, шероховатости поверхности и т.д.). Характеристики метода определяются также техническими характеристиками видеокамер, например, разрешение видео до 752 (640) x 480 пикселей, возможность получения от 7 до 60 кадров в секунду [61].

Фей (Fei) и др. [62] разработали гибкую систему трехмерного сканирования путем применения сканера, который зафиксирован на промышленном манипуляторе с поворотным столом, и предложили практический подход к калибровке системы на основе бинокулярного стереозрения. Эта система сканирования имеет 7 степеней свободы и способна проводить полное сканирование поля под любым углом, подходящим для сканирования объекта сложной формы.

Росси и Савино (Rossi and Savino) [63] предложили роботизированную систему сканирования, в которой робот интегрирован с системой стереозрения. Система стереозрения по существу состоит из лазерного сканера, установленного на манипуляторе робота и неподвижных видеокамер. Поскольку лазерный сканер подключен к роботу, можно использовать координаты звеньев робота, чтобы определить положение и ориентацию окна

сканирования в роботизированной системе, следовательно, в рабочем пространстве. При сканировании поверхности полученные данные преобразуются в облако точек. Затем по координатам этих точек рассчитываются траектории конечных эффекторов, адаптированные для воспроизведения отсканированной поверхности. Тот же робот с помощью рабочего инструмента может воспроизвести отсканированный объект.

Лиу (Liu) и др. [64] разработали роботизированную систему сканирования с использованием методов стереозрения для измерения размеров объекта в медицине. Система состоит из портативного 3D сканера Artec Space Spider (разрешение до 0,1 мм) и роботизированной руки KUKA LBR iiwa 7 R800 (повторяемость $\pm 0,1$ мм). 3D сканер использовался для получения 3D информации о дефекте черепа и экспорта уточненной сетки.

Наиболее продвинутой технологией по сканированию поверхности является технология «машинного зрения» (machine vision). Технология машинного зрения объединяет знания и подходы, используемые для обеспечения автоматической проверки на основе изображений для контроля качества, управления процессами и управления роботами. В основном машинное зрение используется для оптического измерения, контроля качества, сортировки, проверки сборки деталей, их наличия или отсутствия, и в целом контроля производственного процесса [65]. Методы машинного зрения обеспечивают роботам трехмерное восприятие для помощи в распознавании окружающей среды и навигации. Так как для управления роботами бывает необходимо визуализировать окружающую среду «по-человечески», то по этой причине роботу необходимо получать трехмерную информацию [66]. При применении таких методов сканирования измеряемое расстояние находится в диапазоне от 500 до 2650 мм, а время сканирования составляет от 1,8 до 2,5 секунд [67].

В работе Броуз (Brosed) и др [68] для измерения объектов сложной геометрической формы была представлена разработка системы машинного зрения, где основными компонентами были лазерный триангуляционный датчик и робот-манипулятор. Робот манипулировал деталью, чтобы поместить измеряемую поверхность в поле зрения датчика. Результаты испытаний подтвердили точность измерения и характеристики эталонной модели с соответствующими значениями повторяемости для проверки деталей со сложной геометрией и адекватным временем цикла для обеспечения 100% производственного контроля.

Одним из необходимых, но в то же время затратных и трудоемких процессов на сегодняшний день является создание точной цифровой контурной модели поверхности самолета или даже его большей части. Сан (Sun) и др. [69] предложили решение для автоматизированного 3D сканирования самолета с применением новейших технологий робототехники, искусственного интеллекта и сенсорных технологий. Они использовали роботизированную систему, состоящую из беспилотного летательного аппарата с камерой RGB-D, беспилотного наземного аппарата и манипулятора, оснащенного высокоточным

3D сканером ближнего действия, который использовали для автоматического сканирования. Основное внимание было уделено использованию алгоритма (дерево поиска Монте Карло) Monte Carlo Tree Search для определения оптимальной траектории сканирования на основе модели воздушного судна с облаком точек с низким разрешением. Полученная трехмерная модель может быть проанализирована для выявления широко распространенных дефектов, таких как вмятины и трещины, на поверхности фюзеляжа самолета, крыльев и других компонентов. Такое решение делает процесс сканирования намного более эффективным и качественным. Кроме того, такое решение также устраняет утомительный, скучный, а иногда даже рискованный человеческий труд из работы по сканированию.

Родригес (Rodrigues) и др. [70] предложили метод, который позволяет роботу регулировать траекторию сварки, рассчитанную по модели САПР и реализованную на практике для фактической заготовки. В качестве альтернативы, для неповторяющихся задач и в тех случаях, когда модель САПР недоступна, можно интерактивно определить путь в режиме онлайн по сканируемой поверхности. Основными преимуществами метода являются скорость и точность; поверхность может быть отсканирована с одного 2D-изображения и обработана в 3D за 40 мс.

Исследование Счларп (Schlarp) и др. [71] посвящено повышению производительности системы сканирования в отношении достижимого разрешения и скорости сканирования. Для сканирования интересующей области с помощью конечного автомата используются традиционные траектории, а также траектории Лиссажу, которые обеспечивают обзор области сканирования. Для отслеживания этих траекторий используются ПИД-регуляторы. Экспериментальные результаты показывают, что образец траекторий сканирования может быть захвачен правильно с частотой кадров один кадр в секунду, максимальным пространственным разрешением 130 мкм и полем зрения 11,5x18,5 мм. С помощью геометрических соотношений профиль поверхности может быть восстановлен по измеренным величинам. Если используются траектории сканирования на основе траекторий Лиссажу, то обзор всей области сканирования предоставляется уже через часть времени измерения. Результаты измерений показывают, что рассчитанный профиль поверхности сканирования на основе траекторий Лиссажу хорошо согласуется с профилем, измеренным классической механической сканирующей системой.

Безусловно, использование оборудования, обеспечивающего более высокую точность измерений, дает возможность получения более точной модели объекта сканирования, однако при выборе технологии для конкретной задачи логично ориентироваться на совокупность решающих характеристик, таких как точность, время сканирования или стоимость оборудования, которые отражены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнение основных характеристик технологий сканирования по данным [31, с. 37; 46, р.176; 47, р. 17; 53, р. 8-13; 61, р. 101; 64, р. 2; 70, р. 253]

№	Метод	Основное оборудование	Время сканирования	Стоимость оборудования	Точность измерений
1	Лазерное сканирование	лазерный триангуляционный датчик расстояния	1000 и более измерений в секунду	Низкая	до 7 мкм
		Времяпролётный 3D лазерный сканер	10 000 - 100 000 точек за секунду	Низкая	до 1 м
		Лазерный сканер с фазовым сдвигом	500000 точек в секунду	Низкая	70-80 м
2	Стереозрение	Две камеры	от 7 до 60 кадров в секунду	Высокая	до 28 мм
3	Оптический	3D сканер со структурированным светом	40 кадров в секунду	Высокая	от 0,8 м до 6 м
4	Машинное зрение	Промышленные камеры, смарт-камеры, процессор машинного зрения, фреймграбберы, ПО машинного зрения	от 1,8 до 2,5 секунд	Высокая	от 500 мм до 2650 мм
5	Контактный	Измерительный щуп	от 15 до 68 секунд	Низкая	от 1,8 мкм до 3 м

Использование недорогого триангуляционного лазерного датчика расстояния позволяет без использования дорогих видеокамер производить сканирование для определения расстояний в пределах от 5 мм до 1000 мм с точностью измерений до 7 мкм. Анализируя данные, освещенные выше при составлении таблицы 1.1, был сделан вывод, что наиболее привлекательным по

сравнению с другими методами сканирования, является метод 3D сканирования с использованием лазерного триангуляционного датчика расстояния.

Таким образом, разные методы сканирования имеют различные достоинства и недостатки, к последним относятся: высокая стоимость оборудования, низкая скорость сканирования и трудности при обработке данных и получении результата (3D модели), поэтому наибольший интерес вызывают методы, использующие более дешевое оборудование/технику, но позволяющие делать сканирование с высокой точностью и приемлемой быстротой.

Выводы по подразделу 1.2:

Основываясь на полученной путем анализа современной литературы информации о существующих системах роботизированного 3D сканирования были сделаны следующие выводы:

- главными составляющими роботизированных систем 3D сканирования, в основном, являются робот-манипулятор, сканер/датчик, видеокамера, ПО;

- такое оборудование для сканирования, как триангуляционные лазерные датчики, обладает целым рядом достоинств, таких как: дешевизна, высокая точность измерения, отсутствие контакта с объектом, возможность проведения измерений, как в статическом положении, так и в динамическом режиме, возможность проводить измерения без использования видеокамеры. В настоящее время в подавляющем большинстве роботизированных сканеров используются методы стерео и машинного зрения, тогда как использование дешевых, простых в эксплуатации, надежных и точных лазерных триангуляционных датчиков расстояния в совокупности с новым программным обеспечением могло бы предоставить новый и перспективный подход к разработке методов роботизированного 3D сканирования.

В следующем разделе 1.3 диссертации представлен краткий обзор работ по синтезу систем автоматического управления (САУ), нужный для разработки новой роботизированной системы сканирования.

1.3 Методы синтеза систем автоматического управления (САУ)

Огромный вклад в развитие методов синтеза САУ внесли такие ученые, как В.Р. Кулебакин, Т.Н. Соколов, В.В. Солодовников и другие.

К одним из первых решений трудностей по синтезу САУ относят гиперболу И.А. Вышнеградского (1832-1895), задача которой заключается в обеспечении стабилизации САУ по принципу «ввод-вывод», благодаря которой вычисляются области устойчивости и неустойчивости системы, поведение которой описывается дифференциальным уравнением третьего порядка [72].

Еще в 1940 году В.Р. Кулебакин разработал принцип двухэтапного синтеза регуляторов (принцип двухэтапной коррекции), где на начальном этапе выполняется выбор эталонного оператора замкнутой системы (для стационарных систем - эталонная передаточная функция (ПФ) $W_0(s)$, а на

следующем этапе выбирается кроме структурной схемы и параметров регулятора исполнительный элемент, который имеет мощность, обеспечивающую быстроедействие [73]. Этот метод именуется «Методом стандартных коэффициентов», он будет более подробно описан далее, как применяемый для расчетов в главе 3.

Для устранения затруднений синтеза САУ, которые подвергаются влиянию случайных процессов, важную роль играет поиск динамических характеристик оптимальной (эталонной) системы. Как отмечалось выше, В.Р. Кулебакин [74] предложил метод синтеза систем автоматического управления, описываемых линейными дифференциальными уравнениями второго и третьего порядка, отвечающих конкретным техническим требованиям. Свойственной особенностью способа стандартных коэффициентов считается то, что требуемые параметры вычисляются путем решения системы уравнений, выведенной приравниванием коэффициентов к соответствующим операторам эталонной и фактической передаточных функций системы управления.

Основным «минусом» данного метода при решении задачи синтеза во множестве случаях считается неразрешимость системы уравнений, применяемой для определения параметров этой системы. Вследствие этого, при использовании метода приходится «перебирать» подходы, позволяющие игнорировать собственно проблему. Например, Т.Н. Соколов [75] исследовал широкий круг задач синтеза линеаризованных САУ, выделяя методы определения оптимальных передаточных функций, и разработал метод выбора параметров САУ по заданным коэффициентам ошибок.

В настоящее время в теории синтеза СУ можно выделить некоторые их наиболее продвинутых направлений, которые обеспечивают необходимые показатели качества переходных процессов по выходным переменным, а также их неизменность по отношению к переменным характеристикам объекта и возмущениям.

Значимой областью является теория синтеза систем с переменной структурой [76], особенно синтеза систем управления с организацией скользящих режимов движения вдоль многообразия, заданного в пространстве состояний объекта. Например, Ван Трис (Van Trees) [77] рассмотрел решение проблемы компенсации и составил алгоритмы для определения компенсирующих ядер для цепей прямой и обратной связи.

Современный этап совершенствования теории управления имеет своей отличительной особенностью постановку и решение задач, которые принимают к сведению неточность знаний об объектах управления и воздействующих на них возмущений. Проблема синтеза регуляторов и оценки состояния, учитывающая неопределенность модели объекта и характеристики входной активности, является одной из центральных проблем современной теории управления. Ее важность в основном связана с тем, что почти в каждой технической задаче проектирования САУ присутствует неопределенность в знании моделей объектов и возмущений.

Исторически для синтеза регуляторов САУ был применен метод графоаналитического анализа, а именно метод логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) [78, 79], относящийся к синтезу по эталонным, или же желаемым математическим моделям. Его популярность применения в инженерной практике обусловлена главным образом простотой и наглядностью в решении задачи синтеза, а также общей постановкой задачи синтеза.

Наряду с широкой применимостью метода ЛАЧХ для синтеза линейных систем, недостатки все же имеются. К ним можно отнести:

- 1) нет определенной связи между численными коэффициентами АФХ системы в разомкнутом состоянии и прямыми показателями качества замкнутой системы;
- 2) трудности в вычислениях сложных многоконтурных устройств управления.

Кроме метода ЛАЧХ для практических расчетов, скажем, для вычисления эталонных настроечных параметров регулятора, который гарантирует требуемую степень устойчивости САУ, применяют метод расширенных частотных характеристик (РЧХ) [80].

Для синтеза мономерных систем главными недостатками использования методов РЧХ и ЛАЧХ можно назвать ненаглядность задания исходных данных и постулирование структуры регулятора и корректирующих звеньев. В результате отсутствует понимание того, что выбранная структура является эффективной.

Выяснилось, что исследование методов ЛАЧХ и РЧХ является затруднительным для многомерных объектов. Возникновение в 60-х годах разработок методов аналитического конструирования регуляторов (АКР), или линейно-квадратичной (LQ) оптимизации [81, 82] значительно расширила круг систем, требующих синтеза регулятора. Таким образом, возникла необходимость в разработке аналитического синтеза регуляторов [83], где исследовались частотные характеристики LQ-оптимальных систем и были интерпретированы методы подбора структуры квадратичной функции [84-89]. В этих методах широко используется представление систем в пространстве состояний. В зависимости от применяемых методов синтеза регуляторов САУ на основе пространства состояний, можно выделить две группы:

- 1) методы оптимизации системы [90] за счет сведения к минимуму некоторого функционала, который описывает качество регулирования (АКР);
- 2) методы модального управления [91], которые придают замкнутой системе предварительно подобранное распределение корней характеристического уравнения.

Попытки создания более совершенных и в большей степени формализованных методов синтеза, позволяющих определить в процессе синтеза структуру регулятора, привели к новому подходу в методах синтеза – методу аналитического конструирования регуляторов (АКР). Данный метод является одним из самых часто применяемых для синтеза регуляторов

оптимальных систем, показателями которых является квадратичный функционал, выбор и задание, которого считается необходимым аспектом. Критерии эффективного действия АС (перерегулирование, быстродействие, точность и др. инженерные критерии) определяются выражениями весовых коэффициентов функционала.

Сущность способа модального управления [92] заключается в следующем: необходимо выбрать матрицу линейных стационарных обратных связей, обеспечивающую замкнутую систему соответствующий набор показателей качества для объекта управления, включающих свойства всецелой управляемости и наблюдаемости. Данное управление сглаживает свою динамику объекта. Метод модального управления сводится к поиску вышеупомянутой матрицы, благодаря которой замкнутая система обеспечивается требуемыми параметрами характеристического полинома. Управляющее воздействие, которое обеспечивает заранее заданный режим функционирования на основе этих показателей, находят по следующим этапам:

- 1) В результате проверки на наблюдаемость и управляемость определяется возможность синтеза алгоритмов управления данным методом;

- 2) Разрабатывается рациональная эталонная модель на базе характеристик качества;

- 3) Проводится поиск управляющих воздействий;

- 4) Выполняется проверочный расчет, состоящий в подборе матрицы коэффициентов описания замкнутой системы, выявлении её характеристического полинома или корней характеристического полинома. Если полученные данные будут идентичны с требуемыми, то можно судить о достоверности проделанного синтеза.

- 5) С помощью компьютерного моделирования доказывается работоспособность САУ. Если ошибка системы в период времени стремится к нулевому значению, то управляющие воздействия определены верно. В противном случае нужно определить ошибку в расчетах, либо пойти другим путем - синтезировать другое управляющее воздействие [93].

Из вышеизложенного следует, что основным назначением методов модального управления и LQ-оптимизации является коррекция динамических характеристик объекта управления. Один из основных недостатков этих методов: ненулевая статическая ошибка управления. Для устранения такого недостатка при практическом применении данных методов приходится искусственно дополнительно вводить в регулятор интегральную составляющую, использовать прямые связи по внешним воздействиям (комбинированное управление) или использовать другие приемы. Эти дополнения не следуют из исходных методов модального управления и LQ-оптимизации, поэтому при их применении приходится использовать трудоемкий метод проб и ошибок. Другой трудностью считается отсутствие физической наглядности задания коэффициентов функционала в АКР и собственных чисел в методе модального управления. Эти коэффициенты и

числа определяют движение системы в пространстве состояний, которое (пространство состояний) зачастую физически ненаглядно и не полностью отражает свойства объекта управления по каналам: внешние воздействия – выходные переменные. Например, при практическом синтезе регуляторов путем LQ-оптимизации математические расчеты трансформируются в метод проб и ошибок для того, чтобы качество замкнутой системы по каналам: внешние воздействия – выходные переменные соответствовало заданным требованиям [94].

В настоящее время получил развитие третий метод синтеза на основе метода пространства состояний – метод компенсации динамики объекта и возмущений, разработанный в работах Шадрина Г.К. [95-97]. Автор использовал только принцип компенсации для отработки всех внешних воздействий, затем в результате аналитических преобразований была получена структура и параметры управляющего устройства системы управления, содержащей обратные связи. В традиционном методе обратной связи эта связь постулируется, что не позволяет рассчитать структуру и параметры управляющего устройства. [98]. Его можно отнести к структурным методам синтеза в пространстве состояний. «Метод основан на компенсации всех внешних аддитивных воздействий и динамики объекта управления с точностью до фильтров - эталонов посредством обратной математической модели этого объекта. Фильтры-эталон определяют динамику замкнутой системы управления по каналам заданий и возмущений. Преимущества этого метода заключается в задании исходных данных в физически наглядном виде фильтров-эталон замкнутой системы по каналам: задания – выход, возмущения – выход, получение алгоритма управления в аналитическом виде путем выполнения алгебраических операций над матрицами, нулевая статическая ошибка управления. Метод применим для одно- и многомерных объектов управления, в которых количество регулируемых переменных равно количеству управляющих воздействий» [95, с. 667]. Более подробно данный метод рассматривается в [99] и третьей главе данной диссертации.

Чтобы иметь возможность управлять роботом-манипулятором в соответствии с выполняемым им технологическим процессом, важно учитывать динамическую модель при разработке алгоритма управления и моделирования движения. Робототехника использует несколько методов для описания движений роботов. Эти методы основаны на использовании таких принципов, как Эйлера-Лагранжа, Гаусса, Ньютона-Эйлера.

Метод Эйлера-Лагранжа позволяет получить подходящую форму для анализа уравнений движения. Подход разработан с помощью дифференциальной геометрии, линейной алгебры и обычных понятий динамических систем. он является методом описания механических систем в целом, а не как каждой отдельной части. Считается, что звенья соединены вращательными шарнирами и на них действуют произвольные силы и моменты, в том числе моменты, возникающие в результате сил трения, возникающих в соединениях. Конечные дифференциальные уравнения

преобразуются простыми скалярными произведениями, и показано, что полученные дифференциальные уравнения полностью эквивалентны дифференциальным уравнениям, которые выведены из системы лагранжиана [100].

Принцип Ньютона-Эйлера обычно не используется напрямую для решения проблемы описания движения из-за большого количества вычислений, которые связаны с потребностью вычисления матрицы вторых производных. Но, данный метод [101, 102] используется для составления набора дифференциальных уравнений второго порядка для моделирования динамики руки манипулятора с несколькими телами с шарнирами вращения. Процедура основана на принципе Даламбера и уравнениях Ньютона-Эйлера и рассматривает каждое из звеньев манипулятора как находящееся в равновесии под действием множества инерционных, гравитационных и движущих сил в процессе его пространственного движения. Метод прост и основан на повторяемости математических операций. Полученный набор дифференциальных уравнений легко программируется и может быть интегрирован с помощью стандартных процедур. Они также могут быть использованы для решения как прямых, так и обратных динамических задач.

Метод Гаусса представляет собой итерационный метод решения результирующих линейных уравнений. Метод Гаусса [103] является прямым численным методом, используемым для решения систем линейных уравнений, и заключается в приведении исходной системы уравнений в эквивалентную форму с помощью элементарных преобразований. Мы получаем матрицу высшего и низшего треугольников, и после этого мы можем решить систему с помощью определенных повторяющихся процедур, очень эффективных. По числу математических операций данный принцип невозможно считать доступным. Таким образом, больше всех подходит именно метод Лагранжа-Эйлера.

При управлении манипуляционным роботом возникает проблема создания системы динамического управления его звеньями в условиях, когда этот робот находится в гравитационном поле тяготения или в невесомости. Динамика движения звеньев описывается системой нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений и может быть представлена уравнениями Лагранжа [104, 105]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau, \quad L = K - P, \quad (1.1)$$

где $q \in R^n$ – вектор обобщенных координат, $K \in R^1$, $P \in R^1$ – соответственно кинетическая и потенциальная энергия манипулятора, $\tau \in R^n$ – вектор движущих моментов в связях манипулятора, n – количество звеньев манипулятора, t – время.

Существует стандартная процедура, следуя которой, на основе метода Лагранжа-Эйлера можно вывести уравнения движения произвольной

робототехнической системы. Она состоит из следующих последовательных шагов [95, с. 668]:

1. выбрать обобщенные координаты $q_1, q_2, \dots, q_n$;
2. получить выражения для кинетической K и потенциальной P энергии системы, записанные в обобщенных координатах;
3. получить выражение для Лагранжиана системы;
4. составить систему уравнений движения, соответствующих каждой обобщенной координате q_j в виде (1.1)

Ключевым в этой процедуре является шаг номер 2.

Нестационарность связана, прежде всего, с изменением динамики робота при захвате и переносе груза, что выражается в изменении L во времени. В теории управления пока отсутствуют универсальные инженерные методы синтеза систем управления нелинейными объектами, есть только проработки для отдельных их классов. Распространенным приемом является “обычная” линеаризация объекта в области рабочей точки и применение хорошо развитых линейных методов синтеза [106-109] и др., однако системы, созданные на основе такой линеаризации, работоспособны при небольшом диапазоне изменения управляемых переменных от номинального режима, при существенном изменении регулятор системы приходится перенастраивать. Такая линеаризация используется при разработке алгоритмов управления роботами с пониженным быстродействием [110]. Другой подход заключается в линеаризации обратной связью [111-114] и применяется в основном для аффинных систем. Далее опять используются линейные методы. Этот прием используется для синтеза алгоритмов управления “быстрыми” роботами (метод “Computed Torque Control” (CTC)) [115-117]. После такой линеаризации не нужно автоматически или вручную подстраиваться под новый режим, но следует отметить сложность полученных методом CTC алгоритмов управления и необходимость вычисления в них второй производной от задающего сигнала.

Подавляющее большинство подходов используют нелинейное аффинное представление динамики системы. Похоже, что многие системные динамики также могут быть представлены структурой модели, зависящей от состояния. Распространен прием, заключающийся в представлении нелинейного объекта в виде линейной модели с параметрами, зависящими от состояния (State Dependent Coefficient, SDC) [118, 119]. Затем составляется и решается уравнение Риккати, параметры которого также зависят от состояния (SDRE-метод [120]). В методе SDRE, в котором решается алгебраическое уравнение Риккати, с использованием матриц пространства состояний, вычисленных в текущем состоянии, неявно предполагается, что система в будущем останется фиксированной в текущей рабочей точке, что эквивалентно предположению, что система инвариантна во времени с моделью системы, фиксированной в текущий момент времени [121]. Метод связан со значительным объемом вычислений, связанных с необходимостью решения уравнений Риккати в режиме реального времени и поэтому на практике распространения не получил.

При управлении нестационарными объектами в основном применяется адаптивное управление [122, 123]. Адаптивные регуляторы, как правило, характеризуются значительной инерционностью настройки своих параметров и поэтому малопригодны для качественного управления быстродействующими роботами.

Из-за рассмотренных особенностей каждая фирма-изготовитель разрабатывает свой, уникальный для данного вида роботов алгоритм управления, который, как правило, является ее “ноу-хау”.

Для синтеза алгоритма управления роботом предлагается использовать метод компенсации динамики объекта и возмущений (КДОВ), предложенный в [96, с. 33-46] и обладающий рядом преимуществ. Это пригодность для нелинейных нестационарных объектов, физическая наглядность задания исходных данных, получение многоканального алгоритма управления алгебраическими методами в аналитической форме, обеспечивающего автоматическое движение объекта с точностью до заданного фильтра-эталона, отсутствие статической ошибки регулирования. Метод проработан для линейных объектов с постоянными параметрами ([96, с. 33-46; 98, с.10-15] и др.), также для класса нелинейных нестационарных объектов, представленных в форме SDC [96, с. 33]. Далее рассматривается применение метода КДОВ для разработки алгоритма управления динамическим движением на простейшем примере управления одним звеном вращательного типа. Ставилась задача установления работоспособности метода для управления звеньями манипуляционного робота, а также цель – разработать алгоритм управления углом поворота звена аналитическим методом компенсации динамики объекта и возмущений, позволяющий получить обратные модели объекта, фильтры-эталоны замкнутой системы по каналам задания и возмущений, с помощью вычислений по формулам методом Лагранжа, уравнений в пространстве состояний в виде SDC.

Выводы по подразделу 1.3:

Для синтеза системы управления роботом-манипулятором в данном диссертационном исследовании на основании представленного выше анализа методов синтеза был сделан выбор в пользу метода компенсации динамики объекта и возмущений, описываемого в работах [95, с. 667; 96, с. 33; 98, с. 10; 97, с. 108]. Этот метод современный и перспективный, однако, пока недостаточно проработанный для конкретных объектов, так что его применение в данной работе для задачи роботизированного 3D сканирования объектов, которые впоследствии будут обрабатываться плазмой, представляет собой новую научную задачу автоматизации и управления.

1.4 Задачи автоматизации процессов плазменной обработки поверхности

Система роботизированного сканирования в данной диссертации разрабатывается для того, чтобы сканировать и воссоздавать 3D модель

изделия, поверхность которого будет затем обрабатываться плазмой также при помощи робота-манипулятора. Для пояснения проблем, требующих решения и, соответственно, основной идеи исследования, чтобы пояснить требования к управлению роботом при выполнении конкретных технологических операций, рассмотрим несколько подробнее технологию микроплазменного напыления покрытий, назначение этих покрытий, их особенности и те параметры напыления, которые необходимо контролировать, чтобы получить качественное покрытие.

Покрытия – это слой другого материала на поверхности изделия, наносимый для изменения свойств поверхности. Назначение покрытий весьма разнообразно, они могут защищать изделие, работающее в условиях агрессивных сред или повышенного трения, от коррозии или от износа (защитные покрытия), могут придавать поверхности свойства биосовместимости (биосовместимые покрытия) или защищать от воздействия вирусов и бактерий (покрытия с ионами меди или серебра), могут придавать изделию привлекательный вид (декоративные покрытия), защищать от воздействия высоких температур (термостойкие покрытия) и т.д [124].

Основным требованием ко всем без исключения покрытиям является требование удовлетворительного сцепления с поверхностью изделия (хорошая адгезия). Выбор материала покрытий, толщины, композиции – зависит от задач, выполняемых покрытием. Как правило, желательно наносить покрытие равномерно, чтобы толщина его была одинаковой на всей поверхности изделия. Однако, есть и исключения из этого правила, когда специально формируется неоднородная структура покрытия, например, из чередующихся гребней и впадин [125]. Говоря в общем, задача формирования покрытия с прогнозируемой микроструктурой и, соответственно, контролируемыми физико-химическими свойствами – одна из главных задач материаловедения. В материаловедении различают покрытия и тонкие пленки, толщина пленок менее 1 мкм.

Технология получения покрытий с помощью газотермического плазменного напыления является универсальной и широко применяется в машино- и автомобилестроении, сельском хозяйстве, аэрокосмической отрасли и в последнее время в медицине [126-128]. Толщина покрытия газотермическим напылением составляет от 50 мкм до 1000 мкм в зависимости от параметров напыления и числа проходов плазменной струи с материалом покрытия по поверхности обрабатываемого изделия (то есть подложки или основы). Объемная пористость покрытия, полученного газотермическим плазменным напылением, может варьироваться в огромных пределах в зависимости от целей и, соответственно, параметров напыления: от 4% до 25% и более. Кроме того, материалы, которые можно подвергать термическому напылению, как материалы подложек, так и материалы покрытий, практически безграничны. Этот факт делает технологии нанесения покрытий газотермическим напылением чрезвычайно привлекательными для разработки новых инженерных и дизайнерских решений покрытия деталей промышленных и

медицинских изделий и варьирования физико-химических характеристик их поверхности.

Микроплазменное напыление покрытий – это один из видов газотермического плазменного напыления, при котором частицы напыляемого материала двигаются в струе плазмы по направлению к поверхности детали или изделия, плавятся полностью или частично во время движения, ударяются о поверхность, деформируются и застывают, образуя покрытие [129-131] в соответствии с рисунком 1.4.

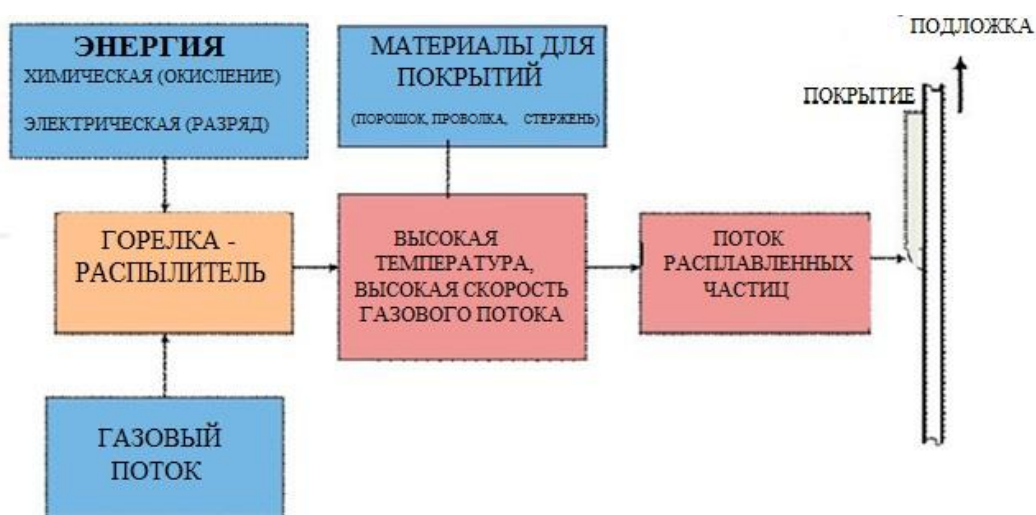


Рисунок 1.4 – Схематическая концепция газотермического напыления

Примечание - Рисунок адаптирован из работы [131, р. 506]

Струя плазмы с частицами покрытия направляется к подложке внутри инертного газа-носителя (зачастую – аргона), чтобы защитить поверхность от окисления. Частицы могут быть частицами порошка или прутка (стержня), или проволоки (они отрываются от расплавленного плазменной струей участка стержня или проволоки и вовлекаются в поток плазмы и газа по направлению к подложке).

Микроплазменное напыление называется так, потому что оно имеет малую мощность процесса (до 2 КВт) и при этом диаметр пятна плазмы на поверхности изделия является малым, от 2-ух до 5 мм, в сравнении с обычным плазменным напылением, где пятно составляет несколько см. Это достигается путем особой конструкции плазмотрона (микроплазмотрона). Свойства покрытий с микроплазменным напылением зависят от: степени деформации отдельных частиц при столкновении с подложкой, их взаимодействия при ударе по поверхности подложки и температуры их нагрева (степени перегрева) в момент удара о подложку [132, 133].

Чтобы газотермическое покрытие закрепилось на подложке, ее поверхность должна быть шероховатой. Для придания напыляемой поверхности нужной шероховатости, ее перед напылением подвергают

газоабразивной (пескоструйной) обработке. Шероховатость поверхности будет зависеть от размеров частиц порошка абразива. Как правило, преподготовка поверхности для микроплазменного напыления проводится для придания ей шероховатости порядка 4-7 мкм.

Газотермическое плазменное покрытие всегда имеет слоистую структуру, и какое-то количество внутренних пор - пустот в соответствии с рисунком 1.5, количество и размеры которых также определяются условиями напыления, главным образом, дистанцией напыления, то есть расстоянием от сопла плазмотрона до поверхности изделия.

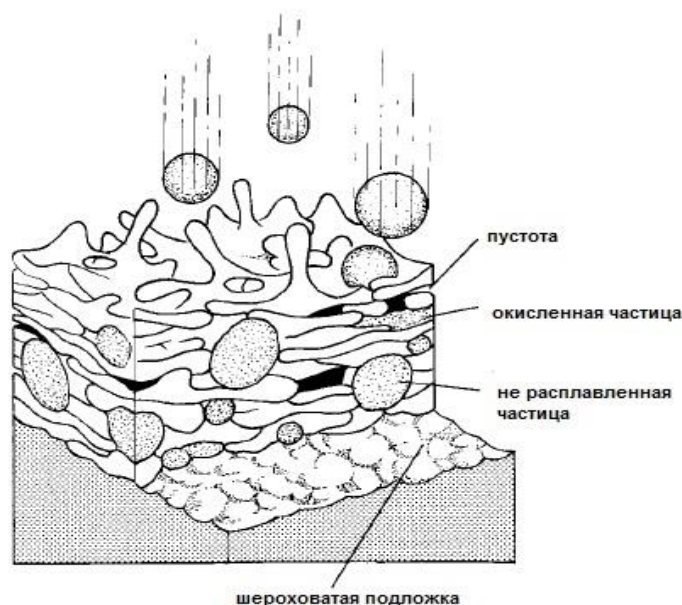


Рисунок 1.5 - Схематическое изображение микроструктуры газотермического плазменного покрытия

Примечание - Рисунок адаптирован из работы [129, р. 7]

Очень важно, чтобы напыление проводилось под прямым углом к напыляемой поверхности. Эти два требования - соблюдение перпендикулярности напыления и строгое выдерживание заданной дистанции напыления – являются фундаментальными требованиями при газотермическом плазменном напылении покрытий. От величины дистанции напыления существенно зависит также микроструктура и адгезия покрытия, так как при большой удаленности от сопла плазменной установки до обрабатываемой поверхности, расплавленные частицы могут остыть, достигая подложки, и плохо сцепиться с ней. Или будет много пустот между такими частицами (тогда возникнет пористое покрытие, что, однако, может быть в некоторых случаях даже желательным). Иными словами, дистанция напыления – это тот параметр, который задается разработчиком покрытия, задача автоматизации – строго выдерживать заданную дистанцию напыления и обеспечивать перпендикулярное падение плазменной струи на поверхность изделия.

Третьим контролируемым параметром напыления является скорость перемещения плазменного источника вдоль поверхности напыляемого изделия, так как от этого зависит толщина покрытия. Толщина покрытия будет тем больше, чем скорость ниже, при прочих неизменных параметрах напыления, таких как сила тока, расход плазмообразующего газа и др., которые не контролируются при автоматизации процесса, но задаются разработчиками покрытия и поддерживаются постоянными за счет конструкции установки плазменной обработки.

Таким образом, основная задача автоматизации применительно к процессу газотермического плазменного напыления – это задача перемещения плазменного источника во время напыления таким образом, чтобы предоставлять поверхность, на которую надо напылить покрытие, в поток частиц покрытия в плазменной струе устойчивым, последовательным и повторяемым образом, всегда поддерживая один и тот же угол напыления (желательно 90°), заданную скорость перемещения плазменного источника и заданную дистанцию напыления.

Эти манипуляции, то есть перемещение источника, обычно осуществляются с помощью двухкоординатного манипулятора или робота. Часто напыляемая деталь является стационарной, как в случае детали с плоскими поверхностями, или поворачивается на поворотном столе или токарном станке, как в случае с цилиндрами. Более сложные компоненты могут потребовать использования скоординированных движений между роботом, на котором закреплен плазменный источник и обрабатываемой деталью.

А как производить напыление, если поверхность напыления не плоская? Как обеспечить желаемую П-образную кривую и соблюдение заданной дистанции напыления и скорости перемещения источника? Покажем вид траектории в пространстве на примере напыления цилиндра (см. рисунок 1.6), где напыление проводится вдоль оси цилиндра с перемещением на фиксированное расстояние вокруг цилиндра

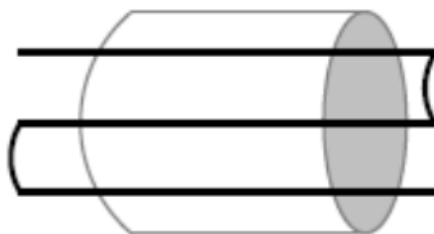


Рисунок 1.6 - Траектория напыления покрытия движущимся источником на цилиндрическую подложку

Если перемещать источник напыления по П-образным пространственным кривым, в соответствии с рисунком 1.6, то чтобы поддерживать дистанцию напыления заданной, надо обеспечить перемещение не в плоскости, но и «по глубине» (или можно сказать по «высоте»). С точки зрения требований к

равномерности распределения массы покрытия на поверхности, процесс плазменного напыления сходен с процессами напыления краски из пульверизатора, где конус напыления перемещается вдоль поверхности окрашиваемого изделия и пятном напыления является сечение данного конуса плоскостью поверхности изделия. Тем не менее, существуют значительные различия между процессами плазменного распыления и распыления краски, а также в оценке качества конечного продукта (покрытия), как было показано выше.

В настоящее время для планирования движения рабочего инструмента манипулятора по пространственной траектории используются разные подходы. Тригатти (Trigatti) и другие [134] рассчитывали временные параметры прохождения траектории напыляющего краску робота, исходя из ограничений на максимальные величины скоростей и ускорений конечного эффектора, налагаемые как спецификацией манипулятора, так и технологическими параметрами процесса нанесения покрытия. Чен (Chen) и другие [135-137] разработали схему планирования траектории для покрасочного робота на основе выбора стартового сегмента траектории как геодезической линии на напыляемой поверхности. Жоу Ю. (Zhou Yu.) и другие [138] отметили, что форма заготовки может сильно повлиять на качество напыляемого покрытия. Для упрощения операций планирования траектории при роботизированном напылении поверхностей сложной формы, Фу (Fu) и другие [139] предложили метод сегментации поверхности на основе генетического алгоритма, в котором сложная поверхность делится на несколько поверхностей малой кривизны. Жоу Б. (Zhou B.) и другие [140] разработали алгоритм обработки среза-проекции поверхности для автоматической генерации траектории рабочего инструмента манипулятора, и результаты моделирования продемонстрировали эффективность алгоритма. Зенг (Zeng) и другие [141] разработали модель скорости роста покрытия для технологии напыления с различным углом наклона, эксперименты показали, что модель имеет хорошую точность.

Таким образом, из этих современных работ [134, р. 2287-2296; 135, р. 6746-6750; 136, р. 698-703; 137, р. 1-16; 138, р. 1-7; 139, р. 4049-4054; 140, р. 5925-5930; 141, р. 1-7] следует, что для обеспечения перемещения источника по третьей оси на определенные расстояния (ведь дистанция напыления должна соблюдаться постоянной), необходимо построение модели поверхности обрабатываемого роботом изделия и, соответственно, программирование робота, который этот источник перемещает.

Все вышеуказанные соображения о распределении частиц в плазменной струе и равномерности перемещения источника применимы к процессу плазменной резки, только от дистанции и скорости перемещения плазмореza будут зависеть глубина проплавления и качество среза. Легче чередовать установку на роботе плазмоторна и плазмореza, чем решать задачу удержания и перемещения роботом крупных деталей (листов проката, плит дробилок). Таким образом, далее подразумевается, что задача решается для перемещения плазменного источника (плазмореza либо плазмоторна), установленного на

руке робота манипулятора. Конкретные параметры робота-манипулятора и плазменных источников, которые будут фигурировать в качестве рабочего инструмента робота, будут даны в следующем (втором) разделе диссертации, также как необходимые сведения о материалах подложек и покрытий.

Выводы по подразделу 1.4:

Проделанный в данном подразделе 1.4 анализ основных требований к автоматизации процессов плазменной обработки поверхности позволил определить, что именно должно быть результатом роботизированного 3D сканирования в данном исследовании: 3D модель изделия, учитывающая его основную геометрию. Так как поверхность обрабатываемого изделия шероховатая (до 7 мкм) после газоабразивной обработки, а покрытия толстые (до 700 мкм), то для построения 3D модели изделия совсем не важны микронеровности поверхности изделия.

Таким образом, задача сканирования не включает измерение шероховатостей или других микродефектов поверхности (для решения таких задач применяются методы профилометрии или атомно-силовой микроскопии), а включает измерение расстояний до поверхности изделия, чтобы воссоздать основную геометрию изделия. Существенными, с точки зрения следующих за сканированием процессов плазменной обработки, являются только макронеровности поверхности, как выступы высотой порядка нескольких миллиметров. На практике, так как дистанции напыления – это величины порядка 40 мм и более [142], а задачей напыления может быть «залечивание» каких-либо повреждений на поверхности путем нанесения на поврежденный участок поверхности нескольких слоев покрытия, то существенными для учета при построении модели, можно считать неровности поверхности высотой не менее 1 см. При таком подходе не пострадает качество напыления, а также не существует никакой опасности столкновения робота-манипулятора с данными объектами в процессе их обработки плазмой. Также следует отметить, что шероховатость поверхности изделий – это необходимое условие для применения лазерных триангуляционных датчиков расстояния, как было отмечено в разделе 1.2 данной работы.

Выводы по разделу 1, постановка цели и задач диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту:

Анализируя проделанный в первом разделе диссертации обзор литературы и анализ современного состояния проблем разработки и использования систем сканирования на основе роботов-манипуляторов и синтеза СУ выяснилось, что, во-первых, данные вопросы чрезвычайно актуальны во множестве направлениях прикладного плана, а также в сфере внедрения теоретических методов. Во-вторых, что в указанной научной сфере выделяют спектр вопросов, которым необходимо подобрать наиболее приемлемые решения, приводящие к наилучшим результатам исследования. В-третьих, что новые решения обязательно должны учитывать собственно цели

сканирования, в данном случае специфику процессов плазменной обработки промышленных изделий, которым предшествует 3D сканирование.

Исходя из проделанного в данном разделе 1 обзора и анализа, а также из практической потребности использовать промышленный робот-манипулятор Kawasaki для 3D сканирования объектов сложной геометрической формы, чтобы затем обрабатывать их плазмой, была поставлена цель диссертационного исследования.

Цель исследования: синтез системы 3D сканирования на базе робота-манипулятора и установленных на роботе бесконтактных датчиков расстояния и апробация роботизированной системы 3D сканирования на модельных и реальных объектах

Для достижения поставленной цели поставлены следующие **задачи:**

1) Анализ современного состояния проблем разработки и использования систем сканирования на основе роботов-манипуляторов и синтеза систем управления ими на основе обзора открытых литературных источников, с учетом специфики процессов плазменной обработки промышленных изделий, которым предшествует 3D сканирование.

2) Разработка методики синтеза системы автоматического управления роботом-манипулятором на основе алгоритма компенсации динамики объекта и возмущений и разработка программного обеспечения, предназначенного для управления роботом в соответствии с выбранными параметрами системы автоматического управления.

3) Разработка алгоритмов управления роботом-манипулятором, выполняющим процедуру 3D сканирования поверхности промышленного изделия.

4) Апробация разработанной системы 3D сканирования на базе робота-манипулятора и установленных на роботе бесконтактных датчиков расстояния на модельных и реальных объектах, включая плазменную обработку реальных объектов сканирования и оценку результата с точки зрения требований к конечному продукту (покрытию).

На защиту выносятся следующие основные положения:

1) синтез системы автоматического управления движением в данном направлении инструмента и звена робота-манипулятора на основе алгоритма компенсации динамики объекта и возмущений;

2) результаты разработки и тестирования на модельных и реальных объектах системы 3D сканирования на базе робота-манипулятора и установленных на роботе бесконтактных датчиков расстояния.

2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1 Оборудование, материалы и методы роботизированного микроплазменного напыления

В данном подразделе 2.1 будет кратко дано описание технологического оборудования для микроплазменного напыления, приведены необходимые для выполнения планирования траектории робота-манипулятора сведения о требованиях к конечному продукту, то есть к конкретным покрытиям и подложкам, обоснован выбор материалов, толщины покрытий и параметров процесса напыления и на базе экспериментальных данных по напылению обоснована используемая далее для планирования траектории модель процесса напыления.

В настоящем исследовании для роботизированного микроплазменного напыления металлических порошков и проволок был использован установленный на роботе-манипуляторе микроплазматрон массой 1,2 кг. Этот микроплазматрон входит в состав разработанной и изготовленной Институтом электросварки им. Е.О. Патона (ИЭС, г. Киев, Украина) установки плазменного напыления последнего поколения МПН-004 (MPS-004), которая включает в себя блок питания с блоком водяного охлаждения, блок управления, микроплазматрон (конструкция микроплазматрона запатентована [143]) и сменный механизм для подачи проволоки либо порошка в соответствии с рисунком 2.1).



Рисунок 2.1 - Внешний вид установки МПН-004 производства ИЭС им. Е.О. Патона

Согласно конструкции микроплазмотрона МПН-004, он имеет следующие отличительные особенности [144], влияющие на характеристики процесса напыления:

1) малая толщина сопла (1 мм), что обуславливает малый угол раскрытия микроплазменной струи (β варьируется в пределах от 2° до 6°) и, соответственно, малое пятно напыления (от 1 мм до 8 мм в диаметре);

2) малое значение мощности (2,0 кВт), которое снижает нагрев обрабатываемой поверхности, позволяет наносить покрытие на небольшие и тонкостенные изделия без перегрева, при том, что температура в самой плазменной струе высокая, порядка нескольких десятков тысяч $^\circ\text{C}$, что позволяет напылять тугоплавкие материалы (Ti, Zr, Ta), полностью расплавляя их в струе плазмы.

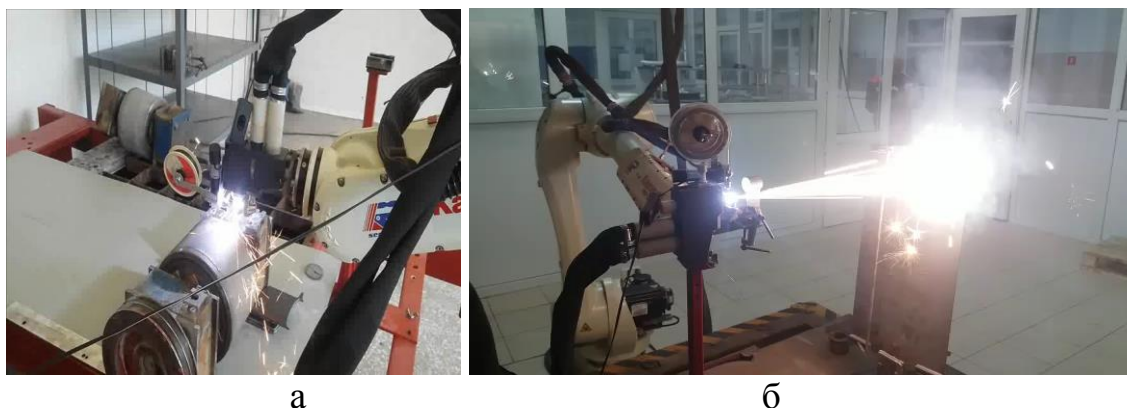
Также следует отметить низкую степень окисления напыляемого материала за счет использования струи защитного газа аргона, низкий уровень шума (не более 50 дБ) ламинарной плазменной струи и мобильность оборудования за счет наличия собственной системы охлаждения. В качестве исходного материала для напыления можно использовать как порошок, так и проволоку.

Управляя параметрами напыления, можно получить покрытие желаемой толщины, с удовлетворительной адгезией и даже до определенной степени контролировать пористость покрытия и шероховатость его поверхности. Здесь следует отметить такие параметры напыления, которые не контролируются при автоматизации процесса, но задаются разработчиками покрытия и поддерживаются постоянными за счет самой установки плазменного напыления. Данными характеристиками являются: коэффициент использования материала, сила тока (I , А), расход плазмообразующего газа ($G_{\text{пл}}$, л/час), а также скорость подачи проволоки ($V_{\text{пр}}$, м/мин) или порошка ($V_{\text{пор}}$, г/мин). Важно отличать, что такой параметр, как скорость напыления покрытия в пересчете на единицу толщины покрытия за проход, контролируется скоростью перемещения потока распыления по поверхности детали $V_{\text{л}}$, тогда как скорость подачи материала в струю ($V_{\text{пр}}$ или $V_{\text{пор}}$) или расход материала (кг/ч) поддерживается постоянной.

Как было отмечено в первой главе диссертации, основные параметры напыления, влияющие на характеристики покрытия, и поддержание которых является целью автоматизации (роботизации) процесса плазменного напыления - это дистанция напыления H (мм), скорость перемещения источника вдоль поверхности детали $V_{\text{л}}$ (мм/мин) и угол напыления. С целью обеспечения поддержания данных параметров, заданными в процессе напыления, было предложено установить микроплазмарон на руку производственного манипуляционного робота Kawasaki RS010L (Kawasaki Heavy Industries, Япония), обладающего с 6-ю степенями свободы и управляемого посредством программируемого контроллера E-40.

В процессе исследования были опробованы разные варианты роботизации процесса микроплазменного напыления: перемещали роботом

источник - микроплазмотрон (в соответствии с рисунком 2.2а) или перемещали роботом напыляемый объект (в соответствии с рисунком 2.2б) при неподвижном источнике.



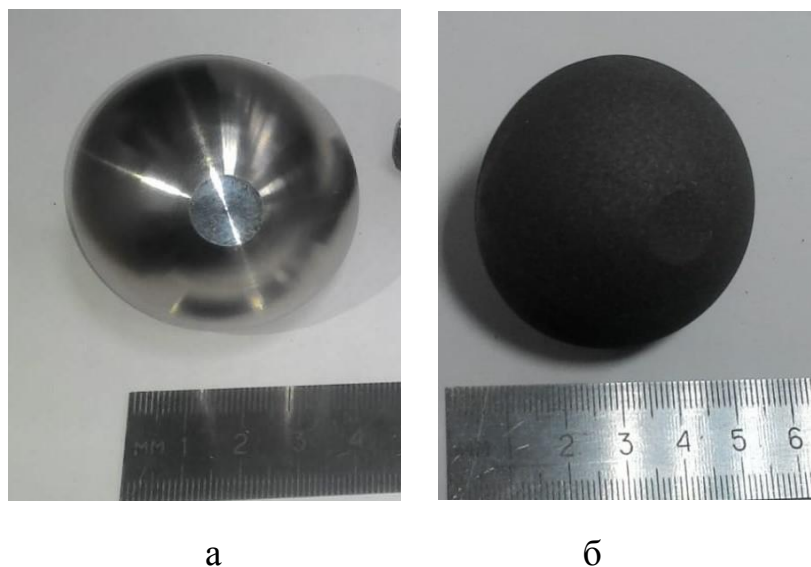
а- робот перемещает микроплазмотрон, б – робот перемещает деталь

Рисунок 2.2 – Процессы роботизированного микроплазменного напыления проволоочного покрытия на опытном производственном участке ВКТУ им. Д. Серикбаева

Следует отметить, что необходимость решения задачи управления промышленным роботом для автоматизации процессов плазменной резки и напыления возникла, во-первых, при выполнении заказов от ряда малых предприятий ВКО о плазменной резке или напылении покрытий на барабаны и плиты дробилок минерального сырья. Во-вторых, в процессе проведения исследования по проекту «Выпуск титановой продукции для дальнейшего использования в медицине» с программно-целевым финансированием Комитета науки МОиН РК на 2017-2019 годы. В этом проекте напылению подвергались медицинские имплантаты эндопротезов, модифицированные КазНИИТО (Научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии, г. Нур-Султан).

Таким образом, исследовательской команде данных проектов надо было решать задачи управления роботом для плазменной обработки поверхности изделий разнообразных (порой весьма сложных) форм и размеров, а также штучных изделий, то есть нельзя было разработать только ряд каких-то базовых моделей, чтобы вести управление роботом по ним. В то время как для управления роботом при движении его рабочего инструмента в плоскости, коллективом нашего университета были найдены и реализованы новые решения, подтвержденные получением свидетельства ИС РК [145] и актом внедрения в производство [146], то проблема осуществления пространственных перемещений оставалась нерешенной. Во многом из-за того, что система используемого в данном исследовании промышленного робота Kawasaki довольно закрытая, видимо, производители не предусматривают активного программирования пользователями данного индустриального робота.

Первым решением было согласовать движение детали и робота, что работало (и работает) для деталей с осью симметрии, которую выбирают за ось вращения, например, для обработки барабанов дробилок (цилиндров), как показано на рисунке 2.2а. Робот совершает возвратно-поступательные движения, а цилиндр вращается с определенной угловой скоростью. Но при обработке деталей даже с геометрически правильной формой, но не цилиндров, а конусов или сфер и т.п., как например, чашка тазобедренного сустава (рисунок 2.3), опять встает вопрос перемещения робота по оси Z и получения 3D модели изделия.



а – до газоабразивной обработки; б – после газоабразивной обработки, предшествующей напылению

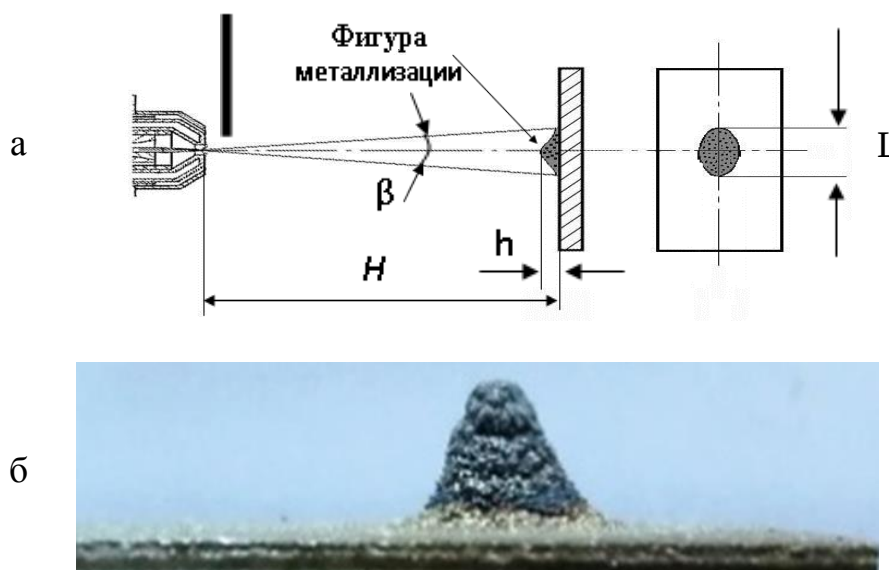
Рисунок 2.3 – Деталь эндопротеза из титанового сплава - чашки тазобедренного сустава, выточенная на станке с ЧПУ в лаборатории ВКТУ им. Д. Серикбаева

Чтобы обосновать применяемые для планирования 3D траектории робота с закрепленным на нем микроплазмотроном допущения в модели процесса напыления, надо рассмотреть характеристики процесса подробнее.

Если рассмотреть неподвижный плазмотрон, производящий напыление покрытия на стационарную подложку, то можно изучить распределение материала в пятне напыления (фигуру металлизации) в соответствии с рисунком 2.4. Такие эксперименты были проделаны с микроплазмотроном МПН-004 (ИЭС им. Патона, Украина) [147], который мы использовали в данном исследовании.

При стационарном напылении толщина покрытия будет определяться высотой фигуры металлизации, которая зависит от таких параметров напыления, как: сила тока (I , А), дистанция напыления (H , мм), расход

плазмообразующего газа ($G_{пл}$, л/час) и скорость подачи проволоки ($V_{пр}$, м/мин) или порошка ($V_{пор}$, г/мин).



а - схема исследования фигуры металлизации, где L- ширина пятна (основание фигуры металлизации); H-дистанция напыления; β - угол раскрытия микроплазменной струи, h- высота фигуры металлизации; б - фигура металлизации, полученная при стационарном напылении циркониевой проволоки в течение 10 секунд на стационарную подложку

Рисунок 2.4 - Образование фигуры металлизации при микроплазменном напылении покрытия

Примечание - Рисунок адаптирован из работ [142, р. 20, 148, 149]

При микроплазменном напылении движущимся источником покрытие образуется в результате наложения единичных валиков фигур металлизации в процессе линейного передвижения пятна напыления $V_{л}$ (мм/мин) относительно напыляемой поверхности в соответствии с рисунком 2.5.

Равномерность распределения толщины покрытия, при которой обеспечивается минимальная разность его наибольшей δ_{max} и наименьшей δ_{min} толщин, зависит от $V_{л}$ и от шага напыления τ . В случае газотермического напыления наилучшая равномерность распределения толщины покрытия достигается при условии $\tau \leq 0.35 L$ [142, р. 20].

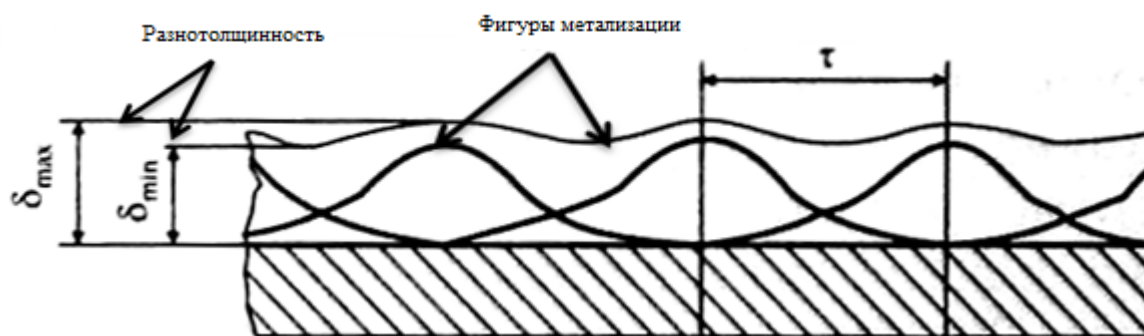


Рисунок 2.5 - Схема, поясняющая формирование однородного микроплазменного покрытия с шагом напыления τ

Примечание - Рисунок составлен на основе источника [142, с. 20]

Следовательно, надо планировать траекторию напыления так, чтобы обеспечить фиксированное расстояние в соответствии с рисунком 2.6.

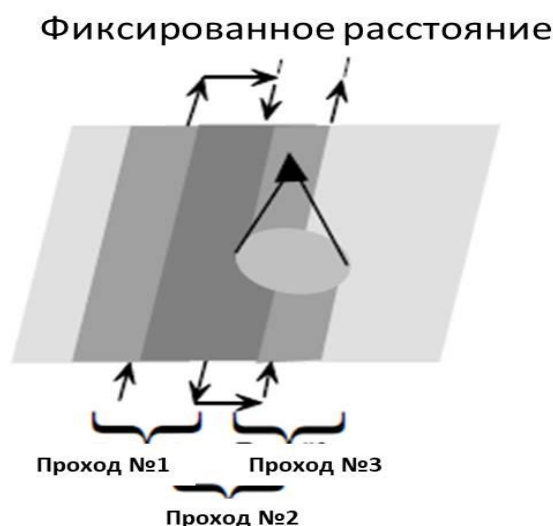


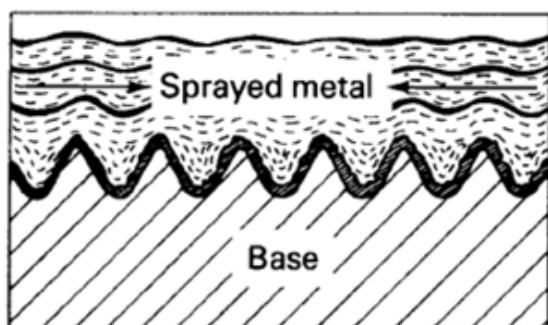
Рисунок 2.6 - Схема, поясняющая покрытие поверхности в несколько проходов

Таким образом, при напылении покрытия траектория движения источника будет П-образной кривой (U-образной кривой в англоязычной литературе), возврат (проход) плазменной струи будет осуществляться с отступом на фиксированное расстояние в соответствии с рисунком 2.6, равное шагу напыления τ в соответствии с рисунком 2.5. Ширина дорожки, напыленной в один проход плазменной струи - это диаметр сечения конуса напыления поверхностью изделия или ширина (диаметр основания) фигуры металлизации в соответствии с рисунком 2.6. Очевидно, что ширина дорожки зависит от дистанции напыления.

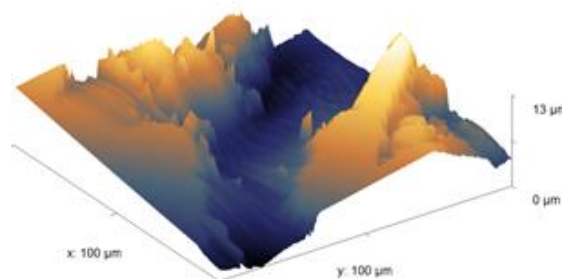
Толщина покрытия зависит от размеров напыляемых частиц и степени их расплавления в момент удара о подложку, а также от числа проходов

плазменной струи по поверхности изделия. То есть за один проход формируется полоса покрытия с шириной, равной диаметру конуса напыления, и с толщиной, определяемой распределением напыленного материала в этом пятне. Толщина микроплазменных покрытий колеблется в пределах от 70 мкм до 700 мкм, то есть это относительно толстые покрытия. Наносить их можно на поверхности из фактически любого материала, если эти поверхности шероховатые, тогда ускоренные в плазменной струе и расплавленные частицы прикрепятся к любой подложке. При этом тепловой импакт в подложку мал, и она не коробится. Вся энергия уходит на плавление частиц в плазменной струе. Микроплазмой наносят защитные покрытия из хромовых и никелевых порошков, теплоизолирующие покрытия из керамики, металлокерамические биосовместимые покрытия на поверхность металлических имплантатов, восстанавливают эмалевые покрытия («залечивают» пятна разрушения на эмали) и др. [132, р. 23].

В данном исследовании для придания напыляемой поверхности нужной шероховатости, ее перед напылением подвергали газабразивной (пескоструйной) обработке на установке Contracor® ECO (Comprag Group GmbH, Германия), получая поверхности подложек с шероховатостью Ra порядка 4-7 мкм (Ra - средняя высота неровностей в соответствии с рисунком 2.7).



а



б

а - схематическое изображение распределения металлического напыленного плазмой покрытия на шероховатой подложке; б – изображение поверхности подложки из титанового сплава после газабразивной обработки перед микроплазменным напылением, полученное методом атомно- силовой микроскопии ($Ra = 4,88 \pm 0,40$ мкм)

Рисунок 2.7 –Шероховатость поверхности подложки перед напылением

Примечание - Рисунок адаптирован из работы [132, р. 75]

Очевидно, что сами покрытия также получаются шероховатыми, коэффициент шероховатости Ra поверхности покрытия зависит в основном от размеров напыляемых частиц и степени их нагрева и расплавления в момент удара о подложку, следовательно, от условий напыления.

Скорость перемещения плазменного источника вдоль поверхности напыляемого изделия $V_{\text{л}}$ также является контролируемым параметром напыления. При изменении скорости произойдет изменение профиля металлизации, толщина покрытия будет тем больше, чем скорость ниже, при прочих неизменных параметрах. Скорость линейного перемещения микроплазмотрона в данном исследовании была выбрана равной 0.008 м/с. Эта скорость была выбрана экспериментально для обеспечения плазменного напыления покрытия равномерной толщины. Эксперименты показали, что такая скорость линейного перемещения микроплазмотрона не приводит к возмущениям в потоке плазменной струи из-за сопротивления воздуха и, следовательно, обеспечивает стабильность процесса напыления с различными параметрами [150-151]. Толщина покрытия варьировалась от 150 мкм до 500 мкм за счет изменения параметров плазменного напыления (сила тока, расстояние напыления, расхода плазменного газа и расхода порошка) и изменения количества проходов плазменной струи.

Таким образом, основная задача автоматизации применительно к процессу микроплазменного напыления, решаемая в этой работе – это обеспечить перемещение роботом микроплазмотрона во время напыления таким образом, чтобы предоставлять поверхность, на которую надо напылить покрытие, в поток частиц покрытия в плазменной струе устойчивым, последовательным и повторяемым образом, всегда поддерживая один и тот же угол напыления (90°), заданную скорость передвижения пятна напыления $V_{\text{л}}$, заданную дистанцию напыления H и шаг τ (фиксированное расстояние, на которое смещается источник или подложка, чтобы подать в струю следующий участок поверхности). Контролируемое относительное перемещение плазменного источника (плазмотрона) по отношению к детали имеет решающее значение для непрерывного и равномерного нанесения покрытия. Все контролируемые параметры численно заданы и описаны выше (кроме дистанции напыления H , численные значения которой будут приведены ниже для конкретных материалов).

Далее, чтобы спланировать траекторию движения руки робота с микроплазмотроном, то есть, как было показано выше, П-образную (или U-образную) кривую, проходимую на заданном расстоянии H (дистанция напыления) от поверхности изделия, надо провести роботизированное 3D - сканирование объектов напыления, получить их 3D модель в понятном для робота виде (в виде координат), и в итоге обеспечить прохождение роботом этой 3D -траектории с постоянной по модулю линейной скоростью.

В качестве основных объектов напыления в данном исследовании были выбраны плита дробилки щековой из высокомарганцовистой стали Гадфилда и детали эндопротезов суставов (медицинские имплантаты) из медицинского титанового сплава ELI марки Grade 5 в соответствии с рисунком 2.3.

На изношенные части дробильной плиты щековой дробилки для измельчения минерального сырья напыляли порошок композиционного сплава на основе хрома АН-35 (ГОСТ 21448-75), который применяется с целью

повышения прочности и обновления изношенных частей. Режимы напыления износостойкого покрытия приведены в таблице 2.1.

Для оценки качества покрытия было проведено производственное испытание в условиях «ИП Абакумов Р.А.» плиты с покрытием, о результатах которого будет сообщаться в Главе 4 данной диссертации. Данное испытание было проведено во время дробления полиметаллических руд различной твердости. Работа дробилки длилась непрерывно не менее получаса. Загрузка осуществлялась в пределах 70-100% высоты камеры дробления в соответствии с ГОСТ 27412-93 (Межгосударственный стандарт «Дробилки щековые. Общие технические условия»).



Рисунок 2.8 – Вид плиты щековой дробилки

В соответствии с рисунком 2.8, плита имеет ребристую поверхность. Измерение параметров плиты показало, что расстояние между центрами ребристых выступов составляет в среднем 100 ± 1 мм, средняя высота выступов составляет 30 ± 1 мм.

Таблица 2.1 - Режим МПН износостойкого покрытия [152, с. 74]

Порошок композиц ионного сплава	Мощ ност ь, Р [Вт]	Диста нция напыл ения [мм]	Сила тока, I [А]	Расход плазм о- образу - ющего газа (Ar) [л/час]	Расход защит ного газа (Ar) [л/час]	Скоро сть перем ещени я источ- ника [м/с]	Расход порош ка [кг/ч]	Коэфф ициен т исполь зовани я порош ка
АН-35	2	100	40	70	360	0.008	2	0.7

На имплантаты титанового сплава ножек и чашек тазобедренного сустава в соответствии с рисунком 2.3, напылялись двухслойные металл-керамические покрытия из чистого титана и гидроксиапатита (минерал на основе фосфата

кальция). На титановые имплантаты локтевых суставов напылялись покрытия из танталовой (Ta) проволоки, чтобы повысить биосовместимость имплантата в соответствии с рисунком 2.3. Тантал обладает повышенной по сравнению с титаном и сплавами на его основе биосовместимостью, но из-за сложностей обработки, обусловленной высокой температурой плавления, он редко используется для покрытия имплантатов. Применение микроплазменного напыления делает возможным получение покрытий из тантала, а применение робота может позволить повысить точность напыления.



а



б

а -изображение эндопротеза до напыления покрытия; б – изображение того же эндопротеза после напыления покрытия

Рисунок 2.9 – Эндопротез локтевого сустава из титанового сплава до и после роботизированного напыления Ta покрытия

Параметры напыления биосовместимого покрытия приводятся в таблице 2.2. Методы анализа качества покрытий медицинского назначения включали оценку их толщины и пористости по цифровым изображениям сканирующей электронной микроскопии с применением стандартного приборного ПО микроскопа JSM-6390LV (JEOL, Япония) в соответствии со стандартом ASTM E2109-01. Шероховатость поверхности определяли в лабораториях ВКТУ стандартными методами профилометрии.

Для обоснования выбора материалов медицинских имплантатов и их покрытий, а также требований к их качеству, был проведен анализ методов микроплазменного нанесения биосовместимых покрытий и требований к медицинским имплантатам, представленный в данном разделе и опубликованный в работе [153].

Таблица 2.2 - Режим микроплазменного напыления биосовместимого покрытия

Материал покрытия	Мощность, Р [Вт]	Дистанция напыления [мм]	Сила тока, I [А]	Расход плазмобразующего газа (Ar) [л/час]	Расход защитного газа (Ar) [л/час]	Скорость перемещения источника [м/с]	Расход проволоки [м/мин]	Число проходов плазменной струи
Та проволока	2	80	45	80	360	0.008	6	2

Для реализации роботизированной микроплазменной обработки (модификации) поверхности с перемещением руки робота-манипулятора в плоскости (то есть без перемещения по оси z), было разработано ПО для расчетов температурных профилей при облучении, описанное в статье [154].

С целью автоматического выбора режимов модификации в соответствии с расчетными режимами возникла необходимость идентификации операций двух следующих программ: программы расчетов температурных профилей с выбором режимов модификации и программы для выбора траектории движения и мощности работы установки.

На данный момент разработана программа, позволяющая выбрать соответствующие параметры облучения на базе технического задания заказчика к формируемому температурному профилю, в котором ввод температур на поверхности покрытия и на границе покрытие-подложка задается вручную посредством пульта управления. В соответствии с рисунком 2.10 затем производится цепочка вычислений в подпрограмме с перебором вариантов плотности мощности и скорости движения источника до достижения заданных температур, в результате необходимые значения трансформируются в блок программы вычислений траектории движения руки робота.

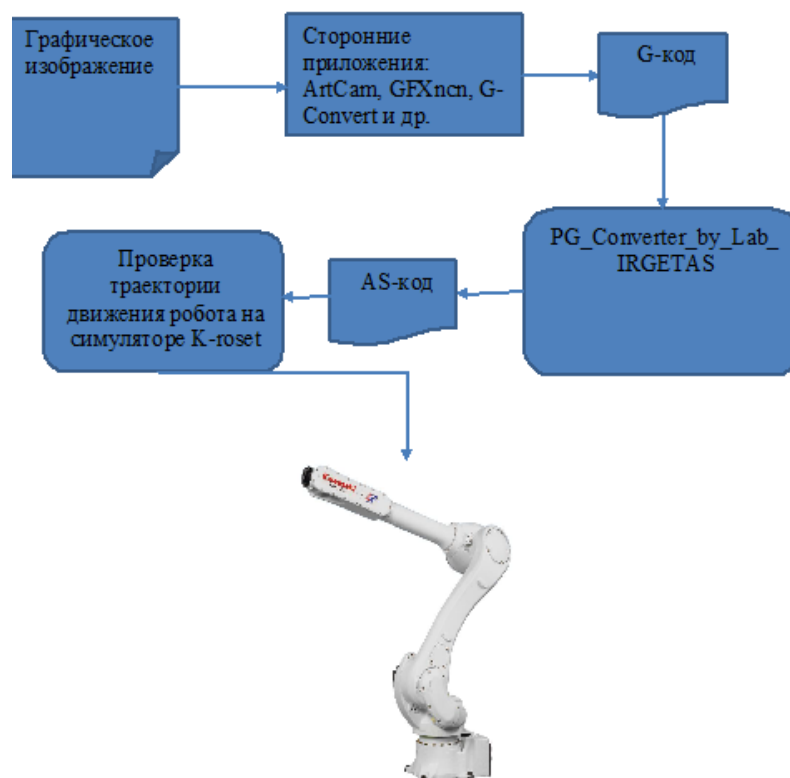


Рисунок 2.10 - UML диаграмма процесса конвертации

Таким образом, можно выделить определенный порядок осуществления процесса конвертации, который описывается в следующей последовательности: графическое изображение, чертеж, эскиз загружается в стороннее приложение для его конвертации в G-коды. После конвертации на выходе получаем файл формата *.txt, который содержит G-коды. Этот файл загружается в PG_Converter_by_Lab_IRGETAS для его конвертации в файл формата *.pg, который включает в себя инструкции на языке AS, понятный контроллеру робота. С целью осуществления проверочных операций файл загружается в программу K-roset, в которой проверяются движения робота, его траектории, т.е. полная симуляция движений по загруженным требуемым инструкциям. По окончании этих действий *.pg-файл загружается на контроллер, откуда задается режим работы робота.

Для перемещения по вертикальной оси (z) при выполнении плазменного напыления, в данной работе предложено выполнение процедуры 3D сканирования с последующей генерацией программы робота вдоль реконструированной роботом 3D модели изделия.

2.2 Оборудование и методики роботизированного 3D сканирования

Этап роботизированного 3D сканирования является ключевым для реализации задач прецизионного микроплазменного напыления, описанных в предыдущем подразделе 2.1. Этот этап необходим для построения трехмерной модели изделия и генерации программы движения робота по заданной таким образом 3D траектории. Разработка новой технологии проводилась в процессе

выполнения проекта № AP05130525 с грантовым финансированием КН МОиН РК на 2018-2020 годы (под руководством проф. Алонцевой Д.Л.) на тему «Интеллектуальная роботизированная система плазменной обработки и резки крупногабаритных изделий сложной формы».

Ключевая идея проекта № AP05130525 заключалась в том, чтобы робот сам построил 3D модель изделия и сгенерировал программу движения вдоль полученной 3D траектории, а данные для построения модели робот получит, выполняя 3D сканирование детали. Разработанная последовательность этапов процесса роботизированной плазменной обработки поверхности с использованием предварительного 3D сканирования представлена на рис. 2.10 и в статье [155]. Идея инновационная, ее реализация позволит обрабатывать поверхности деталей, о геометрии которых ничего не известно заранее, то есть штучные детали разных размеров и формы, в том числе крупногабаритные (как плита щековой дробилки).



Рисунок 2.11 –Блок- схема процесса роботизированной плазменной обработки поверхности с использованием предварительного 3D сканирования

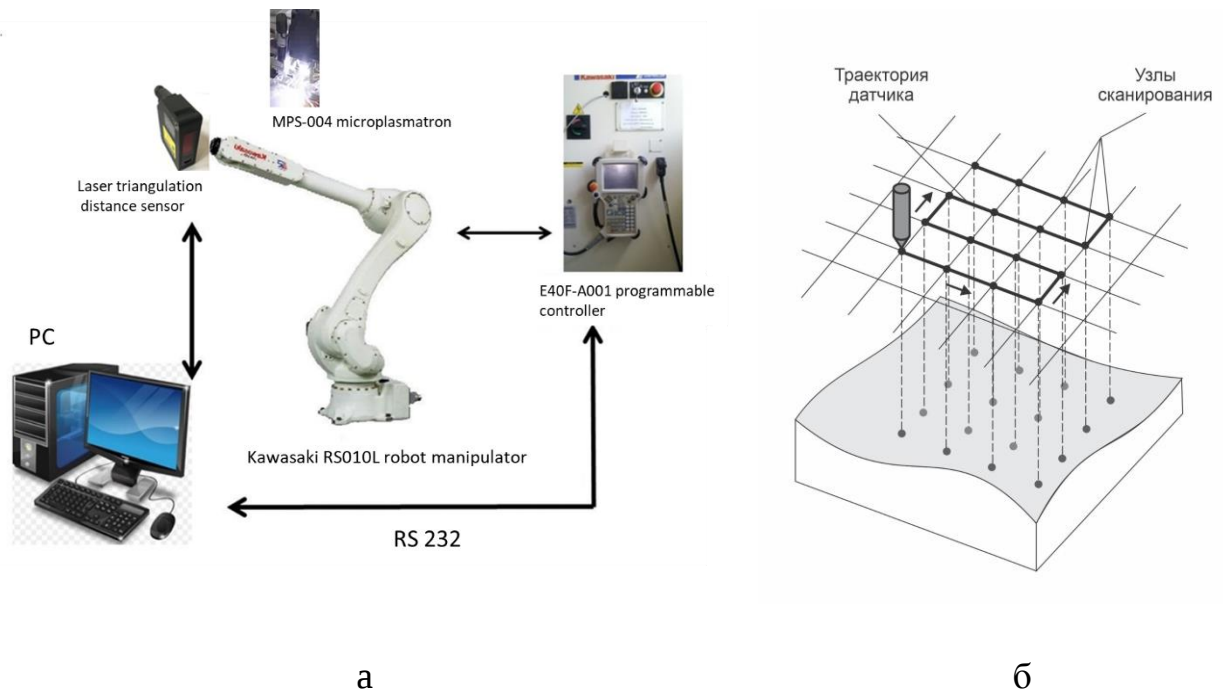
В соответствии с рисунком 2.11 роботизированное 3D сканирование включает этап генерации программы робота-манипулятора для выполнения этой задачи и этап непосредственного сканирования со сбором данных, пригодных для построения достаточно точной аналитической 3D модели обрабатываемого плазмой изделия. Как было показано в первой главе данной диссертации, это актуальные задачи, не имеющие в настоящее время единых признанных решений, то есть обладающие большим потенциалом научной новизны их решения.

Все этапы, представленные на рисунке 2.11 выполнялись с использованием робота-манипулятора Kawasaki RS010L (Kawasaki Heavy Industries, Япония), с полностью цифровой сервосистемой, управляемого программируемым контроллером E40F-A001 с использованием языка AS (Advanced Superior) [156], разработанного специально для таких роботов. Язык управления роботами высокого уровня AS можно рассматривать как язык описания движений конечных эффекторов. Программа AS описывает движение центра рабочего инструмента как движение по ряду позиций траектории, а также описывает пространственную ориентацию рабочего инструмента. Программное обеспечение высокого уровня решает задачу обратной кинематики для заданного описания движения рабочего органа, а также другие задачи планирования траектории. Все задачи управления на низком уровне (например, управление усилием и положением) выполняются контроллером манипулятора. Контроллер Kawasaki имеет модульную конфигурацию, для обучения робота предусмотрено блочное программирование, объём памяти (максимальный) ОЗУ 8 Мб (80000 шагов), внешняя память 2xUSB, удаленное подключение реализуется через Ethernet.

Робот-манипулятор Kawasaki RS-010LA, как указано в [157], характеризуют «6-ю степенями свободы, точностью позиционирования (повторяемость выхода в точку) ± 0.06 мм; максимальной линейной скоростью до 13100 мм/с, максимальной горизонтальной досягаемостью 1925 мм, а также грузоподъемностью до 10 кг» [158]. Другие характеристики модели робота, использованной в данном исследовании приводятся в приложении А.

Этап 3D сканирования осуществлялся с использованием лазерного триангуляционного датчика расстояния ODSL 8/D4-400-S12 (Leuze electronic, Германия), установленного на манипуляторе. Основными характеристиками данного датчика выступают следующие: диапазон измерений охватывает 20–400 мм при разрешении не хуже 0.1 мм; длина волны источника излучения в диапазоне 560-580 нм (видимый красный свет), а размеры светового пятна не более 1×6 мм на расстоянии 400 мм; абсолютная погрешность измерений составляет не хуже 1% на расстояниях до 200мм, не хуже 2% на расстояниях до 400мм; повторяемость (в процентах от измеряемой величины) не хуже 0.25% на расстояниях до 200мм, не хуже 1% на расстояниях до 400 мм; нелинейность не более 0.5 %.; максимальная частота измерений не менее 200 Гц при этом время измерения не больше 5 мс; время же отклика не более 20 мс., типом интерфейса является цифровой RS485; напряжение питания в диапазоне 18-30 В; максимальный потребляемый ток не более 100 мА [159].

Для реализации роботизированной процедуры 3D сканирования была составлена схема сканирования (см. рисунок 2.12 а), описанная в Ph. D. диссертации Кадыроldиной А.Т [153, с. 42], а также в написанной в соавторстве с Кадыроldиной А.Т. нашей статье [160, с.16], на рис. 2.12 б представлена схема сканирования поверхности объекта с указанием траектории перемещения датчика, выполняющего измерения в узлах сканирования в соответствии со вторым этапом, указанным на рис. 2.11.



а - схема, показывающая связь между составляющими системы трехмерного сканирования на базе бесконтактных датчиков расстояния, установленных на роботеманипуляторе Kawasaki RS10L; б – схема сканирования поверхности объекта с указанием траектории перемещения датчика, выполняющего измерения в узлах сканирования

Рисунок 2.12 – Схематическое пояснение выполнения роботизированного 3D-сканирования датчиком расстояния

Примечание - Рисунок 2.12а адаптирован из нашей статьи [160, с. 16]

В разрабатываемой данной диссертации системе роботизированного 3D сканирования робот-манипулятор выполняет последовательное перемещение по точкам проведения сканирования и выполняет сканирование в этих точках, получая данные, которые сохраняются в памяти как результаты сканирования. Эти данные представляют собой результаты измерения расстояния датчиком до поверхности сканируемого объекта в данной точке. Таким образом, формируется облако точек трехмерных координат, две из которых определяют координаты точки сканирования в системе координат робота, а третья – это расстояние до поверхности объекта. Поскольку для точных датчиков расстояния диапазон измеряемых расстояний ограничен, и часто требуется располагать ось датчика в направлении, перпендикулярном области сканирования, то была предложена комплексная система сканирования, включающая этапы «грубого» и «точного» сканирования, описанная в нашей работе [160, с. 16]. При осуществлении процесса двухэтапного сканирования, система «грубого» сканирования, применяющая датчики положения с широким диапазоном измеряемых расстояний и малочувствительная к ориентации

относительно поверхности, используется для выведения датчиков «точного» сканирования в рабочее положение и предотвращения возникновения аварийных ситуаций в ходе процесса сканирования, [160, с. 16].

В роботизированной системе 3D сканирования, разрабатываемой в данной диссертации, расстояния до поверхности объекта измеряются в дискретном множестве точек, образующих сеть с заданными геометрическими параметрами, «наложенную» на поверхность сканируемого объекта. 3D модель объекта строится посредством процедур интерполяции по узлам этой сетки.

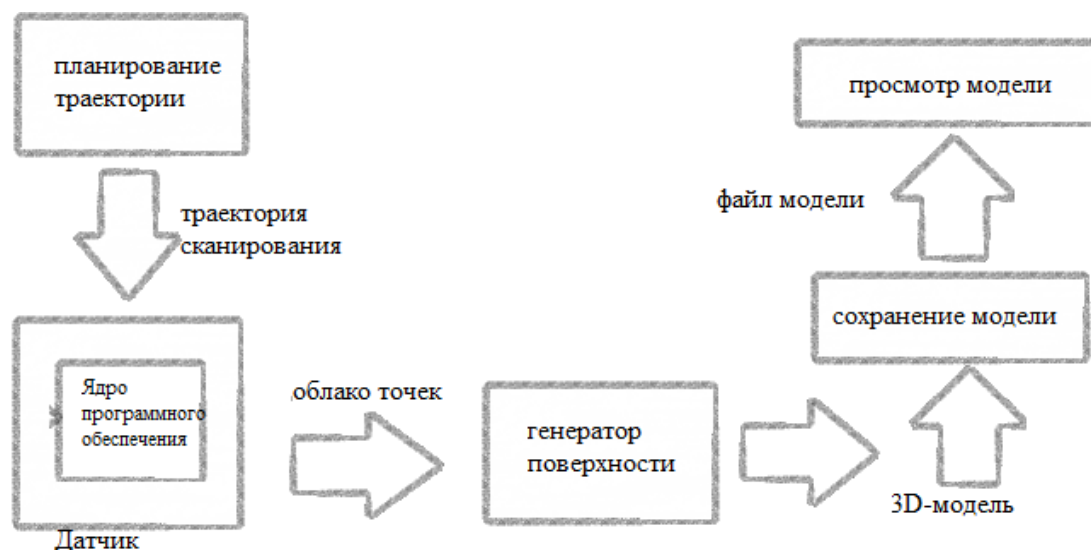


Рисунок 2.13 - Блок-схема системы 3D сканирования, включающая решения программного уровня.

Примечание - Рисунок адаптирован из нашей статьи [161, р. 2]

На рисунке 2.13 представлена блок-схема системы сканирования, которая поэтапно демонстрирует операции от начала планирования траектории до просмотра полученной модели объекта. Процесс создания 3D моделей по данным сканирования описывается программный уровень, который включает блок планирования траектории, ядро программного обеспечения, блок генератора поверхности и блок сохранения модели. Рисунок 2.13 отображает выходные данные из ядра программного обеспечения, которые представлены в виде облака 3D точек. Таким образом, неорганизованный набор трехмерных данных создается и отправляется в блок генератора поверхности, где генерируется гладкая затененная поверхность. В результате лазерная сканирующая съемка характеризуется автоматическим методом обнаружения облака точек, а на последующих этапах обработки требуется вмешательство человека. Следует отметить, что поверхность объекта сканируется с высокой скоростью, с целью получения общих данных облака точек, что позволяет достичь достаточно хорошего качества сканирования без необходимости трудоемких требований к целостности трехмерной информации [160, с. 17].

В соответствии с рисунком 2.12 и работой [160, с.16], процесс сбора данных, то есть создание облака точек производится следующими действиями:

1) задается траектория сканирования (состоящая из U-образных сегментов, покрывающих область сканирования) с указанием точек опроса датчика расстояния;

2) робот перемещает датчик по заданной траектории в плоскости, при этом в опорных точках проводится измерение расстояния до поверхности сканируемого объекта;

3) данные сканирования отправляются на компьютер. Логика (протокол) передачи данных обеспечивает передачу текущих координат датчика расстояния вместе с данными;

4) формируется облако точек, состоящее из множества троек декартовых координат точек (X_k, Y_m, Z_{km}) на сканируемой поверхности.

Таким образом, на финальном этапе сбора данных, полученные данные позволяют вычислить 3D координаты набора точек на поверхности и по данным сканирования реконструируется параметризованная аналитическая 3D модель поверхности.

Процесс построения 3D модели объекта, в свою очередь, идет в 3 этапа. На первом происходит разбиение плоскости сканирования на множество окружностей одного радиуса, образующих покрытие области сканирования. Поверхности внутри окружности аппроксимируется поверхностью второго порядка. На втором этапе проводится сегментация поверхности, причем малые области с завершенной локальной аппроксимацией объединяются в геометрически однородные макрорегионы. На третьем этапе оптимальные параметры модели как поверхности второго порядка рассчитываются для каждого региона.

Таким образом, для второго этапа реконструкции модели необходим этап сегментации. Сегментация поверхности необходима для определения геометрически гомогенных регионов поверхности и определения опорных точек в пределах региона, в которых будет производиться точечное сканирование. Наибольшую трудность для построения адекватной аналитической 3D модели представляли поверхности с резкими перегибами и изломами, в то время как техника аппроксимации гладких поверхностей хорошо разработана. Новый алгоритм сегментации, применяемый в данной работе, доказан и подробно представлен в диссертации Кадыроldиной А.Т. [152, с. 43-56], его описание можно также найти в совместных с ней публикациях [161, р. 1-10; 162].

Сущность этого нового алгоритма заключается в том, что вид реконструируемой при сканировании поверхности определяется в зависимости от значений ее Гауссовской кривизны K и средней кривизны H , которые автоматически вычисляются как функции коэффициентов аппроксимирующего многочлена. На вход алгоритма подается граф. Вершинами графа являются образующие прямоугольные сетку центры окружностей (областей, в которых производится локальная аппроксимация поверхности полиномами второго

порядка). Шаг сетки выбирается таким образом, чтобы окружности образовывали покрытие плоскости. Процедура построения региона идет по выбранной стартовой точке, в которой значение параметра K наиболее близко к «наиболее вероятному значению», найденному по распределению данного параметра. Построение аппроксимации в регионах однородности - это завершающий этап алгоритма сегментации и построения аналитической модели поверхности. Таким образом, локальные модели перекрывающихся сегментов поверхности объединяются в области с однородной геометрической структурой, описываемой общей аналитической параметризуемой моделью, что позволяет без априорного знания геометрии поверхности объекта построить ее аналитическую трехмерную модель, которая будет использована в качестве входных данных для формирования траектории манипулятора при напылении.

Необходимо отметить, что, так как данные LTS расстояния отличаются высоким уровнем зашумленности, то сетка сканирования выбиралась таким способом, чтобы в область локальной аппроксимации гарантировано попадало достаточное число точек (превышающее число точек, достаточное для построения поверхности второго порядка методом интерполяции Лагранжа). Таким образом, выбор радиуса окружности, определяющей размер области локальной аппроксимации, задавался исходя из соображений точности аппроксимации, в то время как выбор шага сетки сканирования обеспечивал компромисс между точностью и производительностью сканирования.

В соответствии с рисунком 2.14 показана схема системы управления движением робота-манипулятора, включающая этап 3D сканирования. Система управления формирует траекторию движения в контроллере и выполняет операцию интерполяции. В соответствии с характеристиками задачи управления роботом, систему управления роботом можно разделить сверху вниз на четыре уровня: уровень планирования, уровень траектории, уровень связи и общий уровень. На уровне планирования система сканирования сканирует объект, чтобы создать траекторию движения рабочего органа робота. Уровень траектории выполняет такие операции, как обратная кинематика, интерполяция траектории и параметризация времени. Он сопоставляет путь в декартовом пространстве с пространством суставов и добавляет временные параметры. Он также планирует разумную скорость и ускорение с помощью алгоритмов интерполяции и оптимизации. После получения эталонной траектории совместного пространства соответствующие данные передаются на уровень связи. Поскольку уровень связи является компонентом реального времени, управление манипулятором с обратной связью также выполняется на этом уровне. Чтобы обеспечить плавность траектории и стабильность робота-манипулятора во время сканирования, коммуникационный слой должен выполнять управление положением и скоростью соединения с обратной связью. Именно для обеспечения стабильности нами был разработан комбинированный метод управления, который будет описан подробнее в следующей главе.

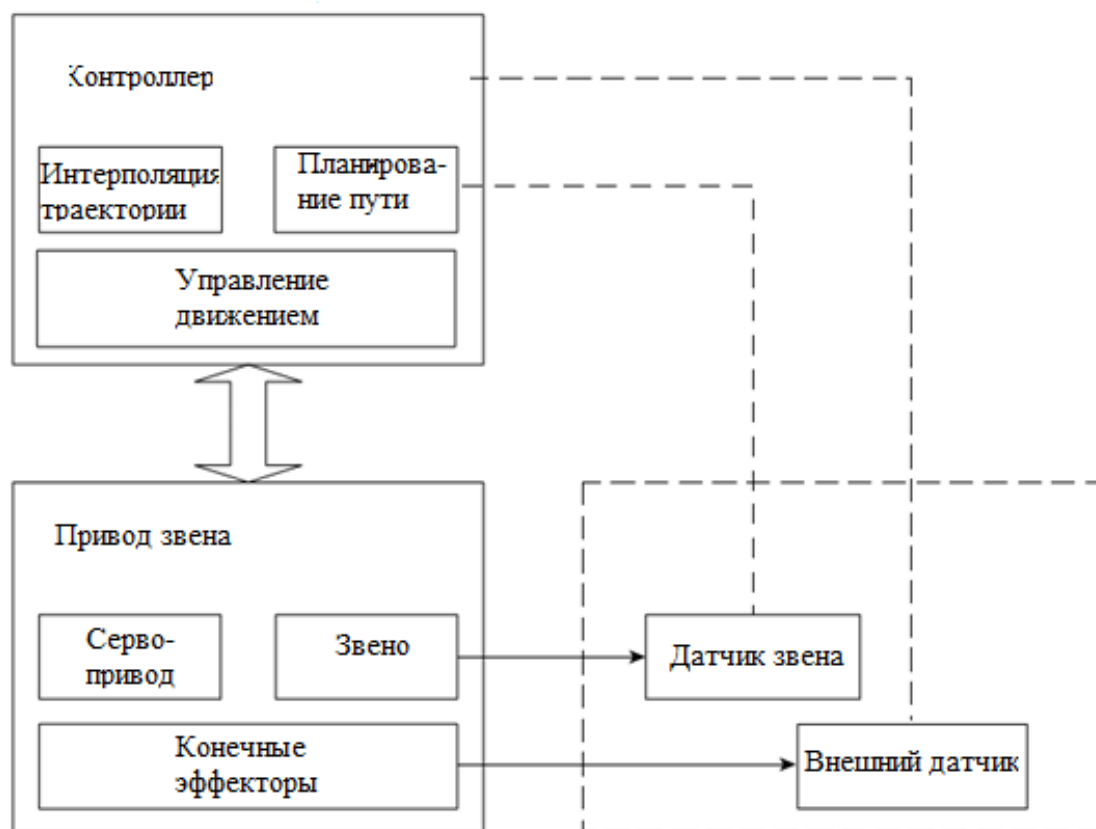


Рисунок 2.14 – Структура системы управления

Система управления промышленным роботом в основном состоит из двух видов оборудования: верхнего контроллера и привода двигателя. Верхний контроллер отвечает за управление всей рукой робота, а привод двигателя отвечает за управление движением двигателя сустава. В традиционной системе управления промышленным роботом путь робота создается на уровне планирования; уровень траектории отвечает за расчет обратной кинематики и интерполяции; коммуникационный уровень отправляет опорные точки траектории на стык в режиме реального времени. Своего рода система управления представляет собой централизованную структуру.

Таким образом, для выполнения операций 3D сканирования поверхностей, 3D модель которых может быть восстановлена по данным датчика расстояния, перемещаемого по U-образной траектории в плоскости над объектом, задача сканирования на первоначальном этапе может быть решена путем генерации данной плоской траектории путем программирования контроллера робота на языке AS. К таким объектам относится показанная на рис. 2.8 дробящая плита щековой дробилки с ребристой поверхностью с выступами высотой 3 см, а также может быть с некоторыми допущениями отнесен эндопротез локтевого сустава (рис. 2.9). Описание решений управления для роботизированного 3D сканирования таких объектов, а также результаты сканирования и последующего напыления покрытий будут приведены в четвертой главе диссертации,

Однако для сканирования таких крупных объектов, как шары в соответствии с рисунком 2.3 (чашка эндопротеза тазобедренного сустава), цилиндры (например, валки дробилок), или крупные поверхности (например, плита дробилки), необходим обход объекта в пространстве, как показано на рисунке 2.15.

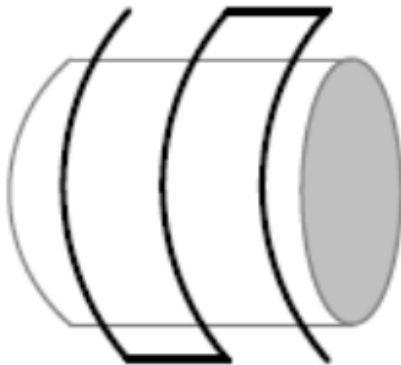


Рисунок 2.15 – Траектория обхода датчиком расстояния крупных объектов при сканировании

Чтобы обеспечить точность управления роботом при выполнении процедуры сканирования с перемещением руки манипулятора с датчиком расстояния по объемной траектории, был проведен синтез алгоритма управления, описываемый в третьей главе диссертации и проведено тестирование предложенного алгоритма управления в программе-симуляторе VisSim. Данная программа-симулятор VisSim используется для исследования и анализа в автоматических системах включая визуальные средства структурного моделирования. Интерпретатор VisSim-а может генерировать код на языке C автоматически. VisSim использует средства автоматической генерации коэффициентов классических линейных и дискретных фильтров. Программа VisSim обладает широкими возможностями, среди которых развитый графический интерфейс, посредством которого имеется возможность создания модели с некоторой степенью условности из виртуальных элементов. Что предоставляет пользователю разработать, исследовать и оптимизировать модели систем разных уровней сложности и различного направления по назначению. Результаты тестирования на модельных объектах в программе-симуляторе будут приведены в третьей и четвертой главе.

Выводы по разделу 2

На основе анализа требований к покрытиям определенных промышленных изделий и характеристик имеющегося технологического оборудования для роботизированного микроплазменного напыления, были выбраны объекты роботизированного 3D сканирования и материалы для их покрытий, приведены существенные для исследования характеристики поверхности и материалов объектов сканирования и процесса напыления.

Показано, что задача сканирования в данной работе — это измерение расстояний до поверхности объекта, чтобы воссоздать 3D модель изделия, учитывающую его основную геометрию, при этом существенными для учета при построении модели, можно считать неровности поверхности высотой не менее 1 см. Обоснован вид траектории сканирования (плоская либо объемная U-образная кривая) и уточнены методы планирования траектории и генерации программы сканирования в зависимости от объекта сканирования.

Разработана и описана последовательность этапов процесса плазменной обработки поверхности с использованием предварительного 3D сканирования на базе робота-манипулятора, с описанием оборудования и методик выполнения 3D сканирования, а также методик и ПО для роботизированного напыления. Составлена схема системы управления движением робота-манипулятора, включающая этап 3D сканирования. Результаты данного раздела доказаны в публикациях [153, с. 62-67; 154, р. 26-29; 155, р. 572-579; 157, с. 81-87; 160, с. 7-19; 161, р. 1-10].

3 ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА КОМПЕНСАЦИИ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТА И ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА

3.1 Применение алгоритма для создания системы автоматического регулирования движения робота в одном направлении

На основе литературного обзора, описанного в первой главе и исходя из практической направленности исследования, определена задача достижения автоматической стабилизации на требуемом уровне и с определенной динамикой скорости в условиях осуществления возмущений посредством изменения управляющих воздействий на сервосистемы движения звеньев робота. Среди главных контролируемых параметров при движении системы выделяется расстояние от триангуляционного датчика до поверхности при 3D сканировании, или расстояние от плазменного источника до поверхности объекта (дистанция напыления) при напылении, то есть смещение по высоте (по оси Z). В результате можно определить следующее положение: робот представляет собой объект управления с одним входом и одним выходом (SISO-объект) этому способствует подтверждение, что в процессе управления будет контролироваться координата вдоль заданного направления, вдоль которого будет двигаться запястье робота вместе с датчиком расстояния в процессе отслеживания расстояния до поверхности.

Поскольку объект управления включает в себя механические элементы манипулятора, то будем аппроксимировать динамику движения объекта в заданном направлении линейным обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка общего вида. Таким образом, ставится задача управления одномерным инерционным линейным объектом второго порядка с сосредоточенными параметрами [99, с. 474-475]. Выбор и обеспечение заданных траекторий движения, включая скорости и ускорения – достаточно сложная для решения задача. Приходится учитывать то обстоятельство, что манипулятор робота является многосвязной связанной инерционной механической системой с ограниченными по мощности и моменту приводами звеньев. Как правило, каждая кинематическая пара манипулятора (сустав) имеет свой привод, датчик положения и микропроцессорную систему управления приводом. В целом получается сервосистема позиционирования данной пары, обладающая своими динамическими характеристиками. На более высоком уровне реализуется координированная работа систем позиционирования всех суставов. Обычно для облегчения программирования на этом уровне предусматривается, наряду с другими, движение инструмента в заданном направлении в декартовой системе координат независимо от типа движения пар звеньев. Примером может служить робот Kawasaki RS10L, в котором используются вращательные пары, но предусмотрено движение инструмента в заданном направлении.

Однако сервосистемы данной пары, как правило, обладают значительной динамической ошибкой (выбросами) при отработке своих задающих

воздействий ступенчатой формы, что вызовет неровности слоя напыления. Для устранения этого эффекта предлагается разработать алгоритм формирования задания в заданном направлении, учитывающий динамику работы сервосистем, исключающий «быстрые» изменения заданий для этих систем.

Необходимо использовать алгоритм синтеза, чтобы компенсировать все возмущения с заданной динамикой и нулевой статической ошибкой. Разработка алгоритма управления выполнена методом КДОВ [96, с. 33; 98, с. 10; 99, с. 474].

3.1.1 Постановка задачи синтеза САУ

Рассматривается объект управления

$$\begin{aligned}\dot{x}_{01} &= a_1 x_{01} + a_2 x_{02} + u - f_{x1}, \\ \dot{x}_{02} &= x_{01} - f_{x2}, \\ y'_0 &= c_1 x_{01} + c_2 x_{02} - f_y,\end{aligned}\tag{3.1}$$

или, в иной записи

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_0 &= \mathbf{A}\mathbf{x}_0 + \mathbf{B}u - \mathbf{f}_x, \\ y_0 &= \mathbf{C}\mathbf{x}_0 - \mathbf{f}_y,\end{aligned}\quad \text{где} \quad \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ c_1 & c_2 & 0 \end{bmatrix}.\tag{3.2}$$

В (3.1)–(3.2) обозначено: $\mathbf{x}_0 = [x_{01} \ x_{02}]^T \in \mathfrak{R}^2$ – переменные состояния; $u \in \mathfrak{R}^1$ – управляющее воздействие; $y_0 \in \mathfrak{R}^1$ – выходная переменная; $f_y \in \mathfrak{R}^1$ – возмущающее воздействие на выходную переменную; $\mathbf{f}_x = [f_{x1} \ f_{x2}]^T \in \mathfrak{R}^2$ – возмущающие воздействия на переменные состояния. Матрицы $\mathbf{A} \in \mathfrak{R}^{2 \times 2}$, $\mathbf{B} \in \mathfrak{R}^{2 \times 1}$, $\mathbf{C} \in \mathfrak{R}^{1 \times 2}$ считаются заданными, $c_2 \neq 0$. Доступными для контроля являются y_0 , $\mathbf{x}_0$.

Алгоритм управления по методу компенсации динамики объекта и возмущений для линейного объекта общего вида записывается как [98, с. 11]

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_\phi &= \mathbf{R}_1 \mathbf{x}_\phi + \mathbf{\Phi}_2 \varepsilon, \\ u &= \mathbf{R}_3 \mathbf{x}_\phi + \mathbf{N}_1 \cdot \tilde{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{P} \varepsilon, \\ \tilde{\mathbf{x}}_0 &= \mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_\phi, \\ \varepsilon &= y - y_0,\end{aligned}\tag{3.3}$$

где для объекта (3.1), (3.2): $\mathbf{x}_\phi = [x_{\phi 1} \ x_{\phi 2}]^T \in \mathfrak{R}^2$ – переменные состояния фильтра-эталона; $y \in \mathfrak{R}^1$ – задание для выходной переменной; $\mathbf{R}_1 \in \mathfrak{R}^{2 \times 2}$, $\mathbf{\Phi}_2 \in \mathfrak{R}^{2 \times 1}$, $\mathbf{R}_3 \in \mathfrak{R}^{1 \times 2}$, $\mathbf{N}_1 \in \mathfrak{R}^{1 \times 2}$, $\mathbf{P} \in \mathfrak{R}^{1 \times 1}$ – матрицы, подлежащие определению.

Динамические свойства полученной замкнутой системы представлены уравнениями

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_\phi &= \Phi_1 \mathbf{x}_\phi - \Phi_2 \mathbf{C} \tilde{\mathbf{x}}_0 + \Phi_2 (y - f_y), \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_0 &= \Phi_{r1} \tilde{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{f}_x, \\ \varepsilon &= -\Phi_3 \mathbf{x}_\phi - \mathbf{C} \tilde{\mathbf{x}}_0 + y - f_y, \\ u &= \mathbf{N} \mathbf{x}_\phi + (\mathbf{N}_1 - \mathbf{P} \mathbf{C}) \tilde{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{P} (y - f_y).\end{aligned}\tag{3.4}$$

где $\Phi_1 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, $\Phi_2 \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$, $\Phi_3 \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ – матрицы фильтра-эталона по каналу отработки воздействия $y - f_y$; $\Phi_{r1} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, $\Phi_{r3} \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ – матрицы фильтра-эталона по каналам действия $\mathbf{f}_x$. Часть элементов этих матриц задается, другая часть определяется расчетным путем.

Требуется, используя последовательность этапов синтеза алгоритма управления из [98, с. 11] определить матрицы в (3.3), (3.4), выполнить анализ работы полученной системы управления и рассмотреть применение алгоритма для создания системы автоматического регулирования движения робота в одном направлении.

3.1.2 Определение уравнений регулятора

Матрицы регулятора (3.3) определяются в следующей последовательности (простые, но громоздкие преобразования опущены):

Выполняя обращение блочной матрицы объекта управления

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{F} \\ \mathbf{G} & \mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}^{-1}$$

например, через соотношение

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{F} \\ \mathbf{G} & \mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

находим матрицу обратной модели

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{F} \\ \mathbf{G} & \mathbf{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{c_1}{c_2} & \frac{1}{c_2} \\ 1 & -a_1 + a_2 \frac{c_1}{c_2} & -\frac{a_2}{c_2} \end{bmatrix}.\tag{3.5}$$

Формируем матрицу $\mathbf{Q}$, которая является верхним правым блоком размером 2×2 матрицы (3.5).

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{c_1}{c_2} & \frac{1}{c_2} \end{bmatrix}$$

и производим ее обращение, например, путем решения матричного уравнения $\mathbf{Q}\mathbf{Q}^{-1} = \mathbf{1}$, где $\mathbf{1}$ – единичная диагональная матрица. В итоге получаем

$$\mathbf{Q}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ c_1 & c_2 \end{bmatrix}.$$

Определяем фильтры-эталон. Обозначим свободно задаваемые коэффициенты этих фильтров, занимающие верхние строки матриц Φ_1 , Φ_{r1} соответственно через ϕ_1, ϕ_2 и ϕ_{r1}, ϕ_{r2} . Соображения по заданию свободных коэффициентов будут приведены ниже при анализе системы управления. Находим оставшиеся коэффициенты фильтров-эталонов по формулам

$$\begin{bmatrix} \phi_{21} & \phi_{22} \\ \phi_{31} & \phi_{32} \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{12} \end{bmatrix} \cdot [\phi_{11} \quad \phi_{12}] \right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ c_1 & c_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{r21} & \phi_{r22} \\ \phi_{r31} & \phi_{r32} \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{12} \end{bmatrix} \cdot [\phi_{r11} \quad \phi_{r12}] \right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ c_1 & c_2 \end{bmatrix},$$

где e_{ij} – соответствующий элемент матрицы $\mathbf{E}$,

$$\Phi_2 = -\Phi_1 \mathbf{F} = \begin{bmatrix} -\frac{\phi_2}{c_2} \\ c_2 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, блочные матрицы фильтров-эталонов имеют вид

$$\begin{bmatrix} \Phi_1 & \Phi_2 \\ \Phi_3 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1 & \phi_2 & -\frac{\phi_2}{c_2} \\ 1 & 0 & 0 \\ c_1 & c_2 & 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \Phi_{r1} \\ \Phi_{r3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{r1} & \phi_{r2} \\ 1 & 0 \\ c_1 & c_2 \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Отметим, что каждый фильтр-эталон имеет единичный коэффициент передачи в статике. Далее, используя (3.5) и (3.6), определим матрицы регулятора (3.3)

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{\Phi}_1 + \mathbf{\Phi}_2 \mathbf{\Phi}_3 = \begin{bmatrix} \phi_1 - \frac{c_1}{c_2} \phi_2 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{G} \mathbf{\Phi}_2 = -\frac{\phi_2}{c_2}, \quad (3.8)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{G} \mathbf{\Phi}_1 + \mathbf{H} \mathbf{\Phi}_3 = [\phi_1 - a_1 \quad \phi_2 - a_2], \quad (3.9)$$

$$\mathbf{N}_1 = \mathbf{G} \mathbf{\Phi}_{r1} + \mathbf{H} \mathbf{\Phi}_{r3} = [\phi_{r1} - a_1 \quad \phi_{r2} - a_2] \quad (3.10)$$

$$\mathbf{R}_3 = \mathbf{N} + \mathbf{P} \mathbf{\Phi}_3 = \begin{bmatrix} \phi_1 - a_1 - \frac{c_1}{c_2} \phi_2 & -a_2 \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Подставляя (3.7)–(3.11) в (3.3), записываем в общем виде уравнения регулятора для объекта (3.1) в скалярной форме

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\phi_1} &= \left(\phi_1 - \frac{c_1}{c_2} \phi_2 \right) x_{\phi_1} - \frac{\phi_2}{c_2} \varepsilon, \\ \dot{x}_{\phi_2} &= x_{\phi_1}, \\ u &= \left(\phi_1 - a_1 - \frac{c_1}{c_2} \phi_2 \right) x_{\phi_1} - a_2 x_{\phi_2} + (\phi_{r1} - a_1) \cdot \tilde{x}_{01} + (\phi_{r2} - a_2) \cdot \tilde{x}_{02} - \frac{\phi_2}{c_2} \varepsilon, \\ \tilde{x}_{01} &= x_{01} - x_{\phi_1}, \\ \tilde{x}_{02} &= x_{02} - x_{\phi_2}, \\ \varepsilon &= y - y_0. \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.1.3 Общий анализ полученной системы управления

Для удобства анализа представим уравнение для управляющего воздействия из (3.12) в области изображений по Лапласу

$$u(s) = -\frac{\phi_2}{c_2} \frac{(s^2 - \phi_{r1}s - \phi_{r2})}{s(s - \phi_1 + \frac{c_1}{c_2} \phi_2)} \varepsilon(s) + (\phi_{r1} - a_1) x_{01}(s) + (\phi_{r2} - a_2) x_{02}(s), \quad (3.13)$$

Подстановка (3.7)–(3.11) в (3.14) дает уравнения, определяющие процессы в замкнутой системе управления

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\phi_1} &= \phi_1 x_{\phi_1} + \phi_2 x_{\phi_2} - \frac{c_1}{c_2} \phi_2 \tilde{x}_{01} - \phi_2 \tilde{x}_{02} - \frac{1}{c_2} \phi_2 (y - f_y), \\ \dot{x}_{\phi_2} &= x_{\phi_1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{x}}_{01} &= \phi_{r1} \tilde{x}_{01} + \phi_{r2} \tilde{x}_{02} + f_{x1}, \\
\dot{\tilde{x}}_{02} &= \tilde{x}_{01} + f_{x2}, \\
\varepsilon &= -c_1 x_{\phi1} - c_2 x_{\phi2} - c_1 \tilde{x}_{01} - c_2 \tilde{x}_{02} + y - f_y, \\
u &= (\phi_1 - a_1) x_{\phi1} + (\phi_2 - a_2) x_{\phi2} + (\phi_{r1} - a_1 + \frac{c_1}{c_2} \phi_2) \tilde{x}_{01} + \\
&+ (\phi_{r2} - a_2 + \phi_2) \tilde{x}_{02} - \frac{\phi_2}{c_2} (y - f_y).
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Согласно (3.13), в регуляторе по каналу рассогласования ε имеется интегральная составляющая, которая устраняет статическую ошибку регулирования. Из (3.13), (3.14) видно, что в системе используются местные обратные связи по переменным состояниям. Эти связи в соответствии с (3.14) «правят» процессы в замкнутой системе по каналам действия f_x , приводя собственную динамику объекта к своему фильтру-эталону посредством свободных коэффициентов ϕ_{r1} , ϕ_{r2} , однако для этого нужно иметь информацию о переменных состояниях объекта. В свою очередь фильтр со свободными коэффициентами ϕ_1 , ϕ_2 определяет переходные процессы замкнутой системы по каналу отработки $y - f_y$. Если динамика объекта удовлетворительная, следует принять $\phi_{r1} = a_1$, $\phi_{r2} = a_2$, тогда отпадает необходимость контроля переменных состояний x_{01} , x_{02} . Возможна частичная «правка» объекта. Используя (3.14), можно установить, что фильтр-эталон по f_x включен последовательно с фильтром по $y - f_y$. Уравнения (3.13), (3.14) позволяют легко получить количественные данные зависимости амплитуды управляющего воздействия от частоты среза фильтров-эталонов. Таким образом, поведение замкнутой системы управления по всем каналам воздействий при заданном объекте определяется свободно задаваемыми коэффициентами, которые определяют положение полюсов фильтра. Это удобно при практическом применении данного метода синтеза.

Уравнения состояния для (3.14) без внешних воздействий, задающие собственные движения системы, можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{\phi1} \\ \dot{x}_{\phi2} \\ \dot{\tilde{x}}_{01} \\ \dot{\tilde{x}}_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1 & \phi_2 & -\frac{c_1}{c_2} \phi_2 & -\phi_2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_{r1} & \phi_{r2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\phi1} \\ x_{\phi2} \\ \tilde{x}_{01} \\ \tilde{x}_{02} \end{bmatrix},$$

откуда следует, что два полюса системы определяются только свободными коэффициентами ϕ_1 , ϕ_2 , два других – коэффициентами ϕ_{r1} , ϕ_{r2} . Каждый из

фильтров-эталонов является фильтром низких частот второго порядка. Опыт показывает, что целесообразно выбирать свободные коэффициенты так, чтобы частотные полосы пропускания объекта управления и фильтра-эталона примерно были одинаковыми, тогда обеспечивается умеренная амплитуда управляющих воздействий и робастность системы управления. Соотношения между коэффициентами удобно выбирать, используя стандартные формы фильтров [163, 164].

Отметим, что, согласно (3.14) нули фильтров-эталонов нельзя задать произвольно, они соответствуют нулям объекта управления. Таким образом, если объект неминимальнофазовый, то эта “неминимальнофазовость” переносится на динамику замкнутой системы, не ухудшая качества ее работы.

3.1.4 Разработка системы автоматического регулирования движения манипуляционного робота

Рассмотрим синтез системы автоматического регулирования манипуляционным роботом в одном направлении методом компенсации динамики объекта и возмущений. Уравнения робота, как объекта управления представлены в виде (3.1). Здесь управляющим воздействием u является задание на положение инструмента робота в данном направлении для системы более низкого уровня. Управляемая переменная – фактическое положение инструмента робота. Доступными для контроля являются положение и скорость движения инструмента, т. е. y_0 и x_{01} . Система должна обеспечивать быстроедействие, примерно соответствующее быстрдействию системы более низкого уровня и динамическую ошибку не более 1%. Для синтеза системы нужно найти числовые коэффициенты уравнения (3.1) конкретного робота. Снятие кривой разгона или других характеристик затруднительно, но обычно известна максимальная скорость перемещения инструмента робота в данном направлении $v_{\max}$. Кроме того, как правило, можно оценить динамическую ошибку (перерегулирование) σ механической сервосистемы более низкого уровня.

Задачу параметрической идентификации в этих условиях предлагается решать следующим образом. Считая объект управления устойчивым с единичным коэффициентом передачи в статике, записываем его передаточную функцию по каналу задание – выход при $c_1 = 0$ в форме Вышнеградского [165]

$$W(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \zeta\omega_0 s + \omega_0^2}; \quad a_1 = -\zeta\omega_0; \quad a_2 = -\omega_0^2; \quad c_2 = \omega_0^2, \quad (3.15)$$

где ω_0 – собственная частота колебаний объекта управления, ζ – коэффициент, характеризующий затухание. Эта форма удобна тем, что позволяет независимо изменять временной масштаб (быстродействие) звена и форму переходной характеристики. Такое представление объекта облегчает задачу его

идентификации. Далее задачу решаем методом математического моделирования.

На компьютерной математической модели (3.15) находим переходную функцию системы и изменяя ζ , добиваемся того, чтобы динамическая ошибка стала равной заданному значению σ . Затем, изменяя ω_0 , легко обеспечиваем соответствие угла наклона касательной в точке перегиба переходной характеристики значению $v_{\max}$.

Во избежание режима насыщения, максимальная скорость на кривой разгона нашего объекта должна быть равна примерно 1/3 от максимальной скорости перемещения руки робота-манипулятора 13100 мм/с, то есть 4м/с. Принятая максимальная скорость адекватна в рамках работы. Необходимо отметить, то, что объект управления является механическим устройством, поэтому принято решение применить 20%-е перерегулирование его сервосистем.

На рисунке 3.1 показан процесс параметрической идентификации математической модели при характерных значениях $v_{\max} = 4 \text{ м/с}$ и $\sigma = 20\%$. Для этих значений получено (размерности здесь и далее опущены):

$$\omega_0 = 7,2; \quad \zeta = 0,92, \quad (3.16)$$

что, согласно (3.15) соответствует коэффициентам

$$a_1 = -0,92 \cdot 7,2 = -6,634; \quad a_2 = -51,84; \quad c_2 = 51,84. \quad (3.17)$$

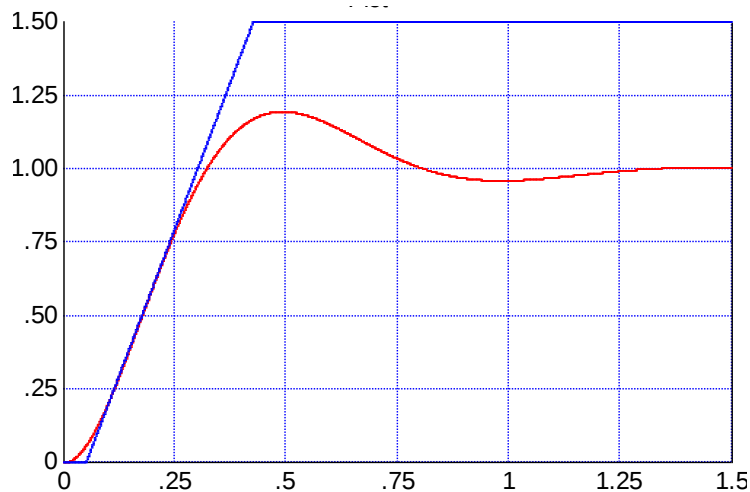


Рисунок 3.1 - Процесс параметрической идентификации математической модели (3.1). По вертикальной оси – расстояние в метрах; По горизонтальной оси – время в секундах.

Для задания свободных коэффициентов фильтров-эталонов также запишем уравнения этих фильтров в виде (3.15)

$$W(s) = \frac{\omega_{\phi 0}^2}{s^2 + \zeta_{\phi} \omega_{\phi 0} s + \omega_{\phi 0}^2}, \quad \phi_1 = -\zeta_{\phi} \omega_{\phi 0}, \quad \phi_2 = -\omega_{\phi 0}^2, \quad (3.18)$$

$$W(s) = \frac{\omega_{r\phi 0}^2}{s^2 + \zeta_{r\phi} \omega_{r\phi 0} s + \omega_{r\phi 0}^2}, \quad \phi_{r1} = -\zeta_{r\phi} \omega_{r\phi 0}, \quad \phi_{r2} = -\omega_{r\phi 0}^2, \quad (3.19)$$

где $\omega_{\phi 0}$, $\omega_{r\phi 0}$ – собственные частоты колебаний фильтров-эталонов соответственно по $y - f_y$ и f_x ; ζ_{ϕ} , $\zeta_{r\phi}$ – коэффициенты, характеризующие затухание по тем же фильтрам. Это – свободно задаваемые параметры. При увеличении $\omega_{\phi 0}$, $\omega_{r\phi 0}$, согласно (3.14) увеличивается быстродействие системы управления, но одновременно увеличивается амплитуда управляющего воздействия. Кроме того, как показывает опыт, при увеличении частот повышается чувствительность системы к отклонениям параметров и структуры объекта управления от своих расчетных значений. В данном случае целесообразно выбрать

$$\omega_{\phi 0} = \omega_{r\phi 0} = \omega_0. \quad (3.20)$$

Поскольку в нашей системе динамическая ошибка должна быть менее 1%, то выбираем

$$\zeta_{\phi} = \zeta_{r\phi} = \sqrt{3} \approx 1,73, \quad (3.21)$$

что соответствует фильтру Бесселя, имеющему перерегулирование 0,43% [96, с. 34].

Регулятор (3.12) с коэффициентами, вычисленными по (3.16)–(3.21) имеет вид уравнений (3.22)

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\phi 1} &= -12,46x_{\phi 1} + \varepsilon, \\ \dot{x}_{\phi 2} &= x_{\phi 1}, \\ u &= -5,83x_{\phi 1} + 51,84x_{\phi 2} - 5,83 \cdot \tilde{x}_{01} + \varepsilon, \\ \tilde{x}_{01} &= x_{01} - x_{\phi 1}, \\ \tilde{x}_{02} &= x_{02} - x_{\phi 2}, \\ \varepsilon &= y - y_0. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Исследование качества регулирования полученной системы производилось методом математического моделирования. На рис. 3.2 представлены переходные функции замкнутой системы управления объектом (3.1) с коэффициентами (3.17) и регулятором (3.12) по каналу: задание – выход при разных значениях $\omega_{\phi 0}$, $\omega_{r\phi 0}$.

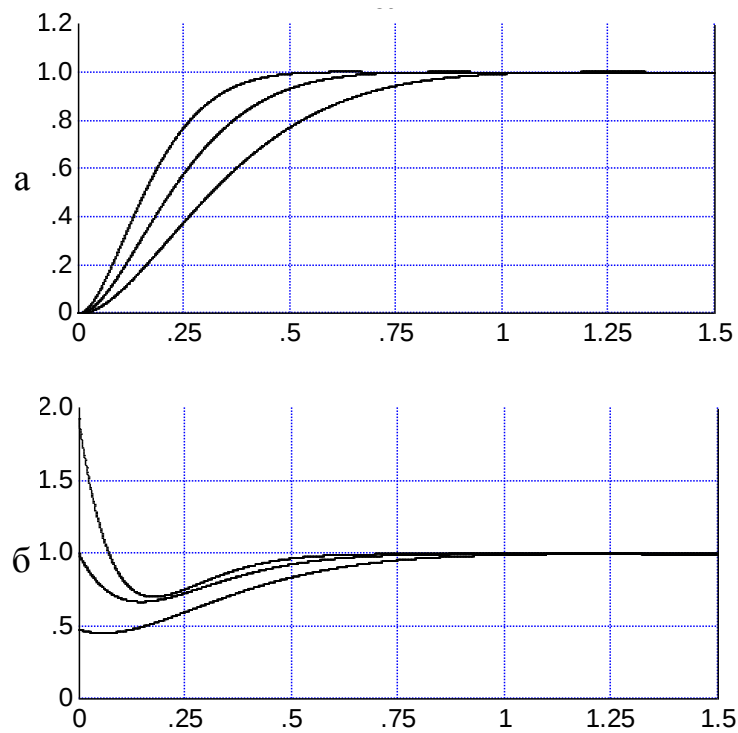


Рисунок 3.2 - Переходные процессы по каналу: задание – выход при разных $\omega_{\phi 0}, \omega_{r\phi 0}$: а – выходная переменная; б – управляющее воздействие.

Верхние кривые в соответствии с рисунком 3.2 соответствуют значениям $\omega_{\phi 0} = \omega_{r\phi 0} = 10$; средняя кривая значениям $\omega_{\phi 0} = \omega_{r\phi 0} = 7,2$; нижняя – $\omega_{\phi 0} = \omega_{r\phi 0} = 5$.

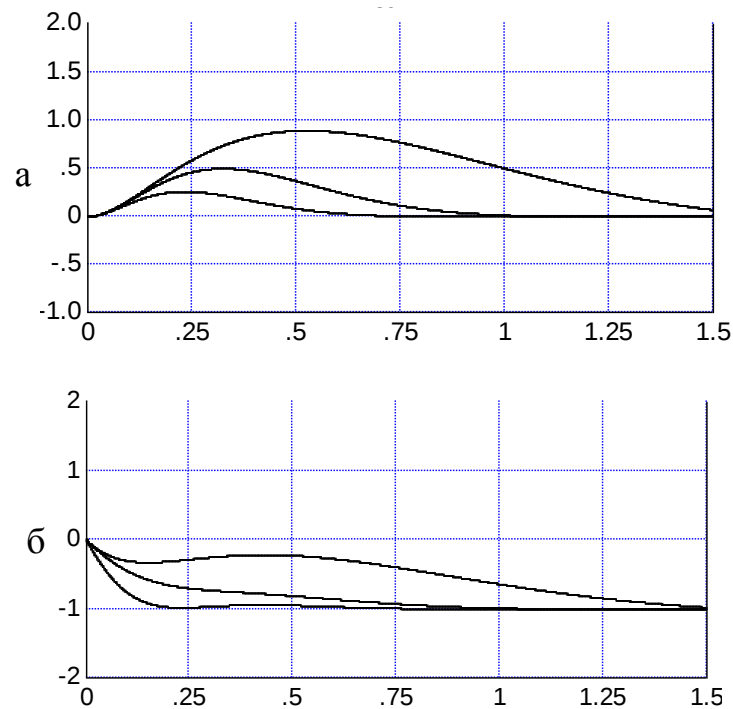


Рисунок 3.3 - Переходные процессы по каналу: f_{x1} – выход при разных $\omega_{\phi 0}, \omega_{r\phi 0}$: а – выходная переменная; б – управляющее воздействие.

В соответствии с рисунком 3.3 показаны переходные функции по каналу: f_{x1} – выход при тех же значениях $\omega_{\phi 0}$, $\omega_{r\phi 0}$, но чередование кривых обратное.

На модели производилось также исследование параметрической и структурной робастности полученной системы управления. Исследование показало анализ переходных функций при существенном изменении коэффициентов объекта управления и его структуры при регуляторе, рассчитанном для номинальных значений коэффициентов.

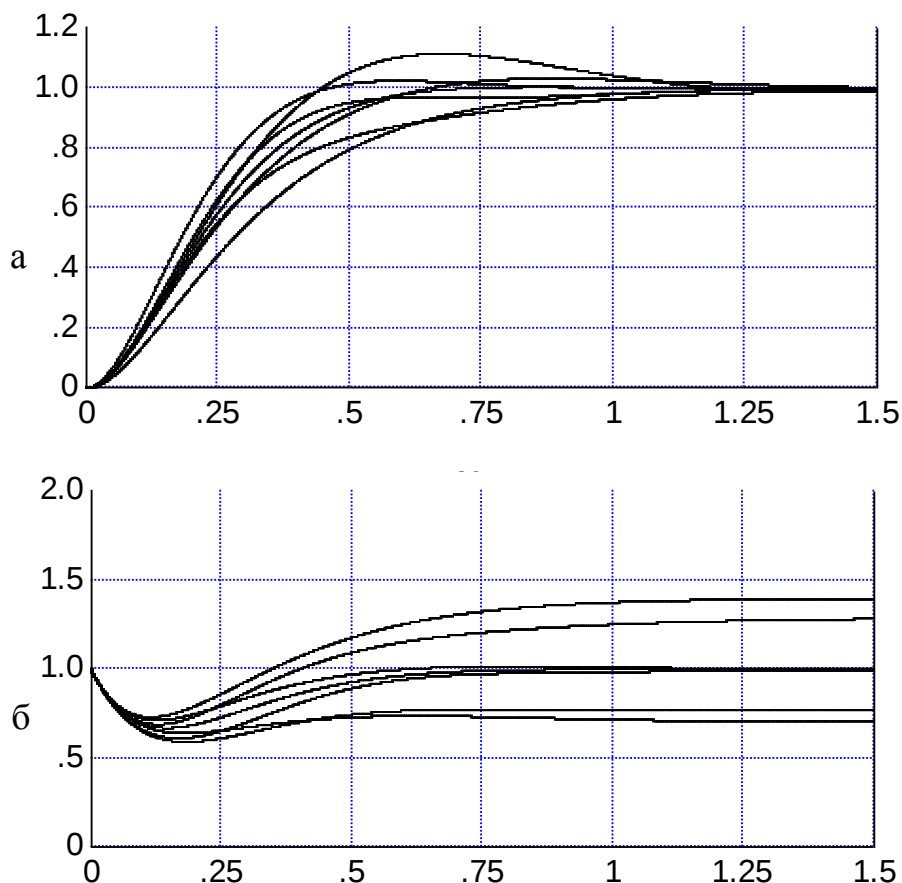


Рисунок 3.4 - Исследование системы на параметрическую робастность: а – выходная переменная; б – управляющее воздействие.

В соответствии с рисунком 3.4 показаны переходные функции при поочередном изменении коэффициентов a_1 , a_2 , c_2 на $\pm 30\%$ от своих номинальных значений. В результате исследовали систему на параметрическую робастность.

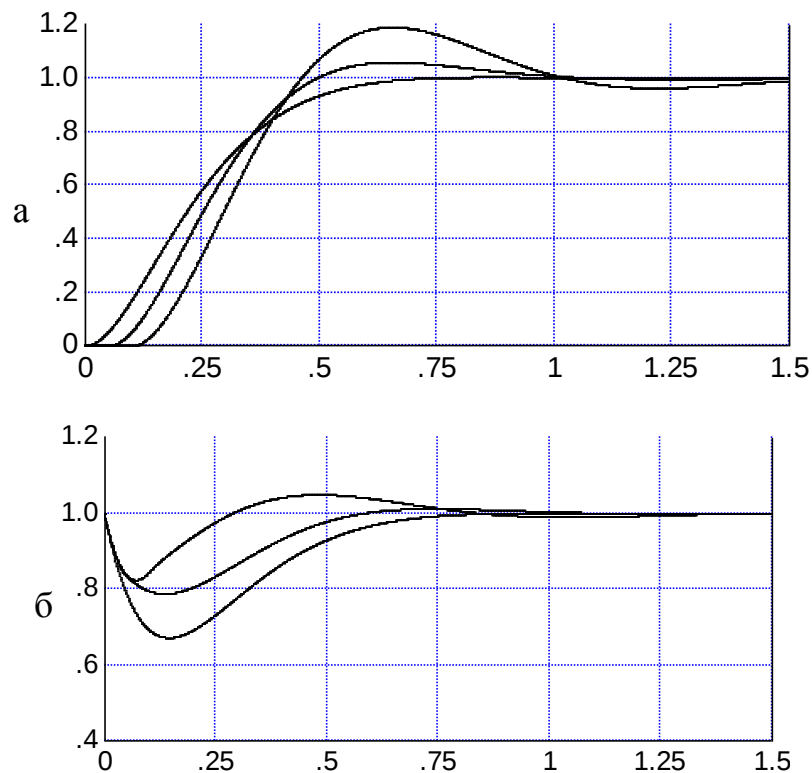


Рисунок 3.5 - Исследование системы на структурную робастность: а – выходная переменная; б – управляющее воздействие.

На рисунке 3.5 представлены переходные функции в системе, в которой объект управления содержал дополнительно запаздывающее звено с разным временем запаздывания: 0; 0,05; 0,1 секунды в номинальном режиме при $\omega_{\phi 0} = \omega_{r\phi 0} = 7,2$. Запаздывание моделирует неучтенную динамику, а также реальные запаздывания в системе.

Выводы по подразделу 3.1

Таким образом, для данных внешних воздействий легко можно подобрать рациональные значения $\omega_{\phi 0}$, $\omega_{r\phi 0}$ и обеспечить вполне удовлетворительное качество регулирования.

Рассмотрение особенностей манипуляционного робота позволяет формулировать задачу управления его движением в одном направлении, как управление линейным объектом второго порядка. Применение метода компенсации динамики объекта и возмущений дает возможность получить алгоритм управления таким объектом общего вида в аналитической форме посредством алгебраических действий над матрицами. Исходными данными для расчета системы управления являются математическая модель объекта управления и свободные параметры фильтров-эталонов, что удобно для практических приложений. Алгоритм обеспечивает нулевую статическую ошибку и отработку внешних воздействий с точностью фильтров-эталонов.

Применение формы Вышнеградского облегчает параметрическую идентификацию объекта и задание свободных коэффициентов фильтра-эталона,

удобную применительно к описанию движения робота. Анализ методом математического моделирования системы управления движением робота, разработанной на основе предложенного в диссертации алгоритма, позволяет заключить, что система обеспечивает заданные показатели качества и обладает свойствами параметрической и структурной робастности.

3.2 Разработка алгоритма управления углом поворота звена аналитическим методом компенсации динамики объекта и возмущений

Другим способом улучшения работы сервосистем кинематических пар робота является создание специального алгоритма работы этих систем. Причиной неточной работы таких систем является нелинейность и нестационарность кинематических пар, рассматриваемых, как объект управления [100, р. 359; 101, р. 99-105; 103, р. 1-8; 104, р. 1-19; 105, р. 1129; 106, с. 5; 108, р. 65-125; 109, с. 26-31; 110, р. 1753-1759; 112, с. 10-26; 113, р. 1-16]. В теории управления пока отсутствуют универсальные инженерные методы синтеза систем управления нелинейными объектами, есть только проработки для отдельных их классов. Однако метод компенсации динамики объекта и возмущений позволяет разрабатывать алгоритмы управления для нелинейных и нестационарных объектов [95, с. 674]. Рассмотрим динамику движения звена робота, как нелинейного нестационарного объекта управления.

3.2.1 Разработка математической модели объекта управления

Рассмотрим одно жесткое звено манипулятора вращательного типа с электрическим приводом. Ось вращения звена закреплена на неподвижном основании. Двигатель привода через редуктор и систему передач вращает звено вокруг своей оси. Для простоты трением в элементах звена и динамикой электромагнитных процессов привода пренебрегаем, считаем, что масса звена сосредоточена в его конечной точке. Используем уравнение Лагранжа (1.1). Кинетическая и потенциальная энергия одного звена манипулятора для этого уравнения вычисляется по известным формулам

$$K = 0,5(J_p + m(t)l^2)\dot{q}^2, \quad (3.23)$$

$$P = m(t)gl \sin q, \quad (3.24)$$

где $m(t)$ – масса звена, как функция времени t , l – длина звена, q – угол поворота звена относительно горизонтальной оси, g – ускорение свободного падения, J_p – момент инерции привода.

Используя (1.1), (3.23), (3.24) несложно получить

$$L = K - P = 0,5(J_p + m(t)l^2)\dot{q}^2 - m(t)gl \sin q,$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = (J_p + m(t)l^2)\dot{q},$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = (J_p + m(t)l^2)\ddot{q} + \dot{m}(t)l^2\dot{q}, \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q} = -m(t)gl \cos q. \quad (3.26)$$

Принимаем, что движущий момент τ , создаваемый приводом связан с управляющим сигналом на этот привод u линейной зависимостью

$$\tau = ku, \quad (3.27)$$

где k – коэффициент пропорциональности. Подставляя (3.23)–(3.27) в (1.1), получаем

$$(J_p + m(t)l^2)\ddot{q} + \dot{m}(t)l^2\dot{q} + mgl \cos q = ku. \quad (3.28)$$

Уравнение (3.28) является динамической математической моделью объекта, в которой угол поворота звена q является выходной переменной, а управляющий сигнал на привод u – управляющим воздействием.

Для синтеза алгоритма управления нужно представить эти уравнения в пространстве состояний в виде SDC. Разделив правую и левую части (3.25) на

$$J_p + ml^2 \quad \text{и обозначая} \quad x_{01} = \dot{q}, \quad x_{02} = q, \quad a_1(t) = \frac{m(t)gl}{J_p + m(t)l^2}, \quad f_{x1} = -\frac{\dot{m}(t)l^2\dot{q}}{J_p + m(t)l^2},$$

$b(t) = \frac{k}{J_p + m(t)l^2}$, получаем математическую модель объекта управления в пространстве состояний

$$\begin{aligned} \dot{x}_{01} &= -a_1(t) \cos x_{02} + b(t)u + f_{x1}, \\ \dot{x}_{02} &= x_{01}, \\ y_0 &= x_{02}, \end{aligned} \quad (3.29)$$

Для представления в виде SDC первое слагаемое в (3.29) разделим и умножим на x_{02} при условии, что $x_{02} \neq 0$, в итоге получим уравнения объекта

$$\begin{aligned} \dot{x}_{01} &= a(\cdot) \cdot x_{02} + b(\cdot)u + f_{x1}, \\ \dot{x}_{02} &= x_{01}, \\ y_0 &= x_{02}, \end{aligned} \quad (3.30)$$

где

$$a(\cdot) = -\frac{a_1(t)}{x_{02}} \cos x_{02}, \quad b(\cdot) = \frac{k}{J_p + m(t)l^2} \quad x_{02} \neq 0, \quad (3.31)$$

значок “ $(\cdot)$ ” здесь и далее означает зависимость переменной с этим значком в общем случае от времени и других переменных. В векторно-матричном виде уравнения (3.30) выглядят так:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}'_0 \\ y'_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(\cdot) & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ u \end{bmatrix}, \quad (3.32)$$

$$\dot{x}_0 = \dot{x}'_0 + f_x, \quad y_0 = y'_0 + f_y,$$

где $f_x = [f_{x1} \ 0]^T$, f_y – возмущающие воздействия,

$$x_0 = \begin{bmatrix} x_{01} \\ x_{02} \end{bmatrix}, \quad A(\cdot) = \begin{bmatrix} 0 & a(\cdot) \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B(\cdot) = \begin{bmatrix} b(\cdot) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [0 \ 1]. \quad (3.33)$$

3.2.2 Получение обратных моделей объекта управления и фильтров-эталонов.

Уравнения обратной модели по каналу задания записываются следующим образом:

$$x = E(\cdot)\dot{x} + F(\cdot)y'_\phi, \quad u_1 = G(\cdot)\dot{x} + H(\cdot)y'_\phi, \quad (3.34)$$

по каналу отработки возмущений они выглядят так

$$\tilde{x} = E(\cdot)\tilde{x}' + F(\cdot)\Delta y'_\phi, \quad \Delta u = G(\cdot)\tilde{x}' + H(\cdot)\Delta y'_\phi, \quad \tilde{x}' = \tilde{x} - f_{x0}, \quad (3.35)$$

где x , $\tilde{x}$, f_{x0} – векторы состояния и оценки f_x соответствующих размерностей, u_1 , Δu – аддитивные составляющие управляющего сигнала, y'_ϕ , $\Delta y'_\phi$ – входные переменные обратных моделей, формируемые фильтрами-эталонами. Отметим, что обратные модели физически нереализуемы и являются промежуточными конструкциями для синтеза алгоритма управления. Матрицы в (3.34), (3.35) находятся решением функциональных уравнений

$$\begin{aligned} A(\cdot)E(\cdot) + B(\cdot)G(\cdot) &= 1, \quad C(\cdot)F(\cdot) = 1, \\ A(\cdot)F(\cdot) + B(\cdot)H(\cdot) &= 0, \quad C(\cdot)E(\cdot) = 0, \end{aligned} \quad (3.36)$$

где 1, 0 – соответственно единичная диагональная и нулевая матрицы соответствующих размерностей. Поставляя (3.33) в (3.36), имеем для данного объекта

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 & a(\cdot) \\ 1 & 0 \end{bmatrix} E(\cdot) + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} G(\cdot) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad [0 \ 1] F(\cdot) = 1, \\ \begin{bmatrix} 0 & a(\cdot) \\ 1 & 0 \end{bmatrix} F(\cdot) + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} H(\cdot) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad [0 \ 1] E(\cdot) = [0 \ 0]. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Решая (3.37), получаем

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad G(\cdot) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ b(\cdot) & 0 \end{bmatrix}, \quad H(\cdot) = -\frac{a(\cdot)}{b(\cdot)}. \quad (3.38)$$

Уравнения фильтра-эталона по каналу задания представлены уравнениями

$$\dot{x}_\phi = \Phi_1(\cdot)x_\phi + \Phi_2(\cdot)y', \quad y'_\phi = \Phi_3(\cdot)x_\phi + \Phi_4(\cdot)y', \quad (3.39)$$

по каналу обработки возмущений

$$\dot{\tilde{x}}'_\phi = \Phi_{r1}(\cdot)\tilde{x}_\phi, \quad \Delta y'_\phi = \Phi_{r3}(\cdot)\tilde{x}_\phi, \quad \tilde{x}'_\phi = \tilde{x}_\phi - f_{x\phi}, \quad (3.40)$$

где x_ϕ , $\tilde{x}_\phi$, $f_{x\phi}$ – векторы состояния и оценки f_x соответствующих размерностей, y' – входная переменная фильтра-эталона, зависящая от заданного и текущего углов поворота звена, а также от y' . Матрицы в (3.39), (3.40) находятся решением функциональных уравнений

$$E(\cdot)\Phi_1(\cdot) + F(\cdot)\Phi_3(\cdot) = 1, \quad E(\cdot)\Phi_{r1}(\cdot) + F(\cdot)\Phi_{r3}(\cdot) = 1, \\ E(\cdot)\Phi_2(\cdot) = 0, \quad \Phi_3(\cdot)\Phi_1^{-1}(\cdot)\Phi_2(\cdot) = -1, \quad \Phi_4(\cdot) = 0. \quad (3.41)$$

Поставляя (3.38) в (3.41), имеем для данного объекта

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\Phi_1(\cdot) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}\Phi_3(\cdot) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\Phi_{r1}(\cdot) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}\Phi_{r3}(\cdot) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\Phi_2(\cdot) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Phi_3(\cdot)\Phi_1^{-1}(\cdot)\Phi_2(\cdot) = -1, \quad (3.42)$$

Решая (3.42), получаем

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} \phi_1 & \phi_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Phi_2(\cdot) = \begin{bmatrix} -\phi_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \Phi_3(\cdot) = \Phi_{r3}(\cdot) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Phi_{r1} = \begin{bmatrix} \phi_{r1} & \phi_{r2} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.43)$$

В (3.43) ϕ_i – свободно задаваемые коэффициенты. Таким образом, фильтр-эталон (3.39) по каналу задания принимает вид

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{\phi 1} &= \phi_1 x_{\phi 1} + \phi_2 x_{\phi 2} - \phi_2 y', \\
\dot{x}_{\phi 2} &= x_{\phi 1}, \\
y'_{\phi} &= x_{\phi 2},
\end{aligned}
\tag{3.44}$$

по каналу отработки возмущений (3.40)

$$\begin{aligned}
\tilde{\dot{x}}_{\phi 1} &= \phi_1 \tilde{x}_{\phi 1} + \phi_2 \tilde{x}_{\phi 2}, \\
\tilde{\dot{x}}_{\phi 2} &= \tilde{x}_{\phi 1}, \\
\Delta y'_{\phi} &= \tilde{x}_{\phi 2}.
\end{aligned}
\tag{3.45}$$

Из (3.44), (3.45) следует, что фильтры-эталонны являются линейными фильтрами второго порядка с единичными коэффициентами передачи в статике. Выбором ϕ_i этих фильтров обеспечивается требуемое быстродействие и форма переходных характеристик замкнутой системы управления по каналам задания и возмущений. Такой выбор удобно производить, если фильтры представлены своей передаточной функцией в форме Вышнеградского [111, с. 12]

$$W(s) = \frac{\omega_{\phi 0}^2}{s^2 + \zeta_{\phi} \omega_{\phi 0} s + \omega_{\phi 0}^2}, \quad \phi_1 = -\zeta_{\phi} \omega_{\phi 0}, \quad \phi_2 = -\omega_{\phi 0}^2, \tag{3.18}$$

$$W(s) = \frac{\omega_{r\phi 0}^2}{s^2 + \zeta_{r\phi} \omega_{r\phi 0} s + \omega_{r\phi 0}^2}, \quad \phi_{r1} = -\zeta_{r\phi} \omega_{r\phi 0}, \quad \phi_{r2} = -\omega_{r\phi 0}^2, \tag{3.19}$$

где $\omega_{\phi 0}$, $\omega_{r\phi 0}$ – собственные частоты колебаний фильтров-эталонных соответственно по $y - f_y$ и f_x ; ζ_{ϕ} , $\zeta_{r\phi}$ – коэффициенты, характеризующие затухание. Эта форма удобна тем, что позволяет выбором $\omega_{\phi 0}$ и ζ_{ϕ} независимо задавать быстродействие и форму переходной характеристики каждого фильтра.

3.2.3 Определение алгоритма управления и анализ полученной системы управления.

Уравнения алгоритма управления представлены уравнениями

$$\dot{x}_{\phi} = R_1(\cdot)x_{\phi} + \Phi_2(\cdot)\varepsilon, \quad u = R_3(\cdot)x_{\phi} + N_1(\cdot)\tilde{x}_{0\phi} + P(\cdot)\varepsilon, \tag{3.46}$$

$$\begin{aligned}
R_1(\cdot) &= \Phi_1(\cdot) + \Phi_2(\cdot)\Phi_3(\cdot), \quad R_3(\cdot) = N(\cdot) + P(\cdot)\Phi_3(\cdot), \quad P(\cdot) = G(\cdot)\Phi_2(\cdot), \\
N(\cdot) &= G(\cdot)\Phi_1(\cdot) + H(\cdot)\Phi_3(\cdot), \quad N_1(\cdot) = G(\cdot)\Phi_{r1}(\cdot) + H(\cdot)\Phi_{r3}(\cdot), \\
\tilde{x}_{0\phi} &= x_0 - x_{\phi}, \quad \varepsilon = y - y_0.
\end{aligned}
\tag{3.47}$$

где y – заданное значение управляемой переменной.

Подставляя (3.38), (3.43) в (3.47), учитывая (3.21) и выполняя преобразования, получаем уравнения алгоритма управления данным звеном, заданным уравнениями (3.29)

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{\phi 1} &= \phi_1 x_{\phi 1} - \phi_2 \varepsilon, \\
\dot{x}_{\phi 2} &= x_{\phi 1}, \\
u &= \frac{1}{b(t)} \left(\phi_1 x_{\phi 1} + \left(\frac{a_1(t)}{x_{02}} \cos x_{02} \right) x_{\phi 2} + \phi_{r1} \tilde{x}_{01} + \left(\phi_{r2} + \frac{a_1(t)}{x_{02}} \cos x_{02} \right) \tilde{x}_{02} - \phi_2 \varepsilon \right), \\
\tilde{x}_{01} &= x_{01} - x_{\phi 1}, \quad \tilde{x}_{02} = x_{02} - x_{\phi 2}, \quad \varepsilon = y - y_0, \\
a_1(t) &= \frac{m(t)gl}{J_p + m(t)l^2}, \quad b(t) = \frac{k}{J_p + m(t)l^2}
\end{aligned} \tag{3.47}$$

Исследование системы управления объектом (3.29) с алгоритмом (3.47) выполняли на компьютерной модели в три этапа. На первом этапе исследовалось качество регулирования при $m = \text{const} = 0,8 \text{ кг}$, $l = 1 \text{ м}$, $J_p = 0,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $k = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$ при разных значениях задания. Принято в (3.18), (3.19): $\omega_\phi = 1$, $\omega_{r\phi} = 2$, $\varsigma_\phi = 1,73$. Тогда $a_1 = 7,84$, $b = 1$, $\phi_1 = -\varsigma_\phi \omega_\phi = -1,73$, $\phi_2 = -\omega_\phi^2 = -1$, $\phi_{r1} = -\varsigma_\phi \omega_{r\phi} = -3,46$, $\phi_{r2} = -\omega_\phi^2 = -4$. Такие параметры фильтра-эталона соответствуют “медленному” движению звена, но здесь наглядно видны все процессы управления.

Уравнения объекта для данных числовых параметров:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{01} &= -7,84 \cos x_{02} + u, \\
\dot{x}_{02} &= x_{01}, \\
y_0 &= x_{02}.
\end{aligned} \tag{3.48}$$

Уравнения регулятора:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{\phi 1} &= -1,73 x_{\phi 1} + \varepsilon, \\
\dot{x}_{\phi 2} &= x_{\phi 1}, \\
u &= -1,73 x_{\phi 1} + \left(7,84 \frac{\cos x_{02}}{x_{02}} \right) x_{\phi 2} - 3,46 \tilde{x}_{01} + \left(7,84 \frac{\cos x_{02}}{x_{02}} - 4 \right) \tilde{x}_{02} + \varepsilon, \\
\tilde{x}_{01} &= x_{01} - x_{\phi 1}, \\
\tilde{x}_{02} &= x_{02} - x_{\phi 2}, \\
\varepsilon &= y - y_0.
\end{aligned} \tag{3.49}$$

На рисунке 3.6b показаны переходные функции по каналу: задание – выход, полученные на компьютерной модели системы (3.48), (3.49). Задание на угол поворота звена изменялось ступенчато через одну секунду от нулевого момента времени от значения 0,001 радиан с амплитудой ступеньки от 1 до 6 радиан. На рисунке 3.6a представлены траектории управляющих воздействий, соответствующие разным амплитудам ступенек. Верхнее значение управляющего воздействия в момент времени 2 сек. соответствует ступеньке 1 радиан, второе сверху значение управления в момент 2 сек. соответствует амплитуде 2 радиана и так далее.

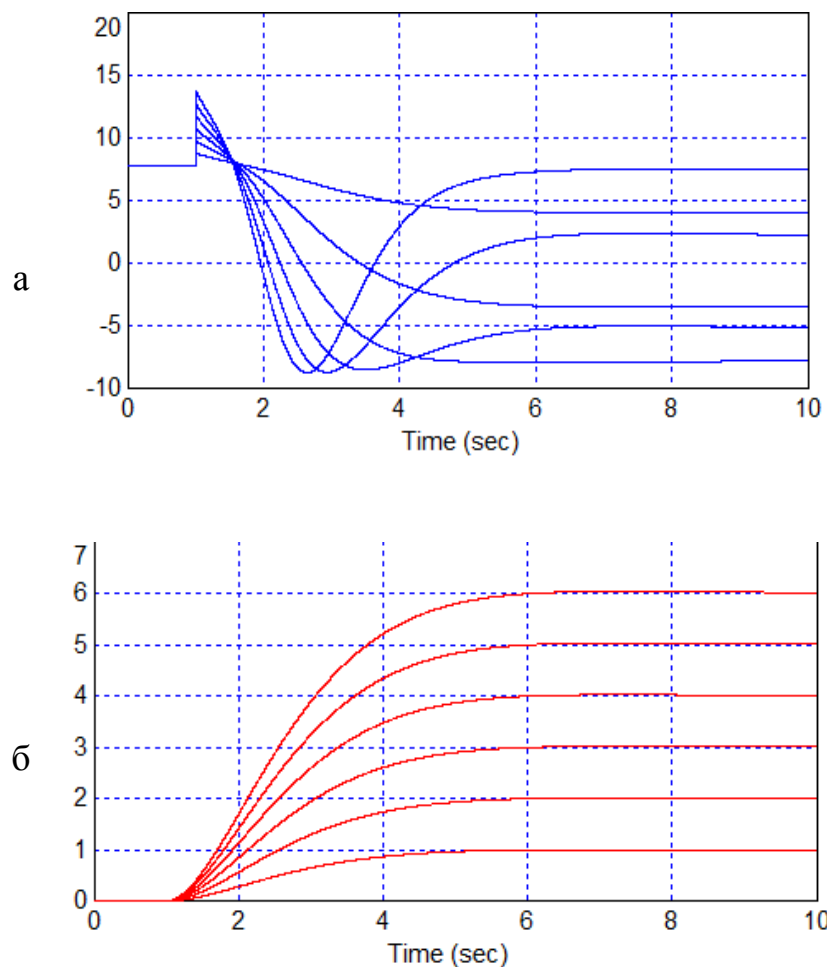


Рисунок 3.6 - а – управляющие воздействия, б – переходные функции системы управления (3.48), (3.49) при амплитуде ступеньки от 1 до 6 радиан с интервалом через один радиан. Каждая ступенька появлялась через одну секунду от нулевого момента времени

Из рисунка 3.6 видно, что в момент появления ступеньки звено разгоняется, затем замедляется, аperiodически приближаясь к своему установившемуся значению. Переходные функции соответствуют фильтру эталону (3.18) для данных параметров. В установившемся состоянии управляющее воздействие уравнивает силу тяжести звена.

На рисунке 3.7 показаны переходные функции системы (3.48), (3.49) при амплитуде ступеньки 1 радиан и изменении коэффициента a_1 на $\pm 30\%$ от своего номинального значения. Здесь использовался регулятор, рассчитанный при номинальном значении a_1 . Как видно, система сохраняет работоспособность при значительных параметрических возмущениях.

На втором этапе моделировалось “быстрое” движение звена. Параметры объекта остались теми же самыми, но использовался “быстрый” фильтр-эталон, в котором $\omega_\phi = 10$, $\omega_{r\phi} = 10$, $\zeta_\phi = 1,73$. Уравнения регулятора (3.49) теперь выглядят так:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{\phi 1} &= -17,3x_{\phi 1} + 100\varepsilon, \\
\dot{x}_{\phi 2} &= x_{\phi 1}, \\
u &= -17,3x_{\phi 1} + \left(7,84 \frac{\cos x_{02}}{x_{02}}\right)x_{\phi 2} - 17,3\tilde{x}_{01} + \left(7,84 \frac{\cos x_{02}}{x_{02}} - 100\right)\tilde{x}_{02} + 100\varepsilon, \quad (3.50) \\
\tilde{x}_{01} &= x_{01} - x_{\phi 1}, \\
\tilde{x}_{02} &= x_{02} - x_{\phi 2}, \\
\varepsilon &= y - y_0.
\end{aligned}$$

Результаты моделирования представлены на рисунке 3.8.

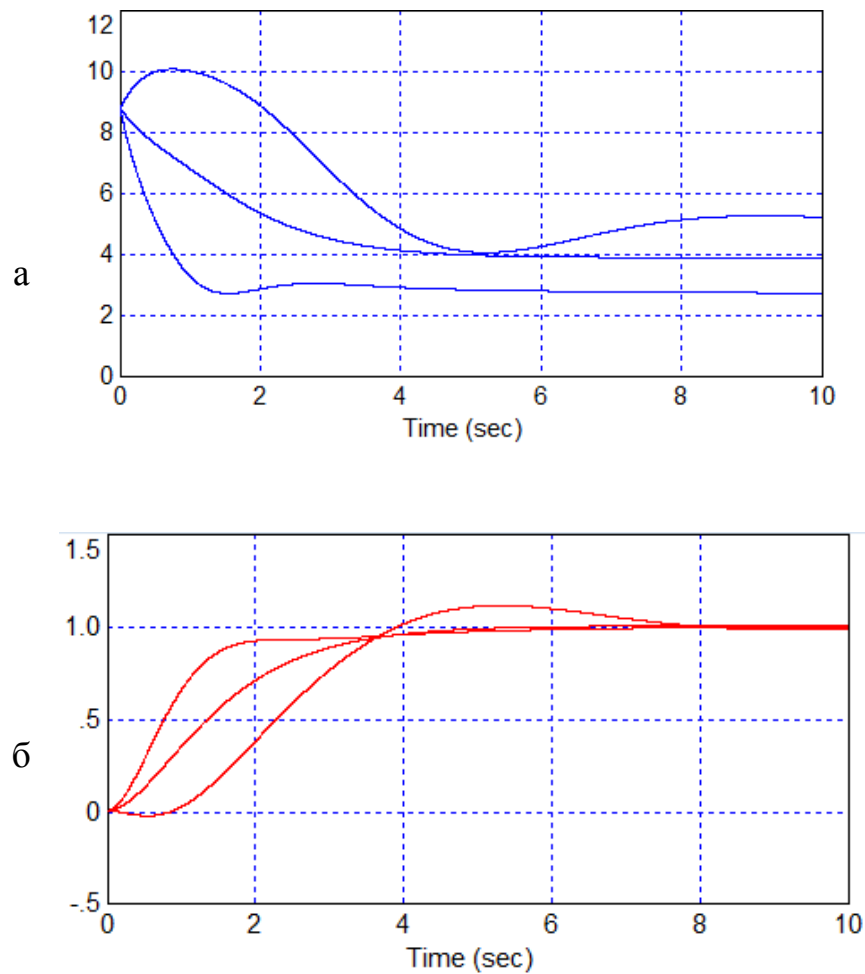


Рисунок 3.7 - а – управляющие воздействия, б – переходные функции системы управления (3.48), (3.49) при амплитуде ступеньки 1 радиан и значениях a_1 , равных: 5,18; 7,84 и 9,62 при расчетном значении 7,84. Каждая ступенька появлялась в нулевой момент времени

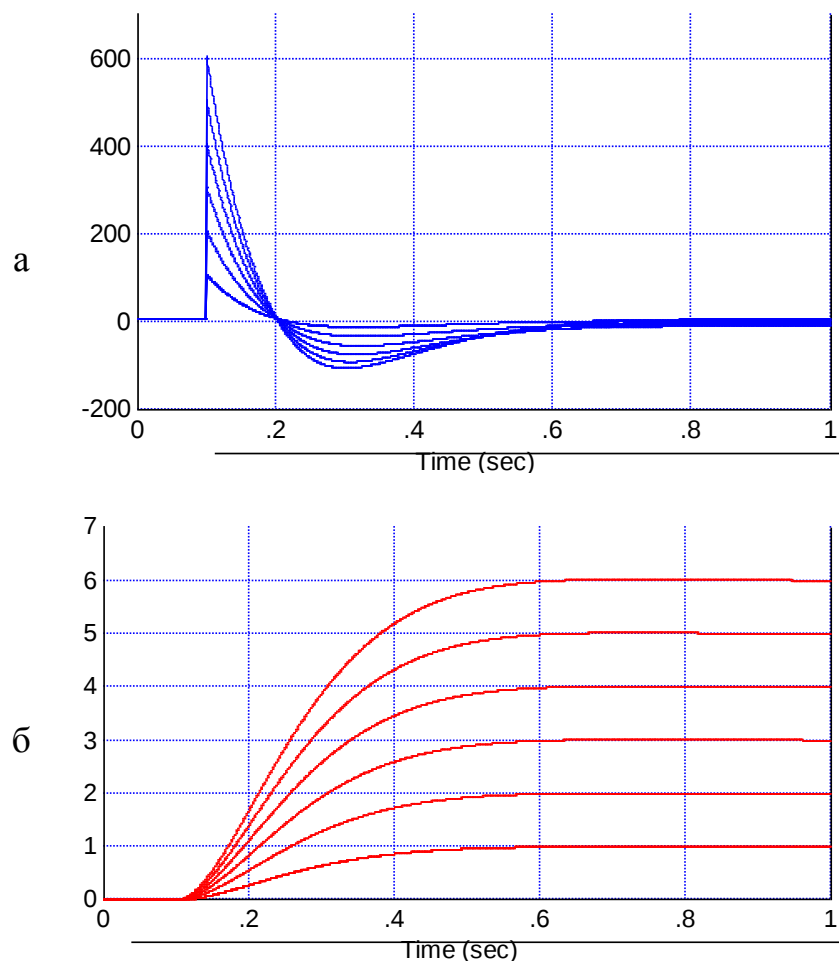


Рисунок 3.8 - а – управляющие воздействия, б – переходные функции системы управления (3.48), (3.50) при амплитуде ступеньки от 1 до 6 радиан с интервалом через один радиан. Каждая ступенька появлялась через одну десятую секунды от нулевого момента времени

Как видно, быстродействие системы увеличилось в 10 раз при сохранении формы переходных процессов. Ясно, что высокое быстродействие достигнуто увеличением амплитуды управляющего воздействия также приблизительно в 10 раз, то есть здесь нужен значительно более мощный привод поворота звена.

На третьем этапе моделировалась динамика работы нестационарной системы. Исходные данные соответствовали первому варианту, но масса звена в процессе движения звена изменялась согласно соотношению

$$m(t) = \begin{cases} 0,8 \text{ нпу} & 0 \leq t \leq 2,5, \\ 1,8 \text{ нпу} & 2,5 \leq t \leq 8, \\ 2,8 \text{ нпу} & t \geq 8. \end{cases} \quad (3.51)$$

На рисунке 3.9 представлены результаты моделирования системы с изменяющейся по (3.51) массой звена при ступенчатом изменении задания амплитудой 1 радиан.

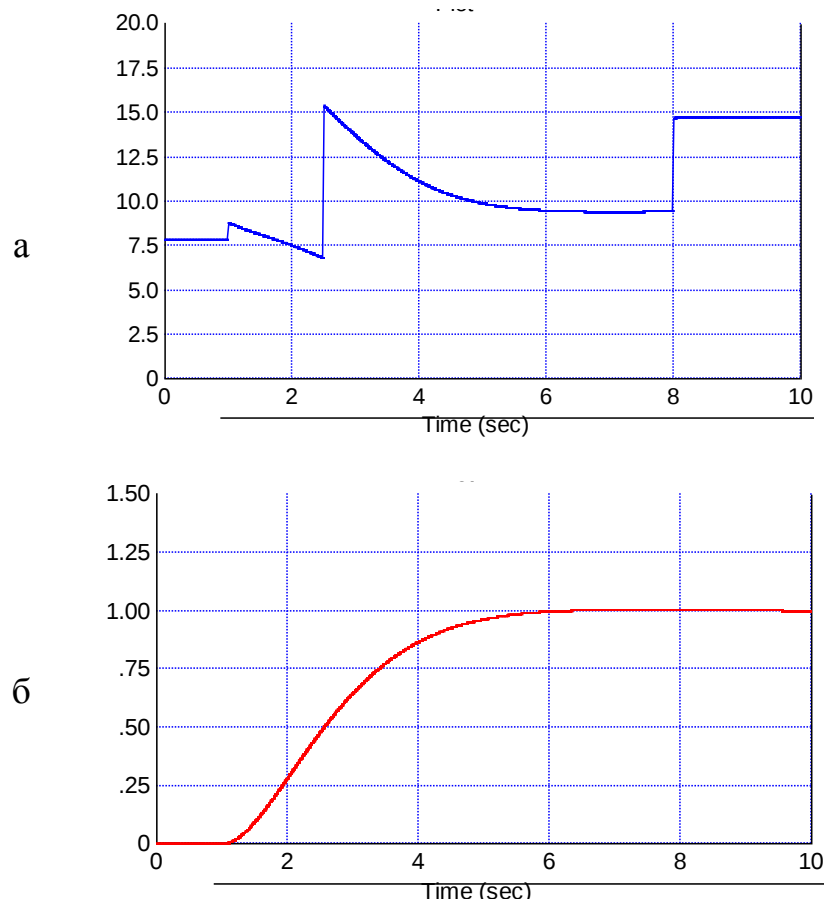


Рисунок 3.9 - а – управляющее воздействие, б – переходная функция нестационарной системы управления при амплитуде ступеньки 1 радиан. Ступенька появилась через одну секунды от нулевого момента времени

Как видно, система инвариантна к массе переносимого груза. Конечно, эта масса должна быть известна и должна вводиться в регулятор (3.49) в качестве параметра.

Полученные результаты показывают применимость предлагаемого метода КДОВ для разработки систем управления звеньями манипуляционного робота. Нужно отметить, что уже для одного звена алгоритм управления достаточно сложен, но его преимуществами являются физическая ясность каждого этапа синтеза и задания исходных данных, доступность для контроля используемых в алгоритме управления переменных, автоматический учет нестационарных свойств объекта. К преимуществам также следует отнести получение алгоритма управления алгебраическими методами с использованием правых частей дифференциальных уравнений объекта, заданных в пространстве состояний.

Выводы по подразделу 3.2:

Рассмотрена нестационарная математическая модель движения одного звена манипулятора на основе уравнений Лагранжа. Разработан алгоритм управления углом поворота звена аналитическим методом компенсации

динамики объекта и возмущений. В рамках этого метода получены обратные модели объекта, разработаны фильтры-эталоны замкнутой системы по каналам задания и возмущений, определен алгоритм управления звеном, как нелинейным нестационарным объектом. Компьютерным моделированием показано соответствие поведения системы управления своим фильтрам-эталонам в условиях аддитивных и параметрических возмущений, а также инвариантность ее работы к массе переносимого груза.

Выводы по разделу 3:

Разработан новый универсальный алгоритм синтеза системы управления линейным объектом управления второго порядка посредством метода КДОВ, позволяющий формировать задания для сервосистем управления кинематическими парами робота, обеспечивающий движение инструмента робота в заданном направлении.

В основе алгоритма лежит метод, базирующийся на компенсации всех внешних аддитивных воздействий и динамики объекта управления с точностью до фильтров-эталонов посредством обратной математической модели этого объекта.

Выполнен синтез алгоритма управления движением кинематической пары робота, учитывающий нелинейные нестационарные свойства этой пары. Алгоритм обеспечивает движение пары с высокой точностью в условиях переменной нагрузки на инструмент робота.

Математическая модель объекта управления была выведена с помощью уравнений Лагранжа и пространства состояний в виде параметров, зависящих от состояния (SDC), учитывая их точность решения, время расчетов и форму уравнения.

На основе метода компенсации динамики объекта и возмущений получен алгоритм для линейного объекта второго порядка общего вида, выполнено исследование замкнутой системы и рассмотрено применение этого алгоритма для создания системы автоматического регулирования движения робота в одном направлении.

Таким образом, подтверждено первое выносимое на защиту: синтез системы автоматического управления роботом-манипулятором на основе алгоритма компенсации динамики объекта и возмущений.

Результаты исследования, описанные в данном разделе, были доказаны и представлены в виде устного доклада на 14-й Международной конференции по прикладной информатике и соответствующим областям AIS 2019 и как пленарный доклад на VII международной научно-технической конференции студентов, магистрантов и молодых ученых (2021), и опубликованы работы [99, с. 472-481; 152, с. 62-67; 154, р. 572-579; 156, р. 81-87; 166, р. 191-214; 167-169].

4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РОБОТИЗИРОВАННОГО 3D СКАНИРОВАНИЯ

4.1 Разработка алгоритмов управления роботом-манипулятором Kawasaki для 3D сканирования с последующим плазменным напылением покрытий промышленных изделий

Практическая реализация задачи сканирования с последующим движением робота-манипулятора на заданном расстоянии от поверхности объекта при напылении покрытия была выполнена с применением индустриального робота Kawasaki, лазерного триангуляционного датчика расстояния и микроплазматрона, как описано в Главе 2 диссертации.

Собственно, задача 3D сканирования подразделяется на 3 подзадачи:

- 1) Генерация программы робота-манипулятора для сканирования поверхности изделия.
- 2) Выполнение 3D сканирования поверхности промышленного изделия
- 3) Построение аналитической 3D модели отсканированной поверхности.

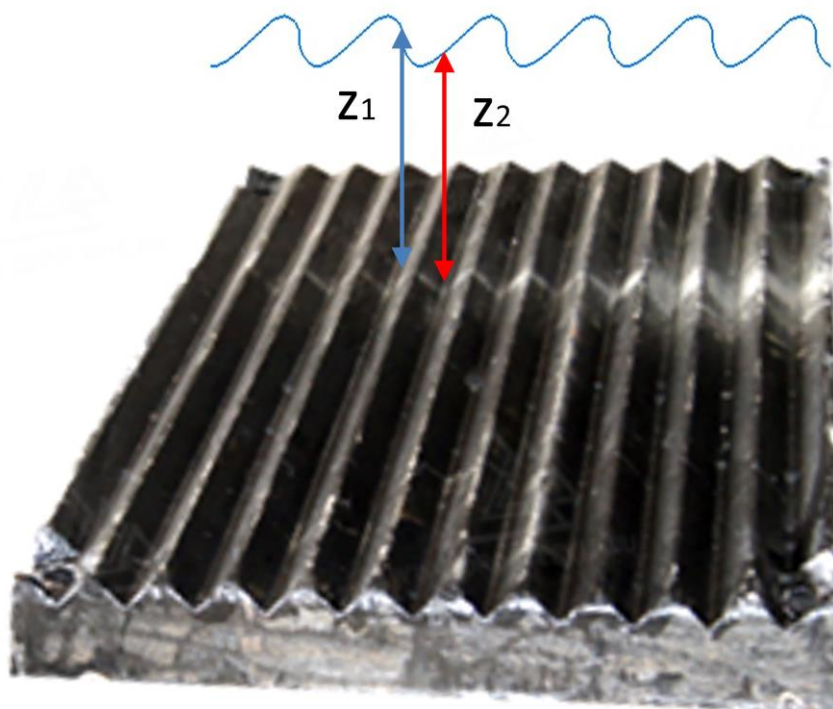
Практическая реализация управления на этапе сканирования осуществлялась путем программирования контроллера робота.

Следующим за сканированием этапом является этап планирования траектории напыления и автоматической генерации программы робота вдоль полученной на этапе сканирования 3D модели, научное теоретическое доказательство решений, предложенных для реализации данного 4-го этапа управления роботом приведено в диссертации Кадыроldиной А.Т. [152, с.58-76] и здесь не приводится.

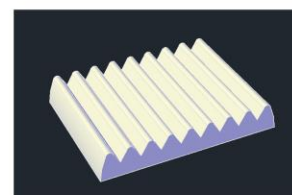
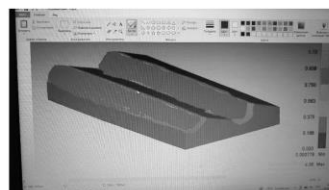
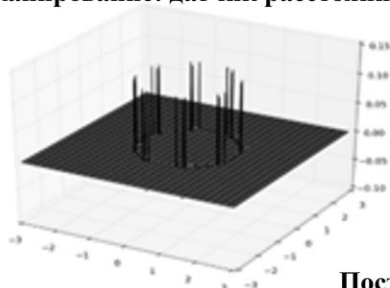
Наглядное представление о последовательности всех этапов управления роботом дают рис. 4.1 и рис. 4.2.

В соответствии с рисунками 4.1 и 4.2, в процессе сканирования траектория рабочего инструмента манипулятора (датчика расстояния) лежит в горизонтальной плоскости над сканируемой поверхностью. На первом этапе необходимо сгенерировать программу движения робота по U-образной траектории в плоскости. То есть надо запрограммировать контроллер Kawasaki на языке AS, чтобы описывать траекторию перемещения рабочего инструмента (датчика расстояния), с постоянной по модулю заданной скоростью перемещения и с заданным шагом (доходя до границы изделия, робот выполняет перемещение в обратном направлении, шаг – это расстояние, на которое один участок U-образной траектории отстоит от другого). 3D сканирование осуществляется путем замеров координат Z_i до поверхности плиты, в соответствии с рис. 4.1 и рис. 4.2, где также показан результат построения 3D моделей по данным сканирования. Далее, исходя из полученных данных, производится плазменное напыление путем движения плазматрона вдоль реконструированной 3D модели объекта на фиксированном расстоянии от поверхности (по оси Z).

Генерация перемещения по плоской траектории рабочего инструмента робота-манипулятора



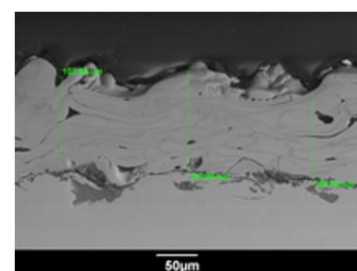
3D- сканирование: датчик расстояния измеряет координаты Z_i до поверхности плиты



Построение 3D модели по данным сканирования



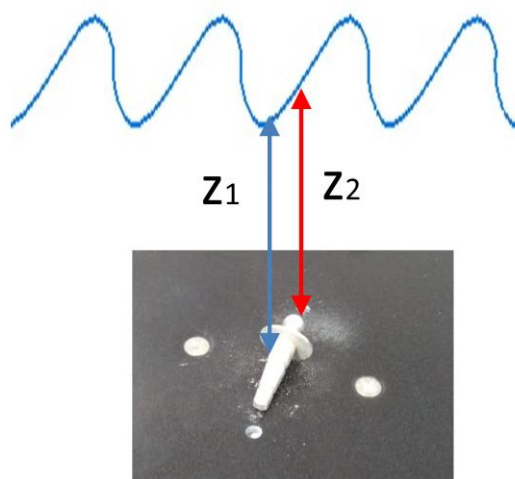
Схема процесса напыления: плазматрон движется вдоль 3D модели на фиксированном (по оси z) расстоянии от поверхности



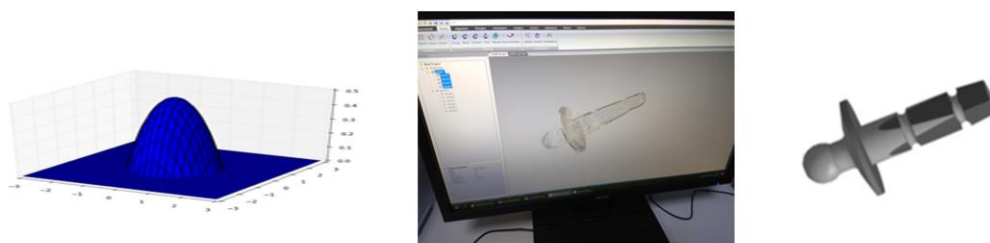
Покрытие на выступе плиты с указанием толщины покрытия

Рисунок 4.1 - Последовательность управления роботом-манипулятором при выполнении операций 3D сканирования и последующего плазменного напыления плиты щековой дробилки

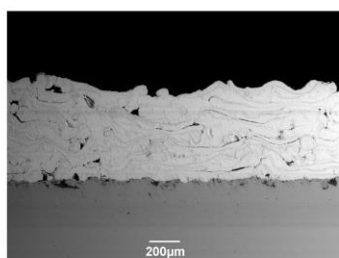
Генерация перемещения руки робота с датчиком расстояния по U-образной траектории в плоскости над объектом- имплантатом



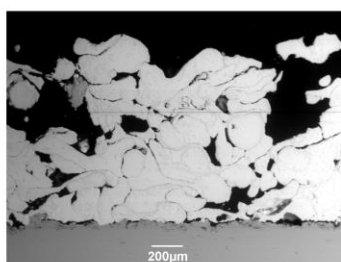
3D- сканирование: датчик расстояния замеряет координаты Z_i до поверхности имплантата



Построение 3D модели по данным сканирования



H=40мм



H=120мм



Имплантат с циркониевым покрытием

Структура покрытий, полученных при разных дистанциях напыления Н

Рисунок 4.2 – Этапы выполнения технологических операций: от 3D сканирования до готового циркониевого покрытия медицинского имплантата

На втором этапе, то есть при прохождении U-образной траектории, считываются данные датчика расстояния. «Контроллер робота-манипулятора позволяет по запросу считывать текущее пространственное положение рабочего инструмента, а лазерный триангуляционный датчик расстояния также позволяет выполнять измерение по запросу. В процессе сканирования от

компьютера последовательно выполняется пара запросов: 1) запрос на выполнение измерений к датчику расстояния и 2) запрос на передачу координат рабочего инструмента в контроллер манипулятора. Временной интервал между этими двумя запросами настолько мал, что предполагается, что расстояние измеряется именно в месте расположения датчика, определенного по координатам, полученным в ответ на второй запрос» [152, с.58]. Результатом процедуры сканирования является облако точек, то есть неупорядоченный набор троек декартовых координат точек на сканируемой поверхности.

Третий этап – это процедура сегментации, необходимая для дальнейшего формирования траектории движения манипулятора, так как в качестве входных данных для перемещения робота с плазматроном используется 3D модель поверхности, которую необходимо реконструировать. Применение метода сегментации дает возможность частично решить проблемы, которые возникли при реконструкции поверхностей, форма которых не может быть описана гладкой функцией двух переменных (поверхности с «изломами») [152, с.59]. Для выделения геометрически однородных участков сканируемой поверхности применялась вариация алгоритма роста регионов, как описано в диссертации.

Четвертый этап, то есть планирование траектории напыления и генерация перемещения робота с плазматроном вдоль 3D модели объекта на постоянном расстоянии H от поверхности, также описан в диссертации Кадыролдиной А.Т. и кратко в нашей совместной статье [154, р. 572-579].

Таким образом, основной задачей управления, описанию решения которой посвящен данный раздел, была генерация программы робота-манипулятора для сканирования поверхности изделия, для чего была необходима разработка о стратегии проведения сканирования поверхности и практическая реализация всех разработанных алгоритмов.

Так как непосредственным результатом процедуры 3D сканирования поверхности является так называемое облако точек - неупорядоченное множество троек пространственных координат точек поверхности, то можно выделить две стратегии проведения сканирования поверхности, проводимые посредством датчика расстояния, укрепленного на роботе - манипуляторе.

Во-первых, возможно проведение измерений расстояния от датчика до сканируемой поверхности при неподвижном манипуляторе. При таком методе сканирования рабочий инструмент манипулятора (датчик расстояния) перемещается между точками остановки, в которых и производится измерение расстояния, которые называют "узлами сетки сканирования". Как было показано в главе 1 данной диссертации, в большинстве работ, посвященных построению систем сканирования на базе робота-манипулятора применяется именно эта стратегия, причем точки сканирования лежат в одной плоскости в узлах прямоугольной сетки (чем и объясняется возникновение термина "узлы сканирования").

Альтернативной стратегией сканирования является проведение измерений с движущегося датчика расстояния, без проведения остановок манипулятора при прохождении узлов сканирования. Очевидно, что

проведение измерений расстояния до сканируемой поверхности с подвижного датчика привносит дополнительную погрешность измерений, величина которой зависит от скорости перемещения датчика и его быстродействия, но следует сразу отметить, что быстродействие современных лазерных триангуляционных датчиков расстояния при разумном выборе технологических параметров процесса сканирования позволяет сделать эту дополнительную погрешность измерений пренебрежимо малой. Две представленные стратегии проведения процедуры сканирования предполагают существенно разные подходы к решению задачи синхронизации данных о пространственном положении датчика расстояния (рабочего инструмента манипулятора) и измеренном датчиком расстоянии.

Во второй главе данной диссертации были приведены основные сведения о системе управления роботом-манипулятором Kawasaki (интерфейсе контроллера манипулятора и языка AS) и интерфейсе триангуляционных датчиков расстояния, необходимые для формулировки проблемы синхронизации и описания предложенных нами методов ее решения.

Существенно, что программа робота-манипулятора на языке AS представляет собой текстовый файл, содержащий последовательность команд, задающих движение рабочего инструмента манипулятора. Основная группа команд языка AS задает движение рабочего инструмента по фрагментам траектории, описываемых геометрическими примитивами - отрезками прямой (группа команд MOVE) или дугами окружностей (группа команд CIRCLE). В число операндов команд этой группы входит параметр скорости движения рабочего инструмента манипулятора, а также предполагается, что участок траектории, описываемый командой языка AS, проходится рабочим инструментом манипулятора с постоянной по модулю скоростью.

Надо сразу отметить, что язык AS позволяет задавать физически не осуществимые (например, из-за невозможности мгновенного изменения модуля или направления вектора скорости движения) временные параметры прохождения траектории. Практически, при исполнении манипулятором подобных программ, реальные временные параметры прохождения пространственной траектории не соответствуют задаваемым. Наглядным примером является прохождение траектории в виде ломаной линии, когда программно заданы равные скорости прохождения всех сегментов ломаной. При исполнении такой программы рабочий инструмент манипулятора совершает остановки в вершинах ломаной, а движение по сегментам происходит неравномерно - с участками разгона после остановки в узле и торможения перед следующим узлом.

Кроме того, контроллер робота Kawasaki позволяет считывать текущие координаты рабочего инструмента во время исполнения программы по запросу с ведущего компьютера (по интерфейсу RS-232). Примененные нами лазерные триангуляционные датчики расстояния оснащены последовательным интерфейсом (RS - 485) и обладают опцией выбора режима проведения измерений. В режиме одиночного измерения, измерение производится по

запросу с ведущего устройства (персонального компьютера) и сразу же после проведения измерения ведущему устройству передается пакет данных, содержащий информацию об измеренном расстоянии и текущем состоянии измерительного устройства. В режиме блочного измерения, серия измерений производится также по запросу ведущего устройства, но после проведения серии измерений на ведущее устройство передается пакет данных большего объема (содержащий результаты не одного измерения, а целой серии).

В любом случае, интерфейс передачи данных датчика расстояния строится по схеме "ведущий - ведомый" (master - slave), что позволяет объединять такие датчики в сеть или включать их в уже существующие сети. Как видно из изложенного выше, программы робота - манипулятора и опроса датчиков исполняются на разных устройствах (программа манипулятора исполняется контроллером робота, а опрос датчиков проводится с персонального компьютера, связанного с контроллером робота последовательным интерфейсом RS-232), вследствие чего возникает проблема синхронизации, а именно, необходимо знать пространственные координаты датчика, закрепленного на манипулятор в момент проведения измерения расстояния до сканируемой поверхности.

В разработанной нами системе сканирования применяется простая схема синхронизации, описанная ниже:

1) *Опрос датчика.* Процесс опроса датчика в ходе сканирования состоит из повторяющихся рабочих циклов. Каждый цикл состоит из двух тактов. В первом такте датчику посылается команда на проведение измерения и затем ожидается ответ датчика.

2) *Считывание текущих координат.* Непосредственно после получения ответного пакета данных, полученные данные перемещаются в буфер данных для последующего анализа, и программа переходит к исполнению второго такта цикла измерений - считыванию текущих координат рабочего инструмента манипулятора (датчика расстояния). Считывание происходит по схеме запрос - получение ответа, аналогичной описанной выше, но команда и данные передаются по другому порту персонального компьютера.

Связь с контроллером осуществляется через COM порт компьютера по интерфейсу RS-232, а для интерфейса с датчиком используется преобразователь RS-485 - USB. Для программной организации работы с USB применялся виртуальный COM - порт, поэтому программно взаимодействие с контроллером робота и датчиком выглядит как работа с двумя COM портами разных номеров.

Программное обеспечение естественным образом разделяется на два модуля: модуль генерации программы робота-манипулятора на языке AS и модуль сбора данных, осуществляющий считывание данных с триангуляционного датчика расстояния, укрепленного на роботе манипуляторе и данных о текущем положении датчика с контроллера робота. Общие принципы функционирования модуля сбора данных описаны выше, ниже

приводится описание модуля автоматической генерации программы робота-манипулятора.

Модуль генерирует программу, в ходе исполнения которой рабочий инструмент манипулятора проходит траекторию, все точки которой лежат в одной плоскости, которую мы будем в дальнейшем называть плоскостью сканирования. Траектория представляет собой набор U-образных фрагментов и состоит из рабочих сегментов (параллельных друг другу отрезков прямых, при прохождении которых проводится считывание данных с датчика расстояния) и сегментов маневрирования, соединяющих соседние рабочие сегменты траектории. В ходе процесса сканирования, ось датчика расстояния всегда ориентирована перпендикулярно плоскости сканирования, и мы будем называть проекцию участка сканируемой поверхности на плоскость сканирования рабочей областью сканирования.

В разработанной системе сканирования ориентация плоскости сканирования и размеры области сканирования задаются пользователем. Эти параметры задаются пространственными координатами трех реперных точек. Эти три точки задают плоскость сканирования и вершины параллелограмма, в плоскости сканирования, задающего область сканирования. Робот - манипулятор Kawasaki снабжен пультом управления и ПО для управляющего компьютера, что позволяет вручную выставлять положение реперных точек, считывая при этом их пространственные координаты (положение рабочего инструмента в системе координат контроллера робота). Другими входными параметрами модуля формирования траектории манипулятора являются шаг (расстояние между рабочими сегментами траектории), задаваемый в миллиметрах и скорость движения рабочего инструмента манипулятора по рабочим фрагментам траектории (задаваемая в миллиметрах в секунду). Ориентация рабочих сегментов (ориентация направляющего вектора параллельных прямых, на которых лежат рабочие сегменты траектории датчика в плоскости сканирования) задаются с помощью средств графического интерфейса пользователя (по умолчанию, направляющий вектор, задающий ориентацию рабочих сегментов, задается двумя первыми реперными точками).

Следует подчеркнуть, что выбор таких параметров сканирования как шаг (расстояние между рабочими сегментами траектории) и скорость прохождения рабочих сегментов траектории должны выбираться с учетом размеров сканируемой области и желаемого разрешения сканирования, и корректный выбор этих параметров оказывает серьезное влияние на качество реконструкции сканируемого участка поверхности. Собственно, программная генерация последовательности команд манипулятора для принятого метода формирования траектории оказывается достаточно тривиальной алгоритмической задачей.

Данные лазерных триангуляционных датчиков расстояния отличаются высокой степенью зашумленности. Вследствие этого, при реконструкции поверхности по облаку точек, полученному при проведении сканирования применяются статистические методы обработки. Заметим также, что в

некоторых методах сканирования с применением триангуляционных датчиков расстояния проводятся многократные измерения расстояния до поверхности в одном узле сканирования (с последующим соединением данных) Это обстоятельство (высокая точность измерений в среднем при наличии существенной случайной погрешности у применяемых датчиков расстояния) делает желательным уменьшение скорости движения датчика на рабочих сегментах траектории до пределов, устанавливаемых ограничениями на общее время проведения процедуры сканирования.

Для непосредственно генерации программы движения робота с датчиком, производится вывод «вручную» манипулятора на исходную реперную точку, в которой производятся пространственные измерения координат (положения рабочего инструмента в системе координат контроллера робота). Задаются размеры области сканирования пространственными координатами трех реперных точек. Ориентация направляющего вектора параллельных прямых, на которых лежат рабочие сегменты траектории датчика в плоскости сканирования, задается двумя первыми реперными точками. Далее контроллер Kawasaki программируется на языке AS, чтобы проходить U -образную траекторию перемещения рабочего инструмента (датчика расстояния), с постоянной по модулю заданной скоростью перемещения и с заданным шагом (доходя до границы изделия робот выполняет разворот по команде и движется в обратном направлении, шаг – это диаметр окружности CIRCLE. При этом перемещении $Z = \text{const}$. Задается ограничение по X, то есть расстоянию, на которое команда MOVE сдвигает датчик в соответствии с размерами сканируемого изделия и по Y, также в соответствии с размерами изделия и шагом, то есть пройти – «замостить» площадь сканирования робот может ограниченное число раз, чем проще геометрия поверхности, тем меньше число проходов сканирования и тем больше шаг. Разворот (маневрирование) происходит за пределами рабочей области сканирования, поэтому возникающие значения центростремительных ускорений не влияют на точность сканирования.

Приводим скриншот рабочих окон программы генерации движения для выполнения сканирования плиты щековой дробилки (рис. 4.3 и 4.4).

отмечалось выше разумно уменьшить скорость движения датчика на рабочих сегментах траектории и обеспечить набор большего количества точек для статистической обработки.

Было выполнено роботизированное плазменное напыление защитного хромового покрытия (см. раздел 2 диссертации) на поверхность (на изношенные участки) плиты, при этом перемещение плазматрона, установленного на руке робота, генерировалось автоматически вдоль восстановленной 3D модели изделия с поддержанием заданной дистанции напыления. Было выполнено роботизированное напыление биосовместимого циркониевого покрытия (см. раздел 2 диссертации) на поверхность имплантата локтевого сустава, которое осуществлялось путем вращения эндопротеза с заданной скоростью вокруг оси симметрии и перемещения робота в плоскости на дистанции $H=40$ мм и $H=120$ мм. Анализ толщины и микроструктуры полученных покрытий подтвердил успешность данной технологии, покрытие получается равномерным и его пористость может быть проконтролирована (рис. 4.1 и рис. 4.2). Для анализа эксплуатационных свойств покрытий, полученных по новой технологии, включающей этап роботизированного 3D-сканирования, были проведены производственные испытания в условиях «ИП Абакумов Р.А.» вышеописанной плиты с покрытием, выполняющей измельчение полиметаллических руд различной твердости. Был получен акт производственных испытаний № 1 от 01.10.2020, где был сделан вывод, что ресурс работы подвижной плиты щековой дробилки, восстановленной по новой технологии, что ресурс работы подвижной плиты щековой дробилки, которая была восстановлена по новой технологии, увеличен на 15% относительно тех плит, которые восстановлению не были подвержены (ПРИЛОЖЕНИЕ Б).

Выводы по подразделу 4.1

Разработан (и запрограммирован на языке AS) алгоритм управления, обеспечивающий генерацию программы перемещения промышленного робота-манипулятора Kawasaki, выполняющего процедуру 3D сканирования бесконтактным лазерным датчиком расстояния с заданными параметрами процесса сканирования (шаг, скорость, точность прохождения траектории).

Результаты тестирования новой системы 3D сканирования на базе робота-манипулятора на реальных объектах показали такие преимущества по сравнению с известными решениями, как невысокая стоимость оборудования (датчик расстояния стоит в десятки раз меньше видеокамер, используемых в системах машинного зрения) в сочетании с высокой скоростью сканирования: от 10 см/с до 1 м/с в зависимости от сложности геометрии объекта сканирования и с точностью измерений до 0,5 мкм и с шагом сканирования 30 мм. При применении предложенных методов сканирования, если сканируется площадь порядка 600 см², то датчик расстояния опрашивается 30 с⁻¹ и время сканирования составляет около 2-ух минут.

Результаты разработки и тестирования на реальных объектах новой системы 3D сканирования на базе робота-манипулятора и установленных на

работе бесконтактных датчиков расстояния показали преимущества в точности выполнения технологических процессов роботизированного напыления покрытий по новой технологии, включающей 3D сканирование, по сравнению с существующими решениями: была продемонстрирована возможность получать покрытия с желаемой толщиной и микроструктурой на поверхностях сложной формы, был получен акт производственных испытаний промышленного изделия (дробилки щековой), подтверждающий увеличение срока службы данной плиты.

4.2 Параметрическая идентификация объекта управления и исследование системы управления в программе симуляторе

В данном подразделе описываются результаты тестирования в программе симуляторе закона управления, разработанного в третьей главе, чтобы обеспечить движение на заданном расстоянии от поверхности. Для этого провели ряд расчетов, начиная от параметрической идентификации объекта управления до выявления показателей качества системы.

В подразделе 3.1 была частично представлена параметрическая идентификация объекта управления, а именно однозвенного или двухзвенного робота-манипулятора. Здесь мы решаем задачу для однозвенного манипулятора, чтобы обеспечить его перемещение на заданном расстоянии от поверхности. Для определения параметрической идентификации коэффициенты a_1, a_2, c_1 и c_2 в выражении (3.1) должны быть рассчитаны. Проведем операции, чтобы получить эти самые коэффициенты.

ОУ в пространстве состояний можно представить так:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ c_1 & c_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Чтобы определить передаточную функцию:

А) первую строку (4.1) представляем в операторном виде

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax + Bu \rightarrow Sx = Ax + Bu \quad (4.3)$$

В) путем переноса Ax в левую часть приводим к виду ниже:

$$\begin{aligned} Sx - Ax &= Bu \\ (SI - A)x &= Bu \end{aligned} \quad (4.4)$$

С) обе части (4.4) умножаем на $(SI - A)^{-1}$, чтобы привести к следующему виду, основываясь на равенстве $(SI - A)^{-1}(SI - A) = 1$:

$$(SI - A)^{-1}(SI - A)x = (SI - A)^{-1}Bu$$

$$x = (SI - A)^{-1}Bu \quad (4.5)$$

Д) во второй строке выражения (4.1) x приравняем к (4.5)

$$y = C(SI - A)^{-1}Bu \quad (4.6)$$

$$\text{Е) } W(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = C(SI - A)^{-1}B - \text{ПФ для (4.1)} \quad (4.7)$$

2. Далее необходимо выражение (4.7) представить в матричном виде, с помощью (4.2):

$$W(s) = \underbrace{[c_1 \quad c_2] * \underbrace{\left(s * \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \underbrace{\begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_B \right)^{-1}}_A}_{C} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

В результате приводим следующие выводы выражений:

$$\text{А) } \left(s * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right)^{-1} = \left(\begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right)^{-1} = \begin{bmatrix} s - a_1 & -a_2 \\ -1 & s \end{bmatrix}^{-1}$$

В (4.9) показано нахождение обратной матрицы:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} s - a_1 & -a_2 \\ -1 & s \end{bmatrix}^{-1} &= \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} s - a_1 & -a_2 \\ -1 & s \end{bmatrix}^T \\ \begin{bmatrix} s - a_1 & -a_2 \\ -1 & s \end{bmatrix}^{-1} &= \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} s & 1 \\ a_2 & s - a_1 \end{bmatrix} \\ \Delta \begin{bmatrix} s - a_1 & -a_2 \\ -1 & s \end{bmatrix} &= s(s - a_1) - a_2 = s^2 - a_1s - a_2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Выполняем следующие операции:

$$\text{В) } \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} s & 1 \\ a_2 & s - a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} s \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$C) \quad \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} c_1 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ a_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} (c_1 s + c_2 a_2) \quad (4.11)$$

В результате получили ПФ с требуемыми коэффициентами:

$$W(s) = \frac{c_1 s + c_2 a_2}{s^2 - a_1 s - a_2} \quad (4.12)$$

Далее используем метод стандартных коэффициентов.

Биномиальная стандартная форма определяется как $s^2 + 2w_0 s + w_0^2$, однако для достижения системы 20%-е перерегулирования необходимо задействовать постоянное значение 0,95 взамен значению 2, следовательно, получаем $s^2 + 0,95w_0 s + w_0^2$, где w_0 - собственная частота объекта управления. В таком случае передаточная функция объекта принимает следующий вид:

$$\frac{c_1 s + c_2 a_2}{s^2 + 0,95w_0 s + w_0^2} \quad (4.13)$$

Данный способ для идентификации считается удобным, поскольку, изменяя w_0 , мы изменяем максимальную скорость кривой разгона, однако, следует отметить, что форма кривой при этом не изменяется.

1. Путем приравнивания выражений двух последних вышеперечисленных выражений, находим собственную частоту

$$\begin{aligned} w_0^2 &= -a_2 \\ w_0 &= \sqrt{-a_2} \end{aligned}$$

Схема составления ПФ (4.13) в программе моделирования VisSim показана на рисунке 4.5.

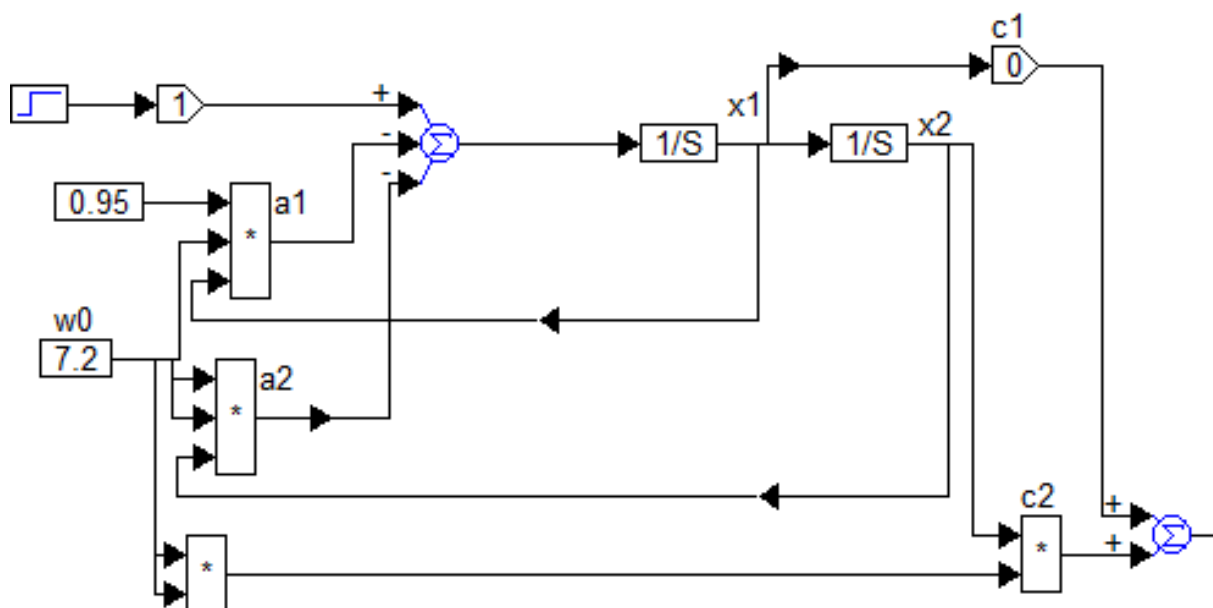


Рисунок 4.5 – Схема составления передаточной функции (4.13) в программе моделирования VisSim

При изменении параметра w_0 , подогнали полученную переходную функцию к касательной к переходной функции (синей линии), отображающей заданную скорость.

Необходимо учесть, что задавали значение параметра в «Свойствах» блока, время задержки, который показан рисунке 4.6.

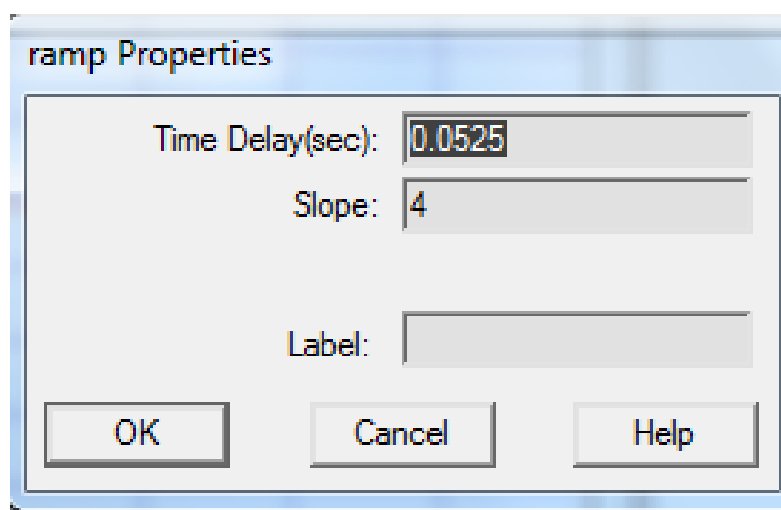


Рисунок 4.6 – Свойства  блока

На рис. 4.7 показан график, который был получен.

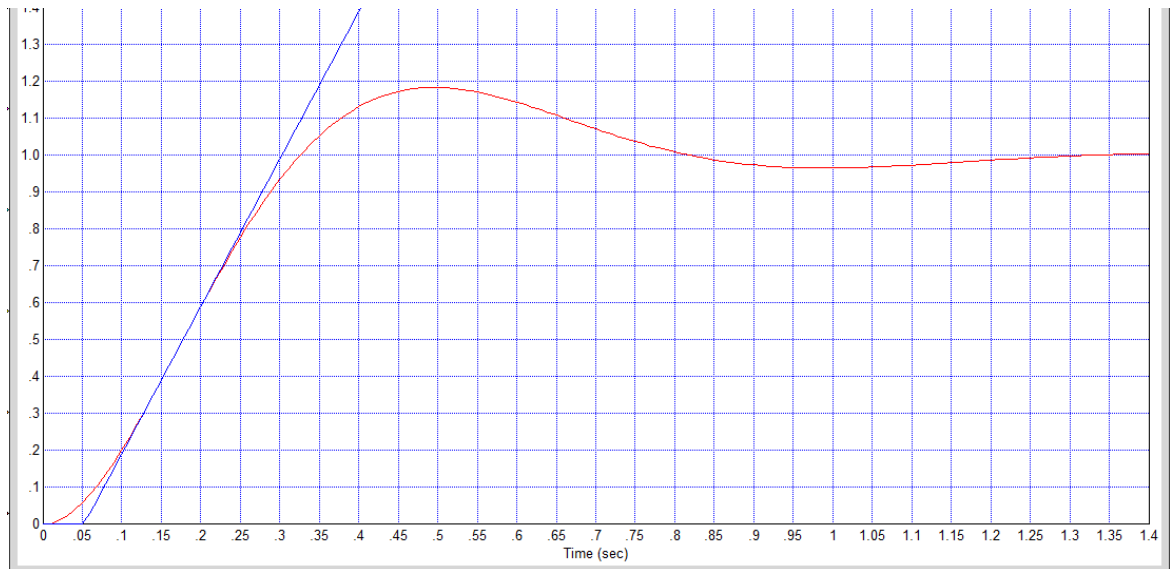


Рисунок 4.7 – Полученный переходный процесс ОУ

В результате получится выражение $w_0^2 = -a_2 = 7.2^2 = 51,84$, благодаря которой, рассчитываем искомые коэффициенты:

$$a_2 = -51,84.$$

$$a_1 = -0,95w_0 = -0,95 \cdot 7,2 = -6,84.$$

$$c_1=0, c_2=w_0^2 = 51,84$$

Найденные коэффициенты записываем в выражения (4.1, 4.2):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + u, \\ \dot{x}_2 = x_1, \\ y = C_1 x_1 + C_2 x_2, \end{cases} \rightarrow \quad (4.14)$$

$$\rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = -6,84x_1 - 51,84x_2 + u, \\ \dot{x}_2 = x_1, \\ y = 0 \cdot x_1 + 51,84x_2 = 51,84x_2, \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cc|c} -6,84 & -51,84 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 51,84 & 0 \end{array} \right] \quad (4.15)$$

Теперь нужно подобрать значения коэффициентов для фильтров-эталонов таким образом, чтобы их собственная частота была равна собственной частоте объекта управления, то есть

$$\phi_1 = \phi_{r1} - 1,45w_0 = -1,45 * 7,2 = -10,44$$

$$\phi_2 = \phi_{r2} = -w_0^2 = -51,84$$

Полученные значения коэффициентов записываем вместо буквенных в уравнениях параметров регулятора:

$$R_1 = \begin{bmatrix} \phi_1 - \frac{c_1}{c_2} \phi_2 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10,44 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.16)$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} -\frac{\phi_2}{c_2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{-51,84}{51,84} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.17)$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} \phi_1 - a_1 - \frac{c_1}{c_2} \phi_2 & -a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10,44 - (-6,84) & -(-51,84) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3,6 & 51,84 \end{bmatrix}. \quad (4.18)$$

$$P = -\frac{\phi_2}{c_2} = -\frac{-51,84}{51,84} = 1, \quad (4.19)$$

$$N_1 = \begin{bmatrix} -10,44 - (-6,84) & -51,84 - (-51,84) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3,6 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.20)$$

По методу КДОВ каждое уравнение представляем в матричном виде:

$$1) \begin{bmatrix} \dot{x}_{\phi 1} \\ \dot{x}_{\phi 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10,44 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\phi 1} \\ x_{\phi 2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \varepsilon \quad (4.21)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{\phi 1} \\ \dot{x}_{\phi 2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10,44x_{\phi 1} \\ x_{\phi 2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10,44x_{\phi 1} + \varepsilon \\ x_{\phi 2} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$\dot{x}_{\phi 1} = -10,44x_{\phi 1} + \varepsilon, \quad \dot{x}_{\phi 2} = x_{\phi 2} \quad (4.23)$$

$$2) u = \begin{bmatrix} -3,6 & 51,84 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\phi 1} \\ x_{\phi 2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -3,6 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - x_{\phi 1} \\ x_2 - x_{\phi 2} \end{bmatrix} + 1 * \varepsilon = \quad (4.24)$$

$$= (-3,6x_{\phi 1} + 51,84x_{\phi 2}) - 3,6(x_1 - x_{\phi 1}) + \varepsilon =$$

$$= -3,6x_{\phi 1} + 51,84x_{\phi 2} - 3,6x_1 + 3,6x_{\phi 1} + \varepsilon =$$

$$= 51,84x_{\phi 2} - 3,6x_1 + \varepsilon$$

В результате получаем:

$$\begin{cases} \dot{x}_{\phi 1} = -10,44x_{\phi 1} + \varepsilon \\ \dot{x}_{\phi 2} = x_{\phi 2} \\ u = 51.84x_{\phi 2} - 3.6x_1 + \varepsilon \\ \varepsilon = y - y_0 \end{cases} \quad (4.25)$$

Схема набора ПФ (4.25) в программе моделирования VisSim показана на рисунке 4.8.

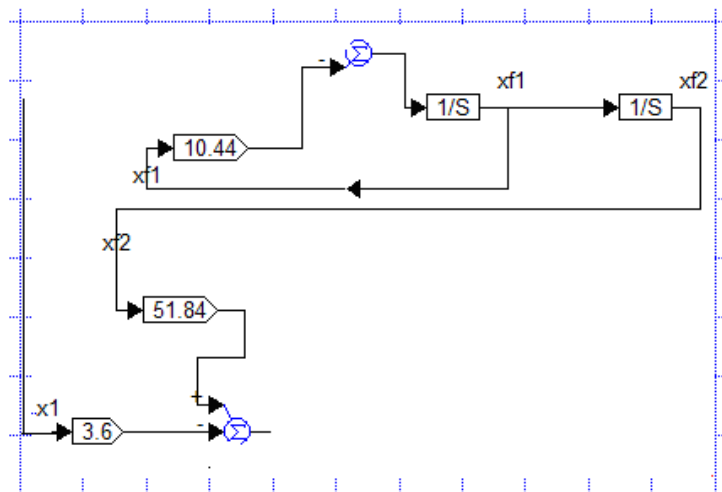


Рисунок 4.8 - Схема набора ПФ (4.25) в программе моделирования VisSim

В VisSim составим ОУ и регулятор, воспользовавшись структурой, представленной на рисунке 4.9.

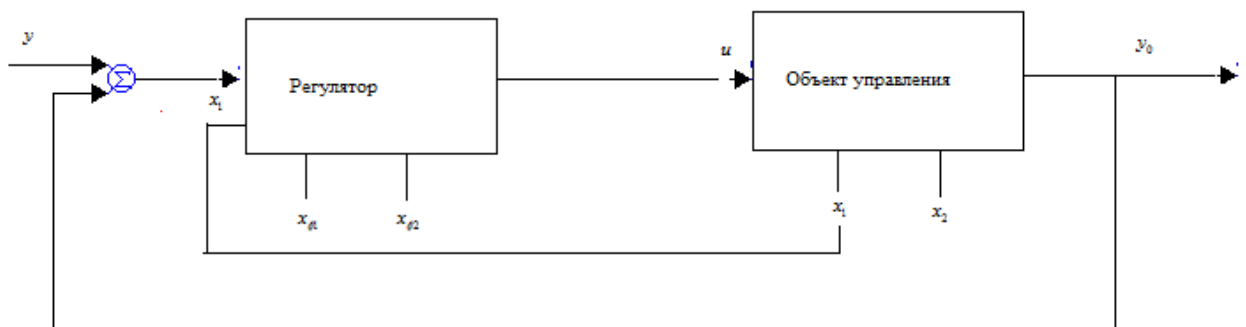


Рисунок 4.9 – Структура взаимодействия объекта управления и регулятора

По итогам проведения компьютерного моделирования передаточных функций объекта управления и регулятора, при соединении схемы набора передаточных функций, представленных на рисунках 4.5 и 4.6, образован график (см. 4.10), отображенный в программе VisSim, с помощью полученных

данных данного графика имеется возможность определения показателей качества управления:

1) Время регулирования t_p – минимальное время, по истечении которого выполняется неравенство

$$|h(t) - h_\infty| \leq \Delta,$$

где Δ - некоторая наперед заданная величина, равная $\Delta = 0,05 \cdot h_\infty$.

$$|h(t) - h_\infty| \leq \Delta$$

$$|h(t)| \leq \Delta + h_\infty$$

$$|h(t)| \leq 0,05h_\infty + h_\infty$$

$$|h(t)| \leq 1,05h_\infty$$

$$|h(t)| \leq 1,05 \cdot 4$$

$$|h(t)| \leq 4,2$$

$$|h(t) - h_\infty| \leq \Delta$$

$$|h(t)| \geq |\Delta - h_\infty|$$

$$|h(t)| \geq |0,05h_\infty - h_\infty|$$

$$|h(t)| \geq 0,95h_\infty$$

$$|h(t)| \geq 0,95 \cdot 4$$

$$|h(t)| \geq 3,8$$

В соответствии с рисунком 4.10, 4,2, то есть верхнее значение, не имеет пересечения с графиком, а 3,8, то есть нижнее, имеет. Таким образом, значению 3,8 соответствует время регулирования, равное $t_p = 0,42$ сек. Следовательно, данная СУ определяется как быстродействующая.

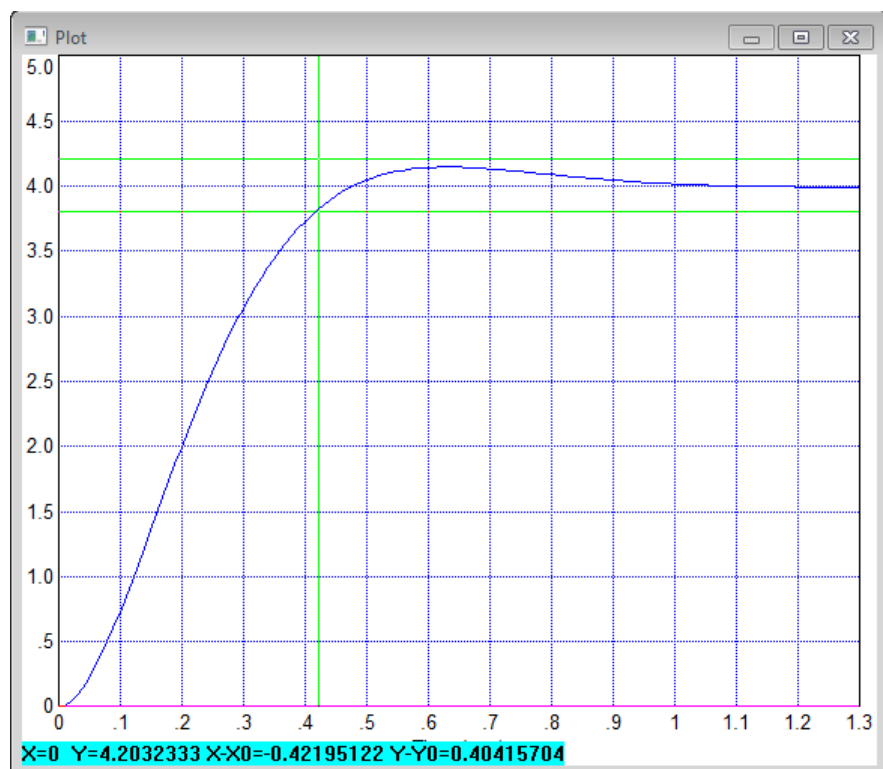


Рисунок 4.10 – Время регулирования t_p

2) На рисунке 4.11 показано перерегулирование переходной характеристики равное 4,145, а установившееся значение равно 4. В результате, перерегулирование рассчитывается так:

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{\infty}}{h_{\infty}} \cdot 100\% = \frac{4,145 - 4}{4} \cdot 100\% = 3,625\%$$

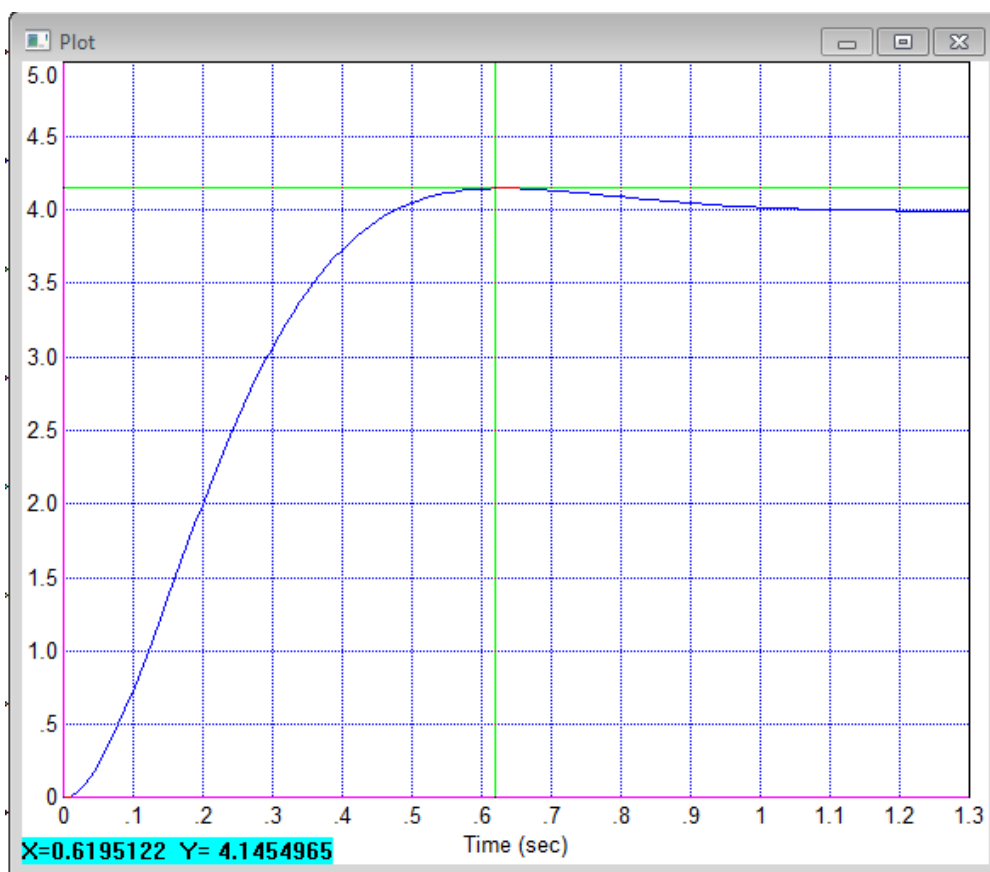


Рисунок 4.11 – Определение перерегулирования

Допустимое значение перерегулирования вычисляется в соответствии с особенностями технологического процесса или агрегата и как правило, оно соответствует диапазону значений от 10 до 30 %, однако, существуют случаи, при которых перерегулирование не допускается совсем. В рамках исследования значение перерегулирования крайне мало.

3) Для статических САР, в которых после окончания переходного процесса образуется ошибка регулирования, вводят дополнительный необходимый показатель качества, а именно установившуюся ошибку регулирования, которую определяют по уравнению $\varepsilon_{\infty} = h_{зад} - h_{\infty}$ и выражают в единицах измерения выходной величины.

$$\varepsilon_{\infty} = 4 - h_{\infty} = 4 - 4 = 0$$

Выводы по подразделу 4.2

Результаты тестирования посредством биномиальной стандартной формы в программе-симуляторе VisSim закона управления, разработанного в третьей главе, где робот-манипулятор был представлен как ОУ и был выполнен синтез алгоритма управления для него, показали, что СУ характеризуется высокой степенью устойчивости, высоким быстродействием и нулевой статической ошибкой, вид переходного процесса – апериодический сходящийся, из-за малого значения перерегулирования обеспечивается автоматическая стабилизация на заданном уровне и с заданной динамикой скорости в условиях действия возмущений посредством изменения управляющих воздействий на сервосистемы движения звеньев робота.

4.3 Разработка ПО для реализации разработанных алгоритмов управления

В данном разделе описывается программная реализация алгоритма управления движением кинематических пар роботов, применяемая для интерактивного взаимодействия с оператором робота. Данное ПО позволяет оператору осуществлять управление роботом в соответствии с выбранными параметрами системы автоматического управления. Как описано в главе 3 диссертации и частично в нашей статье [166, р. 191-214], был разработан новый универсальный алгоритм синтеза системы управления роботом-манипулятором методом компенсации динамики объекта и возмущений и определены показатели качества системы в симуляторе VisSim.

Для интерактивного взаимодействия с оператором робота при осуществлении управления перемещением робота-манипулятора по новому алгоритму, нами была разработана и зарегистрирована в государственном реестре Республики Казахстан программа для ЭВМ под названием «Расчет коэффициентов алгоритма управления однозвенным роботом-манипулятором» [171]. Область применения: системы управления манипуляционными роботами.

Назначением данной программы является создание алгоритмов управления движением кинематических пар роботов, обеспечивающих заданную пользователем динамику движения инструмента в процессе резки, сварки, напыления и других действий. Функциональные возможности: роботы широко используются обработки различных материалов. Как правило, кинематические пары роботов оснащены своими системами управления, настройка которых пользователям недоступна. Эти системы хорошо работают «в общем», но опыт показывает, что такие системы часто не обеспечивают специфических требований по динамике движения кинематических пар, возникающих в процессе обработки. Например, при вырезании отверстий сложной формы происходит «выбег» инструмента, в результате вырез получается неровным, с изгибами и прожогами, не предусмотренными программой резки. Предлагаемая программа позволяет реализовать оригинальный компенсационный алгоритм управления, позволяющий сразу, без настройки, реализовать заданную динамику движения инструмента робота, исключаящую «выбеги» и другие отклонения от заданной траектории.

Целью является вычисление коэффициентов алгоритма управления, обеспечивающего заданную пользователем динамику движения инструмента робота в процессе обработки различных материалов.

Для достижения данной цели используется оригинальный компенсационный алгоритм управления, сразу (без проб и ошибок) обеспечивающий требуемую траекторию движения инструмента робота с заданной пользователем динамикой. Исходными данными для расчета коэффициентов являются: коэффициенты a , b , c уравнений естественного движения кинематической пары робота; коэффициенты ϕ , ϕ_r задающие эталонное движение кинематической пары робота; предполагаемое максимальное значение изменения задающего воздействия $\Delta u_{\max}$. Для нормальной работы системы ϕ , ϕ_r должны быть отрицательными. Программа вычисляет коэффициенты r_1 , r_2 , r_3 , r_4 регулятора. Программой также предусмотрено построение графика зависимости амплитуды управляющего воздействия Δu от предполагаемого максимального значения изменения задающего воздействия $\Delta u_{\max}$. График позволяет выбрать значение ϕ , обеспечивающее работу системы в пределах возможностей привода данной кинематической пары робота.

На рисунке 4.12 показано окно для введения исходных данных и считывания результатов расчета.

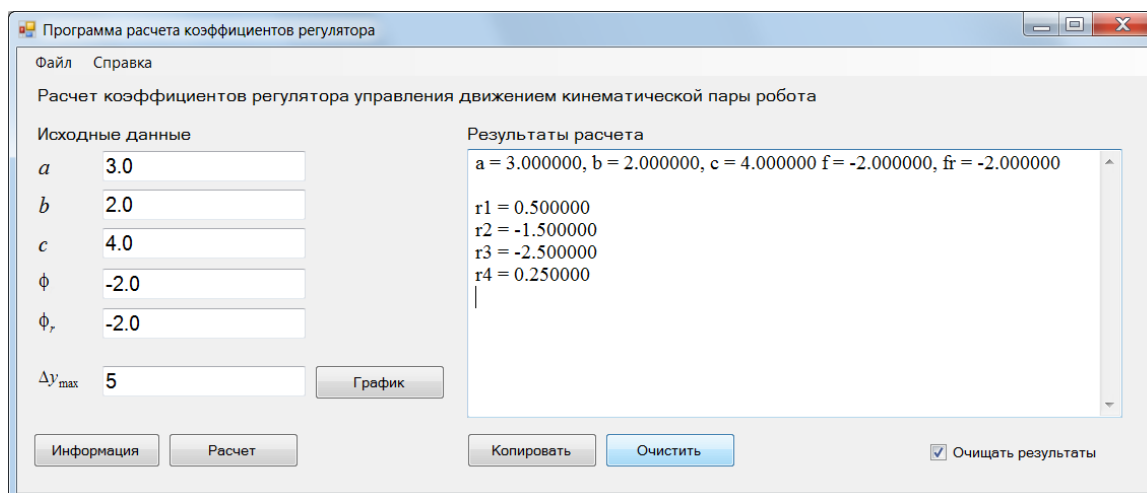


Рисунок 4.12 – Вид окна программы «Расчет коэффициентов регулятора» с примером расчета коэффициентов при заданных начальных условиях

На рисунке 4.13 представлен пример графика, поясняющего выбор параметра ϕ эталонного фильтра. Например, из графика видно, что при $\Delta u_{\max} = 2,95$ ед. амплитуда управляющего воздействия Δu не будет превышать двух единиц.

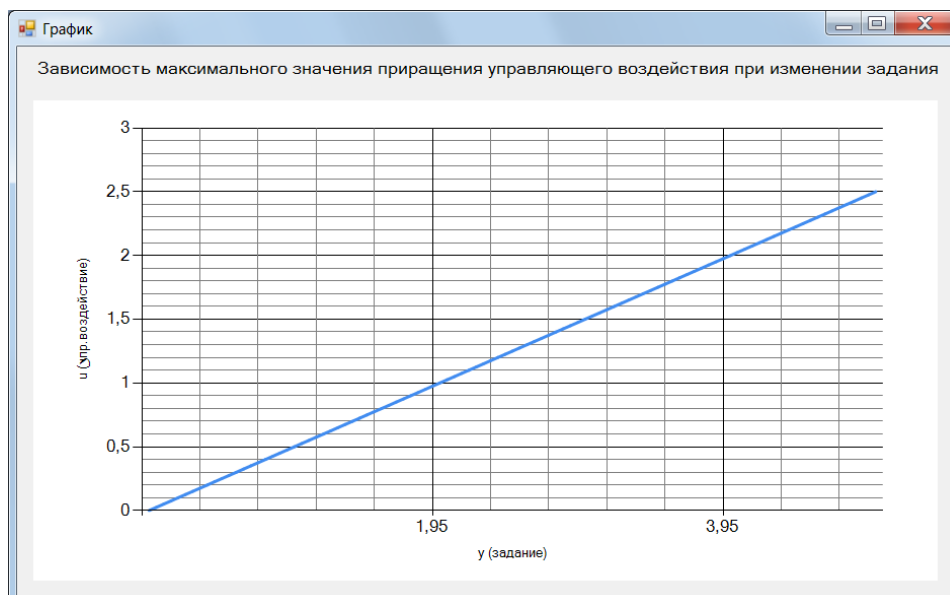


Рисунок 4.13 – Вид окна программы «График» с графиком, поясняющим выбор параметров эталонного фильтра

Интерфейс программы предоставляет пользователю окно «Информация» (Рис. 4.14), содержащее пояснение к исходным данным определения коэффициентов и уравнения управления, поясняющие алгоритм расчета, что позволяет использовать данную программу также в обучающих целях.

Далее алгоритм управления с рассчитанными программой параметрами преобразуется в исходные коды, обеспечивающие управление кинематическими парами робота-манипулятора, что позволяет осуществить интерактивное взаимодействие оператора с роботом-манипулятором.

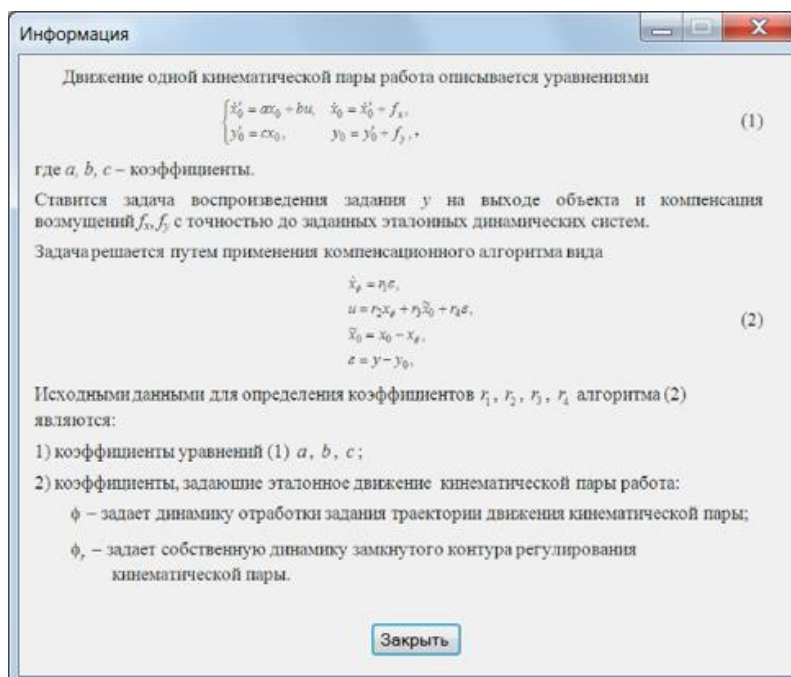


Рисунок 4.14 – Вид окна «Информация»

Основные технические характеристики: (ОС)Windows 7 и более новые версии с установленной платформой .NET 4.8 (или старших версий), робот-манипулятор Kawasaki RS-010LA с ПО AS и микроконтроллером E40F-A001

Язык программирования: Microsoft Visual Studio/C#.

Тип реализующей ЭВМ: IBM PC совместимая, объем оперативной памяти RAM 2 ГБ и выше; объем дискового пространства: 40 ГБ; объем видеопамати не менее 128 МБ.

Таким образом, данная программа реализует оригинальный компенсационный алгоритм управления, который описан в третьей главе диссертации, обеспечивающий заданную пользователем динамику движения инструмента робота в процессе обработки (например, плазменной резки, сварки, напыления) различных материалов, предоставляя доступный пользователю интерфейс для расчета коэффициентов автоматического регулятора (см. рисунок 4.12), дает возможность пользователю получить графическую зависимость управляющего воздействия от задающего воздействия для выбора параметров эталонного фильтра системы управления (см. рисунок 4.13), а также получить информацию непосредственно о реализуемом алгоритме управления, что позволяет использовать данную программу для управления однозвенными роботами-манипуляторами, выполняющими плазменную резку или обработку поверхности, а также в учебных целях для обучения студентов в вузах по техническим специальностям, связанным с автоматизацией технологических процессов (см. рисунок 4.14).

Выводы по подразделу 4.3

Разработано программное обеспечение, предназначенное для интерактивного взаимодействия с оператором робота. Разработано, создано ПО на языке программирования: Microsoft Visual Studio/C#, реализующее оригинальный компенсационный алгоритм управления, обеспечивающего заданную оператором динамику движения инструмента робота в процессе обработки (плазменной резки, сварки, напыления) различных материалов, предоставляющее доступный оператору интерфейс для расчета коэффициентов автоматического регулятора.

Выводы по разделу 4

Разработан алгоритм управления, обеспечивающий генерацию программы перемещения промышленного робота-манипулятора Kawasaki для выполнения процедуры 3D сканирования, отличающийся от существующих тем, что генерация программы перемещения рабочего инструмента робота (бесконтактного датчика расстояния) обеспечивает перемещение рабочего инструмента манипулятора (лазерного датчика расстояния) по заданной криволинейной траектории в плоскости с заданными параметрами процесса сканирования (шаг, скорость, точность прохождения траектории).

Получена совокупность результатов апробации на модельных и реальных объектах системы автоматического управления движением робота-манипулятора, выполняющего задачи 3D сканирования объектов сложной геометрической формы с последующим плазменным напылением их поверхности, которая подтверждает преимущества новой технологии в точности выполнения технологических процессов по сравнению с существующими решениями.

Результаты опубликованы в статьях [99, с. 472-481; 153, с. 62-67; 154, р. 26-29; 155, р. 572-579; 157, с. 81-87; 158, с. 95-98; 160, с. 7-19; 161, р. 1-10; 166, р. 191-214; 167, с. 190-194; 168, р. 280-286; 169, б. 539-543; 170, р. 39-42].

Результаты имеют практическое значение: в «ИП Абакумов Р.А.» проведены производственные испытания промышленного изделия (дробилки щековой), на поверхность которого наносилось покрытие с использованием робота-манипулятора, перемещающегося по 3D модели изделия, полученной в результате предварительного 3D сканирования, подтверждающие увеличение срока службы плиты щековой дробилки с плазменным покрытием изношенной поверхности (Акт производственных испытаний «ИП Абакумов Р.А.», № 1 от 01.10.2020).

Для внедрения в практику предлагается: свидетельство о государственной регистрации на объект авторского права № 5803 от 15 октября 2019 г. Вид объекта: программа для ЭВМ. Название объекта: «Расчет коэффициентов алгоритма управления однозвенным роботом-манипулятором» Авторы: Алонцева Д.Л., Шадрин Г.К., Құсайын-Мұрат Ә.Т. (ПРИЛОЖЕНИЕ Г).

Таким образом, подтверждено второе, выносимое на защиту, положение: результаты разработки и тестирования на модельных и реальных объектах системы 3D сканирования на базе робота-манипулятора и установленных на роботе бесконтактных датчиков расстояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1) Универсальный алгоритм синтеза системы управления объектом управления методом компенсации динамики объекта и возмущений, применимый для одно- и многомерных объектов управления, в которых количество регулируемых переменных равно количеству управляющих воздействий. Метод, лежащий в основе алгоритма, основывается на компенсации всех внешних аддитивных воздействий и динамики объекта управления с точностью до фильтров-эталонов посредством обратной математической модели этого объекта. Анализ последовательных шагов алгоритма позволяет выявить динамические свойства полученной системы и качество компенсации сигналов в идеальном случае, когда структура и параметры объекта равны их расчетным значениям.

2) Алгоритм управления, обеспечивающий генерацию программы перемещения промышленного робота-манипулятора Kawasaki для выполнения процедуры 3D сканирования, отличающийся от существующих тем, что генерация программы перемещения рабочего инструмента робота (бесконтактного датчика расстояния) обеспечивает перемещение рабочего инструмента манипулятора (лазерного датчика расстояния) по заданной криволинейной траектории в плоскости с заданными параметрами процесса сканирования (шаг, скорость, точность прохождения траектории);

3) Совокупность результатов апробации на модельных и реальных объектах системы автоматического управления движением робота-манипулятора, выполняющего задачи 3D сканирования объектов сложной геометрической формы с последующим плазменным напылением их поверхности, обладающая преимуществами в точности выполнения технологических процессов по сравнению с существующими решениями.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1) выполнен синтез системы автоматического управления движением в данном направлении инструмента и звена робота-манипулятора на основе алгоритма компенсации динамики объекта и возмущений;

2) разработан алгоритм управления, обеспечивающий генерацию программы перемещения промышленного робота-манипулятора Kawasaki, выполняющего процедуру 3D сканирования бесконтактным лазерным датчиком расстояния с заданными параметрами процесса сканирования (шаг, скорость, точность прохождения траектории);

3) получена совокупность результатов апробации на модельных и реальных объектах системы автоматического управления движением робота-манипулятора, выполняющего задачи 3D сканирования объектов сложной геометрической формы с последующим плазменным напылением их поверхности, обладающая преимуществами в точности выполнения технологических процессов по сравнению с существующими решениями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Teulieres M., Tilley J., Bolz L., Ludwig-Dehm P. M., Wagner S.. Industrial robotics – insights into the sector’s future growth dynamics// Advanced Industries, Copyright McKinsey & Company. – 2019. -36 p.
2. Инновационное учебное оборудование для промышленности «Зарница». Разработка и производство оборудования в области технологического и экологического надзора и промышленной безопасности. <https://zarnitza.ru/upload/iblock/7da/7dafcfe0697add328f8c92b1858a7e85.pdf>. 14.05.2019.
3. A guide to robotics and automation. https://www.distrelec.de/medias/robotics-guide-en.pdf?context=bWFzdGVyfHJvb3R8ODA3MTg2OHxhcHBsaWNhdGlvbi9wZGZ8aGZkL2g2Ni85NDEyMDgwNDY3OTk4LnBkZnwyM2JmYTcxZDNkYTFIMDk1MTFIMTIwNmM2ZThiMjg2ZjAwZTc1NTI5NWU2MDQzOGM4ZTFkZTc2YWlyMmQxY2Yw&int_cid=1829currentcontent.intext-roboticsebooken. 14.05.2019.
4. Дорошенко Ф. Н., Беляев И. Г. Основы управления манипуляционными роботами. - М.: 2016. – 284 с.
5. Horton R. The robots are coming. - London: Deloitte, 2015. - 328 p.
6. Walker Ian D. Continuous Backbone “Continuum” Robot Manipulators // Hindawi Publishing Corporation ISRN Robotics. -2013. - Vol. 2013. - P.1-19 DOI:[10.5402/2013/726506](https://doi.org/10.5402/2013/726506)
7. Chromy A., Zalud L. Robotic 3D scanner as an alternative to standard modalities of medical imaging // Springerplus. -2014. - Vol. 3. - P. 1-10 DOI:[10.1186/2193-1801-3-13](https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-13)
8. Chromy A. Application of High-Resolution 3D Scanning in Medical Volumetry // INTL Journal of Electronics and Telecommunications. - 2016. - Vol. 62, №1. - P. 23-31 DOI:[10.1515/eletel-2016-0003](https://doi.org/10.1515/eletel-2016-0003)
9. Stumm S., Neu P., Brell-Cokcan S. Towards Cloud Informed Robotics // Proc. 34th International Symposium on Automation and robotics in Construction. - Taipei, 2017. - P. 59-64 DOI:[10.22260/ISARC2017/0008](https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0008)
10. Feng C., Xiao Y., Willette A., McGee W., Kamat V.R. Vision guided autonomous robotic assembly and as-built scanning on unstructured construction sites // Automation in Construction. – 2015. - Vol. 59. - P. 128–138 <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2015.06.002>
11. Reyes A.L., Cervantes J. M., Gutierrez N. C. Low cost 3D scanner by means of a 1D optical distance sensor procedural technology // IJIRST. - 2013.- Vol. 6. – P. 223–230 DOI:[10.1016/j.protcy.2013.04.028](https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.04.028)
12. Rahayem M.R., Kjellander J.A.P. Quadric segmentation and fitting of data captured by a laser profile scanner mounted on an industrial robot // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2010. - Vol. 52. – P. 155-169. DOI:[10.1007/s00170-010-2713-4](https://doi.org/10.1007/s00170-010-2713-4)

13. Chen W., Li X., Ge H., Wang L., and Zhang Yu. Trajectory Planning for Spray Painting Robot Based on Point Cloud Slicing Technique // Electronics. – 2020 – vol. 9, no. 6 – P. 908 <https://doi.org/10.3390/electronics9060908>
14. Робототехника: фантастика, которая станет реальной
Робототехника: история развития, прогноз рынка, основные игроки
(gazprombank.investments) 26.11.2021
15. Alontseva D.L., Ghassemieh E., Russakova A., Krassavin A., Prokhorenkova N. Developing a new resource- and energy-saving technology of precision application of powder coating multifunctional systems. // Special Issue of the 7th International Advances in Applied Physics and Materials Science – 2018. – vol. 134. – P. 374-378 doi: 10.12693/APhysPolA.134.374
16. Alontseva D.L., Prokhorenkova N.V. Forming Strengthening Nanoparticles in the Metal Matrix of Plasma deposited Powder Alloys Coatings. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. - vol. 87. – P.1-9 DOI:[10.1088/1757-899X/87/1/012026](https://doi.org/10.1088/1757-899X/87/1/012026)
17. Zhao R. Trajectory planning and control for robot manipulations: doctoral thesis: 24.09.2015 / Université Paul Sabatier. – Toulouse, 2015. - 158 p.
18. Campa R., Ramirez C., Camarillo K., Santibanez V., Soto I. Motion Control of Industrial Robots in Operational Space: Analysis and Experiments with the PA10 Arm / Advances in Robot Manipulators, Ernest Hall (Ed.). - InTech, 2010. - P. 417-442 DOI:[10.5772/9666](https://doi.org/10.5772/9666)
19. Liu Zh.G, Huang J.M. A New Adaptive Tracking Control Approach for Uncertain Flexible Joint Robot System // International Journal of Automation and Computing. - 2015. - Vol. 12(5). - P. 559-566 DOI:[10.1007/s11633-015-0898-6](https://doi.org/10.1007/s11633-015-0898-6)
20. Wang Zh., Liu W., Cui B., He J., Li Zh., and Zhao Yo. Research on Robot Surface Tracking Motion Based on Force Control of Six-Axis Wrist Force Sensors // Advances in Mechanical Engineering. – 2014. - P.1-9. DOI:[10.1155/2014/249696](https://doi.org/10.1155/2014/249696)
21. Gasparetto A., Boscariol P., Lanzutti A., Vidoni R. Trajectory planning in Robotics // Mathematics in Computer Science. – 2012. – vol. 6 (3). – P. 1-12 DOI:[10.1007/s11786-012-0123-8](https://doi.org/10.1007/s11786-012-0123-8)
22. Wang, Q. and Kim, M.K. Applications of 3D point cloud data in the construction 2 industry: A fifteen-year review from 2004 to 2018 // Advanced Engineering Informatics. - 2019. - vol. 39. - P. 306-319. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.02.007>
23. High-accuracy 3D scanning using Texas Instruments DLP technology for structured light. https://www.ti.com/lit/wp/dlpy005a/dlpy005a.pdf?ts=1646297862086&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. 24.01.2020.
24. Chougule V.N., Gosavi H.S., Dharwadkar M.M., Gaiind A.A. Review of Different 3D Scanners and Scanning Techniques // IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN), 7th National conference on Recent Developments In Mechanical Engineering RDME. – 2018. - ISSN (e): 2250-3021, ISSN (p): 2278-8719. -P. 41-44.

25. Rusu R. B., Cousins S. 3D is here: Point Cloud Library (PCL) //2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2011. - P. 1-4. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980567.
26. Nguyen A., Le B. 3D point cloud segmentation: A survey // 6th IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). – 2013. - P. 225-230. doi: 10.1109/RAM.2013.6758588.
27. Guo Y., Wang H., Hu Q., Liu H., Liu L. and Bennamoun M. Deep Learning for 3D Point Clouds: A Survey // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2021. - Vol. 43, Issue 12. – P. 4338-4364 doi: 10.1109/TPAMI.2020.3005434.
28. Che E., Jung J., Olsen M.J. Object Recognition, Segmentation, and Classification of Mobile Laser Scanning Point Clouds: A State of the Art Review. // Sensors – 2019. – Vol. 19(4). – P. 1-43 doi [10.3390/s19040810](https://doi.org/10.3390/s19040810)
29. Curless B. From Range Scans to 3DModels // ACM SIGGRAPH Computer Graphics. – 2000. – vol. 33(4). – P. 38–41 DOI:[10.1145/345370.345399](https://doi.org/10.1145/345370.345399)
30. Trebuňa P., Mizerák M., Rosocha L. 3D SCANING – TECHNOLOGY AND RECONSTRUCTION // Acta Simulatio - International Scientific Journal about Simulation. - 2018. – vol. 4, Issue: 3. – P. 1-6. -ISSN 1339-9640 doi:10.22306/asim.v4i3.44
31. Васильева А.А., Абляз Т.Р. Исследование процесса измерения корпусных деталей на координатно-измерительной машине CARL ZEISS CONTURA G // Вестник ПНИПУ: Машиностроение, материаловедение. – 2015. – Т. 17. - № 3. – С. 32-40.
32. Kačucha P., Dovicaa M., Slosarčíka S., Kováč J. Comparision of contact and contactless measuring methods for form evaluation // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 48. – P. 273-279 DOI:[10.1016/j.proeng.2012.09.514](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.514)
33. Lopez-Hawa H., VanPelt A., Emmanuel S., Yihun Y. Automated Scanning Techniques Using UR5 // Journal of Robotics. – 2019. – Vol. 2019. – P.1-8. - Article ID 5304267 <https://doi.org/10.1155/2019/5304267>
34. Martínez S., Cuestaa E, Barreiro J., Álvarez B, Fernández P. Comparison between noncontact and contact scanning systems for dimensional control // Second International Conference on Multidisciplinary Design Optimization and Applications. – 2008. – Vol. 1. – P. 1-11.
35. Edl M., Mizerák M., Trojan J. 3D LASER SCANNERS: HISTORY AND APPLICATIONS / Acta Simulatio - International Scientific Journal about Simulation. – 2018. – Vol. 4, Issue: 4. – P. 1-5. - ISSN 1339-9640 doi:10.22306/asim.v4i4.54
36. Lerch T., MacGillivray M., Domina T. 3D Laser Scanning: A Model of Multidisciplinary Research // Journal of Textile and Apparel, Technology and Management. – 2007. - Vol 5, Issue 4. – P. 1-22.
37. Park J.S., Ilyas T., Lee M.H., Kim S.C. Low-Cost 3D Sensor System: Using Image-based Laser Triangulation // Institute of Control, Robotics and Systems. - 2021. – Vol. 7. – P. 105-107. - <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09410356>

38. Golparvar-Fard M., Bohn J., Teizer J., Savarese S., Peña-Mora F. Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. // *Autom. Constr.* – 2011. – Vol. 20. – P. 1143–1155 DOI:[10.1016/j.autcon.2011.04.016](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.016)
39. Abdel-Bary Ebrahim M. 3D Laser Scanners' Techniques Overview // *International Journal of Science and Research (IJSR)*. – 2015. – vol. 4(10), pp. 5-611
40. Rex D., Stoli S. Applications of 3D Laser Scanning in a Production Environment: Master's thesis in Production Engineering - Gothenburg, Sweden, 2014. – 55 p.
41. Eslami M., Saadatseresht M. Imagery Network Fine Registration by Reference Point Cloud Data Based on the Tie Points and Planes.// *Sensors*. – 2021. Vol. 21. – 317 p. <https://doi.org/10.3390/s21010317>
42. Rieke-Zapp D., Royo S. Structured light 3D scanning. Digital techniques for documenting and preserving cultural heritage // *Arc Humanities Press*. - 2017. - P. 245-249. <https://doi.org/10.1515/9781942401353-026>
43. Bartol K., Bojanic D., Petcovic T., Pribanic T. A Review of Body Measurement Using 3D Scanning // *IEEE Access*. - 2016. – Vol. 4. – P. 1-25 DOI:[10.1109/ACCESS.2021.3076595](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3076595)
44. Haleem A., Javaid M. 3D scanning applications in medical field: a literature-based review // *Clinical Epidemiology and Global Health*. – 2019. - Vol. 7. - No. 2. - P. 199–210 DOI:[10.1016/j.cegh.2018.05.006](https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.05.006)
45. Valiño G., Carlos Rico J., Zapico P., Fernández P. Influence of scanning strategies on measuring and surface digitising by means of a conoscopic holography sensor integrated in a machining centre // *Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems*. – 2017. – Vol. 10.- No. 2. – P. 167-183 DOI:[10.1504/IJMMS.2017.10005772](https://doi.org/10.1504/IJMMS.2017.10005772)
46. Voicu A.-C., Gheorghe G.I., Badita L.L. 3D MEASURING OF COMPLEX AUTOMOTIVE PARTS USING VIDEO-LASER SCANNING // *The Scientific Bulletin of VALAHIA University – MATERIALS and MECHANICS* – 2013. – Vol. 8 – P. 174-178 DOI:[10.4028/www.scientific.net/AMM.371.519](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.371.519)
47. Abdel-Bary Ebrahim M. 3D LASER SCANNERS: HISTORY, APPLICATIONS, AND FUTURE – 2014. – 100 p. DOI:[10.13140/2.1.3331.3284](https://doi.org/10.13140/2.1.3331.3284)
48. Nuttens T., Wulf A.D., Deruyter G., Stal C., Backer H.D., Schotte K. Application of laser scanning for deformation measurements: a comparison between different types of scanning instruments. // *Materials Science*. - 2012. – 13 p.
49. Peiravi A., Taabbodi B. A Reliable 3D Laser Triangulation-based Scanner with a New Simple but Accurate Procedure for Finding Scanner Parameters // *The Journal of American Science*. – 2010. – No. 6. – P. 80-85.
50. Cajal, C.; Santolaria, J.; Samper, D. & Garrido, A. Simulation of Laser Triangulation Sensors Scanning for Design and Evaluation Purposes // *International Journal of Simulation Modelling*. – 2015. – Vol. 14(2). – P.250-264. - DOI:[10.2507/IJSIMM14\(2\)6.296](https://doi.org/10.2507/IJSIMM14(2)6.296)
51. Young Soo Suh. Laser Sensors for Displacement, Distance and Position // *Sensors*. – 2019. -Vol. 19. P.19-24. - doi:[10.3390/s19081924](https://doi.org/10.3390/s19081924).

52. Soave E., D'Elia G., Mucchi E. A laser triangulation sensor for vibrational structural analysis and diagnostics // Measurement and Control. -2020. - Vol. 53(1-2). -P. 73–82. - <https://doi.org/10.1177/0020294019877484>.
53. Laser triangulation sensors. https://cdn.sick.com/media/docs/9/39/539/product_information_laser_triangulation_sensors_dt20_hi_od_value_od1000_od_mini_od_max_od_precision_od5000_en_im0053539.pdf. 12.07.2020.
54. Brosed F.J., Santolaria J., Aguilar J., Guillomía D. Laser triangulation sensor and six axes anthropomorphic robot manipulator modelling for the measurement of complex geometry products // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. - 2012. - Vol. 28. P. 660–671 DOI:[10.1016/j.rcim.2012.04.002](https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.04.002)
55. Kholhujayev J., Abdugarimov N., Mavlonov J., Abdivahidova N. Non-contact point measuring equipment for robot for robotic systems of automobile industry // Technical science and innovation. - 2020. - Issue 4. - P. 232-238. [10.51346/tstu-01.20.4-77-0092](https://doi.org/10.51346/tstu-01.20.4-77-0092).
56. Boyé de Sousa G. et al. 3D metrology using a collaborative robot with a laser triangulation sensor / Procedia Manufacturing 11. -2017. - Vol. 11. – P.132 – 140 DOI:[10.1016/j.promfg.2017.07.211](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.211)
57. Santolaria, J. et al. Modelling and Calibration Technique of Laser Triangulation Sensors for Integration in Robot Arms and Articulated Arm Coordinate Measuring Machines //Sensors. - 2009. - Vol. 9. - P. 7374 - 7396. DOI:[10.3390/s90907374](https://doi.org/10.3390/s90907374)
58. Digge J., Digge Ya. Stereo Vision For Robotics// International Journal of Computer Applications in Technology – 2012.- P. 33-39
59. Lv Zh., Zhang Z. Build 3D Scanner System based on Binocular Stereo Vision // JOURNAL OF COMPUTERS, FEBRUARY 2012. - VOL. 7, NO. 2. - P. 399-404 DOI:[10.4304/jcp.7.2.jcp0702399404](https://doi.org/10.4304/jcp.7.2.jcp0702399404)
60. Kaczmarek A.L., Szwoch M., Bartoszewski D., Borzemski L., et al. (Eds.): Using Open Source Libraries for Obtaining 3D Scans of Building Interiors: Part I. // Information Systems Architecture and Technology: Proceeding of 39th International Conference on Information Systems Architecture and Technology - 2019. –P. 201–210 https://doi.org/10.1007/978-3-319-99981-4_19
61. Lipnickas A., Knyš A. A Stereovision System for 3-D Perception // Elektronika ir Elektrotechnika. – 2009. – No. 3 (91). – P. 99-102
62. Fei Z., Zhou X., Gao X., Zhang G. A flexible 3D laser scanning system using a robotic arm // Proc. SPIE 10329, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X. – 2017. – P. 1-7 <https://doi.org/10.1117/12.2278898>
63. Rossi C., Savino S. A Robotic System to Scan and Reproduce Object // Journal of Robotics. – 2011. - vol. 2011. – 11p. <https://doi.org/10.1155/2011/168481>
64. Liu Sh., Huang W.-L., Gordon Ch., Armand M. A Robotic System for Implant Modification in Single-stage Cranioplasty // IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA – 2021. – P. 12275-12281 DOI:[10.1109/ICRA48506.2021.9560965](https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9560965)

65. Sathiyamoorthy S. INDUSTRIAL APPLICATION OF MACHINE VISION // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2014 - Volume: 03. – P. 1-5 DOI:[10.15623/ijret.2014.0319120](https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0319120)
66. S.M. Zohdy B., Ramadan N., A. Mahmood M., A. Nefny H. Machine Vision Application on Science and Industry: Machine Vision Trends // Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications. 2019/ - ch.8. – P/233-254 DOI:[10.4018/978-1-5225-5751-7.ch008](https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5751-7.ch008)
67. Canon 3D Machine Vision System RV Series. [https://www.canon-kz.com/3D machine-vision-system/specifications/](https://www.canon-kz.com/3D-machine-vision-system/specifications/). 11.03.2021.
68. Brosed F., Aguilar J., Guillomía D., Santolaria J. 3D Geometrical Inspection of Complex Geometry Parts Using a Novel Laser Triangulation Sensor and a Robot. // Sensors (Basel, Switzerland). – 2011. – vol. 11. – P. 90-110 doi: 10.3390/s110100090
69. Sun Yu., Zhang L., Ma O. Robotics-Assisted 3D Scanning of Aircraft. // AIAA 2020-3224 Session: Geometry, Meshing, Visualization and Environments. – 2020. <https://doi.org/10.2514/6.2020-3224>
70. RODRIGUES M., KORMANN M. ,SCHUHLER, C., TOMEK, P. Robot trajectory planning using OLP and structured light 3D machine vision. // BEBIS, G, (ed.) Lecture notes in Computer Science Part II. LCNS, 8034 (8034). Heidelberg, Springer. – 2013. – P. 244-253 DOI:[10.1007/978-3-642-41939-3_24](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41939-3_24)
71. Schlarp J., Csencsics E., Schitter G. Optical scanning of a laser triangulation sensor for 3D imaging // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2019. – Vol. 69, Issue: 6, P. 3606 – 3613 DOI: 10.1109/TIM.2019.2933343
72. НЕСТЕРОВ А.В., НЕСТЕРОВ С.В. ДИАГРАММА ВЫШНЕГРАДСКОГО В СИСТЕМЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКИ MATLAB. // Научные труды КубГТУ, 2016. - № 13. – с. 88-99
73. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5-ти тт.; 2-е изд. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004 – 616 с.
74. Нейдорф Р.А., Иванов Б.А., Обухов П.С. и др. Синтез законов управления в технических системах: Учеб. пособие. Ч.1. Инженерные методы синтеза законов управления в технических системах по эталонным математическим моделям / Под общ. ред. Р.А.Нейдорфа, З.Х.Ягубова. - Ухта: УГТУ, 2000.- 168 с., ил. ISBN 5-88179-179-7
75. Соколов Н.И. Аналитический метод синтеза линеаризованных систем автоматического регулирования. Монография. — М.: Машиностроение, 1966. — 326 с.
76. Теория систем с переменной структурой / под ред. С.В. Емельянова. – М.: Наука, 1970. – 592 с
77. Harry L. Van Trees, Kristine L. Bell, Zhi Tian. Detection Estimation and Modulation Theory, Part I: Detection, Estimation, and Filtering Theory. Wiley, 2nd Edition, 2013, 1176 p.

78. Fiodorov I., Izvoreanu B., Cojuhari I., Baranov S. Analytical Synthesis Algorithms of the Controllers for the Automatic Control Systems with Maximum Stability Degree and Imposed Performance // 13th International Conference on DEVELOPMENT AND APPLICATION SYSTEMS, Suceava, Romania. – 2016. –P. 26-32 DOI:[10.1109/DAAS.2016.7492543](https://doi.org/10.1109/DAAS.2016.7492543)
79. Wang, H. & Men, X. & Zhang, Yang. The researching of plotting logarithmic phase frequency response curve // Journal of Theoretical and Applied Information Technology – 2012. – vol. 45, no. 2 – P. 425-429.
80. Барабанов Н.Н., Земскова В.Т. Расчет одноконтурных и многоконтурных автоматических систем регулирования на ЭВМ: Учеб. пособие / Владим. гос. ун-т. Владимир. – 2002, с. 52. ISBN 5-89368-319-6.
81. Летов А.М. Аналитическое конструирование регуляторов I-IV //АиТ. №4. -1960, С. 436-441; №5. -1960, С.561-568; №6. -1960, С.661-665; - 1961. №4. №.425-435.
82. Chestnov V.N., Shatov D.V. Multivariable Systems Design of Desired Accuracy Based on LQ and H_{∞} Optimization Procedures // Proc. Eur. Control Conf. (ECC-2018). Cyprus, Limassol, IFAC Publication. - 2018. -P. 2511-2516
83. Александров А.Г. Частотные свойства оптимальных линейных систем управления. //АиТ. №9. – 1969, С. 176 - 181.
84. Baskin M. LQG/LTR, H-INFINITY AND MU ROBUST CONTROLLERS DESIGN FOR LINE OF SIGHT STABILIZATION: Master's thesis in Electrical and Electronics Engineering - Ankara, Turkey, 2015. – 164 p.
85. Тимофеев Ю.К. Статические ошибки аналитически сконструированных систем//Аналитические методы синтеза регуляторов. Межвуз. научн. сб.: Сарат. политехн. инс. – 1976, С. 53-60.
86. Садомцев Ю.В. Аналитическое конструирование регуляторов по заданным показателям качества. Развитие проблемы //Аналитические методы синтеза регуляторов. Межвуз. научн. сб.: Сарат. политехн. Инс. - 1980, С. 32-48.
87. Волков Е.Ф., Ершов Н.Н. Синтез асимптотически устойчивых многосвязных систем с заданной статической точностью //АиТ. No 7.- 1981, С. 19-27.
88. Umurzakova D.M. Synthesis of an Automatic Control System of a Multidimensional Dynamic Object Under Information Uncertainty. // 2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). - 2020. - pp. 1-4, doi: [10.1109/ICISCT50599.2020.9351451](https://doi.org/10.1109/ICISCT50599.2020.9351451).
89. Lewis F.L., Vrabie D., Syrmos V.L. Optimal Control. // 3 ed. Hoboken, Wiley, 2012. - 552 p
90. Tyutikov V.V., Tararykin S.V. Robastnoe modal'noe upravlenie tekhnologicheskimi ob'ektami [Robust modal control of the technological plants]// Ivanovo, ISPU Publ., 2006. - 255 p.
91. Ковальчук А.К., Калинов М.Н. Разработка системы управления работа специального назначения. - Машиностроение., 2011 - №8. - стр 58-64

92. Григорьев В.В., Журавлёва Н.В., Лукьянова Г.В., Сергеев К.А. Синтез систем автоматического управления методом модального управления. — С-Пб: СПбГУ ИТМО. – 2007, - с. 108 с ил.
93. Честнов В.Н., Зацепилова Ж.В. Синтез регуляторов заданной точности по среднеквадратичному критерию при действии неизмеряемых внешних возмущений. // Автоматизация и управление. Вестник СГТУ. - № 1 (64). Выпуск 2. -2012, С. 147-152.
94. Kalman R.E. Contributions to the Theory of Optimal Control //Bullet Soc. Mat. Mech. 1960 V. 5 No 1 P.102- 119
95. Шадрин Г.К. Синтез алгоритма управления нелинейным объектом на основе коррекции динамики объекта и компенсации возмущений // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. - №12. - С. 667-674.
96. Шадрин Г. К. Физический подход к построению систем управления на основе компенсации динамики объекта и возмущений // Автоматика и Телемеханика. - 2016. - № 7. - С. 33—46. URL: http://m.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=14505&option_lang=rus
97. Мутанов Н.В., Шадрин Г.К., Аринова Н.В. Сравнительный анализ методов разработки систем автоматического регулирования/ Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им.Д.Серикбаева. - №2 – 2010. - с.108-114 <https://doi.org/10.17587/mau.21.667-674>
98. Шадрин Г. К., Порубов Д. А., Шадрин М. Г. Синтез алгоритма управления движением двухколесного робота методом компенсации динамики объекта и возмущений / Автоматика и программная инженерия. 2017. - № 4 (22) - С.10—15. URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-42017-1.pdf>
99. Шадрин Г.К., Алонцева Д.Л., Красавин А.Л., Құсайын-Мұрат Ә.Т. Синтез алгоритма управления движением инструмента робота методом коррекции его динамики и компенсации возмущений/ Synthesis of the robotic tool motion-controlling algorithm using method of correction dynamics and perturbations compensation. Мехатроника, автоматизация, управление (Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie). – 2019. - Том 20, № 8 (2019). - С.472-481 ISBN 1684-6427 <https://doi.org/10.17587/mau.20.472-481>
100. Giacaglia G. E. O., Lamas W. Q. On Euler-Lagrange's Equations: A New Approach / Tendencias em Matemática Aplicada e Computacional. – 2020. - vol. 21, N. 2 (2020). - P. 359-369 DOI:[10.5540/tema.2020.021.02.0003590359](https://doi.org/10.5540/tema.2020.021.02.0003590359)
101. Grigorov B. A GENERALIZED NEWTON-EULER ALGORITHM FOR DYNAMIC SIMULATION OF ROBOT-MANIPULATORS WITH REVOLUTE JOINTS. // Recent. – 2013. - Vol 14, no 2(38) –P. 99-105
102. Khalil W. Dynamic Modeling of Robots Using Newton-Euler Formulation // Lecture Notes in Electrical Engineering,. – 2011. – vol. 89. – P. 3-20 DOI:[10.1007/978-3-642-19539-6_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19539-6_1)
103. Drugarin Anghel C.V., Petropoulos G. A COMPUTATIONAL GAUSS METHOD USED TO SOLVE THE LINEAR EQUATION SYSTEMS // 1

International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization At: Athens, Greece. – 2005. – Vol.1. - P. 1-8

104. Guo W., Li R., Cao Ch., Gao Yu. Kinematics, dynamics, and control system of a new 5-degree-of-freedom hybrid robot manipulator // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2016. - Vol. 8(11). - pp. 1–19 DOI: 10.1177/1687814016680309

105. Li D.-Q., Hong H.-J., Jiang X.-L. Dynamics Modeling, Control System De-sign and Simulation of Manipulator Based on Lagrange Equa-tion // *Mechanism and Machine Science*. – 2016. – P. 1129–1141

106. Хорошавин В. С. Особое оптимальное управление нелинейными объектами: [монография] / В. С. Хорошавин, А. В. Зотов. – Киров : Вятский государственный университет, 2019. – 208 с. ISBN 978-5-98228-193-7

107. Громов Ю.Ю., Земской Н.А., Лагутин А.В., Иванова О.Г., Тютюнник В.М. С71 Специальные разделы теории управления. Оптимальное управление динамическими системами: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. - 108 с. ISBN 5-8265-0264-9

108. Grimbale M., Majecki P. (2020). Review of Linear Optimal Control Laws. // *Nonlinear Industrial Control Systems*, 2020. - P.65-125 DOI:[10.1007/978-1-4471-7457-8_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7457-8_2)

109. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000.

110. Palli G., Melchiorri C., De Luca A. On the feedback linearization of robots with variable joint stiffness. // *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – 2008. – P. 1753 - 1759. 10.1109/ROBOT.2008.4543454.

111. Лазарев В.Л., Травина Е.А. Синтез и расчет систем автоматического управления – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 34с. -

112. Бобцов А.А., Никифоров В.О., Пыркин А.А., Слита О.В., Ушаков А.В. Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении: Учеб. пособие / СПб., НИУ ИТМО, 2013. – 277с.

113. Liu J., Liu K., Liu S. (2017) Adaptive control for a class of nonlinear complex dynamical systems with uncertain complex parameters and perturbations.// *PLoS ONE*, 2017. –P. 1-16 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175730>

114. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные оптимальные и адаптивные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.

115. Афанасьев В.Н. Управление нелинейными объектами с параметрами, зависящими от состояния // *АиТ*. 2011. № 4. С. 43 – 56.

116. Song X., Zhao Y., Chen C., Zhang L., Lu X. (2021). A PD Computed Torque Control Method with Online Self-gain Tuning for a 3UPS-PS Parallel Robot. // *Robotica*. – 2021. – Vol. 39, Issue 9. - P. 1575 - 1587. doi:10.1017/S0263574720001368

117. Wu G., Lin Z. On the Dynamics and Computed Torque Control of an Asymmetric Four-Limb Parallel Schoenflies Motion Generator // *Journal of Robotics and Automation*. – 2020. -Vol 4, Issue 1, - P. 168-178 DOI: 10.36959/673/368

118. Lin L.-G., Liang Y.-W., Cheng Li-J. Control for a Class of Second-Order Systems via a State-Dependent Riccati Equation Approach // SIAM Journal on Control and Optimization, 2018. - Vol. 56, No. 1. - P. 1-18 <https://doi.org/10.1137/16M1073820>
119. Dutka S., Grimble M. J. State-Dependent Riccati Equation Control with Predicted Trajectory // Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, Massachusetts. - June 30 - July 2, 2004. - P. 1563-1568 DOI:[10.23919/ACC.2004.1386799](https://doi.org/10.23919/ACC.2004.1386799)
120. Çimen T., State-Dependent Riccati Equation (SDRE) Control: A Survey // IFAC Proceedings. - 2008. -Vol.41 (2008). - P. 3761 — 3775, <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00635>.
121. Wang J. Control of nonlinear state-dependent systems using a receding horizon strategy // Advances in Mechanical Engineering. - 2016. - Vol. 8(11). -P. 1–10 DOI: [10.1177/1687814016681695](https://doi.org/10.1177/1687814016681695)
122. Wei B. A Tutorial on Robust Control, Adaptive Control and Robust Adaptive Control—Application to Robotic Manipulators. // Inventions. - 2019. Vol. 4. - 49 p. doi:[10.3390/inventions4030049](https://doi.org/10.3390/inventions4030049)
123. Alonge F., D'Ippolito F. Adaptive Robot Control – An Experimental Comparison // International Journal of Advanced Robotic Systems. - 2012. - Vol. 9 issue: 5. - P. 1-11 DOI: <https://doi.org/10.5772/53731>
124. Fotovvati B., Namdari N., Dehghanghadikolaei A.: On Coating Techniques for Surface Protection: A Review.// J Manuf Mater Process. - 2019. - vol. 3(1), P. 1-22 DOI:[10.3390/jmmp3010028](https://doi.org/10.3390/jmmp3010028)
125. Kalita V.I., Malanin D.A., Mamaev A.I., Mamaeva V.A., Novochadov V.V., Komlev D.I, Komlev V.S., Radyuk A.A. 3D bioactive coatings with a new type of porous ridge/cavity structure.// Materialia. - 2021. - Vol. 15 (2021) – P. 1-24 DOI:[10.1016/j.mtla.2021.101018](https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101018)
126. Fauchais P.,Vardelle A.M. Thermal Spray Coatings // J. Webster (ed.), Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. 2007. - .P. 1-21 DOI:[10.1002/047134608X.W5923.pub2](https://doi.org/10.1002/047134608X.W5923.pub2)
127. Zavareha A. , Sarhanb A.A.D.M., Zavarehc P.A., Razakd B.A., Kakooeie - Can. J. S. Fundamentals and Applications of Thermal Spray Coating // 4 TH INTERNATIONAL CONGRESS ON TECHNOLOGY - ENGINEERING & SCIENCE. -2017. -Vol. 05(01). –P. 178-181
128. Cizek J., Matejicek J.: Medicine Meets Thermal Spray Technology: A Review of Patents.// J Therm Spray Tech, 2018. –vol. 27(8). – P. 1251–1279.
129. Introduction to Coating Design and Processing, Thermal Spray Technology R.C. Tucker, Jr., editor , 2013. - vol. 5A. – P. 76-88
130. Łatka L, Pawłowski L, Winnicki M, Sokołowski P, Małachowska A, Kozerski S.: Review of Functionally Graded Thermal Sprayed Coatings. Applied Sciences. – 2020. – vol. 10 (20). –P. 41
131. Fauchais P., J. Heberlein and M. Boulos Thermal spraying, Elsevier Amsterdam, NL.- 2012. - p. 506

132. Alontseva D.L. Microplasma Spraying of the Coatings with Desired Structures and Properties/ D.L. Alontseva. - Ust-Kamenogorsk, EKSTU:2019. - 100 p. ISBN 978-601-208-668
133. Shibe V., Chawla V. An Overview of Research Work in Surface Coating / IJRMET . 2013. - Vol. 3, Issue 2. – P. 85-88
134. Trigatti, G., Boscariol, P., Scalera, L. et al. A new path-constrained trajectory planning strategy for spray painting robots - rev.1. // Int J Adv Manuf Technol. – 2018. – vol. 98. –P. 2287–2296. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2382-2>
135. Chen W, Tang Y, Zhao Q. A novel trajectory planning scheme for spray painting robot with Bézier curves// Control and Decision Conference. IEEE, 2016. – P. 6746-6750 DOI:[10.1109/CCDC.2016.7532211](https://doi.org/10.1109/CCDC.2016.7532211)
136. Chen W, Sun C, Liu H, et al. Path planning scheme for spray painting robot with Bézier curves on complex curved surfaces// Automation. IEEE, 2017. – P. 698-703. DOI:[10.1109/YAC.2017.7967499](https://doi.org/10.1109/YAC.2017.7967499)
137. Chen W., Liu J., Tang Y., Ge H. Automatic Spray Trajectory Optimization on Bézier Surface, Electronics. - 2019. – Vol. 8 (168). – P. 1-16. - DOI:[10.3390/electronics8020168](https://doi.org/10.3390/electronics8020168)
138. Zhou Yu. et al. Path Planning for Spray Painting Robot of Horns Surfaces in Ship Manufacturing. // 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 521. – P. 1-7 DOI:[10.1088/1757-899X/521/1/012015](https://doi.org/10.1088/1757-899X/521/1/012015)
139. Fu Z, Xiao B, Wu C, et al. A genetic algorithm-based surface segmentation method for spray painting robotics// Control and Decision Conference. IEEE, 2017. – P. 4049-4054 DOI:[10.1109/CCDC.2017.7979209](https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7979209)
140. Zhou B, Fang F, Shao Z, et al. Fast and templatable path planning of spray painting robots for regular surfaces // Control Conference. IEEE, 2015. –P. 5925-5930 DOI:[10.1109/ChiCC.2015.7260567](https://doi.org/10.1109/ChiCC.2015.7260567)
141. Zeng Y, Zhang Y, He J, et al. Prediction Model of Coating Growth Rate for Varied Dip-Angle Spraying Based on Gaussian Sum Model[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016. – Vol. 2016(4). – P. 1-7 DOI:[10.1155/2016/9369047](https://doi.org/10.1155/2016/9369047)
142. БОРИСОВ Ю. С., ВОЙНАРОВИЧ С. Г., КИСЛИЦА А. Н., КАЛЮЖНЫЙ С. Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЯТНА НАПЫЛЕНИЯ И ФИГУРЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ ДИОКСИДА ТИТАНА // Автоматическая сварка 2014. - с 19-22
143. Borisov Iu.S., Voinarovich S.G., Fomakin O.O., Iushchenko K.A.Decl. Pat. UA V23K10/00 Plazmotron dlia napilennia pokruttiv / (Ukraina (UA)); no 2002076032; Zaiavl.19.07.2002r. Opubl. 16.06.2003, Bul. no 6.
144. Alontseva D.L., Borisov Yu., Voinarovych S., Kyslytsia O., Kolesnikova T., Prokhorenkova N., Kadyroldina A. Development of technology of microplasma spraying for the application of biocompatible coatings in the manufacture of medical implants // Przegląd Elektrotechniczny . – 2018. – vol. 1(7). – P. 96-99 DOI:[10.15199/48.2018.07.23](https://doi.org/10.15199/48.2018.07.23)

145. А.с. 009030 Конвертер для перевода чертежей DXF формата в AS язык робота-манипулятора KawasakiRS010L / Д.М. Нуременов, А.Л. Красавин, Д.Л. Алонцева; опубл. 21.06.2017, № 1490. – 2 с.

146. Акт внедрения от 17.05.2017 в производство ТОО «DeCh» результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических результатов научной разработки и соответствующий акт испытаний в производственных условиях «Центра проектирования и исследования минерального сырья ТОО «DeCh» валков дробилки валковой для измельчения минерального сырья, восстановленных по новой технологии, разработанной исследовательской группой проекта под руководством Алонцевой Д.Л.

147. Yushenko K., Borisov Yu., Voynarovych S., Fomakin O.: Plasmatron for spraying of coatings/ Pub. No.: WO/2004/010747 International Application. No.: PCT/UA2003/000014 Publication Date: 29.01.2004; International Filing Date: 25.04.2003, IPC: H05H 1/32. – 2006

148. Alontseva D. L. Microplasma Spraying of Biocompatible Coatings onto Titanium Implants / D.L. Alontseva, A.V. Russakova, S. G. Voinarovych, O. N. Kyslytsia. - Ust-Kamenogorsk, EKSTU:2019. -104 pp. ISBN 978-601-208-669-0

149. Войнарович С. Г., Алонцева Д. Л., Хожанов А.Р., Красавин А.Л., Кислица А.Н., Калюжный С.Н. Влияние параметров микроплазменного напыления на потери напыляемой Zr проволоки и пористость покрытия//Вестник КазНУ. Серия Физическая (ВКФ). – 2021 - Том. 79, №. 4, стр. 82-96. doi: <https://doi.org/10.26577/RCPH.2021.v79.i4.10>.

150. Alontseva D.L., Krasavin A.L., Nurekenov D.M., Zhanuzakov Y.T. Mathematical Modeling of Temperature Fields in Two-Layer Heat Absorbers for the Development of Robotic Technology for Microplasma Spraying of Biocompatible Coatings // Communications in Computer and Information Science. – 2019. - Vol. 998. - P. 11-22. - DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-030-12203-4_2.

151. Алонцева Д.Л., Красавин А.Л., Жанузаков Е.Т. Математическое моделирование температурных полей для разработки роботизированной технологии микроплазменного напыления биосовместимых покрытий // Вестник ВКГТУ им. Д.Серикбаева. – 2019. -№ 1. - С. 114-119.

152. Кадыролдина А. Интеллектуальная роботизированная система для плазменной обработки изделий сложной формы: Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD)/ Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева. – Усть-Каменогорск, 2021. - 89 р.

153. Құсайын-Мұрат Ә. Т., Алонцева Д. Л. Анализ методов микроплазменного нанесения биосовместимых покрытий и требований к медицинским имплантатам. Вестник ВКГТУ им. Д.Серикбаева - Усть-Каменогорск - №4 (78), 2017. – С.62-67.

154. Alontseva d., Krasavin A., Ospanov O., Kussaiyn-Murat A., Zhanuzakov Ye. Software Development for a New Robotic Technology of Microplasma Spraying of Powder Coatings. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. – 2018. - Vol 94, No 7. - P.26-29

doi:10.15199/48.2018.07.06

155. Kussaiyn-Murat A., Krasavin A., Alontseva D., Kadyroldina A., Khozhanov A., Krak Iu., Muñoz de Escalona P., Dyomina I. Development of an intelligent robotic system for plasma processing of industrial products with complex shape. // Proceeding of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2021. – 2021. – vol. 1. – P. 572-579 doi [10.1109/idaacs53288.2021.9660960](https://doi.org/10.1109/idaacs53288.2021.9660960)

156. AS Language Programming Manual. Kawasaki Heavy Industries, LTD. – 2001, - 471 p.

157. Алонцева Д., Красавин А., Шадрин Г., Кадыроldина А., Құсайын-Мұрат Ә. Разработка системы управления промышленным роботом-манипулятором для трехмерного сканирования поверхностей // Вестник ВКГТУ им. Д.Серикбаева. – 2019. - № 1. - С. 81-87.

158. Кадыроldина А. Т., Красавин А. Л., Құсайын-Мұрат Ә. Т., Прохоренкова Н.В. Күрделі формадағы бұйымдарға плазмалық өңдеуді жүргізетін робот-манипулятор үшін ақпараттық жүйені әзірлеу. Вестник ВКТУ им. Д.Серикбаева. – Усть-Каменогорск. 2020– №3 (89).– С. 95-98.

159. ODSL 8/D4-400-S12 (Leuze electronic, Германия) https://www.leuze.com/media/assets/dv007_144dpi_geschuetzt_pdf/CAT_VK_LOS_2009_en.pdf

160. Алонцева Д. Л., Красавин А. Л., Кадыроldина А. Т., Құсайын-Мұрат Ә. Т. Разработка системы 3D сканирования для интеллектуальной роботизированной системы плазменной обработки и резки крупногабаритных изделий сложной формы. Вестник ВКГТУ им. Д.Серикбаева - Усть-Каменогорск - № 1, 2018. – С. 7-19

161. Alontseva D., Krasavin A., Kadyroldina A., Kussaiyn-Murat A. Segmentation Algorithm for Surface Reconstruction According to Data Provided by Laser-Based Scan Point// Communications in Computer and Information Science. – 2019. -vol 998. Springer. -Cham. -pp. 1-10 DOI:[10.1007/978-3-030-12203-4_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12203-4_1)

162. Alontseva D., Krasavin A., Russakova A., Kadyroldina A. Automation of Industrial Sites with Mechatronic Systems // International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications (IJEET&T). -2018. - Vol. 7. -No. 4. - pp. 146-151 DOI:[10.18178/ijeetc.7.4.146-151](https://doi.org/10.18178/ijeetc.7.4.146-151)

163. Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 5-и т.; 2-е изд., перераб. и доп. Т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

164. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М.: Мир, 1982. – 512 с.

165. Красовский А.А., Поспелов Г.С. Основы автоматики и технической кибернетики. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 600 с..

166. Shadrin G. K., Alontseva D. L., Kussaiyn-Murat A. T., Kadyroldina A. T., Ospanov O.B., Haidegger T. Application of Compensation Algorithms to Control

the Movement of a Robot Manipulator// Acta Polytechnica Hungarica. – 2020. - Vol. 17, No. 1. - P. 191-214. DOI: 10.12700/APH.17.1.2020.1.1.

167. Құсайын-Мұрат Ә. Т., Шадрин Г.К., Алонцева Д. Л. Нысанның динамикасы мен бұзылыстарын өтеу әдісі. // Материалы VII МНТК студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана» – Усть-Каменогорск, 8, 9 апреля 2021. –Часть IV. – С. 190-194

168. Alontseva D., Krassavin A., Shadrin G.K., Kussaiyn-Murat A., Kadyroldina A. Development of Control System for Robotic Surface Tracking. // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. - 2020. - Vol. 9, No. 2. - P.280-286 DOI:[10.18178/ijmerr.9.2.280-286](https://doi.org/10.18178/ijmerr.9.2.280-286)

169. Құсайын-Мұрат Ә. Т., Алонцева Д. Л. Өнеркәсіптік робот-манипуляторының негізінде тәжірибе әндірістік учаскесін басқарудың автоматтандыру Global Science And Innovations 2018: Central Asia» атты III Халықар. ғыл.-тәж. конф. Материалдары (I том)/ Құраст.: Е. Ешім, Е. Абиев т.б.– Астана, 2018 –Б. 539-543

170. Kadyroldina A., Kussaiyn-Murat A., Beszedes B., Alontseva D., A. Krasavin. Image Acquisition and Processing on Raspberry Pi in Matlab for 3D Scanning // 14th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (AIS 2019). – November 14, 2019. – Székesfehérvár, Hungary.–P. 39-42.

171. А.с. 5803. Программа для ЭВМ «Расчет коэффициентов алгоритма управления однозвенным роботом-манипулятором» / Д.Л. Алонцева, Г.К. Шадрин, Құсайын-Мұрат Ә. Т.; опубл. 15.10.2019. – 2 с

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Технические характеристики робота-манипулятора Kawasaki RS-010LA

Число степеней свободы		6 осей
Максимальная досягаемость		1450 мм
Максимальная нагрузка		10 кг
Максимальный угол поворота	ЛТ1	$\pm 180^\circ$
	ЛТ2	$+145^\circ \sim -105^\circ$
	ЛТ3	$+150^\circ \sim -163^\circ$
	ЛТ4	$\pm 270^\circ$
	ЛТ5	$\pm 145^\circ$
	ЛТ6	$\pm 360^\circ$
Максимальная скорость поворота	ЛТ1	250°/с
	ЛТ2	250°/с
	ЛТ3	215°/с
	ЛТ4	365°/с
	ЛТ5	380°/с
	ЛТ6	700°/с
Момент	ЛТ4	22.0 Н·м
	ЛТ5	22.0 Н·м
	ЛТ6	10.0 Н·м
Момент инерции	ЛТ4	0,7 кг·м ²
	ЛТ5	0,7 кг·м ²
	ЛТ6	0,2 кг·м ²
Повторяемость		$\pm 0,06$ мм
Масса		150 кг
Максимальная линейная скорость перемещения		11 800 мм/с
Рекомендуемый тип контроллера		E40
Цвет робота		Munsell 10GY9/1
Способ установки робота		Напольная или потолочная установка
Условия окружающей среды	Температура	0 ~ 45 °C
	Влажность	35 ~ 85 %
	Вибрация	Менее чем 0,5 G
	Прочее	Место установки робота не должно подвергаться воздействию легковоспламеняющихся или едких жидкостей и газов, электрошумовых помех
Степень защиты		IP65

Nordica Sterling Ltd
Finland, 01390 Vantaa
Laaksokuja 10

Y-1824927-7
email: info@belfingroup.com
www.belfingroup.com

Nordea Bank
USD 125752-11457
EUR 125730-519142

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт производственных испытаний результатов диссертационного исследования

АКТ проведения производственных испытаний № 1 от 01 октября 2020 года

В период с 01 июня 2020 г. по 01 октября 2020 г. проведены испытания в производственных условиях «ИП Абакумов С.А.» восстановленной дробящей плиты (подвижной) в щековой дробилке СМД-108А, предназначенной для измельчения минерального сырья. Восстановление дробящей плиты произведено по технологии роботизированного микроплазменного напыления износостойкого хромового покрытия на изношенные части дробящей плиты, в соответствии с технологией, разработанной по проекту № AP05130525 «Интеллектуальная роботизированная система для плазменной обработки и резки крупногабаритных изделий сложной формы». Поверхность дробящей плиты была восстановлена и упрочнена путем роботизированного микроплазменного нанесения покрытия из порошка композиционного сплава АН-35 (ГОСТ 21448-75), применяемого для упрочнения и ремонта трущихся деталей. Нанесение покрытий проводилось по рекомендованному в результате численного эксперимента режиму, указанному в таблице 1. Поверхность дробящей плиты была предварительно подвергнута роботизированному сканированию, затем по новым алгоритмам управления осуществлялось роботизированное микроплазменное напыление защитного покрытия на изношенные участки плиты путем перемещения руки робота-манипулятора с закрепленным на ней плазматроном в соответствии с полученной 3D-моделью изделия.

Таблица 1 Режимы плазменного напыления износостойкого покрытия

Материал покрытия (порошок композиционного сплава)	Мощность, Р [Вт]	Дистанция напыления [мм]	Сила тока, I [А]	Расход плазмобразующего газа (Ar) [л/час]	Расход защитного газа (Ar) [л/час]	Скорость перемещения источника [м/с]	Расход порошка [кг/ч]	Коэффициент использования порошка
АН-35	2	100	40	70	360	0.008	2	0.7

Испытания восстановленной и упрочненной плиты проводились в условиях измельчения полиметаллических руд различной твердости. Испытания проводились ежедневно при непрерывной работе дробилки в течение не менее 30 мин. с загрузкой от 70 до 100% высоты камеры дробления в соответствии ГОСТ 27412-93 (Межгосударственный стандарт «Дробилки щековые. Общие технические условия»)

Результаты испытаний

Обработанная после выработки основного ресурса подвижная плита щековой дробилки дополнительно эксплуатировалась в течение 6-ти месяцев, подвергаясь оптимальной нагрузке по 5-6 часов в смену, таким образом, ресурс ее работы был продлен при неизменной производительности дробилки.

Заключение

Ресурс работы подвижной плиты щековой дробилки восстановленной путем плазменного напыления износостойких защитных покрытий на разрушенные участки плиты, был повышен на 15% по сравнению с плитами, не подвергавшимися восстановлению.

Директор ИП Абакумов С.А.

СЕРГЕЙ
АЛЕКСАНДРОВИЧ
ИИН
780314302718

С.А. Абакумов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт внедрения НИР

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени Д. СЕРИКБАЕВА»

СОГЛАСОВАНО Проректор по научно-инновационной деятельности и цифровизации Денисова Н.Ф. 11 2021 г.	УТВЕРЖДАЮ Проректор по академической деятельности Конурбаева Ж.Т. 11 2021 г.
--	--

Акт о внедрении научно-исследовательской работы в учебный процесс

Комиссия Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева в составе: председатель: Конурбаева Ж.Т. - проректор по академической деятельности, члены: декан Школы информационных технологий и интеллектуальных систем Демин И.А. (Ф.И.О), руководители Образовательных программ Швец О.Я. и Кадыролдина А.Т. (Ф.И.О)

составили настоящий акт о том, что в 2021/2022 учебном году в образовательную программу «Автоматизация и управление» - внедрены результаты научно-исследовательской работы ст. преподавателя Кұсайын-Мұрат Ә. Т., выполненной под руководством д.ф.-м.н., проф. Алонцевой Д.Л., на тему: «Синтез системы автоматического управления движением робота-манипулятора для задач 3D сканирования объектов сложной геометрической формы»

№ п/п	Форма внедрения (наименование нового курса, спецкурса, раздела лекций, лаб. Работы, установки, учебные пособия и т. П.); курс, специальность	Объем внедрения (количество работ, лекционных часов)	Краткое содержание внедренной работы
1	Результаты НИР <u>Синтез системы автоматического управления движением робота-манипулятора для задач 3D сканирования объектов сложной геометрической формы»</u> внедрены в курс « <u>Нелинейные системы автоматического регулирования</u> » (5 кредитов) <u>3_</u> курса на базе СО и <u>2_</u> курса на базе СПО по специальности 6В07101 Автоматизация и управление, а также <u>«Экспериментально-статистические методы построения математических моделей»</u> (5 кредитов) <u>1_</u> курса докторантуры по специальности 8D07101 Автоматизация и	Лекции « <u>3_</u> » - кол-во час. Практическая работа « <u>4_</u> » - кол-во часов Лабораторная работа « <u>2_</u> » - кол-во часов	Использование разработанной авторами компьютерной программы: А.с. 5870. «Расчет коэффициентов алгоритма управления однозвенным роботом-манипулятором» / А.Л. Красавин, Д.Л. Алонцева, А.Т. Кадыролдина; опубл. 15.10.2019. – 2 с. для вычисления коэффициентов автоматического регулятора, получения графической зависимости

ПРИЛОЖЕНИЕ В (продолжение)

Акт внедрения НИР

	управление	управляющего воздействия от задающего воздействия, для выбора параметров эталонного фильтра системы автоматического управления при выполнении лабораторных и практических работ. Введение в курс лекций новых тем, связанных с использованием компенсационного метода управления системой автоматического управления и соответствующей математической модели.
--	------------	---

Материалы к настоящему акту рассмотрены на заседании НТС
Школы информационных технологии и интеллектуальных систем (протокол № 2 от
__19.11__ 2021 г.)

Члены комиссии:

Декан Школы информационных технологий
и интеллектуальных систем

 Демина И.А.

Руководитель Образовательной программы
бакалавриата «Автоматизация и управление»

 Кадыролдина А.Т.

Руководитель Образовательной программы
докторантуры «Автоматизация и управление»

 Шве́ц О.Я.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права №5803 от 15 октября 2019 о регистрации программы для ЭВМ

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

СВИДЕТЕЛЬСТВО
О ВНЕСЕНИИ СВЕДЕНИЙ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЕСТР
ПРАВ НА ОБЪЕКТЫ, ОХРАНЯЕМЫЕ АВТОРСКИМ ПРАВОМ

№ 5803 от «15» октября 2019 года

Фамилия, имя, отчество, (если оно указано в документе, удостоверяющем личность) автора (ов):
АЛОНЦЕВА ДАРЬЯ ЛЬВОВНА, ШАДРИН ГЕННАДИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ, КҰСАЙЫН-МҰРАТ ӘСЕЛ ТҮГЕЛБАЙҚЫЗЫ

Вид объекта авторского права: **программа для ЭВМ**

Название объекта: **Расчет коэффициентов алгоритма управления однозвчным роботом-манипулятором**

Дата создания объекта: **12.10.2019**





Құжат түпнұсқалығын <http://www.kazpatent.kz/ru> сайтының
"Авторлық құқық" бөлімінде тексеруге болады. <https://copyright.kazpatent.kz>

Подлинность документа возможно проверить на сайте [kazpatent.kz](http://www.kazpatent.kz)
в разделе «Авторское право» <https://copyright.kazpatent.kz>

Подписано ЭЦП

Абулкаиров Н. А.