

Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева

УДК 004.942.519.876.5

На правах рукописи

КАРЫМСАКОВА ИНДИРА БЕКЕНОВНА

**Информационная система моделирования траекторий для построения
роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной
геометро-топологической структуры**

6D070300 – Информационные системы (по отраслям)

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты
кандидат физико-математических наук,
ассоц. профессор
Н.Ф. Денисова
доктор физико-математических наук,
профессор
Ю.В. Крак

Республика Казахстан
Усть-Каменогорск, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ СОЗДАНИЯ ИМПЛАНТОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОТЕРЯННЫХ ИЛИ РАЗРУШЕННЫХ ЧАСТЕЙ СКЕЛЕТА ЧЕЛОВЕКА.....	9
1.1 Обзор методов создания имплантов для замены (усиления) различных частей человеческого тела.....	9
1.2 Обзор методов построения систем движения манипуляционных роботов при отслеживании сложных траекторий.....	10
1.3 Обзор методов и систем плазменного напыления на пространственные элементы сложной геометрической формы.....	11
Выводы к разделу с постановкой нерешенных проблем, которые будут исследоваться и решаться в диссертации.....	17
2 ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ СОЗДАНИЯ ИМПЛАНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РЕШЕНИЙ.....	19
2.1 Классификация имплантов по типу применения и материалам изготовления, по геометро-топологическим размерам составляющих.....	19
2.2 Параметрический метод классификации имплантов сложной геометро- топологической структуры.....	29
2.3 Исследование программного обеспечения при построении 3d моделей имплантов для станков с ЧПУ.....	37
Выводы к разделу 2.....	39
3 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА БАЗЕ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА.....	40
3.1 3d моделирование имплантов сложной геометро-топологической структуры.....	40
3.2 Исследование и построение схемы системы плазменного напыления на объекты сложной геометро-топологической структуры.....	45
3.3 Построение траекторий движения манипуляционного робота для плазменного напыления.....	47
3.4 Выводы к разделу 3.....	65
4 РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ НАНЕСЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ИМПЛАНТЫ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРО- ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ФОРМЫ.....	66
4.1 Архитектура приложения и файловый обмен.....	66
4.2 Описание пользовательского интерфейса приложения.....	74
4.3 Моделирование плазменного напыления поверхности имплантов.....	84
4.4 Выводы к разделу 4.....	93

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	95
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Авторское свидетельство	101
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Акт внедрения.....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ В – ТР программа.....	104

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы: диссертационная работа посвящена разработке информационной системы моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры.

Выпуск титановой продукции в Восточно-Казахстанской области является важнейшей задачей для дальнейшего использования в медицине. На сегодняшний день одной из актуальных проблем в эндопротезировании можно назвать разработку титановых имплантов с использованием роботизированной техники. Это дает возможность создать поверхности на имплантах, которые обеспечивают лучшую приживаемость. Также имеются следующие преимущества: оптимизация обработки, экономия времени, повышение качества, безвредность для здоровья, точность нанесения, экономия порошкового материала, проведение альтернативных операций, быстрое изменение и управление процессом.

Использование современных производственных решений в процессах напыления имплантов является актуальной задачей на сегодняшний день. Это одна из задач, решение которой является сложной проблемой, так как на сегодняшний день не удастся создать манипулятор, полностью выполняющий функции конечностей человека.

Производство и изготовление имплантов является трудоемким процессом. Он требует выполнения следующих требований: покрытие должно удовлетворять условию биотолерантности с тканями человека, способность не вызывать аллергическую реакцию. Для точности нанесения покрытия на импланты применение роботов является наиболее оптимальным решением [1].

Все вышеизложенное послужило основанием для проведения данного исследования.

Актуальность данной проблемы обусловлена действием Кодекса Республики Казахстан «О здоровье народа и системе здравоохранения» (от 7 июля 2020 года №360-VI ЗРК), который определяет стандарты производства медицинских изделий, в том числе имплантов и эндопротезов. В статье 235 Разработка лекарственных средств и медицинских изделий определены основные положения, стандарты разработки медицинских изделий, требования к разработке медицинских изделий.

Основная идея данной работы заключается в разработке информационной системы моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры.

Цель исследования – разработка информационной системы моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры.

Объект исследования – роботизированные системы плазменного напыления.

Предмет исследования. Предметом исследования было информационное и математическое обеспечение системы управления процессом плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры.

Задачи исследования:

1. Выполнить классификацию имплантов и сформировать хранилище данных для оптимизации траектории напыления.
2. Создать 3d модели имплантов разных классов.
3. Адаптировать метод интерполяции на основе сплайна Эрмита для формирования траектории напыления.
4. Построить архитектуру системы и программные траектории напыления для манипуляционного робота.

Методы исследования.

Средства математического моделирования, трехмерной графики, имитационного моделирования, робототехники, методы web-программирования, применялись технологии объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна исследования.

Предложена модель классификации имплантов сложной геометро-топологической структуры на основе параметрического метода и для каждого класса имплантов сформирована траектория напыления на основе сплайнов Эрмита третьего и четвертого порядков.

Научная и практическая значимость работы.

Результаты, полученные в ходе диссертационных исследований, позволили создать научные основы информационной системы моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры. Научные и практические результаты диссертационной работы получены в ходе выполнения исследований в рамках проекта программно-целевого финансирования «0006/ПЦФ-2017 «Выпуск титановой продукции для дальнейшего использования в медицине». Зарегистрированы программы для ЭВМ: «Информационная подсистема для работы с базой данных имплантов» от 19 августа 2020 г. №11699», «Информационная система моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры» от 16 февраля 2021 г. №15189 (Приложение А). Результаты диссертации перспективны для создания наукоемкого производства, внедрение в производство информационной системы моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры позволяет оптимизировать процесс плазменного напыления, экономически эффективно проводить процесс плазменного напыления. Получен акт внедрения результатов диссертационной работы (Приложение Б).

Основные положения диссертационного исследования, выносимые на защиту:

1. Параметрическая классификация имплантов сложной геометро-топологической структуры.
2. Модель траектории напыления имплантов сложной геометро-топологической структуры на основе сплайнов Эрмита третьего и четвертого порядков.
3. Архитектура системы и программные модули управления процессом напыления для роботизированных систем плазменного напыления.

Публикации результатов исследования.

По материалам исследования имеются 13 публикаций, из них 5 в изданиях, которые рекомендованы Комитетом по контролю в сфере образования и науки, 1 статья в журнале, входящего в базу данных Scopus: International Journal of Computing (№19(2) 2020, p. 224-232) с процентилем по CiteScore в базе данных Scopus 55%.

Апробация работы.

Основные результаты исследования изложены на:

- международной научной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI' 2017)», (Зализный порт, 2017 – 22-26 мая);
- 14-й международной научно-практической конференции „Математическое и программное обеспечение интеллектуальных систем (MPZIS-2017)” (Днепр, 2017 – 21-22 ноября);
- 5-й международной научно-практической конференции «Winter InfoCom 2017» (Киев, 2017 – 1-2 декабря);
- международной научной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI' 2018)» (Зализный порт, 2018 – 21-27 мая);
- proceedings of International Educational Forum "The Didactic Hub: Europe-Asia" (Семей, 2018 – 26 апреля);
- международной научно-практической конференции «XVIII международный научный семинар «Современные проблемы информатики в экономике, управлении и образовании и преодоления последствий Чернобыльской катастрофы» (Свитязь, 2018 – 2-8 июля);
- международной научно-практической конференции "Творчество молодых ученых инновационному развитию Казахстана" (Усть-Каменогорск, 2019).

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертационная работа изложена на 100 страницах компьютерного набора, состоит из введения, четырех разделов, заключения, библиографии и приложений. Текст иллюстрирован 29 таблицами, 88 рисунками. Список использованных источников - 100.

В первом разделе диссертации представлены результаты анализа современного состояния и развития технологий создания имплантов для восстановления потерянных или разрушенных частей скелета человека. Проведен обзор существующих методов создания имплантов для замены (усиления) различных частей человеческого тела, методов построения систем движения манипуляционных роботов при отслеживании сложных траекторий, методов и систем плазменного напыления на пространственные элементы сложной геометрической формы.

Рассмотрены технические характеристики технологии, выявлены отличия их свойств от аналогов. Обосновано использование технологии микроплазменного напыления.

Во втором разделе диссертации были проанализированы основные типы имплантов: по их геометрическим размерам составляющих, по типу применения, по фирмам-изготовителям, по материалам изготовления, по технологии изготовления.

Были проанализированы существующие методы классификации имплантов. Рассмотрены основные преимущества и недостатки каждого подхода.

В результате параметрического метода классификации была разработана система классификации имплантов по соответствию необходимым условиям для последующего плазменного напыления.

Для реализации параметрического метода классификации были определены 11 параметров. Определено 3 класса имплантов. Было отобрано по 3 импланта с первых двух классов имплантов, которые удовлетворяют предельным параметрам, допустимым при напылении роботом.

Для осуществления процесса напыления было отобрано 6 имплантов, с 1 класса: имплант тазобедренного сустава, имплант голени, плечевого сустава и 2 класса: имплант позвоночный, имплант шейного отдела, имплант суставов пальцев.

В третьем разделе диссертации процесс напыления имплантов при помощи роботизированного комплекса был условно разделен на пять этапов.

Были проанализированы основные методы создания 3d моделей объектов сложной геометро-топологической структуры. Рассмотрены основные преимущества и недостатки каждого метода. Сделан обзор основного программного обеспечения, используемого в каждом методе.

Для разработки 3D моделей имплантов был использован сканер SCAN 3D UNIVERSE, позволяющий восстанавливать размеры детали, и в последующем по этим данным при помощи программы Geomagic Design X были разработаны 3d модели имплантов и их составляющих.

Оптимальный процесс напыления имплантов был определен следующим образом:

Имплант устанавливается в захвате манипуляционного робота, который будет двигать и вращать имплант для напыления его поверхности. Для

качественного нанесения напыления на поверхность импланта необходимо выполнение требований:

1. Распылитель напыляет имплант плазменной струей порошок металла, располагается на расстоянии около 15 см от объекта, угол наклона - 90° .

2. Диаметр пятна напыления должен составлять примерно – 1-5 мм (большая пористость обеспечивает лучшую приживаемость), толщина слоя порошка должна составлять 0,05...1,0 мм.

3. Расход титанового порошка при напылении должен составлять максимум 10-15%.

4. Материал для напыления – титан VT6.

Была рассмотрена задача формирования управляющих сигналов, построение программных движений робота.

Для моделирования интерполяционного полинома с определенными координатами и скоростями были использованы сплайн третьего и четвертого порядков, которые обеспечивают непрерывность второй производной траектории. Смоделировано решение этой задачи в среде Matlab.

Для моделирования траектории напыления был выбран сплайн Эрмита четвертого порядка, так как при его использовании выполняется условие гладкости функции, а также выполняется условие непрерывности второй производной, и ошибка приближения в данном случае меньше, значит выполняется условие прохождения по установленной траектории с определенными скоростями.

В четвертом разделе диссертации было создано приложение "Информационная система моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры" для работы с базой данных имплантов.

Была разработана симуляционная модель движения робота Fanuc по координатам и скоростям для напыления поверхности импланта.

В заключительном разделе диссертации приводится перечень основных результатов и выводов диссертационного исследования, исходя из которых, положения, выносимые на защиту, были подтверждены, дается оценка научной новизны и практической значимости исследования.

Приложения. Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, акт внедрения.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ СОЗДАНИЯ ИМПЛАНТОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОТЕРЯННЫХ ИЛИ РАЗРУШЕННЫХ ЧАСТЕЙ СКЕЛЕТА ЧЕЛОВЕКА

1.1 Обзор методов создания имплантов для замены (усиления) различных частей скелета человека

Импланты являются изделиями медицинского назначения, используемые для замены человеческих поврежденных органов, могут быть также в виде чипов [2].

Существующие типы имплантирования:

- протезирование зубов;
- кохлеарное имплантирование;
- стволомозговое имплантирование;
- имплантирование клапанов сердца;
- идентификационная имплантация;
- имплантирование сетчатки;
- имплантирование конечностей [3-7].

Виды имплантов

Можно выделить следующие виды классификации имплантов:

По числу включенных элементов бывают эндопротезы, состоящие из одного, двух или трех компонентов.

По принципу конструкции импланта бывают одно, двухполюсные протезы.

В зависимости от фиксации импланта различают бесцементную, цементную, гибридную фиксацию.

Импланты суставов изготавливают из таких материалов как металлы и их сплавы, полиэтилен, керамика, углерод, оксиниум.

Полиметилметакрилат используется для закрепления импланта [8-15].

Импланты изготавливаются различными способами фрезерования.

Каждый из этих методов имеет свои отличительные преимущества и недостатки.

Одним из перспективных направлений создания титановых имплантов на сегодняшний день является использование для этих целей 3D принтеров. Преимуществами такого способа получения имплантов является возможность создания импланта под конкретного пациента, а также и то, что титановый имплант позволяет обеспечить правильное распределение нагрузки по всему объему импланта. 3D технологии позволяют напечатать на 3D-принтере импланты с особой двояковыпуклой формой, которые помогают конструкции быть ближе к прилегающей кости [16-19].

1.2 Обзор методов построения систем движения манипуляционных роботов при отслеживании сложных траекторий

Для населения при повреждениях или травмах, которые требуют замены человеческих органов, использование имплантов позволяет сохранить работоспособность той или иной части человеческого тела.

Роботизированные комплексы плазменного напыления имплантов позволяют значительно быстрее решить поставленную задачу по напылению имплантов биосовместимыми покрытиями.

Комплексы для напыления с интегрированием роботизированных систем в процессы плазменного напыления деталей дают возможность выйти на более высокий уровень, а также добиться улучшения свойств поверхностей имплантов и узлов за счет образования на их поверхностях покрытий с необходимыми свойствами. Роботизация процессов напыления позволяет существенно увеличить производительность труда, оптимизировать технологии обработки деталей, а также сократить время изготовления, повысить качество продукции, устранить вредные факторы, влияющие на здоровье человека. Роботы для микроплазменного напыления и программное обеспечение дают возможность наносить покрытия с высокой точностью, это позволит существенно сокращать количество используемых материалов, которые являются дорогими, позволяет осуществлять манипуляции с деталью, показывать технологические параметры работы и управлять ими в процессе самого напыления.

Промышленные роботы для напыления используются для выполнений широкого круга задач. С учётом действительности и дефицитом кадров необходимой квалификации самыми популярными являются автоматизированные решения на базе роботов [20].

При помощи роботизированного комплекса возможно выполнение различных функций движения в производственном процессе, передвижение устройств и выполнение многих видов операций.

Напыление поверхностей различными материалами:

- а) порошками (металлическими, керамическими и металлокерамическими, специальными композитными материалами);
- б) проволоками (из латуни, стали низколегированной, медной, алюминиевой и т.д.) [21].

Программа FANUC ROBOGUIDE V 9.40 дает возможность симуляции движения, разрабатываемые модули тестируются и изменяются полностью автономно, это сокращает время моделирования. Данные можно импортировать из файлов типа САПР. Программа является простой и легкой для обучения.

Чтобы обеспечить оптимальную конструкцию модуля, с помощью приложения ROBOGUIDE можно моделировать модули и выбрать нужного робота для использования и установить соответствующие свойства. Продолжительность циклов работы возможно просчитать за короткое время, и проверить выполнение.

Настройка и тестирование сложных систем

Изменяемые шаблоны ROBOGUIDE V 9.40 позволяют упрощать настройку осей, а также устройств позиционирования и станков с различными группами движения. После этого шаблоны тестируются с помощью инструментов проверки разных показателей работы, таких как движение, выполнение, продолжительность цикла и обнаружение столкновений.

Приложение ROBOGUIDE также доступно с рядом программных средств, предназначенных для решения конкретных задач. Каждое инструментальное средство для планирования движений при зачистке грата, загрузке-разгрузке, распылении краски, паллетировании или сварке разработано, чтобы повысить производительность посредством устранения возможных ошибок и сокращения времени настройки и продолжительности циклов [22].

1.3 Обзор методов и систем плазменного напыления на пространственные элементы сложной геометрической формы

На этапе обработки поверхности имплантов в основном используются методы газотермического напыления для нанесения различных покрытий из порошков металлов и керамики на импланты [23, 24].

Ортопедические импланты с покрытием, которое имеет пористую структуру, образованную частицами порошка титана (Ti) с поверхностью, имеют наиболее тесный контакт с образованными костными клетками. В сравнении с обычным проволочным напылением этот метод позволяет снизить потери материала при нанесении покрытий на изделия очень малых размеров благодаря малому (1...5 мм) размеру пятна напыления.

В течение последних лет был разработан метод и установки микроплазменного напыления (МПН) биомедицинского Ti-покрытия с использованием проволоки. Для напыления Ti-покрытий использовали установку микроплазменного напыления МПН-004, которая используется для напыления покрытий из проволок или порошков [25, 26].

Микроплазменное напыление - это вид газотермического напыления, где электрическая дуга загорается между катодом и анодом в среде аргона, который используется как плазмообразующий и защитный газ. Частицы порошка или проволоки поступают в плазменную струю, движутся, нагреваются и попадают на поверхность, формируя покрытие. Процесс напыления осуществляется при атмосферном давлении и требует соблюдения заданного расстояния до обрабатываемой поверхности, фиксированной скорости перемещения вдоль поверхности и перпендикулярности струи к поверхности, поэтому плазмотрон закрепляется на роботе или деталь перемещается в захвате робота по заданной траектории с соблюдением вышеперечисленных условий. Микроплазменное напыление отличается ламинарной струей и малым пятном напыления, малой мощностью до 4 кВт, что дает преимущества при обработке малых деталей и получения удовлетворительного плазменного напыления на пористые покрытия [27].

Для напыления имплантов широко применяются различные установки плазменного напыления.

Обзор систем плазменного напыления:

1. Мультипроцессная система.

МР-50 – это мультипроцессная система газотермического напыления, которая дает возможность точного контроля всего процесса.

Возможно управление следующими видами напыления:

- плазменного напыления;
- высокоскоростного напыления HVOF;
- газопламенного порошкового напыления;
- проволочного напыления;
- электродуговой металлизации;
- газопламенного проволочного напыления;
- газодинамического напыления (рисунок 1).



а

б

в

а – комплекс оборудования; б – робот ; в – камера

Рисунок 1 – Система МР-50

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [28]

2. Установка вакуумная для напыления зубных имплантов FORVAK.

Вакуумная установка используется в основном для напыления металлических зубных имплантов нитридом титана и нитридом циркония (рисунок 2).



Рисунок 2 – Установка FORVAK

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [29]

3. Установка ННВ-6.6.

Эта установка используется для напыления изделия композиционными покрытиями, например такие, как нитрид, карбид, карбонитрид, оксиды, борид (рисунок 3).



Рисунок 3 – Установка ННВ-6.6

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [30]

4. Установки напыления тонких пленок ННВ TF600 для лабораторных НИОКР или производства.

Установка напыления ННВ TF600 имеет преимущество использования полного диапазона методов нанесения для НИОКР (научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы) и производства, и разработана для повышенных требований к технологическому процессу (рисунок 4).

Установка напыления тонких пленок TF600 с управлением на базе ПЛК.

Установка напыления тонких пленок TF600 является одной из эффективных средств в операторском режиме.



а



б

а – камера TF600; б – установка напыления TF600

Рисунок 4 – Установка напыления TF600

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [31]

5. Установка для микроплазменного напыления КП-01.

Эта установка широко применяется для микроплазменного напыления деталей, для которых требуется соблюдение условий износостойкости, для восстановления поверхностей (рисунок 5).



Рисунок 5 – Установка КП-01

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [32]

6. Оборудование высокоскоростного (или сверхзвукового) газопламенного напыления High Velocity Oxy Fuel (HVOF) и High Velocity Air Fuel (HVAF).

Это оборудование относится к разряду наиболее технологических решений, внедряемых на вновь строящихся заводах (рисунок 6).

Существующие системы сверхзвукового напыления:

- мобильная система начального уровня Плакарт HVA-1;
- универсальная система Плакарт HV-2;
- мобильная система для напыления крупногабаритных объектов Плакарт HVA-7.

Оборудование высокоскоростного напыления ПЛАКАРТ HV-2



Рисунок 6 – Роботизированная система высокоскоростного напыления ПЛАКАРТ HV-2

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [33]

Характеристики системы HV-2:

- скорость установки - 7-9 скоростей звука;
- выходная пористость от 0,5%;
- адгезия > 80 МПа.

Сферы применения данной установки:

- гальваническое хромирование;
- никелирование деталей;
- детонационное напыление объектов;
- вакуумное напыление;
- ионно-плазменное напыление (рисунок 7) [33; 34-37].

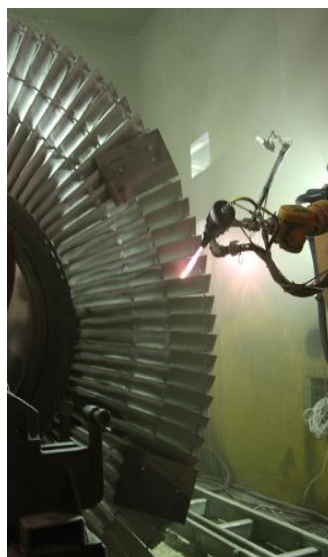


Рисунок 7 – Комплекс высокоскоростного напыления Плакарт HVA

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [34]

Установки плазменного напыления были классифицированы по способу, типу напыления, расстояния до объекта, вспомогательному оборудованию и фирме-производителю, установки плазменного напыления приводятся в таблице 1.

Таблица 1 – Установки плазменного напыления

Название установки	Способ напыления	Тип напыления	Расстояние до объекта (мм)	Вспомогательное оборудование	Фирма-производитель
1	2	3	4	5	6
Alpha	Спрей	плазменное	300-600	привод вращения	Alpha Dent
Forvak	Спрей	плазменное	270	частотный привод вращения арматуры, планетарный механизм оснастки	Siemens
Мульти процессная система MP-50	Спрей	плазменное, высокоскоростное HVOF, газопламенное порошковое и проволоочное, электродуговая металлизация	300	привод вращения	Flame Spray Technologies, Нидерланды
Установка ННВ-6.6	Точечное	парофизическое осаждение материала на подложку в вакууме	300	механизм вращения	«ЦВК»

Продолжение таблицы 1

2	3	4	5	6	7
Установка напыления тонких пленок TF600	Спрей	плазменное	300	частотный привод вращения арматуры, планетарный механизм оснастки	ННУ
Установка для микроплазменного напыления УМПН-02	Точечное	плазменное	300	привод вращения	Институт электросварки имени Е.О. Патона

Выводы к разделу с постановкой нерешенных проблем, которые будут исследоваться и решаться в диссертации

В данном разделе были изучены и проанализированы характеристики технологий для напыления, были отмечены отличия от аналогов:

- метод микроплазменного напыления позволяет в одном технологическом цикле создавать многослойные прочные слои на поверхностях деталей форм различных сложностей, обеспечивающие прочность и твердость данного покрытия;

- износостойкость повышается в 2-3 раза, защищают от коррозии и придают поверхности изделия свойства биотолерантности.

В диссертации будет решаться проблема моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры.

Объектом исследования являются импланты, которые используются вживления в организм человека в качестве заменителей поврежденных частей тела. Проблема отторжения импланта в данный момент решается при помощи нанесения покрытий на импланты биотолерантных порошков металлов.

В данной диссертации планируется решение следующих проблем:

1. При помощи параметрического метода классификации разработать систему классификации имплантов по соответствию необходимым условиям для последующего микроплазменного напыления.

2. Отобрать импланты для осуществления процесса напыления, при помощи устройства SCAN 3D UNIVERSE и программы Geomagic Design X разработать 3d модели выбранных имплантов.

3. Выделить основные этапы процесса напыления импланта при помощи роботизированных установок.

4. Выбрать оптимальный сплайн для построения интерполяционного сплайна с координатами и скоростями. Повысить порядок используемого сплайна и смоделировать решение этой задачи в среде Matlab.

5. На примере отобранных имплантов построить симуляцию движения робота-манипулятора с помощью виртуального симулятора Roboguide V 9.40.

Дальнейшие исследования в диссертации будут отражены в следующих моментах: классификация имплантов, создание 3D моделей имплантов, определение этапов процесса напыления, моделирование траектории напыления, симуляция движений робота.

2 ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ СОЗДАНИЯ ИМПЛАНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РЕШЕНИЙ

2.1 Классификация имплантов по типу применения и материалам изготовления, по геометро-топологическим размерам составляющих

По типу применения выделяют следующие виды имплантов:

1. Зубные импланты

Зубные импланты бывают разных типов:

- разборные;
- неразборные.

По форме импланта выделяют:

- цилиндрические конструкции;
- конусные или винтовые конструкции;
- пластиночные импланты.

По типу используемого материала выделяют:

- титановые;
- циркониевые (рисунок 8).



Рисунок 8 – Зубные импланты

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [38]

2. Кохлеарный имплант – имплант, дающий возможность восстановить потерю слуха пациентам с нейросенсорной тугоухостью (рисунок 9).



Рисунок 9 – Кохлеарный имплант

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [39]

3. Слуховой стволомозговой имплант – устройство, которое позволяет восстановить слух больным с глухотой неврального типа [40].

4. Имплант клапана сердца – прибор, который используется для восстановления сократительных движений сердца (рисунок 10).



Рисунок 10 – Имплант клапана сердца

Примечание - Рисунок адаптирован из работы [41]

5. Идентификационный код – имплант это устройство, которое предназначено для мобильной идентификации человека независимо от его возраста, состояния и дееспособности (рисунок 11).

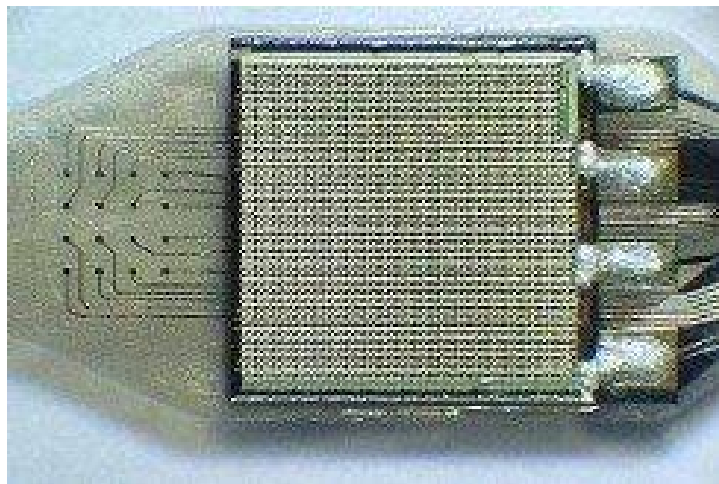


Рисунок 11 – Идентификационный код

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [42]

6. Импланты сетчатки-прибор, позволяющий заменить собой сетчатку человеческого глаза в случае её повреждения или дисфункции (рисунок 12).

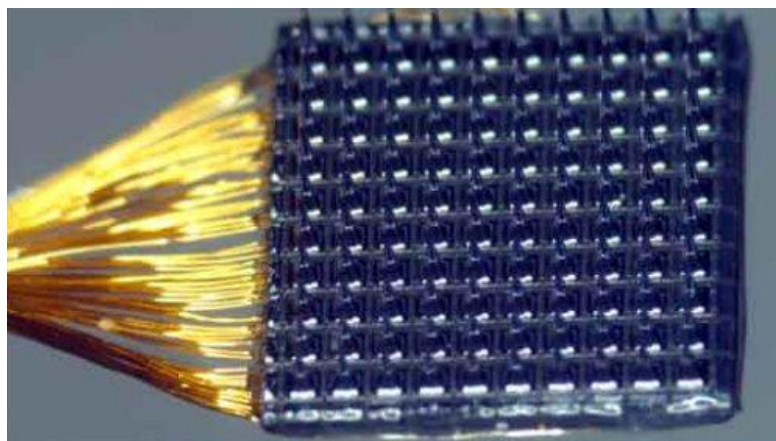


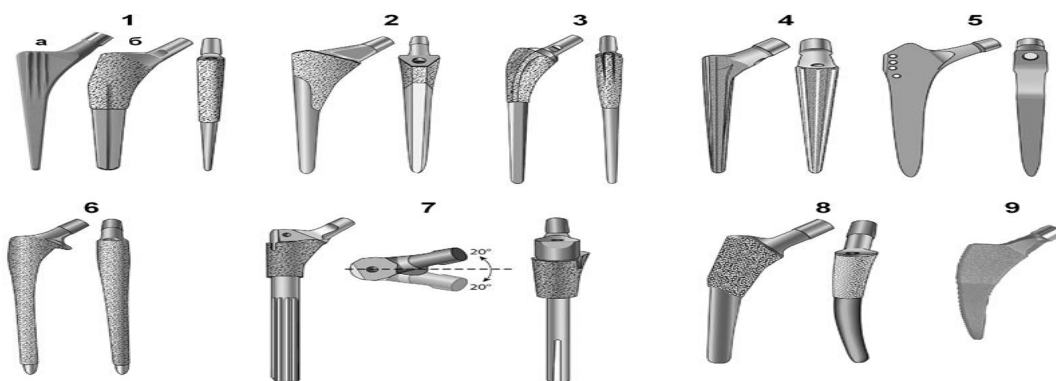
Рисунок 12 – Имплант сетчатки

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [43]

7. Имплант парализованных конечностей – это имплант, который позволяет возобновить частичное или полное функционирование парализованных конечностей, частей тела, при повреждениях центральной или периферической нервной системы.

Существующие виды имплантов конечностей:

– имплант(эндопротез) тазобедренного сустава (рисунок 13):



1 – конусовидный; 2 – прямой; 3 – закругленный; 4 – остроугольный; 5 – ромбовидный; 6 – круглый; 7 – угловой; 8 – ломаный; 9 – короткий

Рисунок 13 – Виды имплантов (эндопротезов) тазобедренного сустава

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [44]

– имплант(эндопротез) коленного сустава(рисунок 14):



а

б

а – вид сбоку; б – вид спереди

Рисунок 14 – Имплант (эндопротез) коленного сустава

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [44]

– имплант плечевого сустава (рисунок 15):



1 – головка; 2 – ножка; 3 – средняя часть

Рисунок 15 – Импланты плечевого сустава

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [44]

– имплант локтевого сустава (рисунок 16):



Рисунок 16 – Имплант локтевого сустава

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [44]

- имплант голеностопного сустава (рисунок 17):



Рисунок 17 – Имплант голеностопного сустава

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [44]

- шеечный диафизарный имплант (рисунок 18):



Рисунок 18 – Шеечный диафизарный имплант

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [44]

- имплант лучезапястного сустава (рисунок 19):



Рисунок 19 – Имплант лучезапястного сустава

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [44]

- имплант межфалангового сустава пальцев кисти (рисунок 20):



Рисунок 20 – Имплант межфалангового сустава пальцев кисти

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [44]

- имплант пястно-фалангового сустава пальцев кисти (рисунок 21):



Рисунок 21 – Имплант пястно-фалангового сустава пальцев кисти

Примечание - Рисунок адаптирован из работы [44]

- имплант суставов стопы (рисунок 22):



Рисунок 22 – Имплант суставов стопы

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [44]

8. Позвоночный имплант – это конструкция, позволяющая поддерживать хребет (рисунок 23).



Рисунок 23 – Позвоночный имплант

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [45]

9. Импланты хрящевого отдела носа - это импланты для реконструкции носа, которые изготавливают из медицинского силикона либо из других синтетических материалов (рисунок 24).



Рисунок 24 – Имплант хрящевого отдела носа

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [46]

Существующие импланты были разделены по материалу изготовления и фирмам-производителям, по геометро-топологическим размерам составляющих. Перечень имплантов приводится в таблицах 2, 3, 4.

Таблица 2 – Перечень имплантов по материалу и фирмам-производителям

Тип импланта	Физические размеры(мм)	Материал	Фирма-производитель
1	2	3	4
Зубные импланты	длина -10 диаметр от 2 до 6	титан	Nobel Biocare, Straumann, Astra Tech, Ankylos, Xive Friadent, AlphaBio, Ards, MIS, Implantium
Кохлеарный имплант	диаметр -От 1 до 4	титан	Cochlear, Clarion CII Bionic Ear, HiRes 90k, Nucleus 24 Contour, Med-El Combi 40+

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
Имплант клапана сердца	диаметр - От 16 до 33	титан	Edwards Lifesciences, Labcor Laboratorios Ltda, MEDTRONIC, St.Jude Medical
Имплант сетчатки	длина 0,02	титан	LABTICIAN, Pixium Vision, Retina Implant, Argus II, eSight.
Имплант тазобедренного сустава	длина ножки от 150 до 250	титан	AESCULAP AG , ЭСИ, SL-Plus, Sulfix-60, Palacos, Cemex, Simplex, Bioosteo, Osteobond, CMW, Zimmer, Lima, Metabloc, CLS, Zweymuller, ИСКО, Синко, ЭСИ, Aesculap
Импланты коленного сустава	длина дуги от 50 до 70 Ширина от 30 до 50 Длина ножки от 20 до 30	титан	Zimmer, DePuy, «Алтимед», Stryker, Smith&Nephew, Lima
Эндоимплант плечевого сустава	Диаметр стержня от 6 до 14 Диаметр диафиза 125	титан	DePuy Mitek, Zimmer, HIPREPLACEMENT, OHST, Streicer - Howmedica, Keramed, Имплант MT
Имплант локтевого сустава	диаметр 10-16 длина от 50 до 280	титан	Zimmer , Эндосервис, OppO, Medi, Push.
Имплант голено-стопного сустава	Длина от 30 до 50 Ширина 30 от до 50	титан	ArtusMed, OttoBock, Orlett, OppO
Шеечный диафизарный имплант	Стержень - диаметр 12, длина 150, 200, 300, 400 Зажим - диаметр 6, длина 160 и 200	титан	Zimmer, HIPREPLACEMENT, OHST, Streicer - Howmedica, Keramed
Имплант лучезапястного сустава	Размер головки -16 с четырьмя типоразмерами ножки (10-12-14-16)	титан	Orlett, Ortex, Immobil, Otto Boc
Имплант суставов кисти	Межфаланговый сустав пальцев кисти Длина от 30 до 70	титан	Zimmer , OppO, Medi, Push.
	Пястно-фаланговый сустав пальцев кисти Длина от 80 до 120		
Имплант суставов стопы	высота - 3, 4, ширина - 4, 2, длина проксимального стебля -11, длина дистального стебля - 6, а диаметр стеблей - 2,2	титан	Zimmer Trilogy, DePuy

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
Позвоночный имплант	диаметр 150-200 стержень 15 х 14, диаметр колец 16	титан	Sulfix-60, Palacos, Cemex, Simplex, Bioosteo
Импланты хрящевого отдела носа	Длина от 10 до 30	титан	Zimmer Trilogy, DePuy

Таблица 3 – Импланты по фирмам-производителям

Тип импланта	Фирма-производитель	Технология изготовления	Оборудование	Программное обеспечение
1	2	3	4	5
Зубные импланты	MISS	Фрезерование, токарная обработка	Tornos Bechler ENC 162, Mazak, DECO 13a, <u>Rollomatic</u>	TB-DECO
Зубные импланты	Zimmer	Фрезерование, токарная обработка	<u>Rollomatic</u>	Siemens, Sinumerik
Имплант тазобедренного сустава	DePuy	Фрезерование, токарная обработка, горячая штамповка	Anca TX7+	Siemens PLM NX
Имплант тазобедренного сустава	Poldi Anticorro	Печать 3D принтере, фрезерование, токарная обработка	Schutte 305	FANUC
Импланты коленного сустава	Poldi Anticorro	Фрезерование, токарная обработка	Anca TX7+	Siemens PLM NX
Импланты коленного сустава	Zimmer	Фрезерование, токарная обработка	<u>Rollomatic</u>	Siemens, Sinumerik
Эндопротез плечевого сустава	MATHYS	Фрезерование, токарная обработка	Anca TX7+	Siemens PLM NX
Эндопротез плечевого сустава	Zimmer	Фрезерование, токарная обработка	<u>Rollomatic</u>	Siemens Sinumerik
Имплант локтевого сустава	Biomet Merk	Печать 3D принтере, фрезерование,	DECO 13	TB Deco
Имплант локтевого сустава	Zimmer	Фрезерование, токарная обработка	<u>Rollomatic</u>	Siemens, Sinumerik
Имплант голеностопного сустава	Poldi Anticorro	Фрезерование, токарная обработка	Anca TX7+	Siemens PLM NX

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5
Имплант голеностопного сустава	Zimmer	Фрезерование, токарная обработка	<u>Rollomatic</u>	Siemens, Sinumerik
Имплант лучезапястного сустава	Waldemar Link	Печать на 3D принтере, фрезерование, токарная обработка	Anca TX7+	Delcam plc
Имплант лучезапястного сустава	Zimmer	Фрезерование, токарная обработка	<u>Rollomatic</u>	Siemens, Sinumerik
Сустав пальцев кисти	Poldi Anticorro	Фрезерование, токарная обработка	Anca TX7+	ArtCAM
Пястно-фаланговый сустав пальцев кисти	Poldi Anticorro	Фрезерование, токарная обработка	DECO 13	TB Deco

Таблица 4 – Перечень имплантов по физическим размерам составляющих

Тип импланта	Физические размеры(мм)										
	Длина	Диаметр	Ширина	Длина дуги	Длина зажима	Диаметр зажима	Длина прямоугольника	Высота	Длина прокси мального стебля	Длина дистального стебля	Диаметр стебля
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Зубные импланты	10	2-6									
Кохлеарный имплант		1-4	2								
Имплант клапана сердца		16-33									
Имплант сетчатки	0,02		0,02								
Имплант тазобедренного сустава	150-250										
Импланты коленного сустава	20-30		30-50	50-70							
Эндоимплант плечевого сустава	125-200	6-14									

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Имплант локтевого сустава	50-280	10-16									
Имплант голеностопного сустава	125-250		30-50								
Шеечный диафизарный имплант	150-400	12			160 - 200	6					
Имплант лучезапястного сустава	16										
Имплант межфалангового сустава пальцев кисти	25-70										
Имплант пястно-фалангового сустава пальцев кисти	80-120										
Имплант суставов стопы			4,2-5,4				3,4-4,3	3,4-4,2	11-12,2	6-6,4	2,2-2,5
Позвоночный имплант	16-30										
Импланты хрящевого отдела носа	10-30										

2.2 Параметрический метод классификации имплантов сложной геометро-топологической структуры

Классификация относится к задачам оптимизации. В этих задачах необходимо отнести элементы по каким-либо свойствам к разным классам. Такие задачи формализуются, затем показатель качества необходимо обратить в экстремум. Есть множество механизмов поиска результирующего разделения данных.

В зависимости от элементов, типа данных выбирается тот или иной метод классификации. Оптимизационные методы классификации могут быть основаны на кластерном анализе [47, 48].

Были проанализированы существующие классификации имплантов.

В работе Иманбаевой М.Б., Зуби Ю.Х., Избаскановой А.С., импланты классифицированы по паре трения составляющих [49].

В работе Джаксыбаева М.Н., Жумагулова М.О., импланты классифицированы по конструкции составляющих [50].

В работе Вильямса Д., Роуфа Р. импланты классифицированы по составу и конструкции, по длительности функционирования, по степени погружения в организм [51].

В работе Кирпичева И.В., Алиева А.Г., Коваленко А.Н., Амбросенкова А.В., импланты классифицированы по количеству компонентов [52].

В работе Миронова Р.А., Османова А.М., Устазова К.А., Асламханова С.Р. импланты классифицированы в зависимости от принципа конструкции [53].

В работе Чиркова Н.Н., Николаева Н.С., Горбатова Р.О., Клеменовой И.А., Новикова А.В., Зиновьева С.В., Казакова А.А. импланты классифицированы по способу фиксации, по конструкции [54].

В работе Нехлопочина С.Н., Нехлопочина А.С., Швеца А.И. импланты классифицированы по конструкции [55].

В работе Адамовой А.А., Шведовой А.Г., Чудовского И.В. импланты классифицированы по различным их характеристикам: области применения, способу пришивания к органическим тканям [56].

В результате анализа существующих классификаций были выделены следующие основные классификации имплантов, которые приведены в таблице 5:

- по конструкции;
- по количеству компонентов;
- по области применения;
- по способу пришивания к тканям;
- по паре трения составляющих;
- по составу;
- по длительности функционирования;
- по степени погружения в организм.

Таблица 5 – Существующие классификации имплантов

Вид классификации	Параметр
1	2
Конструкция	– цилиндрические
	– конусные
	– пластиночные
Количество компонентов	– 1 компонент
	– 2 компонента
	– 3 компонента
Область применения	– зубные импланты
	– импланты конечностей
	– другие импланты
	– чипы
Способ пришивания	– цементный
	– гибридный
	– бесцементный
Тип материала	– титановые
	– полиэтиленовые
	– керамические

Продолжение таблицы 5

1	2
Состав	– оксиниумные
	– углеродные
	– разборные
	– неразборные
Длительность функционирования	– 0-5 лет
	– 5-10 лет
	– свыше 10 лет
Степень погружения в организм	– поверхностная
	– глубокая

Анализ топологических структур имплантов показывает, что они являются сложными поверхностями, для изготовления которых необходимо использовать оборудование, которое дает возможность работы с самыми малыми деталями. Для этих целей возможно использование роботизированных комплексов.

Импланты выбираются индивидуально, в связи с этим физические размеры имплантов можно взять как параметрические функции, это позволит изготовить имплант методом подгонки этих параметров под определенные размеры.

В результате исследований был проведен анализ основных типов имплантов по различным критериям:

- физические и геометрические размеры;
- тип применения;
- фирмы-производители;
- материал изготовления;
- технология изготовления.

Учитывая предельные параметры, допустимые при использовании робота-манипулятора Fanuc, выделяем предельные значения физических параметров. Для качественного нанесения покрытия манипуляционным роботом необходимо выполнение следующих условий. Допустимые условия для покрытия роботом приводятся в таблице 6.

Таблица 6 – Допустимые условия для покрытия роботом

Параметр	Минимальное значение(мм)	Максимальное значение(мм)
Расстояние до объекта	145	155
Диаметр напыления	1	5
Толщина покрытия	0,05	1

Для плазменного напыления имплантов с помощью роботизированных установок необходимо выполнение условий, указанных в таблице 6. Для этого целесообразно использование параметрического метода классификации этих имплантов для того, чтобы отобрать импланты, которые возможно напылить с

помощью роботизированной установки. Для этого необходимо определить максимальные и минимальные значения параметров этих имплантов.

Для реализации параметрического метода классификации 16-ти видов имплантов для возможности последующего напыления были определены 11 параметров физических размеров составляющих этих имплантов:

- k_1 – длина импланта;
- k_2 – диаметр импланта;
- k_3 – ширина импланта;
- k_4 – длина дуги;
- k_5 – длина зажима;
- k_6 – диаметр зажима;
- k_7 – длина прямоугольника;
- k_8 – высота;
- k_9 – длина проксимального стебля;
- k_{10} – длина дистального стебля;
- k_{11} – диаметр стебля.

Для каждого параметра определены максимальное и минимальное значение. Предельные значения параметров приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Предельные значения параметров составляющих имплантов

Значения	Предельные значения(мм)										
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}
Минимальное	0,02	0,15	0,02	50	160	6	3,4	3,4	11	6	2,2
Максимальное	400	16	50	70	200	6	4,3	4,2	12,2	6,4	2,5

Значения каждого параметра разбиты на 3 интервала, по которым они отнесены к разным классам. Интервалы для классификации приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Классификация имплантов по параметрическому методу

Класс	Значения параметров по классам (мм)										
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}
1-класс	30-400	15-35	30-50	50-70	160-200	10-20	15-20	15-20	15-20	15-20	15-20
2-класс	10-30	5-15	5-30	10-50	10-160	5-10	10-15	10-15	10-15	10-15	10-15
3-класс	0-9	0-5	0-5	0-10	0-10	0-5	0-10	0-10	0-10	0-10	0-10

Определено 3 класса имплантов по соответствию предельным параметрам, определенным в таблице 6:

- 1-класс: класс имплантов, наиболее оптимально удовлетворяющих предельным параметрам, допустимым при напылении роботом;
- 2-класс: класс имплантов, удовлетворяющих предельным параметрам, допустимым при напылении роботом;

–3-класс: класс имплантов, не удовлетворяющих предельным параметрам, допустимым при напылении роботом.

Алгоритм классификации можно представить в следующем виде (рисунок 25).



Рисунок 25 – Алгоритм классификации

1. Приведение исходных данных к нужному виду (подготовка данных).
Данные по типам имплантов и значения параметра загружаются в текстовый файл Parametry_dannye. txt.

2. Выбор меры близости.

Мерой близости определим расстояние между предельными значениями физических параметров имплантов по классам.

3. Выбор алгоритма (метаалгоритма) классификации.

Применим параметрический алгоритм классификации при помощи мастера обработки Квантование в аналитической платформе Deductor Studio.

4. Выполнение алгоритма.

Для классификации имплантов по параметрам в аналитической программе Deductor Studio был использован мастер обработки Квантование.

Мастер обработки Квантование применяется для разбиения данных на определенные интервалы.

В настройках параметров квантования укажем способ – по интервалам, количество интервалов – 3, значение – метка интервала (рисунок 26).

Квантование
Настройка параметров квантования

тип импланта
✓ параметр

Имя столбца: COL2
Тип данных: Вещественный
Назначение: ☒ Используемое

Способ: По интервалам
Интервалов: 3
Значение: Метка интервала
Вид данных: ... Дискретный

Минимум: 0,02
Максимум: 150
Стандартное откл.: 43,9030829403433

< Назад Далее > Отмена

Рисунок 26 – Настройка параметров Квантование

Определим метки: 1-класс, 2-класс, 3-класс (рисунок 27).

Границы и метки интервалов
Настройка границ и меток интервалов квантования

Столбцы		Интервалы (изменены)		
Имя	Интервалов	Nº	Граница	Метка
9.0 параметр	3		0,02	
		0	9	3-класс
		1	30	2-класс
		2	150	1-класс

< Назад Далее > Отмена

Рисунок 27 – Границы и метки интервалов

В результате импланты были классифицированы на 3 класса по параметрам составляющих.

К первому классу были отнесены:

- импланты(эндопротезы) тазобедренного сустава;
- импланты(эндопротезы) коленного сустава;
- импланты(эндопротезы) плечевого сустава;
- имплант(эндопротезы) локтевого сустава;
- имплант(эндопротезы) голеностопного сустава.

Ко второму классу были отнесены:

- импланты(эндопротезы) лучезапястного сустава;
- имплант фалангового сустава пальцев кисти;
- имплант пястно-фаланговых суставов пальцев кисти;
- имплант(эндопротез) суставов стопы;
- позвоночный имплант.

К третьему классу были отнесены:

- зубные импланты;
- кохлеарный имплант;
- имплант клапана сердца;
- имплант сетчатки;
- шеечный диафизарный имплант;
- имплант хрящевого отдела носа (рисунок 28).



тип импланта	параметр
Имплант тазобедренного сустава	1-класс
Импланты коленного сустава	1-класс
Эндопротез плечевого сустава	1-класс
Имплант локтевого сустава	1-класс
Имплант голеностопного сустава	1-класс
Имплант лучезапястного сустава	2-класс
Межфаланговый сустав пальцев кисти	2-класс
Пястно-фаланговый сустав пальцев кисти	2-класс
Имплант суставов стопы	2-класс
Позвоночный имплант	2-класс
Зубные импланты	3-класс
Кохлеарный имплантат	3-класс
Имплант клапана сердца	3-класс
Имплант сетчатки	3-класс
Шеечный диафизарный имплант	3-класс
Импланты хрящевого отдела носа	3-класс

Рисунок 28 – Классификация имплантов по параметрам

5. Представление полученных результатов.

Диаграмма размещения имплантов по кластерам показана на рисунке 29.

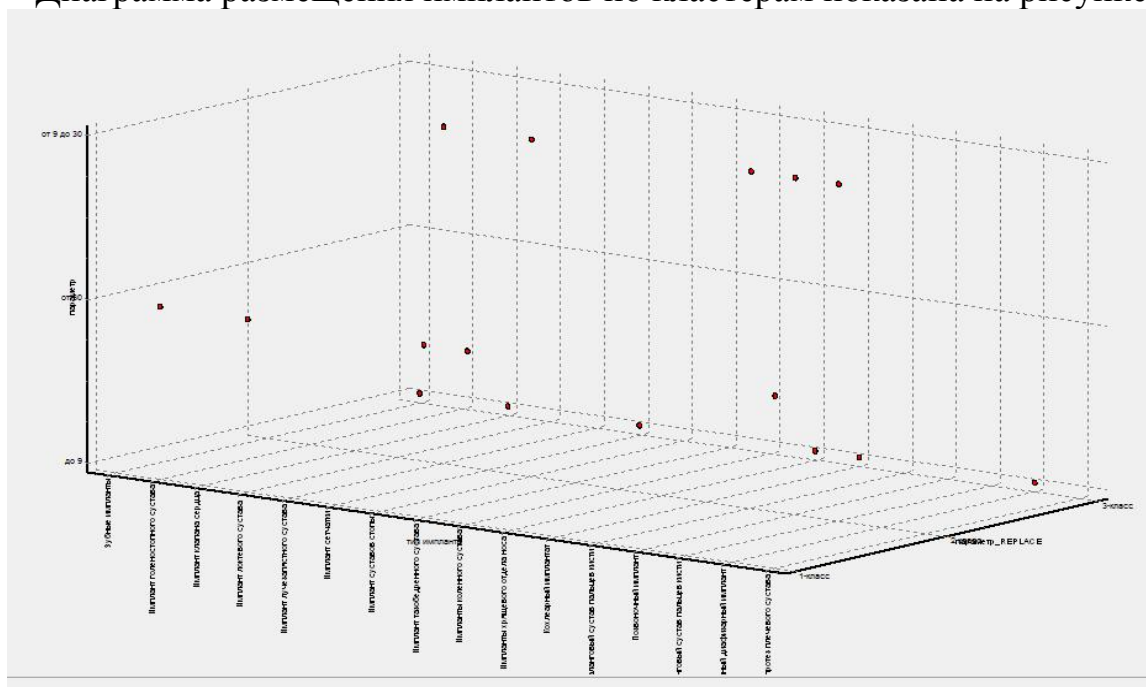


Рисунок 29 – Диаграмма размещения имплантов по кластерам

В результате параметрического метода классификации были получены следующие классы (рисунок 30).



Рисунок 30 – Классификация имплантов

6. Интерпретация полученных результатов.

Для плазменного напыления имплантов с помощью роботизированных установок необходимо было определить виды имплантов, которые соответствуют предельным параметрам напыления. Для последующего плазменного напыления при помощи роботизированных комплексов было отобрано по 3 импланта с первых двух классов имплантов, которые удовлетворяют предельным параметрам, допустимым при напылении роботом [57].

2.3 Исследование программного обеспечения при построении 3d моделей имплантов для станков с ЧПУ

Разработка имплантов и эндопротезов при помощи станков ЧПУ применяется довольно широко.

Для подготовки заготовок из титановых материалов используют станки ЧПУ и специальные инструменты, предназначенные для резки металлов. Данный процесс является многоэтапным, каждая операция имеет свою специфику.

Операции подготовки имплантов и эндопротезов на токарных станках ЧПУ делятся следующие типы:

- предварительная обработка;
- промежуточная обработка;
- основная обработка.

Программное обеспечение

Программы для станков с ЧПУ разрабатываются на языке «G-код». Некоторые видов станков работают с языками программирования, которые отличаются от стандарта. Для решения простых задач, таких как раскрой плоских заготовок, могут использоваться файлы обмена данными [58].

Solid Works – это комплекс программ системы автоматизированного проектирования, которые предназначены для автоматизации работ предприятия на конструкторских и технологических этапах подготовки производства деталей. Он обеспечивает разработку деталей самой сложной конструкции и различных назначений. Работает в операционной системе Microsoft Windows, есть специальные версии, позволяющие работать в других операционных системах. Это первая САПР, поддерживающая твердотельное моделирование для операционной среды Windows [59-63].

Было проанализировано большое количество станков с ультразвуковой обработкой, удовлетворяющих требованиям обработки титановых имплантов и изготовления имплантов различной сложности. Станки были проанализированы по техническим и коммерческим параметрам. В результате проведенного анализа наиболее подходящими станками для изготовления имплантов были выбраны станки: токарно-фрезерный типа NXT 1000 (рисунок 31) и фрезерный с ультразвуковой обработкой типа VU5 или ULTRASONIC 20 (рисунок 32).



Рисунок 31 – Внешний вид токарно-фрезерного станка

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [64]



а



б

а – Ultrasonic 20; б – VU-5

Рисунок 32 – Внешний вид фрезерного станка

Примечание – Рисунок адаптирован из работы [64]

С помощью этих двух станков можно создать эндопротезы самой разной степени сложности. К этим станкам в поставку входит комплект инструментов, позволяющий проводить обработку титановых имплантов и его сплавов [64].

Выводы к разделу 2

В результате этих исследований был проведен анализ типов имплантов по их физическим геометрическим размерам, по типу применения, по фирмам-производителям, материалам изготовления, технологии изготовления.

В результате параметрического метода классификации была разработана система классификации имплантов по соответствию необходимым условиям для последующего плазменного напыления при помощи роботизированного комплекса.

Для реализации параметрического метода классификации были определены 11 параметров. Определено 3 класса имплантов. Было отобрано по 3 импланта с первых двух классов имплантов, которые удовлетворяют предельным параметрам, допустимым при напылении роботом. Для осуществления процесса напыления было отобрано с 1-го класса: имплант тазобедренного сустава, имплант голени, имплант плечевого сустава и 2-го класса: имплант позвоночный, имплант шейного отдела, имплант суставов пальцев.

Было исследовано программное обеспечение, используемое при построении 3d моделей имплантов для станков с ЧПУ.

Было проанализировано большое количество токарно-фрезерных и фрезерных станков с ультразвуковой обработкой, удовлетворяющих требованиям обработки титана и изготовления имплантов, станки были проанализированы по всем техническим и коммерческим параметрам.

3 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА БАЗЕ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

3.1 3d моделирование имплантов сложной геометро-топологической структуры

3D моделирование является процессом создания трехмерной модели объекта. Задача – создание визуального объёмного образа объекта.

Изображение трехмерных объектов включает построение проекции модели на сцены на плоскости. Существует множество программ трехмерного моделирования. Но с созданием 3D-дисплеев и 3D-принтеров, трёхмерная графика может не включать проецирование на плоскость [65].

Существуют следующие основные методы создания 3D модели объекта (рисунок 33):

- фотограмметрия;
- создание модели в системе автоматизированного проектирования;
- 3D сканирование.

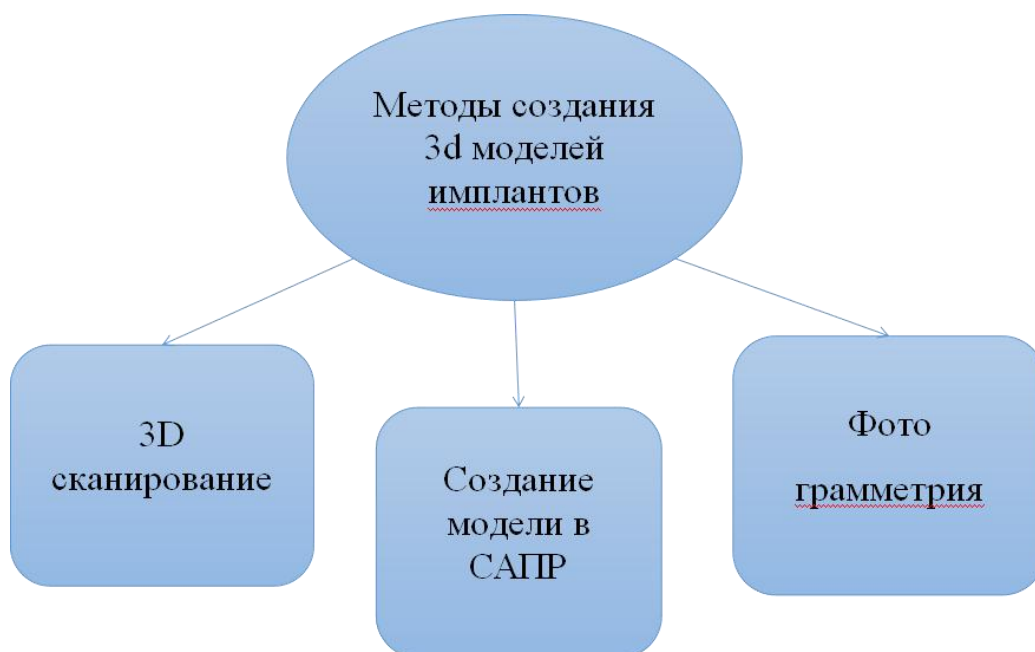


Рисунок 33 – Методы создания 3D модели

Фотограмметрия является областью науки, которая занимается установлением и определением физической формы, геометрических размеров, положений и других характеристик моделей по их фотографическим изображениям.

Имеются два направления фотограмметрии: первое – фототопография, которая занимается созданием карты и планов Земли по снимкам, второе – решение прикладных задач, например таких областей как, архитектура, строительство, медицина, криминалистика и т.д. [66-68].

SolidWorks – программа трехмерного моделирования, предназначенная для создания моделей различных сложностей и различного назначения [69].

Для создания 3D модели сложной геометрической формы, чаще всего используются аппаратные средства такие, как 3D сканеры.

3D сканирование

Для 3d сканирования используются сканеры, которые основаны на методах сканирования структурированным светом. Это устройства, представляющие собой систему, в которой есть одна или две камеры связанные с кино-проектором. При засветке объекта “зеброй” и черно-белыми квадратами, расположенными в шахматном порядке, камеры могут анализировать искривления картины и с помощью этих данных строят 3D модель [70].

Программа Geomagic Design дает возможность разрабатывать трехмерные модели и проверять геометрические размеры в CAD/CAM/CAE.

Возможности этой программы определяются различными доступными функциями, начиная от исправления ошибок в полученной модели и заканчивая контролем качества.

Основные функции программы Geomagic Design X:

- реверс-инжиниринг;
- исправление и оптимизация данных;
- контроль качества и размеров объекта, статистика полученных данных;
- разработка деталей с высокими требованиями к прилеганию поверхностей;
- сжатие данных сканирования [70-73].

Наиболее подходящим из рассмотренных вариантов получения 3D модели импланта является устройство scan 3D UNIVERSE, позволяющее создать 3D модель любых объектов и обработать результаты измерений. Нет необходимости корректировать и сертифицировать точность калибровки.

Процесс 3d моделирования имплантов

Трехмерное планирование и моделирование операции дает возможность разрабатывать импланты, полностью соответствующие стандартам.

Процесс создания модели на компьютере позволяет учитывать особенности организма каждого пациента. Этот метод позволяет правильно подобрать импланты с высокой точностью.

Моделирование 3d имплантации является инновационным и безопасным методом установки имплантов и эндопротезов в организм человека.

Методика 3D имплантации – это планирование установления имплантов в организм человека. Данные обрабатываются на компьютере, в результате получают данные, необходимые для проведения операции вживления:

- оценивается состояние физических размеров импланта;
- качество ткани;
- подбор места вживления.

Учитывается расположение самих костей и близлежащих органов человека.

Преимущества:

- быстрое время проведения имплантации;
- минимальный риск повреждения органов;
- демонстрация пациенту проведения операции;
- выбора точного места положения;
- выбор угла наклона конструкции;
- наиболее точный подбор места для установки импланта;
- изготовление точных имплантов;
- сведение к минимуму травматичности операции, уменьшение болезненности и отеков после операции;
- уменьшение срока восстановительного периода после проведения операции.

Этапы имплантации:

- сканирование;
- виртуальное планирование;
- применение хирургического шаблона [74].

Для создания 3D моделей имплантов использовалось устройство для 3d сканирования SCAN 3D UNIVERSE, восстанавливающее геометрические размеры, затем по этим размерам при помощи программы Geomagic Design X были разработаны 3d модели имплантов (рисунки 34, 35, 36, 37, 38, 39).

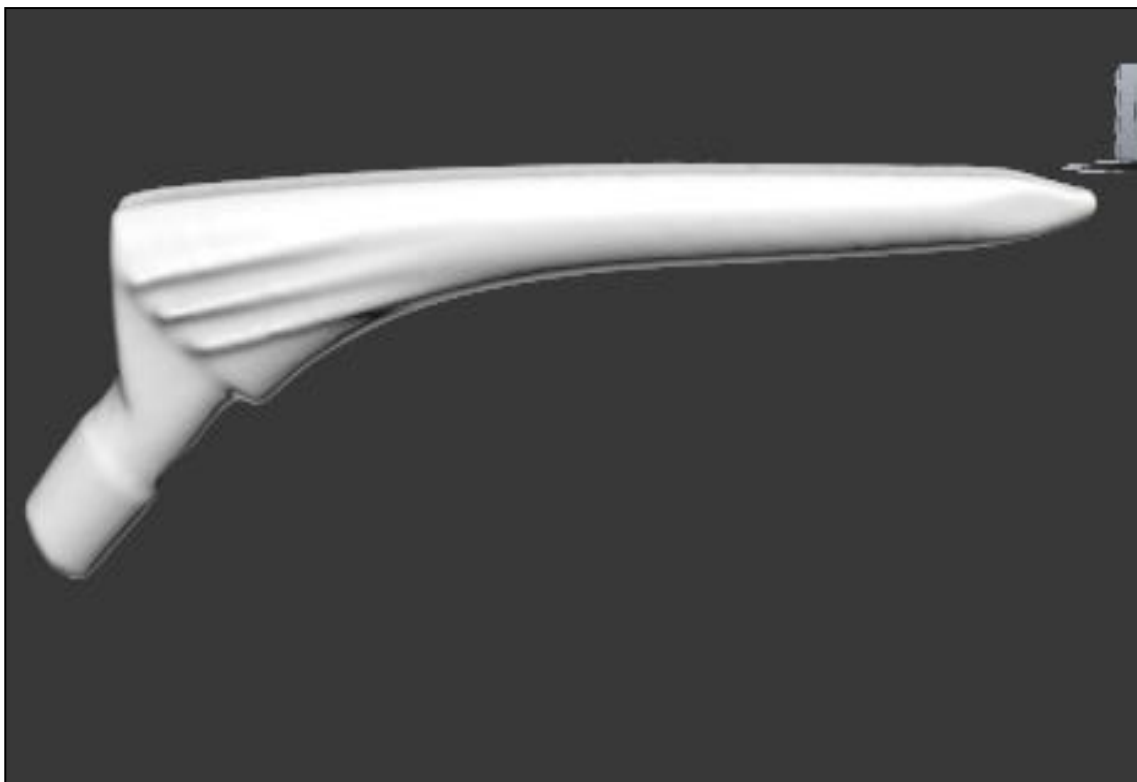


Рисунок 34 – 3d модель составляющей импланта тазобедренного сустава

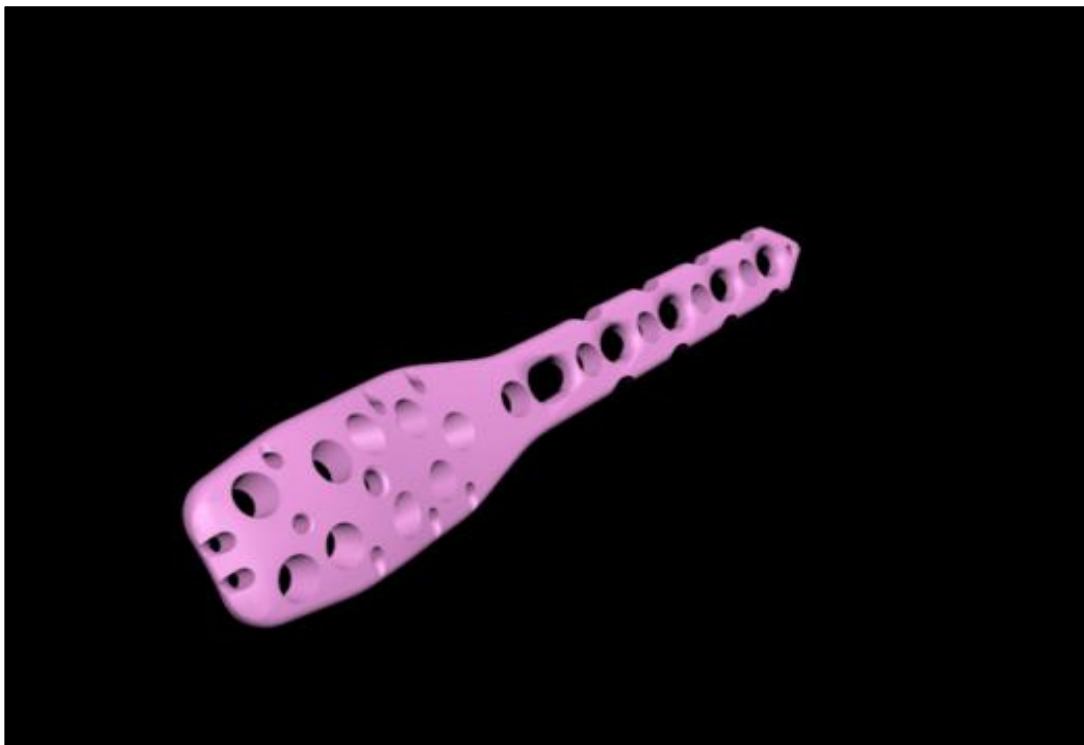


Рисунок 35 – 3d модель составляющей импланта плечевой кости

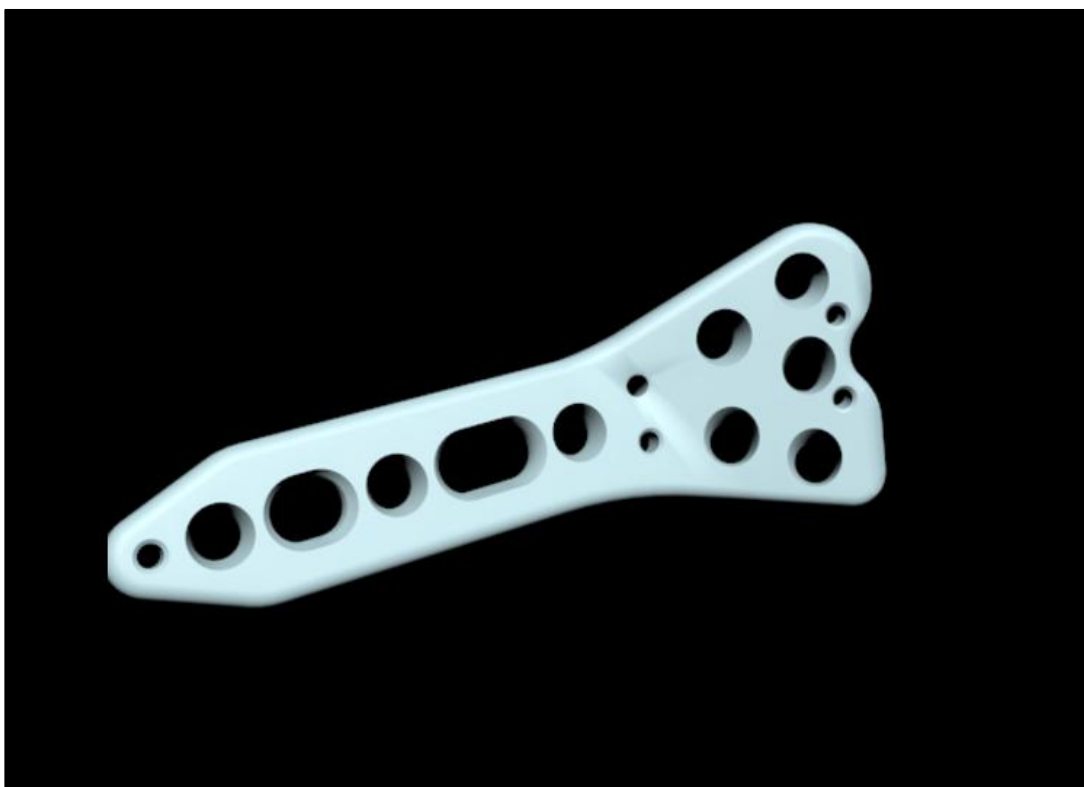


Рисунок 36 – 3d модель составляющей импланта голени



Рисунок 37 – 3d модель составляющей позвоночного импланта



Рисунок 38 – 3d модель составляющей импланта суставов пальцев

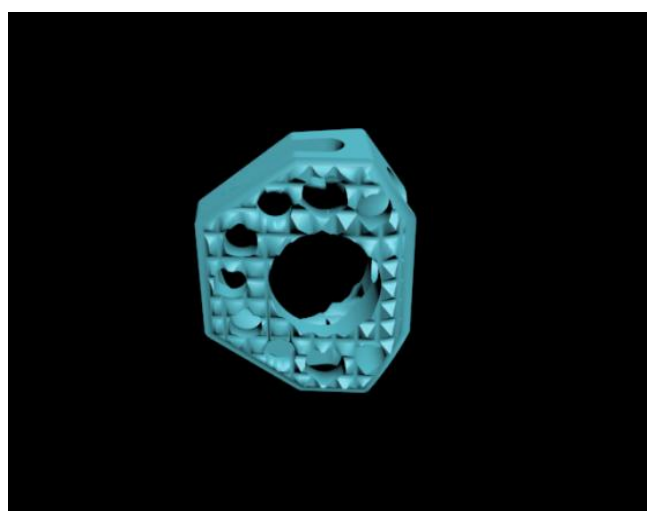


Рисунок 39 – 3d модель составляющей шейного эндопротеза

3.2 Исследование и построение схемы системы плазменного напыления на объекты сложной геометро-топологической структуры

Преимущества и возможности микроплазменного напыления в сравнении с альтернативными методами напыления:

- создание прочных поверхностных слоев на поверхности имплантов сложных форм, обеспечивающие следующие качества: прочность, твердость самого импланта, стойкость к изнашиванию, защита от коррозии, а также немаловажную роль играет качество биотолерантности;
- использование математических методов компьютерного моделирования позволяет создавать медицинскую продукцию с прогнозируемыми свойствами и структурой;
- использование новых алгоритмов управления станками ЧПУ и роботоманипулятором, что дает возможность проводить обработку изделий медицинского назначения более продуктивно и обеспечивает защиту окружающей среды от отходов.

Целью является моделирование траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры.

Объектом исследования являются импланты или эндопротезы, используемые для замены разрушенных частей человека. Для того чтобы импланты лучше приживались в организме человека, покрытие биосовместимыми металлами является одним из самых лучших решений.

Напыление имплантов при помощи роботизированного комплекса сложный процесс. Его можно условно разделить на пять этапов (рисунок 40):

1. Создание базы данных имплантов.
2. Создание 3d модели имплантов.
3. Математическое моделирование траектории напыления.
4. Симуляция движений робота.
5. Напыление на реальном станке (рисунок 41).

Создание базы данных имплантов

При помощи параметрического метода классификации была разработана система классификации имплантов по типу применения и материалам изготовления, позволяющая классифицировать импланты по геометро-топологическим размерам составляющих и отобрать импланты по соответствию необходимым условиям для последующего плазменного напыления.

В результате проведенных исследований, в MS SQL Server Management Studio 2012 была разработана база данных для учета существующих и возможных имплантов различных производителей, просмотра данных имплантов по типу применения и материала изготовления, просмотра данных имплантов по геометро-топологическим размерам составляющих, просмотра данных программного обеспечения при построении 3D моделей имплантов для станков с числовым программным управлением (ЧПУ), учета физических

размеров имплантов, обновления, записи элементов, добавления новых полей, файлового обмена данных с Matlab.

Создание 3d модели имплантов

Учитывая предельные параметры, допустимые при использовании выбранного робота с применением параметрического метода классификации были отобраны 6 имплантов с первых двух классов. При помощи сканирующего устройства SCAN 3D UNIVERSE и программы Geomagic Design X были разработаны 3d модели 6 имплантов, были обработаны результаты измерений.

Математическое моделирование траектории напыления

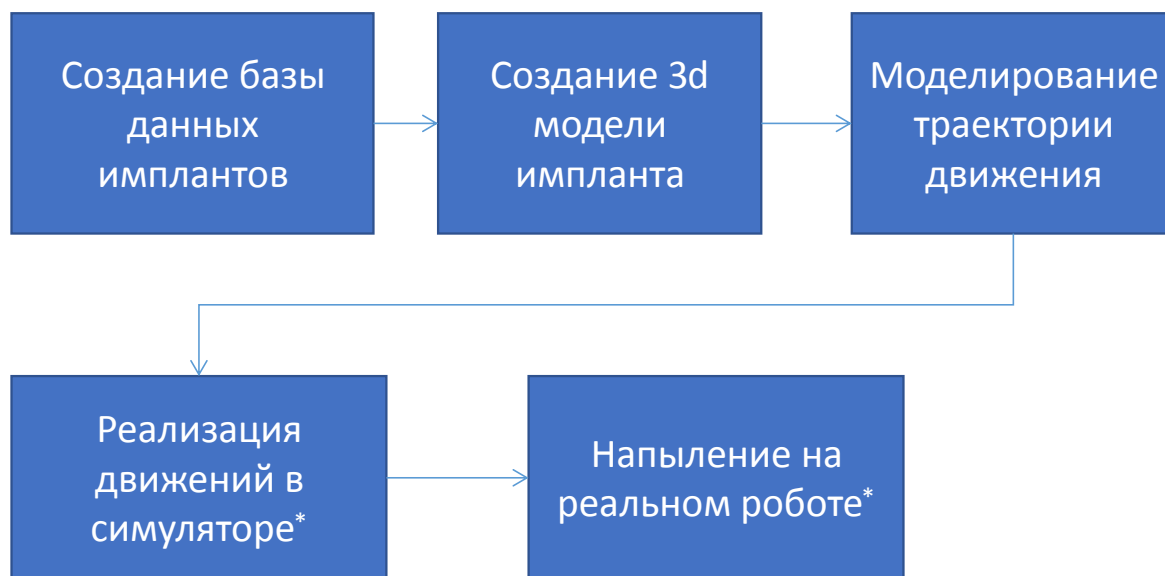
Выбирается оптимальный сплайн для построения моделирующего сплайна с модельными тестовыми данными координат и скорости. Решение данной задачи проводится путем повышения порядка используемого сплайна и решение этой задачи моделируется в среде Matlab.

Симуляция движений робота.

На примере отобранных имплантов будет построена симуляция движений робота с использованием симулятора Roboguide V9.40 для робота типа Fanuc.

Напыление на реальном станке

Программа, построенная в виртуальном симуляторе, дает возможность переноса TP программы на реальный робот [75].



* – параметры напыления: диаметр напыления $d=1-5$ мм; скорость напыления $v=1-10$ мм/с; расстояние до объекта $S=150$ мм; время прохождения по одной линии $t=1-15$ с.

Рисунок 40 – Этапы процесса напыления

Процесс напыления

Напыляемый имплант должен быть установлен в руке манипуляционного робота, перемещающего и вращающего данный имплант для наилучшего

напыления его поверхности. Для этого требуется соблюдение следующих условий:

- 1) сопло направляет струю порошка металла на имплант, приблизительное расстояние – 150 мм от детали, угол расположения объекта – 90° ;
- 2) точка пятна напыления должна быть – 1-5 мм (чем пористее напыленная поверхность импланта, тем оптимальнее эндопротез вживляется в место установки), высота покрытия должна составлять примерно 0.05...1.0 мм слоя;
- 3) издержки используемого материала могут быть максимально 10-15% от общей массы;
- 4) напыляемый материал – титан VT6 [76-78].

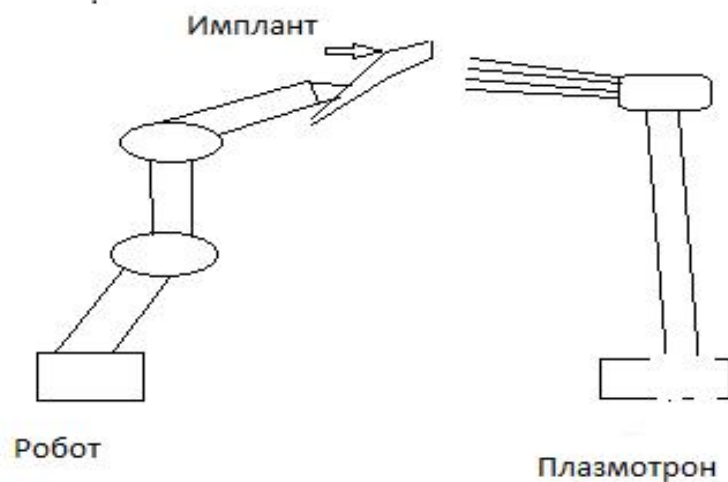


Рисунок 41 – Схема напыления импланта

3.3 Построение траекторий движения манипуляционного робота для плазменного напыления

Формирование управляющих сигналов

Координаты исполнительных механизмов роботов подбираются так, чтобы каждый привод управлял изменением одной из обобщенных координат, которые являются сигналами этих приводов.

Для моделирования управляющих сигналов в первую очередь строятся матрицы значений обобщенных координат. Строится зависимость от времени $q_i(t)$, $i = 1, \dots, l$, с заданными условиями:

$$q_i(t_j) = q_i^j, j = 0, 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где $t_0, t_1, \dots, t_m$ – набор точек интервала $[0, T]$, $t_0 = 0, t_m = T$. Для того, чтобы управление этими приводами было правильным и качественным, могут налагаться дополнительные ограничения. Также решается вопрос о длине интервала времени, в течение которого проходит процесс моделирования.

Должны быть определены узлы данной траектории в течение этого времени t_j . Существует множество алгоритмов планирования управления приводами роботизированного манипулятора.

Задачи алгоритма моделирования управляющих сигналов:

- определение продолжительности данного процесса;
- разделение интервала на определенное количество отрезков;
- определение управления для произвольного момента времени.

Первая задача в основном решается при помощи метода последовательных приближений, если ограничения, которые накладываются на функции, являются очень сложными, а их выполнение можно проверить только после определения алгоритма интерполяции.

Первое условие приближения для точек интерполяции t_j находится из формулы (2):

$$t_j = t_{j-1} + \max_{1 \leq i \leq N} (|q_i^j - q_i^{j-1}| / v_{max}^i), t_0 = 0, \quad (2)$$

где v_{max}^i – наиболее максимально допустимая скорость слежения текущего i -го привода. Эти параметры определяют возможность приводов, которые должны обеспечить достаточно малые ошибки слежения.

Задача интерполяции решается при помощи приближения управляющих сигналов привода сплайнами.

Допустим, дана задача приближения функции $q(t)$ на отрезке $[0, T]$. Отрезок разделен на интервалы:

$$[t_0, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{m-1}, t_m], t_0 = 0, t_m = T \quad (3)$$

Сплайн $S^n(q, t)$ порядка n это функция, которая является полиномом степени n на каждом из следующих отрезков $[t_{j-1}, t_j]$:

$$S^n(q, t) = P_{jn}(t) = a_{j0} + \dots + a_{jn}t^n, \quad t_{j-1} \leq t \leq t_j, \quad (4)$$

в которой функция будет непрерывной и производные до порядка $n-1$ в точках $t_0, t_1, \dots, t_{m-1}$ тоже будут непрерывными:

$$P_{jn}^{(k)}(t_j) = P_{j+1,n}^{(k)}(t_j) \quad (5)$$

при $k=0, \dots, n-1, j=1, 2, \dots, m-1$. a_{ji} $m(n+1)$ неизвестные коэффициенты в (4), а выражения (5) образуют систему из $(m-1)n$ уравнений.

Недостающие уравнения для нахождения остальных коэффициентов ищутся из условия близости к интерполируемой функции, а также условий. Простейшей управляющей функцией может быть ступенчатый входной сигнал:

$$q(t) = a_{j0} = q^{j-1}, \quad t_{j-1} \leq t < t_j \quad (6)$$

неудовлетворяющий условиям непрерывности (5). Возможность использования такого входного сигнала определяется свойствами привода и требованиями к качеству переходного движения. Простейшей функцией, удовлетворяющей условию непрерывности, может быть линейный сплайн ($n=1$). Общее число свободных параметров равно $2m$.

Кроме $m-1$ условий непрерывности потребуем совпадения значений сплайна с $q(t)$ в точках $t_0, t_1, \dots, t_m$:

$$P_{11}(t_0) = q^0, P_{j1}(t_j) = q^j, j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

Это дает недостающие $m+1$ условий. В итоге находим

$$\begin{aligned} a_{j1} &= (q^j - q^{j-1}) / (t_j - t_{j-1}) \\ a_{j0} &= q^{j-1} - a_{j1}t_{j-1}, j = 1, \dots, m \\ q(t) &= a_{j0} + a_{j1}t, t_{j-1} \leq t \leq t_j, j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (8)$$

Эта же функция получается из решения следующей вариационной задачи: необходимо найти непрерывную функцию $q(t)$ с кусочно-непрерывной производной, такую, которая проходит через заданные точки $q(t_j) = q^j, j = 0, 1, \dots, m$, и минимизирует интеграл

$$I_1 = \int_0^T (\dot{q}(t))^2 dt \quad (9)$$

т.е. функция должна быть достаточно гладкой. Уравнение Эйлера можно представить в виде $\ddot{q}(t) = 0$, поэтому функция $q(t)$ будет линейной на любом из отрезков $[t_{j-1}, t_j]$.

Роботы могут обрабатывать только очень плавные сигналы. А также определенный кусочно-линейный сигнал при наиболее точном выполнении порождает резкие импульсы при движении, что дает перегрузки манипуляционному роботу. В связи с этим для оптимизации качества управления приводами необходимо использовать полиномы более высокого порядка. Поэтому задачу интерполяции можно определить следующим образом: поиск функции $q(t)$, первая производная которой будет являться непрерывной, удовлетворяющая условиям $q(t_j) = q^j, j = 0, 1, \dots, m$, и минимизирующая следующий интеграл

$$I_2 = \int_0^T (\ddot{q}(t))^2 dt, \quad (10)$$

который представляет собой усредненный квадрат ускорений функции на данной траектории.

Для данной функции уравнение Эйлера будет выглядеть следующим образом $q^{IV}(t) = 0$, т.е.

$$q(t) = P_{j3}(t) = a_{j0} + a_{j1}t + a_{j2}t^2 + a_{j3}t^3, \quad t_{j-1} \leq t \leq t_j, \quad (11)$$

Количество параметров a_{ji} , которые надо определить, равно $4m$, а количество условий равно $3m-1$: $2m$ условий непрерывности функции и приближения

$$\left. \begin{aligned} P_{j3}(t_j) &= P_{j+1,3}(t_j), \quad j = 1, 2, \dots, m-1, \\ P_{13}(t_0) &= q^0, P_{j3}(t_j) = q^j, \quad j = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

и $m-1$ условий непрерывности первой производной

$$\dot{P}_{j3}(t_j) = \dot{P}_{j+1,3}(t_j), \quad j = 1, 2, \dots, m-1. \quad (13)$$

Кроме этого, при решении вариационной задачи из необходимого условия минимума функционала вытекают условия непрерывности ускорений

$$\ddot{P}_{j3}(t_j) = \ddot{P}_{j+1,3}(t_j), \quad j = 1, \dots, m-1, \quad (14)$$

А также требуемые граничные условия. Если не имеется дополнительных условий на концах этой траектории, то получаем следующее выражение

$$\ddot{P}_{13}(t_0) = \ddot{P}_{m3}(t_m) = 0 \quad (15)$$

Существует несколько вариантов состояний. Первый вариант, когда движение имеет нулевую начальную и конечную скорости:

$$\dot{P}_{13}(t_0) = \dot{P}_{m3}(t_m) = 0, \quad (16)$$

в данном случае условие на ускорения (7) не будет выполняться.

Выполнение условий (15) и (16) одновременно было бы самым оптимальным вариантом, но это невозможно если используются только сплайны третьих порядков: условий оказывается больше, чем самих неизвестных. Поэтому будут применены условия (16), а также к первому и последнему сплайнам будут добавляться специальные функции, у которых более высокий порядок. Вместо $P_{13}(t_0)$ и $P_{m3}(t_m)$ можно взять следующего вида полиномы пятого порядка:

$$P_{15}(t) = P_{13}(t) + c_1(t - t_0)^2(t_1 - t)^3/(t_1 - t_0)^3, \quad (17)$$

$$P_{m5}(t) = P_{m3}(t) + c_m(t_m - t)^2(t - t_{m-1})^3/(t_m - t_{m-1})^3, \quad (18)$$

где

$$c_1 = -\ddot{P}_{13}(t_0)/2, \quad c_m = -\ddot{P}_{m3}(t_m)/2.$$

Данные функции не нарушают предварительных ограничений, но также обеспечивают и выполнение условия (7).

Определим параметры сплайнов $P_{j3}(t)$, $j = 1, \dots, m$, условий (12), (13), (14) и (8). Представим эти функции в следующем виде:

$$P_{j3}(t) = M_{j-1} \frac{(t_j - t)^3}{6h_j} + M_j \frac{(t - t_{j-1})^3}{6h_j} + \left(q^{j-1} - M_{j-1} \frac{h_j^2}{6} \right) \frac{(t_j - t)}{h_j} + \left(q^j - M_j \frac{h_j^2}{6} \right) \frac{(t - t_{j-1})}{h_j} \quad (19)$$

на отрезке $[t_{j-1}, t_j]$, где $h_j = t_j - t_{j-1}$, $j = 1, \dots, m$. Данный сплайн удовлетворяет условиям (12) и (14). При разных значениях M_j его ускорения будут непрерывными и будут изменяться по следующему кусочно-линейному закону:

$$\ddot{P}_{j3}(t) = M_{j-1} \frac{(t_j - t)}{h_j} + M_j \frac{(t - t_{j-1})}{h_j} \text{ на } [t_{j-1}, t_j] \quad (20)$$

Условия непрерывности скоростей (13) дают уравнения

$$\frac{h_j}{6} M_{j-1} + \frac{h_j + h_{j-1}}{3} M_j + \frac{h_{j+1}}{6} M_{j+1} = \frac{(q^{j+1} - q^j)}{h_{j+1}} + \frac{(q^j - q^{j-1})}{h_j}, \quad (21)$$

$$j = 1, \dots, m.$$

Для того, чтобы найти параметры $M_0, M_1, \dots, M_m$, достаточно рассмотреть условия нулевой скорости входа в самом начале движения и в конце траектории

$$M_0 \frac{h_1}{3} + M_1 \frac{h_1}{6} = \frac{q_1 - q_0}{h_1} \quad (22)$$

$$M_{m-1} \frac{h_m}{6} + M_m \frac{h_m}{3} = \frac{q_{m-1} - q_m}{h_m} \quad (23)$$

Таким образом, величины $M_j = \ddot{q}(t_j)$, $j = 0, \dots, m$, определяются из следующей системы линейных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей:

$$\begin{bmatrix} 2 & \lambda_0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & 2 & \lambda_1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \mu_{m-1} & 2 & \lambda_{m-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \mu_m & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ \dots \\ M_{m-1} \\ M_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \dots \\ d_{m-1} \\ d_m \end{bmatrix} \quad (24)$$

где

$$\lambda_0 = \mu_m = 1, d_0 = \frac{6(q^1 - q^0)}{h_1^2}, d_m = \frac{6(q^{m-1} - q^m)}{h_m^2},$$

$$\mu_j = \frac{h_j}{h_j + h_{j+1}}, \lambda_j = 1 - \mu_j,$$

$$d_j = \frac{6 \left[\frac{(q^{j+1} - q^j)}{h_{j+1}} - \frac{(q^j - q^{j-1})}{h_j} \right]}{(h_{j+1} + h_j)},$$

$j = 1, \dots, m - 1.$

После определения M_j может быть вычислен сплайн $S^3(q, t) = P_{j3}(t)$ при $t_{j-1} \leq t \leq t_j$.

Автоматические роботы часто работают по замкнутому циклу, выполняя многократно одну и ту же операцию. В этом случае исходные данные должны содержать условие $q^0 = q^m$, а при вычислении сплайна необходимо учитывать также условия замыкания траектории

$$\dot{P}_{13}(t_0) = \dot{P}_{m3}(t_m), \ddot{P}_{13}(t_0) = \ddot{P}_{m3}(t_m) = M_0 = M_m \quad (25)$$

Все эти условия дают несколько иную систему алгебраических уравнений для определения $M_1, M_2, \dots, M_m$

$$\begin{bmatrix} 2 & \lambda_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \mu_1 \\ \mu_2 & 2 & \lambda_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \mu_{m-1} & 2 & \lambda_{m-1} \\ \lambda_m & 0 & 0 & \dots & 0 & \mu_m & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \dots \\ M_{m-1} \\ M_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_{m-1} \\ d_m \end{bmatrix} \quad (26)$$

где $\lambda_i, \mu_i, d_i, i = 1, 2, \dots, m - 1$, вычисляются по тем же самым формулам, а $\mu_m = \frac{h_m}{h_1} + h_m, \lambda_m = 1 - \mu_m$.

Для решения указанных систем алгебраических уравнений не нужно использовать общих методов, потому что в этом случае наиболее эффективно работает метод прогонки, трудоемкость которого линейно растет с ростом числа неизвестных. Для первой задачи (24) этот метод дает следующий простой алгоритм. Сначала по рекуррентным формулам (8) находятся значения вспомогательных коэффициентов a_i и b_i :

$$a_i = -\frac{\lambda_i}{\mu_i a_{i-1} + 2}, b_i = \frac{(d_i - \mu_i b_{i-1})}{\mu_i a_{i-1} + 2}, a_{-1} = b_{-1} = 0, i = 0, 1, \dots, m. \quad (27)$$

Затем по найденным a_i и b_i определяются последовательно значения $M_m, M_{m-1}, \dots, M_0$:

$$M_m = b_m, M_i = a_i M_{i+1} + b_i, i = m - 1, \dots, 0. \quad (28)$$

По аналогичному, но более сложному алгоритму решается и вторая задача определения параметров программы управления движением по замкнутой траектории.

Сплайн-функции для управляющих сигналов приводов манипуляционного робота строятся отдельно для каждой степени подвижности, т.е. для каждой строки таблицы данных точек траектории. После этого проверяется условие правильного назначения продолжительности и деления данного интервала на следующие отрезки $[t_{j-1}, t_j]$.

Необходимо рассчитать наиболее максимальную скорость и, наиболее максимальное ускорение для каждой функции на любом отрезке времени. Функции представляют собой многочлены третьей степени, поэтому вычисление максимальных скоростей и ускорений не вызывает затруднений.

Если на каком-либо из отрезков функция имеет скорость или ускорение, которое превосходит допустимые значения, то соответствующий отрезок увеличивается в значении. После этого для вновь определенного интервала $[0, T]$ и нового его деления на такие отрезки $[t_{j-1}, t_j], j = 1, \dots, m$, сплайн-функция строится заново. Управляющие функции для приводов строятся методом последовательных приближений.

Обычно формирование управления для исполнительного механизма с шестью степенями подвижности занимает несколько секунд машинного времени для компьютера средней мощности. Для реализации движения манипуляционного робота созданные управляющие функции передаются на приводы. Генерирование управляющих функций выполняется либо тем же самым компьютером, либо эта работа передается другому компьютеру, сопряженному с первым, с целью освободить планирующий процессор от непроизводительного расхода времени [79].

Были проанализированы существующие подходы по формированию траекторий. Подходы по формированию траекторий приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Подходы по формированию траекторий

Метод построения траектории	Преимущества	Недостатки
1	2	3
Полиномиальная интерполяция	Плавное перемещение схвата манипулятора	Не выполняется условие непрерывности второй производной
Полиномы Лагранжа	Малая погрешность вычислений	Увеличение числа узлов ведет к перестраиванию полинома заново
Полиномы Ньютона	Интерполирование функций с различным числом узлов	Возрастание погрешности интерполяции на граничных участках
Интерполяция	Плавное перемещение схвата манипулятора	
Интерполяция при помощи модели Лагранжа-Эйлера	Плавное перемещение схвата манипулятора	Не выполняется условие непрерывности второй производной

Продолжение таблицы 9

1	2	3
Метод Гаусса	Наилучшая оценка остаточных значений	
Метод интегральных многообразий	Движение по оптимальной траектории	Не выполняется условие непрерывности второй производной
Интерполяция сплайнами третьего порядка	Плавное перемещение схвата манипулятора	

Построение программных движений робота

Построим математическую модель движения. Пусть имеется определенная последовательность точек – значения обобщенных координат манипуляционного робота, которые были получены в процессе планирования траектории. Требуется построить непрерывную во времени функцию обобщенных координат, которая в известные моменты времени будет совпадать с определенными значениями. Требуется построить интерполяционный сплайн по его известному значению в узлах.

Предположим, что каждая степень свободы манипуляционного робота и соответствующая ей обобщенная координата управляется независимым приводом, так что интерполирование можно провести в отдельности по каждой из обобщенных координат.

Среди достаточно большого количества методов решения задачи построения интерполяционных полиномов большое применение в последнее время получила интерполяция с помощью сплайнов, имеющая определенные удобства по сравнению с традиционными полиномами Лагранжа, Ньютона, Гаусса и других при реализации на компьютере.

Для интерполяции механических движений широко используются кубические сплайны – алгебраические полиномы третьей степени с постоянными коэффициентами на каждом из интервалов.

Для того чтобы решить проблему эффективного напыления покрытия на имплант необходимо выполнение условия совпадения значений точек со значением первой производной, а вторые производные полинома были непрерывными. Это связано с динамическими характеристиками манипуляционных роботов, которые используются для построения законов движения. Система управления промышленным роботом позволяет считывать и задавать наборы значений обобщенных координат и скорости движения робота по каждой обобщенной координате. С точки зрения построения сплайна это значит, что необходимо прохождение через эти узлы и с определенной скоростью в этих узлах.

Отметим, что сплайн третьего порядка

$$q_i(t) = \sum_{l=0}^3 a_i^{(l)} (t_{i+1} - t)^l \quad (29)$$

для i -той обобщенной координаты, который удовлетворяет условиям прохождения через узлы $t_1, t_2, \dots, t_n$ и в этих узлах удовлетворяет условиям:

$$q_i(t) = \theta_i; \quad q_i(t_{i+1}) = \theta_{i+1}; \quad \dot{q}_i(t_i) = v_i; \quad \dot{q}_i(t_{i+1}) = v_{i+1}, i = \overline{1, n-1}, \quad (30)$$

где $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ - заданные значения функции в этих точках, т.е. $\theta(t_i) = \theta_i$, а $v_i = v(t_i)$ - заданные скорости i -той обобщенной координаты в этих узлах – называется Эрмитовым сплайном.

Неизвестные коэффициенты сплайна $a_i^{(l)}$ находятся методами линейной алгебры, в основном используется метод прогонки.

Однако, для сплайна Эрмита третьего порядка не выполняется условие непрерывности второй производной в точках. Для удовлетворения условиям непрерывности вторых производных в узлах сетки предлагается повысить порядок сплайна и построить интерполяционную функцию в виде сплайна четвертого порядка.

Математическая постановка проблемы заключается в построении функции четвертого порядка, которая удовлетворяет условиям непрерывности на данном интервале $[t_1, t_n]$, а также ее первые и вторые производные тоже удовлетворяют этим условиям, функция проходит через заданные точки с определенной скоростью, т.е. удовлетворяет условиям:

$$q_i(t_{i+1}) = \theta_{i+1}, \quad \dot{q}_i(t_{i+1}) = v_{i+1}, \quad q_i(t_{i+1}) = q_{i+1}(t_{i+1}), \quad \dot{q}_i(t_{i+1}) = \dot{q}_{i+1}(t_{i+1}), \quad \ddot{q}_i(t_{i+1}) = \ddot{q}_{i+1}(t_{i+1}) \quad (31)$$

Добавляются условия на концах траектории t_1 и t_n : $q_1(t_1) = \theta_1, q_{n-1}(t_n) = \theta_n$.

Тогда сплайн будем строить в виде интерполяционного полинома (29-31):

$$q_i(t) = \sum_{l=0}^4 a_i^{(l)} (t_{i+1} - t)^l, \quad i = \overline{1, n-1}. \quad (32)$$

Таким образом, для определения $5(n-1)$ коэффициентов $a_i^{(l)}$ имеем $5n-8$ условий, остальные три условия можно задавать в зависимости от конкретной задачи. В частности, из условий непрерывности сплайна, получим, что $a_i^{(0)} = \theta_{i+1}$, $a_i^{(1)} = -v_{i+1}$, при этом v_n может быть известно, либо нет.

С учетом этих значений получим систему уравнений, которые связывают коэффициенты $a_{i+1}^{(2)}, a_{i+1}^{(3)}, a_{i+1}^{(4)}$ с известными значениями $\theta_{i+1}, \theta_{i+2}, v_{i+1}, v_{i+2}$ и коэффициентом $a_i^{(2)}$ из предыдущего интервала:

$$\begin{pmatrix} h_{i+1}^2 & h_{i+1}^3 & h_{i+1}^4 & a_{i+1}^{(2)} \\ 2h_{i+1} & 3h_{i+1}^2 & 4h_{i+1}^3 & a_{i+1}^{(3)} \\ 1 & 3h_{i+1} & 6h_{i+1}^2 & a_{i+1}^{(4)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{i+2}h_{i+1} + \theta_{i+1} - \theta_{i+2} \\ v_{i+2} - v_{i+1} \\ a_i^{(2)} \end{pmatrix}, \quad (33)$$

где $h_{i+1} = t_{i+2} - t_{i+1}$.

Отметим, что определитель системы (33) равняется $h_{i+1}^6 \neq 0$ и, следовательно, решение всегда существует. Неизвестные коэффициенты сплайна находятся по следующим рекуррентным соотношениям:

$$\begin{aligned} a_{i+1}^{(2)} &= a_i^{(2)} + \frac{3(v_{i+2} - v_{i+1})}{h_{i+1}} + \frac{6(\theta_{i+1} - \theta_{i+2})}{h_{i+1}^2}, \\ a_{i+1}^{(3)} &= -\frac{2}{h_{i+1}} a_i^{(2)} + \frac{5(v_{i+2} - v_{i+1})}{h_{i+1}^2} - \frac{8(v_{i+2} h_{i+1} + \theta_{i+1} - \theta_{i+2})}{h_{i+1}^3}, \\ a_{i+1}^{(4)} &= \frac{1}{h_{i+1}^2} a_i^{(2)} - \frac{2(v_{i+2} - v_{i+1})}{h_{i+1}^3} + \frac{3(v_{i+2} h_{i+1} + \theta_{i+1} - \theta_{i+2})}{h_{i+1}^4}. \end{aligned} \quad (34)$$

Рекуррентные соотношения (34) дают возможность выразить $a_{n-1}^{(2)}, a_{n-1}^{(3)}, a_{n-1}^{(4)}$ через $a_1^{(2)}$, а именно:

$$\begin{aligned} a_{n-1}^{(2)} &= a_1^{(2)} + S(n), \\ a_{n-1}^{(3)} &= -\frac{2}{h_{n-1}} a_1^{(2)} - \frac{2}{h_{n-1}} S(n) + \frac{3v_n + v_{n-1}}{h_{n-1}^2} + \frac{4(\theta_{n-1} - \theta_n)}{h_{n-1}^3}, \\ a_{n-1}^{(4)} &= \frac{1}{h_{n-1}^2} a_1^{(2)} + \frac{1}{h_{n-1}^2} S(n) - \frac{v_{n-1} + 2v_n}{h_{n-1}^3} + \frac{3(\theta_n - \theta_{n-1})}{h_{n-1}^4}, \end{aligned} \quad (35)$$

где $S(n) = 3 \sum_{k=3}^n \left(\frac{v_k + v_{k-1}}{h_{k-1}} + \frac{2(\theta_{k-1} - \theta_k)}{h_{k-1}^2} \right)$.

Как отмечалось выше значение v_n может быть задано или определено из следующих условий:

А. Заданы скорости на обоих концах интервала и ускорение на одном из них

$$\begin{aligned} \dot{q}_1(t_1) &= v_1, \quad \dot{q}_{n-1}(t_n) = v_n, \\ \alpha \ddot{q}_1(t_1) + \beta \ddot{q}_{n-1}(t_n) &= 2\gamma, \quad (\alpha + \beta \neq 0) \end{aligned} \quad (36)$$

В. Заданы скорость либо ускорение на одном из концов и условие плавности движения на всем интервале:

$$\begin{aligned} \alpha_1 \dot{q}_1(t_1) + \beta_1 \ddot{q}_1(t_1) &= \gamma_1, \quad (\alpha_1 + \beta_1 \neq 0) \\ \alpha_2 \dot{q}_{n-1}(t_n) + \beta_2 \ddot{q}_{n-1}(t_n) &= \gamma_2, \quad (\alpha_2 + \beta_2 \neq 0), \\ \int_{t_1}^{t_n} (\ddot{q}(t))^2 dt &= \min \end{aligned} \quad (37)$$

С. Заданы скорость либо ускорение на одном из концов и условие минимума энергии

$$\begin{aligned}
&\alpha_1 \dot{q}_1(t_1) + \beta_1 \ddot{q}_1(t_1) = \gamma_1, \quad (\alpha_1 + \beta_1 = 0) \\
&\alpha_2 \dot{q}_{n-1}(t_n) + \beta_2 \ddot{q}_{n-1}(t_n) = \gamma_2, \quad (\alpha_2 + \beta_2 = 0) \\
&\int_{t_1}^{t_n} (\dot{q}(t))^2 dt \rightarrow \min.
\end{aligned} \tag{38}$$

Здесь γ_1, γ_2 – некоторые параметры.

Для каждого из приведенных краевых условий существует единственный сплайн четвертого порядка [80-83].

Рассмотрим решение этой задачи в среде Matlab.

Язык технических вычислений MATLAB и вспомогательные ToolBox'ы дают широкие возможности для построения приближения и интерполяции различных данных, имеется очень большой спектр функций от простых до самых сложных интерполирований.

Средства MATLAB позволяют решать следующие задачи:

- приближение данных полиномами методом наименьших квадратов;
- интерполирование различных данных при помощи сплайнов;
- интерполирование разрозненных данных;
- решение задач вычислительной геометрии;
- реализация подбора параметров в нелинейных моделях.

Приложение Basic Fitting является графическим интерфейсом ко многим функциям MATLAB. Возможности:

- интерполяция одномерных данных сплайнами третьего порядка;
- интерполяция сплайнами, которые сохраняют форму и монотонность данных (кубические сплайны Эрмита);
- приближение данных многочленами по методу наименьших квадратов [84; 85, 86].

Построим траекторию движения по этой предложенной схеме.

Существующие функции для построения сплайнов Эрмита строят сплайн по значениям в узлах. В нашей работе был создан скрипт, в котором значения обобщенных координат приравниваются к значениям интерполируемой функции, а значения первых производных данной функции приравниваются к значениям скорости. Функцию mkrp-представления для кубического эрмитова интерполянта в Matlab можно представить следующим образом:

```

function p=cubic(x,y,d);
n=length(x);
a=zeros(n-1,4);
for j=1:n-1
a(j,1)=2*y(j)-2*y(j+1)+d(j)+d(j+1);
a(j,2)=-3*y(j)+3*y(j+1)-2*d(j)-d(j+1);
a(j,3)=d(j);
a(j,4)=y(j);
a(j,1)=a(j,1)/(x(j+1)-x(j))^3;

```

```

a(j,2)=a(j,2)/(x(j+1)-x(j))^2;
a(j,3)=a(j,3)/(x(j+1)-x(j))^1;
a(j,4)=a(j,4);
end;

```

Подставляемые значения для данной функции:

```

x=[0 50 75 100 120 150 210 250];
y=[655 680 715 720 730 735 745 750];
dl=[1 1 1 1 1 1 1 1];
pl=cubic(x,y,dl);
xx=0:10:220;
yy1=ppval(pl,xx);
plot(x,y,xx,yy1);
axis([0 250 600 750]);
title('Эрмитов кубический интерполянт')
xlabel('x'); ylabel('y');
legend('сплайн', 'эрмитов кубический сплайн')

```

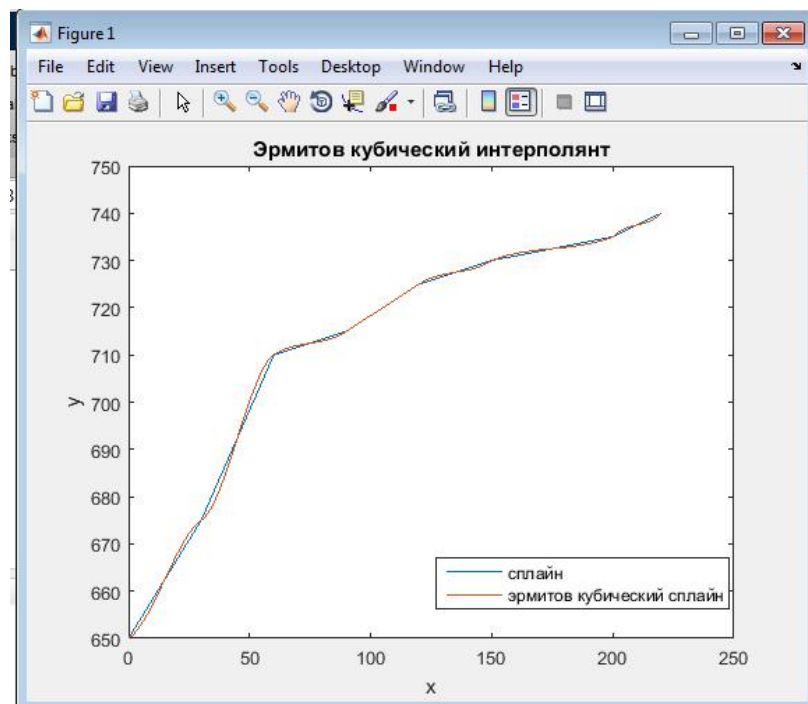


Рисунок 42 – Эрмитова кубическая интерполяция с заданием производных

При построении сплайна Эрмита третьего порядка требование гладкости функции выполняется (рисунок 42), а значит выполняется условие прохождения по выбранной траектории с определенными скоростями, но сплайн Эрмита третьего порядка не выполняет требования непрерывности второй производной в точках данного сплайна. Исследование влияния этого ограничения на качество траекторий движения при напылении требует дополнительных исследований.

Для полинома четвертого порядка найдем коэффициенты, удовлетворяющие условиям (31)-(36). Начальные коэффициенты будем рассчитывать следующим образом:

$$\begin{aligned} f(1,3) &= (3/t(1)) * ((2*(G(1)-G(2))/t(1)) + p(1) + p(2)); \\ f(1,4) &= (1/(t(1))^2) * ((8*(G(2)-G(1))/t(1)) - (3*p(2) + 5*p(1))); \\ f(1,5) &= (1/(t(1))^3) * ((3*(G(1)-G(2))/t(1)) + t(2) + 2*t(1)). \end{aligned}$$

Остальные коэффициенты полинома можно записать в таком виде:

$$\begin{aligned} f(1,3) &= f(1-1,3) + (3*(p(1+1)-p(1))/t(1)) + 6*(G(1)-G(1+1))/(t(1))^2; \\ f(1,4) &= -(2*f(1-1,3)/t(1)) + (5*(p(1+1)-p(1))/(t(1))^2) - 8*(p(1+1)*t(1) + G(1) - G(1+1))/(t(1))^3; \\ f(1,5) &= (f(1-1,3)/(t(1))^2) - (2*(p(1+1)-p(1))/(t(1))^3) + 3*(p(1+1)*t(1) + G(1) - G(1+1))/(t(1))^4; \\ f(1,1) &= G(1+1); \quad f(1,2) = p(1+1). \end{aligned}$$

Функция mkpp-представления для кубического Эрмита интерполянта в Matlab по заданным значениям координат и скорости:

```
function p=cubic(r,Q,z);
l=length(r);
b=zeros(l-1,4);
for k=1:l-1
b(k,1)=2*Q(k)-2*Q(k+1)+z(k)+z(k+1);
b(k,2)=-3*Q(k)+3*Q(k+1)-2*z(k)-z(k+1);
b(k,3)=z(k);
b(k,4)=Q(k);
b(k,1)=b(k,1)/(r(k+1)-r(k))^3;
b(k,2)=b(k,2)/(r(k+1)-r(k))^2;
b(k,3)=b(k,3)/(r(k+1)-r(k))^1;
b(k,4)=b(k,4);
end;
p=mkpp(r,b);
```

Функция mkpp-представления для сплайна Эрмита четвертого порядка в Matlab:

```
Function r = spline4(s,O,g);
d= length(s);
c= zeros(d-1, 5); m(1)=s(2)-s(1);
c(1,3)=(3/m(1))*((2*(O(1)-O(2))/m(1))+g(1)+g(2));
c(1,4)=(1/(m(1))^2)*((8*(O(2)-O(1))/m(1))-(3*g(2)+5*g(1)));
c(1,5)=(1/(m(1))^3)*((3*(O(1)-O(2))/m(1))+g(2)+2*g(1));
for i=2:d-1
```

```

m(u)=s(u+1)-s(u);
c(u,3)=c(u-1,3)+(3*(g(u+1)-g(u))/m(u))+6*(O(u)-O(u+1))/(m(u))^2;
c(u,4)=-(2*c(u-1,3)/m(u))+(5*(g(u+1)-g(u))/(m(u))^2)-8*(g(u+1)*m(u)+O(u)-
O(u+1))/(m(u))^3;
c(u,5)=(c(u-1,3)/(m(u))^2)-(2*(g(u+1)-g(u))/(m(u))^3)+3*(g(u+1)*m(u)+O(u)-
O(u+1))/(m(u))^4;
c(u,1)=O(u+1); c(u,2)=g(u+1);
c(u,5)=c(u,5)/(s(u+1)-s(u))^4;
c(u,4)=c(u,4)/(s(u+1)-s(u))^3;
c(u,3)=c(u,3)/(s(u+1)-s(u))^2;
c(u,2)=-c(u,2)/(s(u+1)-s(u))^1;
c(u,1)=c(u,1);
end;
p=mkpp(s,c);

```

Подставляя значения времени, значения для каждой из обобщенных координат и их скорости, получим следующие результаты для построения сплайна третьего и четвертого порядков для 6 имплантов, по оси абсцисс – узлы данной траектории, по оси ординат – значение обобщенной координаты в этих узлах. При помощи инструмента Basic Fitting рассчитываются ошибки приближения для каждой модели (рисунки 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49).

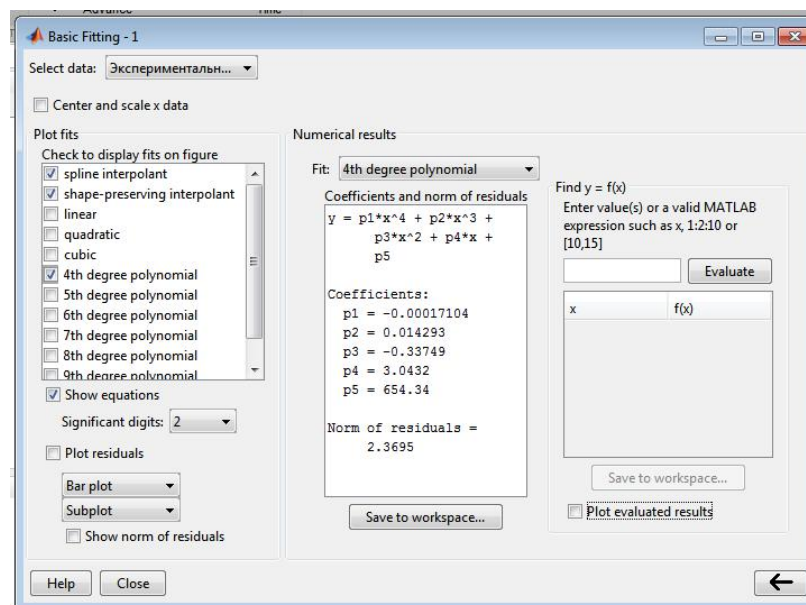
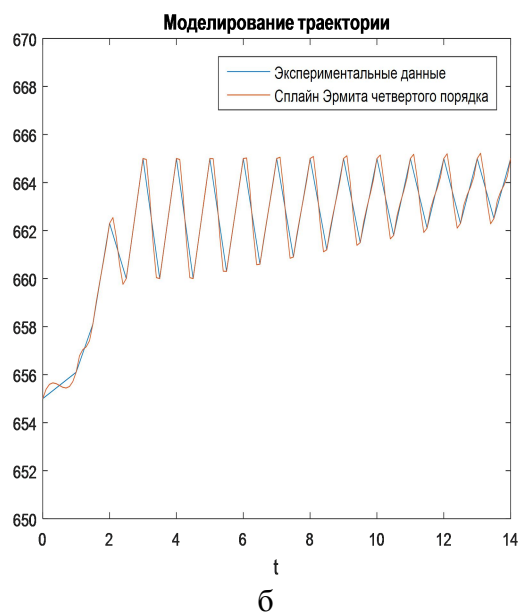
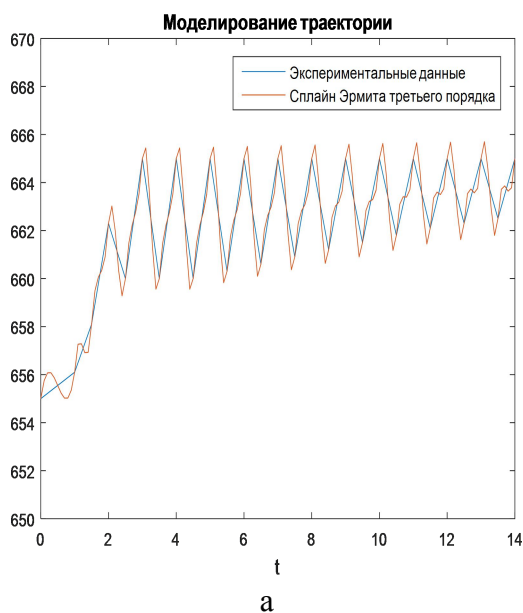


Рисунок 43 – Расчет ошибок приближения

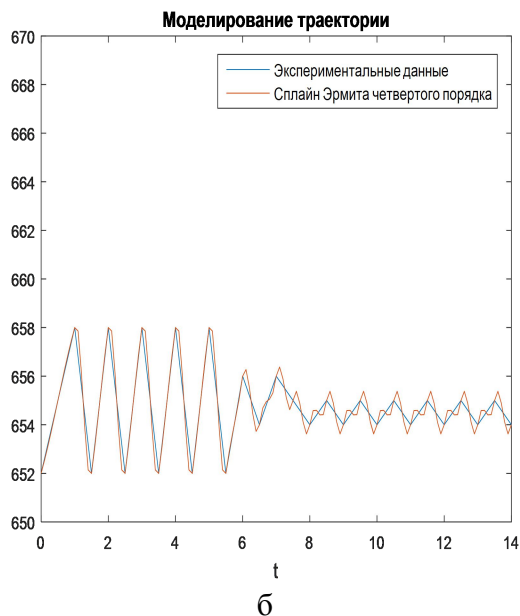
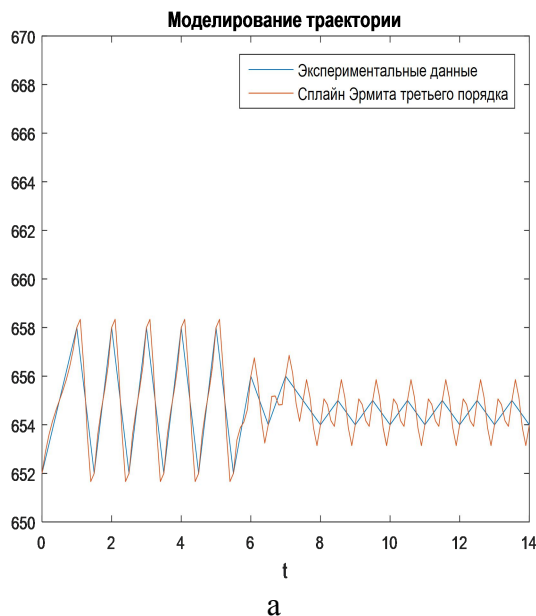
1. Реализация модели Эрмита третьего и четвертого порядков для импланта тазобедренного сустава



а – ошибка приближения равна - 0,05; б – ошибка приближения равна - 0,04

Рисунок 44 – Моделирование траектории сплайном Эрмита третьего и четвертого порядков для импланта тазобедренного сустава

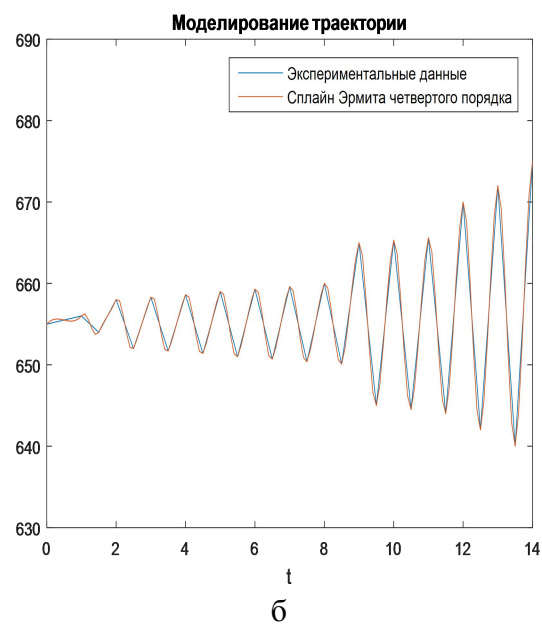
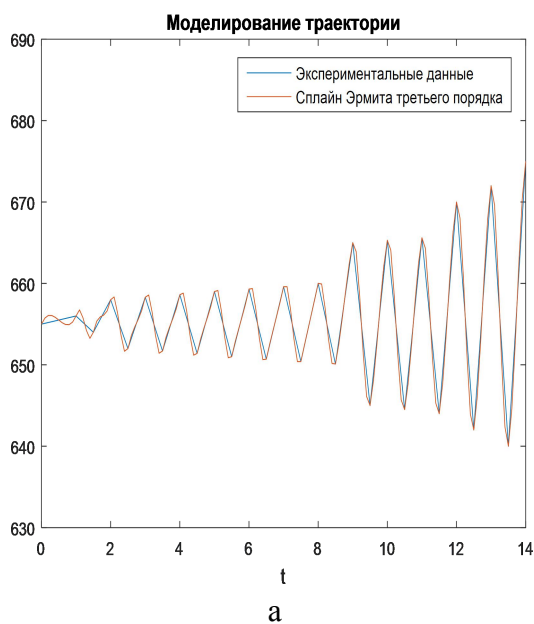
2. Реализация модели Эрмита третьего и четвертого порядков для импланта плечевого сустава.



а – ошибка приближения равна - 0,047; б – ошибка приближения равна - 0,038

Рисунок 45 – Моделирование траектории сплайном Эрмита третьего и четвертого порядков для импланта плечевого сустава

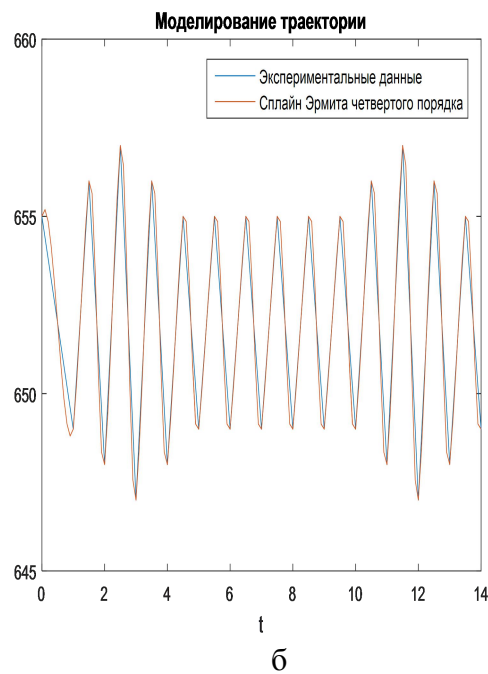
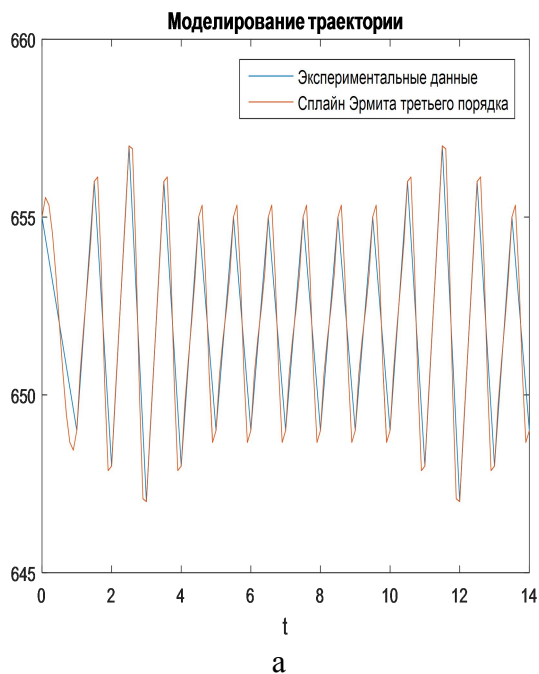
3. Реализация модели Эрмита третьего и четвертого порядков для импланта голени



а – ошибка приближения равна - 0,044; б – ошибка приближения равна - 0,038

Рисунок 46 - Моделирование траектории сплэйном Эрмита третьего и четвертого порядков для импланта голени

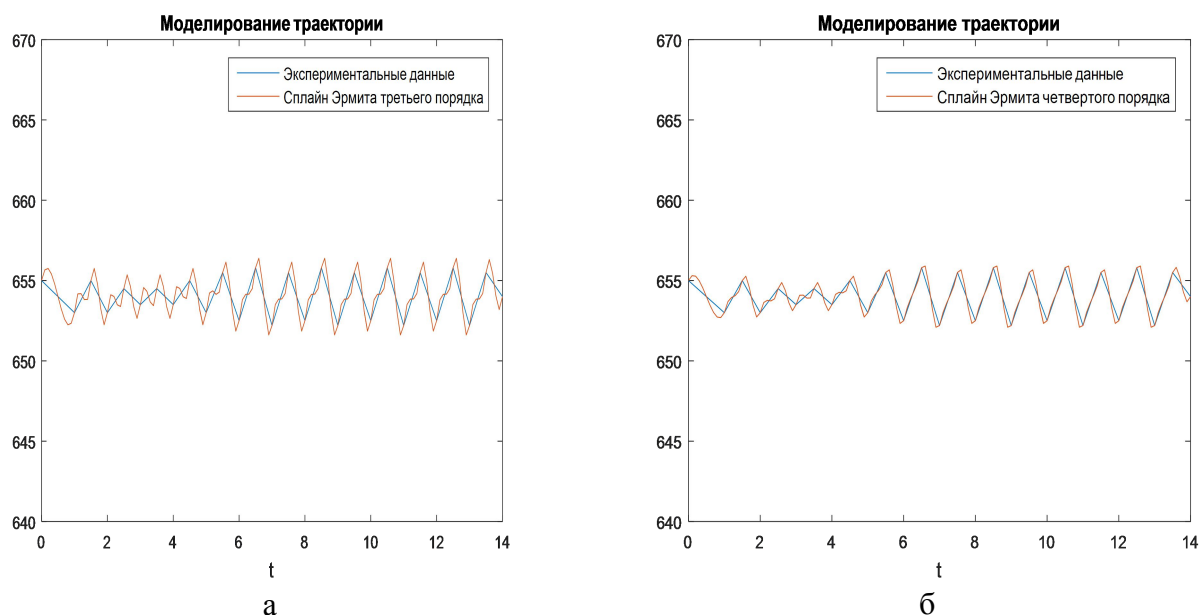
4. Реализация модели Эрмита третьего и четвертого порядков для позвоночного импланта



а – ошибка приближения равна - 0,046; б - ошибка приближения равна - 0,039

Рисунок 47 – Моделирование траектории сплэйном Эрмита третьего и четвертого порядков для позвоночного импланта

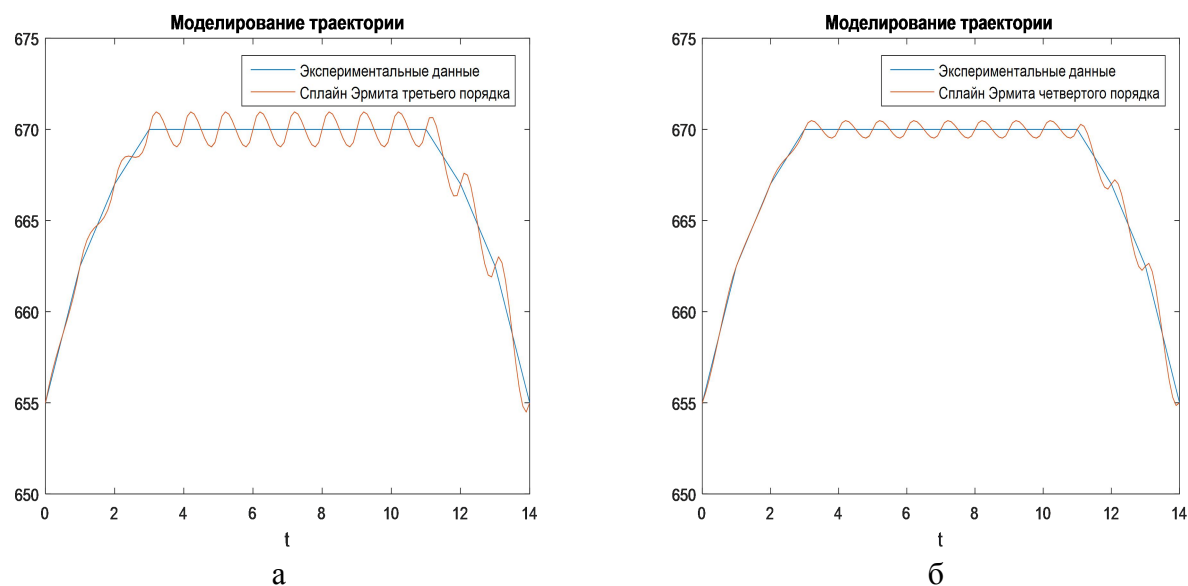
5. Реализация модели Эрмита третьего и четвертого порядков для импланта суставов пальцев



а – ошибка приближения равна - 0,045; б – ошибка приближения равна - 0,036

Рисунок 48 – Моделирование траектории сплайном Эрмита третьего и четвертого порядков для импланта суставов пальцев

6. Реализация модели Эрмита третьего и четвертого порядков для импланта шейного отдела



а – ошибка приближения равна - 0,047; б – ошибка приближения равна - 0,039

Рисунок 49 – Моделирование траектории сплайном Эрмита третьего и четвертого порядков для импланта шейного отдела

На рисунках 44, 45, 46, 47, 48, 49 изображены график исходных точек, Эрмитов сплайн третьего и четвертого порядков (по оси абсцисс- время прохождения, по оси ординат- соответствующая обобщенная координата).

Как следует из рисунков 44, 45, 46, 47, 48, 49, для построенных сплайнов Эрмита требование гладкости функции выполняется, значит выполняется условие прохождения по выбранной траектории с определенными скоростями. При построении полиномов Эрмита относительная погрешность интерполирования должна быть почти нулевой (или очень малой), так как сплайн Эрмита третьего порядка и сплайн Эрмита четвертого порядка, являются интерполяционными сплайнами и их значения совпадают в точках интерполяции со значениями данных. Сравнение результатов моделирования траектории приводится в таблице 10 [87-94].

Таблица 10 – Моделирование траектории напыления

Класс	Моделирование траектории напыления			
	Тип	Отклонение 3 порядка	Отклонение 4 порядка	Вывод
1-класс	Имплант тазобедренн огосустава	0,05	0,04	Ошибка приближения при использовании сплайна Эрмита четвертого порядка меньше, соответственно выполняется условие гладкости функции
	Имплант голени	0,047	0,038	Ошибка приближения при использовании сплайна Эрмита четвертого порядка меньше, соответственно выполняется условие гладкости функции
	Имплант плечевого сустава	0,044	0,038	Ошибка приближения при использовании сплайна Эрмита четвертого порядка меньше, соответственно выполняется условие гладкости функции
2-класс	Имплант позвоноч ный	0,046	0,039	Ошибка приближения при использовании сплайна Эрмита четвертого порядка меньше, соответственно выполняется условие гладкости функции
	Имплант шейного отдела	0,045	0,036	Ошибка приближения при использовании сплайна Эрмита четвертого порядка меньше, соответственно выполняется условие гладкости функции
	Имплант суставов пальцев	0,047	0,039	Ошибка приближения при использовании сплайна Эрмита четвертого порядка меньше, соответственно выполняется условие гладкости функции

Как следует из таблицы 10, ошибка приближения при использовании сплайна Эрмита четвертого порядка меньше ошибки третьего порядка, что является доказательством построения сплайна, оптимально близкого к исходным значениям.

Для моделирования траектории напыления был выбран сплайн Эрмита четвертого порядка, так как при его использовании выполняется условие гладкости функции, также выполняется условие непрерывности второй производной, и ошибка приближения меньше, а значит выполняется условие прохождения по траектории с определенными скоростями.

Выводы к разделу 3

В результате исследований в данной главе был проанализирован процесс напыления имплантов сложной геометро-топологической структуры. Процесс напыления имплантов при помощи роботизированного комплекса был условно разделен на пять этапов.

Были проанализированы основные методы создания 3d моделей объектов сложной геометро-топологической структуры. Были проанализированы достоинства и недостатки каждого метода, принцип работы. Сделан обзор основного программного обеспечения, используемого в каждом методе.

Для осуществления процесса напыления было отобрано 6 имплантов. С 1 класса: имплант тазобедренного сустава, имплант голени, плечевого сустава и 2 класса: имплант позвоночный, имплант шейного отдела, имплант суставов пальцев. Были разработаны 3d модели этих имплантов.

Оптимальный процесс напыления имплантов был определен следующим образом: объект устанавливается в захват манипуляционного робота, который перемещает и вращает имплант для напыления порошка на поверхность импланта. К процессу напыления предъявляются следующие требования:

- 1) плазматрон напыляет плазменной струей титан, устанавливается на расстоянии 150 мм от импланта, угол приблизительно должен быть равен 90° ;
- 2) напыленное пятно должно составлять в среднем – 1-5 мм, пористость должна составлять в среднем 0.05...1.0 мм;
- 3) траты используемого материала могут составлять в среднем 10-15%;
- 4) материал – титан VT6.

Была рассмотрена задача формирования управляющих сигналов, построение программных движений робота.

Для моделирования интерполяционного сплайна с координатами и скоростями были использованы сплайн третьего и четвертого порядков. Смоделировано решение этой задачи в среде Matlab. Для моделирования траектории напыления был выбран сплайн Эрмита четвертого порядка, так как при его использовании выполняется условие гладкости функции, также выполняется условие непрерывности второй производной, и ошибка приближения меньше, поэтому выполняется условие соблюдения дистанции и скорости напыления.

4 РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ НАНЕСЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ИМПЛАНТЫ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

4.1 Архитектура приложения и файловый обмен

Исследование предметной области

Целью исследования является – разработка информационной системы моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры.

Разработанная система предназначена для:

- учета существующих и возможных имплантов различных производителей;
- просмотра данных имплантов по типу применения и материала изготовления;
- просмотра данных имплантов по геометро-топологическим размерам составляющих;
- просмотра данных программного обеспечения при построении 3d моделей имплантов для станков с ЧПУ;
- учета физических размеров имплантов;
- обновления, записи элементов, добавления новых полей;
- моделирования траекторий в Matlab;
- симуляции движений в Roboguide.

Программное обеспечение обеспечивает следующие функции:

- просмотр;
- редактирование;
- вставка записей базы данных;
- формирование запросов;
- формирование отчетов.

Проектирование инфологической модели

Инфологическая модель должна отражать логические связи между сущностями этой базы данных. Объекты системы должны быть четко идентифицированы, иметь некоторые свойства, такие как простое, составное, ключевое, однозначное, многозначное, отсутствующее, базовое, производное [95].

Анализируя предметную область, можно выделить следующие сущности:

- импланты – сущность, содержащая информацию о типах имплантов;
- физические размеры имплантов – сущность, содержащая информацию о физических размерах составляющих имплантов;
- импланты по фирмам – сущность, содержащая информацию о типах имплантов по фирмам-производителям;
- координаты - сущность, содержащая информацию об обобщенных

координатах робота для импланта;

- установки плазменного напыления – сущность, содержащая информацию об установках плазменного напыления.

Рассмотрим связи между сущностями.

Сущность Тип импланта связана с сущностью Физические размеры. Одни и те же физические размеры могут быть у нескольких типов имплантов. Степень связи – «один-ко-многим».

Сущность Тип импланта связана с сущностью Фирма-производитель. Разные типы имплантов могут быть произведены одной фирмой-производителем. Степень связи – «один-ко-многим».

Сущность Название установки связана с сущностью Способ напыления. Один способ напыления может быть у нескольких установок. Степень связи – «один-ко-многим».

Сущность Название установки связана с сущностью Тип напыления. Один тип напыления может быть у нескольких установок. Степень связи – «один-ко-многим».

Сущность Расстояние до объекта связана с сущностью Тип напыления. Расстояние до объекта может быть одинаковым у нескольких типов напыления. Степень связи – «один-ко-многим».

Сущность Вспомогательное оборудование связана с сущностью Способ напыления. Вспомогательное оборудование может быть одинаковым у нескольких способов напыления. Степень связи – «один-ко-многим».

Рассмотрим атрибуты каждой сущности:

- импланты (Код импланта, Тип импланта, Физические размеры, Материал, Фирма-производитель);

- физические размеры имплантов (Код импланта, Тип импланта, Длина, Ширина, Диаметр, Ширина, Длина дуги, Длина зажима, Диаметр зажима, Длина прямоугольника, Высота, Длина проксимального стебля, Длина дистального стебля, Диаметр стебля);

- импланты (Код импланта, Тип импланта, Фирма-производитель, Ссылка на источник, Тип изготовления, Оборудование, Программное обеспечение);

- координаты (Время прохождения робота, Обобщенная координата, Скорость прохождения робота);

- установки плазменного напыления - (Название установки, Фото установки, Способ напыления, Тип напыления, Расстояние до объекта, Вспомогательное оборудование, Фирма-производитель).

Набор атрибутов, однозначно идентифицирующих конкретный экземпляр сущности, называется, ключевым.

Даталогическое проектирование

При преобразовании модели ER-типов в реляционную модель данных использовались правила степени связи, отношений, определение первичных ключей [96].

Физическое проектирование

Физическая модель базы данных отражает требования конкретной системы управления базами данных, в состав БД входят таблицы, которые содержат информацию обо всех объектах и существующих взаимосвязях между ними. Таблицы могут содержать оперативную и условно-постоянную информацию.

В базе данных My_DB.db представлены в таблицах 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25.

Таблица 11 – Структура таблицы «Импланты»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Код_импланта	tinyint	Да	Код импланта
Тип_импланта	char(1000)		Тип импланта по классификации
Физические_размеры	char(1000)		Длина, ширина импланта
Материал	char(10)		Материал изготовления
Фирма-производитель	char(1000)		Фирма-производитель имплантов

Таблица 12 – Структура таблицы «Физические размеры имплантов»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Код_импланта	tinyint	Да	Код импланта
Тип_импланта	char(1000)		Тип импланта по классификации
Длина	float		Длина импланта
Диаметр	float		Диаметр импланта
Ширина	float		Ширина импланта
Длина_дуги	float		Длина дуги импланта
Длина_зажима	float		Длина зажима импланта
Диаметр_зажима	float		Диаметр зажима импланта
Длина_прямоугольника	float		Длина прямоугольника импланта
Высота	float		Высота импланта
Длина_проксимального_стебля	float		Длина проксимального стебля импланта
Длина_дистального_стебля	float		Длина дистального стебля импланта
Диаметр_стебля	float		Диаметр стебля импланта

Таблица 13 – Структура таблицы «Импланты по фирмам»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Код_импланта	tinyint	Да	Код импланта
Тип_импланта	char(1000)		Тип импланта по классификации
Фирма-производитель	char(1000)		Фирма-производитель имплантов

Продолжение таблицы 13

1	2	3	4
Ссылка_на_источник	char(1000)		Ссылка на источник информации
Технология_изготовления	char(1000)		Технология изготовления имплантов
Оборудование	char(1000)		Оборудование, используемое при изготовлении
Программное_обеспечение	char(1000)		Программное обеспечение на оборудовании

Таблица 14 – Структура таблицы «Установки плазменного напыления»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Код_установки	tinyint	Да	Код установки плазменного напыления
Название_установки	char(1000)		Название установки плазменного напыления
Фото_установки	char(1000)		Фото установки
Способ_напыления	char(1000)		Способ напыления имплантов
Тип_напыления	char(1000)		Тип напыления имплантов
Расстояние_до_объекта	float		Расстояние до напыляемого объекта
Вспомогательное_оборудование	char(1000)		Вспомогательное оборудование
Фирма-производитель	char(1000)		Фирма-производитель

Таблица 15 – Структура таблицы «Координаты»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Время	float		Время прохождения робота
Координата	char(100)		Обобщенная координата робота
Скорость	char(100)		Скорость прохождения робота

Таблица 16 – Структура таблицы «Материалы»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Номер	tinyint	Да	Номер позиции
Материал	char(100)		Материал изготовления импланта

Таблица 18 – Структура таблицы «Технологии изготовления»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Номер	tinyint	Да	Номер позиции
Технология_изготовления	char(100)		Технология изготовления импланта

Таблица 19 – Структура таблицы «Оборудование»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Номер	tinyint	Да	Номер позиции
Оборудование	char(100)		Оборудование, используемое для напыления

Таблица 20 – Структура таблицы «Программное обеспечение»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Номер	tinyint	Да	Номер позиции
ПО	char(100)		Программное обеспечение, используемое при напылении

Таблица 21 – Структура таблицы «Производители имплантов»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Номер	tinyint	Да	Номер позиции
Производитель_имплантов	char(100)		Фирма-производитель импланта

Таблица 22 – Структура таблицы «Способы напыления»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Номер	tinyint	Да	Номер позиции
Способ_напыления	char(100)		Способы напыления имплантов

Таблица 23 – Структура таблицы «Типы напыления»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Номер	tinyint	Да	Номер позиции
Тип_напыления	char(100)		Типы напыления импланта

Таблица 24 – Структура таблицы «Вспомогательное оборудование»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Номер	tinyint	Да	Номер позиции
Вспомогательное_оборудование	char(100)		Вспомогательное оборудование для напыления

Таблица 25 – Структура таблицы «Производители установок»

Имя поля	Тип поля	Ключевое поле	Назначение
Номер	tinyint	Да	Номер позиции
Производители_установок	char(100)		Производители установок напыления

Инфологическая модель будет выглядеть следующим образом (рисунок 50).

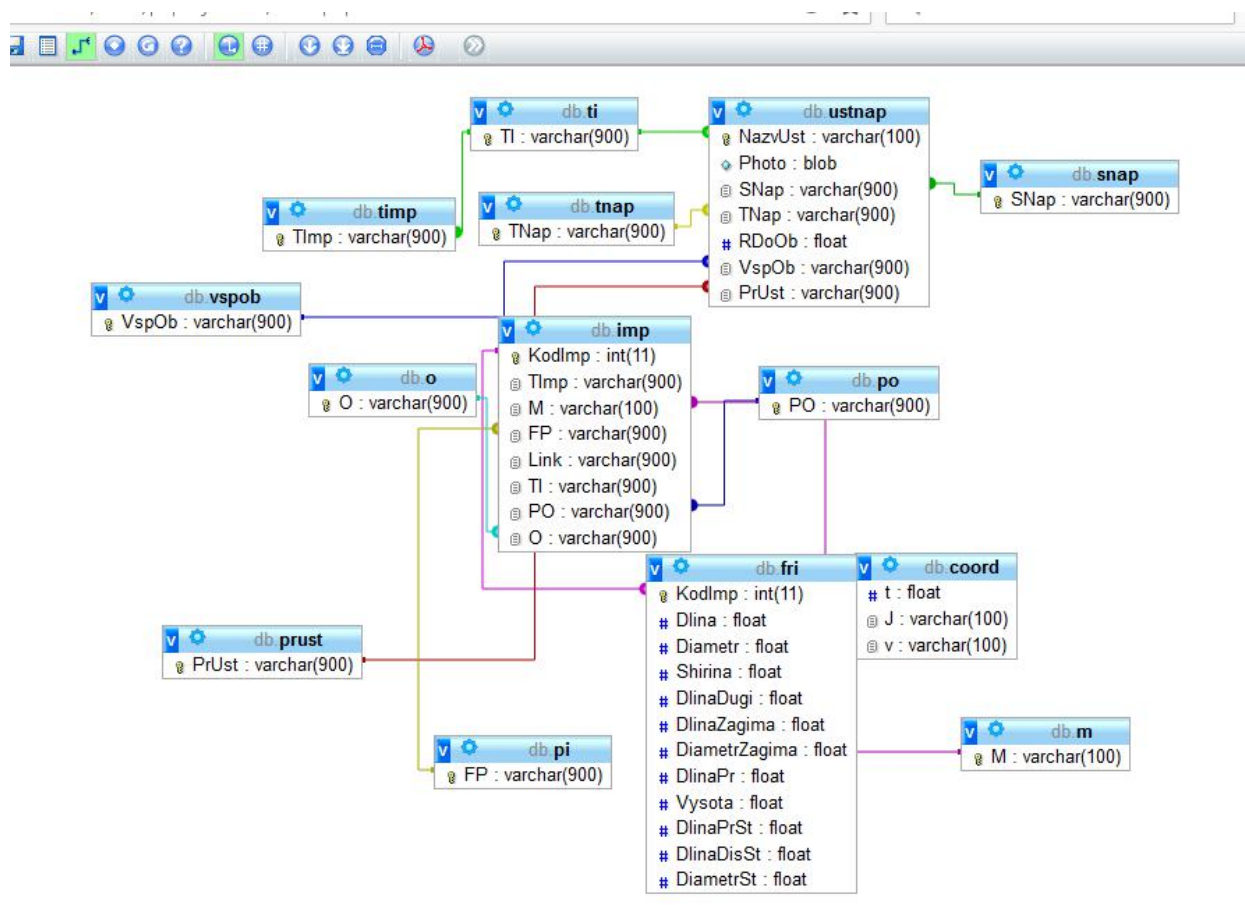


Рисунок 50 – Инфологическая модель

Аппаратное и системное программное обеспечение, необходимое для работы приложения:

Microsoft SQL Server 2012 – это система управления базами данных, используемая для работы с базой данных. Язык запросов данной СУБД – Transact-SQL [97].

PHP – это язык программирования используемый для web-разработок [98].

1. Основные требования:

Требования, предъявляемые к комплексу, для нормального функционирования информационной системы. Требования приведены в таблицах 26, 27, 28, 29.

Таблица 26 – Требования к аппаратной части комплекса

Компонент	Конфигурация
Центральный процессор	IntelPentium, IntelXeon совместимый процессор с частотой 1,5 ГГц и выше
Оперативная память	512 Мб
Дисковая подсистема	5 Гб

Таблица 27 – Требования к программному комплексу

Класс ПО	Продукт, версия
ОС	Microsoft Windows 2007 и выше
Сервер БД	Microsoft SQL Server Management Studio

Таблица 28 – Требования к программному обеспечению виртуального симулятора

Класс ПО	Продукт, версия
ОС	Microsoft Windows 2007 и выше
Приложение	Roboguide V9.40

2. Языки программирования: PHP, технология .NET.

3. Тип реализующего компьютера:

Требования, предъявляемые к комплексу, для нормального функционирования информационной системы.

Таблица 29 – Требования к аппаратной части комплекса приложений системы

Компонент	Конфигурация
Процессор	Intel Pentium, Intel Xeon совместимый процессор с частотой 1,5 ГГц и выше
Оперативная память	2 ГБ
Дисковая подсистема	1 ГБ

Система разбита на несколько модулей. Каждый модуль имеет назначение, обеспечивающее потребности приложения.

При помощи сканера Scan 3d Universe сканируется имплант, создается параметрическая модель импланта, затем в программе Geomagic Design X создается математическая 3d модель импланта.

В модуле web-приложения хранится информация об имплантах. Параметры созданной 3d модели импланта в программе Geomagic Design X передаются в базу данных имплантов MS SQL Server Management Studio 2012.

В модуле Приложение в среде Matlab строится траектория по сплайну Эрмита третьего и четвертого порядков по заданным координатам, скоростям и времени.

В модуле Симулятор строится симуляционная программа моделирования траектории движения в виртуальном симуляторе Roboguide V 9.40 для робота манипулятора Fanuc LR Mate 200 id7l. Определенные в среде Matlab промежуточные значения координат передаются в виртуальный симулятор и базу данных имплантов, созданная 3d модель импланта в программе Geomagic Design X в формате igs передается в виртуальный симулятор Roboguide V9.40. Симуляционная программа может быть перенесена с виртуального симулятора на реальный робот.

Архитектура системы может быть представлена следующим образом (рисунок 51).

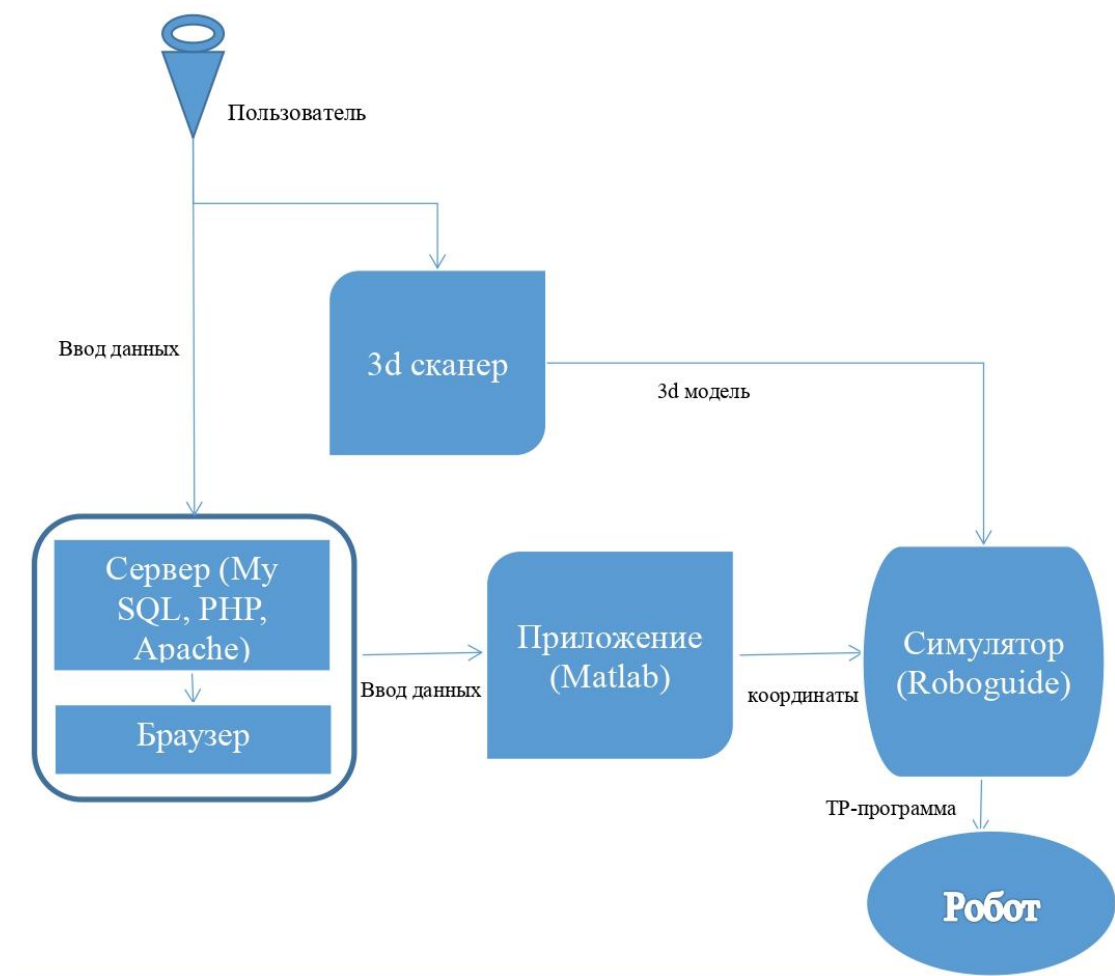


Рисунок 51 – Архитектура системы

Структуру информационной системы можно представить в следующем виде (рисунок 52).

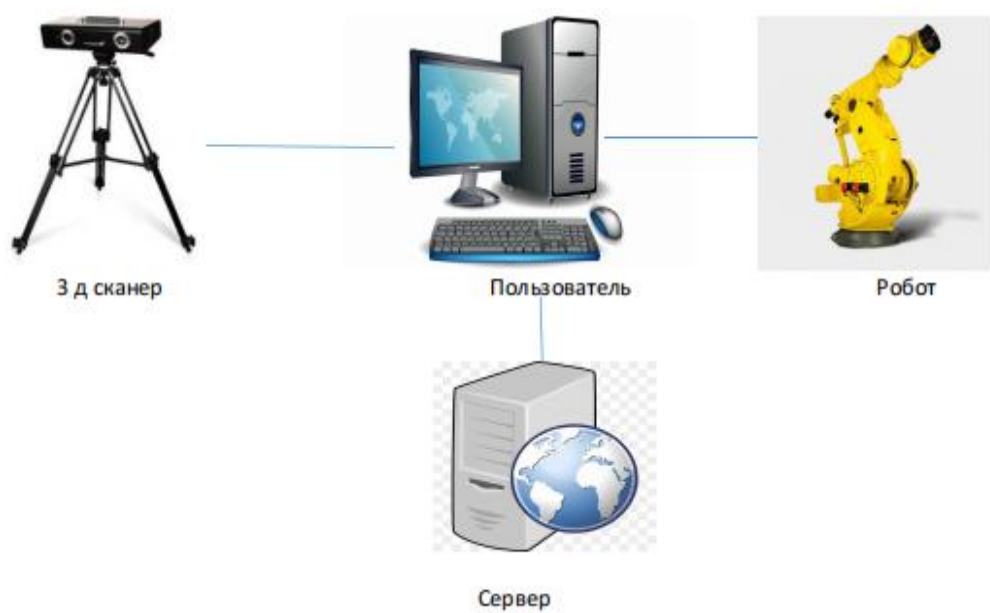


Рисунок 52 – Структура информационной системы

Для нормального функционирования системы необходимо осуществление файлового обмена данными.

В созданной системе файловый обмен данных осуществляется следующим образом: в модуле создания 3d модели разрабатывается модель импланта в формате igs, которая передается в симулятор робота манипулятора Roboguide V9.40, в модуле создания БД хранится информация о координатах и скоростях, которая передается в модуль формирования траектории, где строится траектория, полученные в этом модуле промежуточные значения координат передаются в виртуальный симулятор, где по этим данным строится симуляционная программа движения робота (рисунок 53).

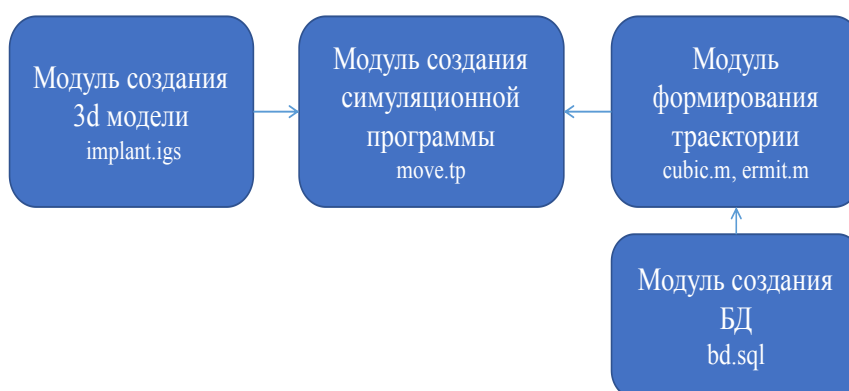


Рисунок 53 – Файловая структура

4.2 Описание пользовательского интерфейса приложения

Приложение «Информационная система моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры» было разработано на Денвер (Джентельменский набор веб-разработчика), на языке PHP, база данных создана в среде MySQL Server Management Studio.

Приложение запускается на локальном сервере localhost. Главное окно приложения состоит из 4 основных вкладок, необходимых для работы с приложением: Справочники, Импланты, Установки плазменного напыления, Координаты (рисунок 54).

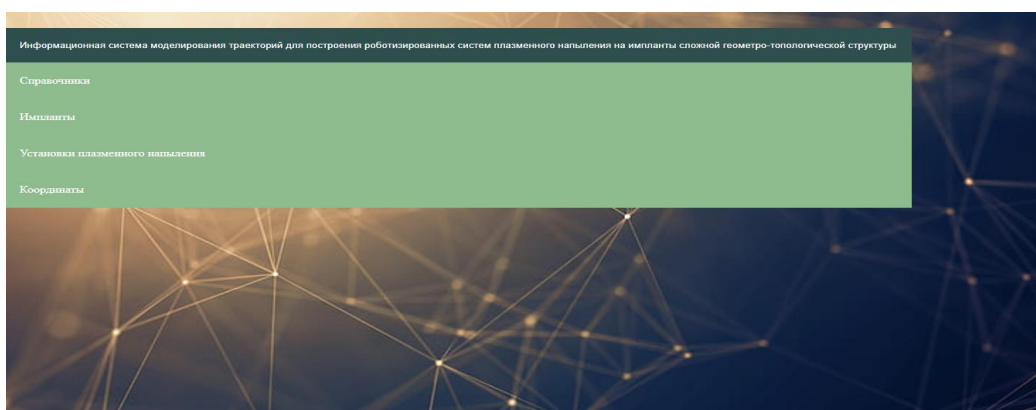


Рисунок 54 – Главное окно

Вкладка Справочники позволяет проводить работу со следующими категориями: Типы имплантов, Материалы, Технологии изготовления, Оборудование, Программное обеспечение, Производители имплантов, Способы напыления, Типы напыления, Вспомогательное оборудование, Производители установок (рисунок 55).

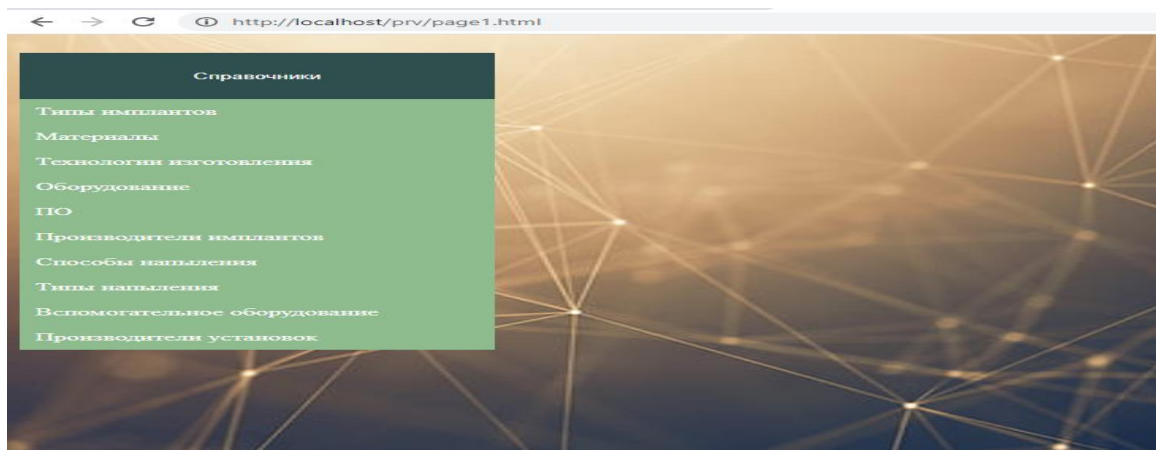


Рисунок 55 – Справочники

Во вкладке Типы имплантов приведены 10 основных типов имплантов, которые производятся с использованием основным методов производства металлических имплантов (рисунок 56).

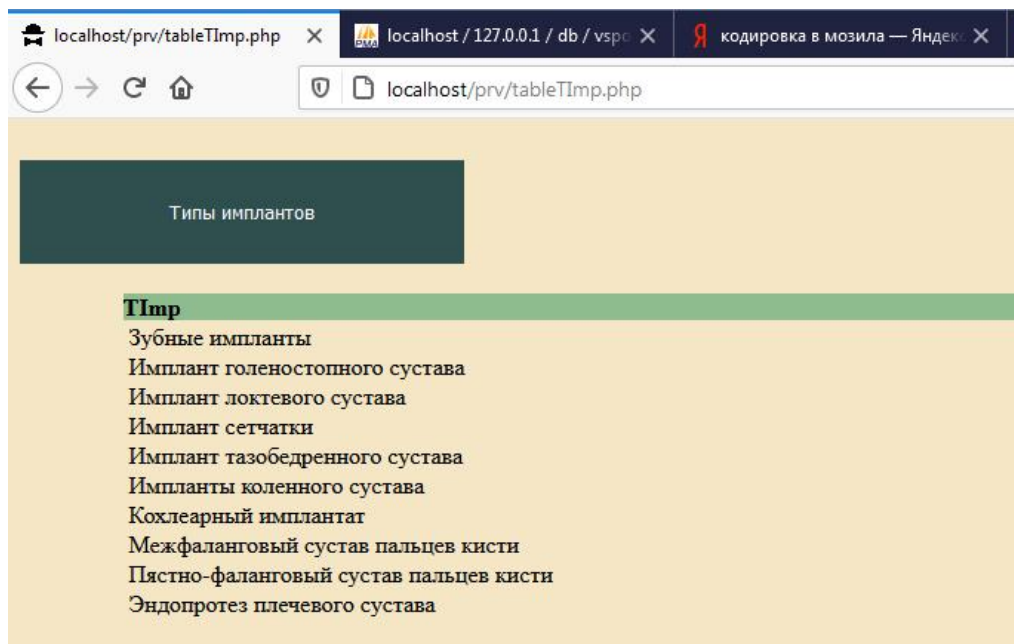


Рисунок 56 – Типы имплантов

Во вкладке Материал можно просмотреть основные материалы изготовления имплантов, которые используются при производстве металлических имплантов (рисунок 57).

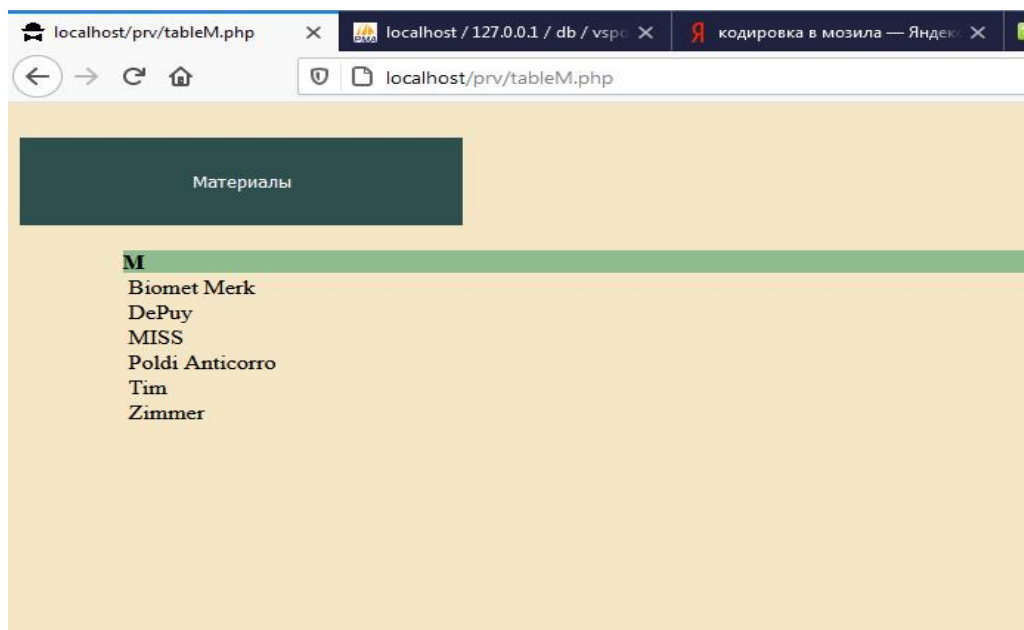


Рисунок 57 – Материалы

Во вкладке Технологии изготовления можно просмотреть информацию о технологиях изготовления имплантов, используемых при производстве имплантов, провести разные операции по редактированию данной категории (рисунок 58).

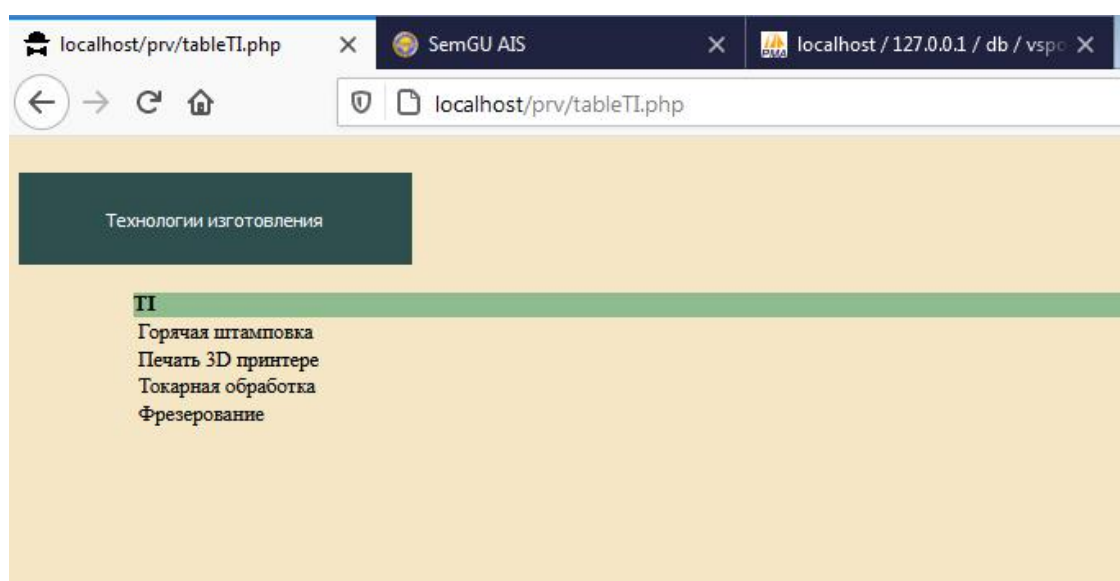


Рисунок 58 – Технологии изготовления

Во вкладке Оборудование можно просмотреть основные виды оборудования, используемые для изготовления имплантов, провести разные операции по редактированию данной категории (рисунок 59).

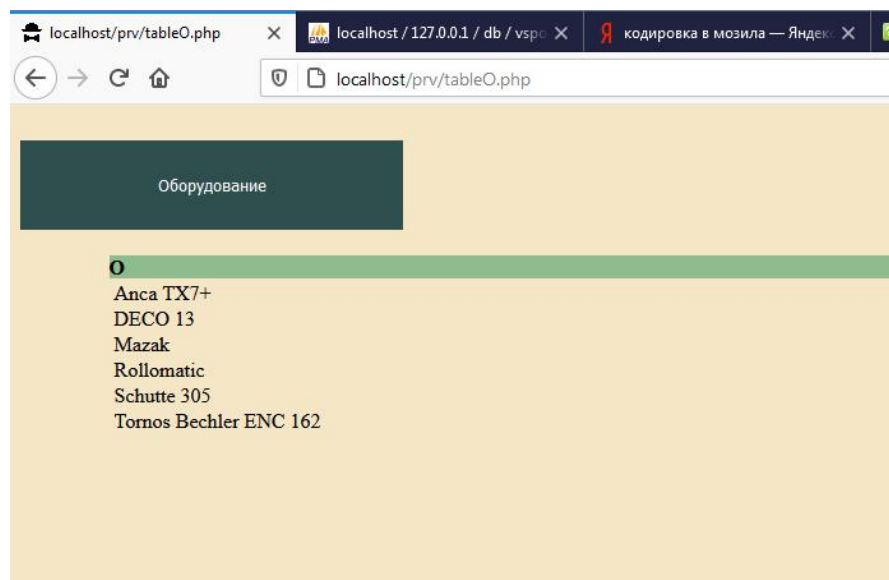


Рисунок 59 – Оборудование

Во вкладке ПО можно просмотреть программное обеспечение, которое состоит из приложений, встроенных модулей, используемое для работы при изготовлении имплантов, провести разные операции по редактированию данной категории (рисунок 60).

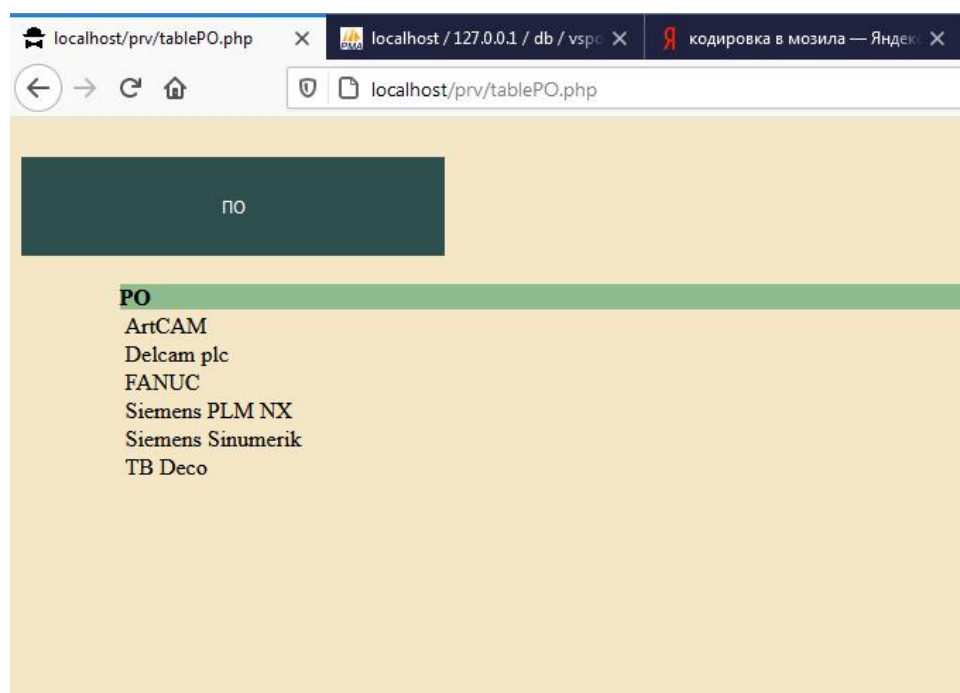


Рисунок 60 – Программное обеспечение

Во вкладке Производители имплантов можно просмотреть основных производителей имплантов, применяющих методы плазменного и микроплазменного напыления, провести разные операции по редактированию данной категории (рисунок 61).

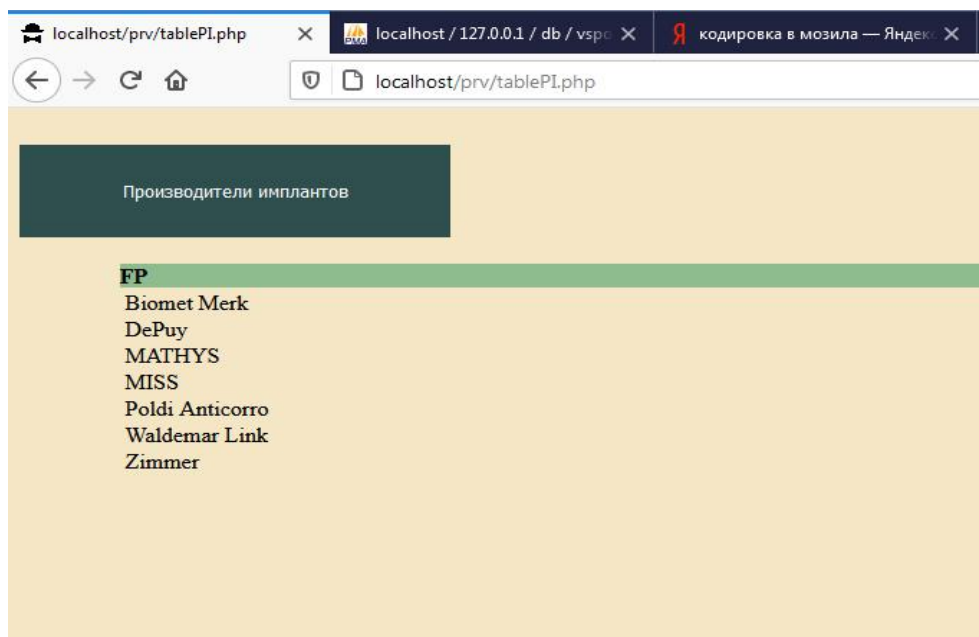


Рисунок 61 – Производители имплантов

Во вкладке Способы напыления можно просмотреть способы напыления, которые используются при плазменном и микроплазменном напылении имплантов в установках напыления, провести разные операции по редактированию данной категории (рисунок 62).

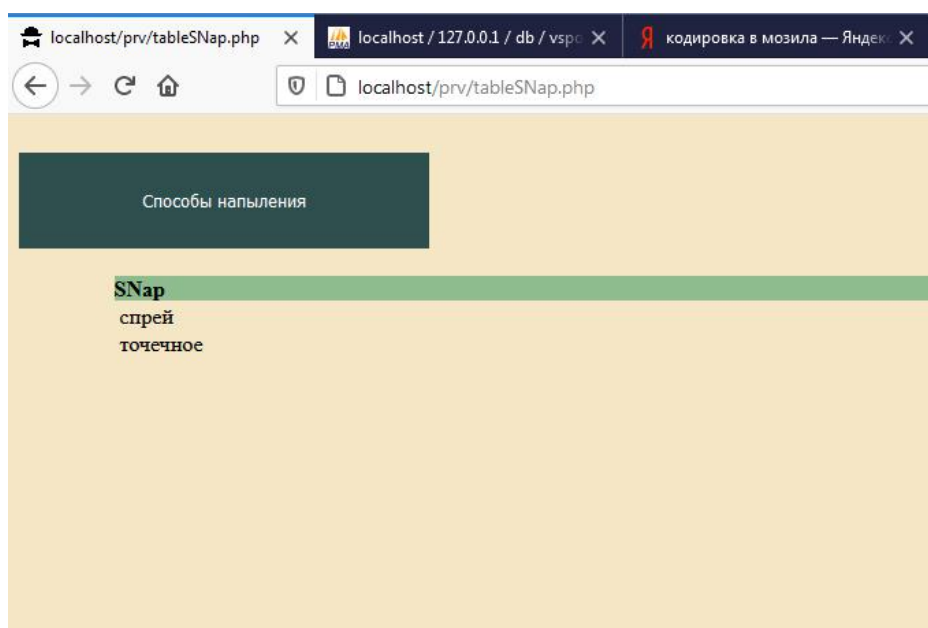


Рисунок 62 – Способы напыления

Во вкладке Типы напыления можно просмотреть типы напыления имплантов, которые используются при напылении имплантов в установках напыления, провести разные операции по редактированию данной категории (рисунок 63).

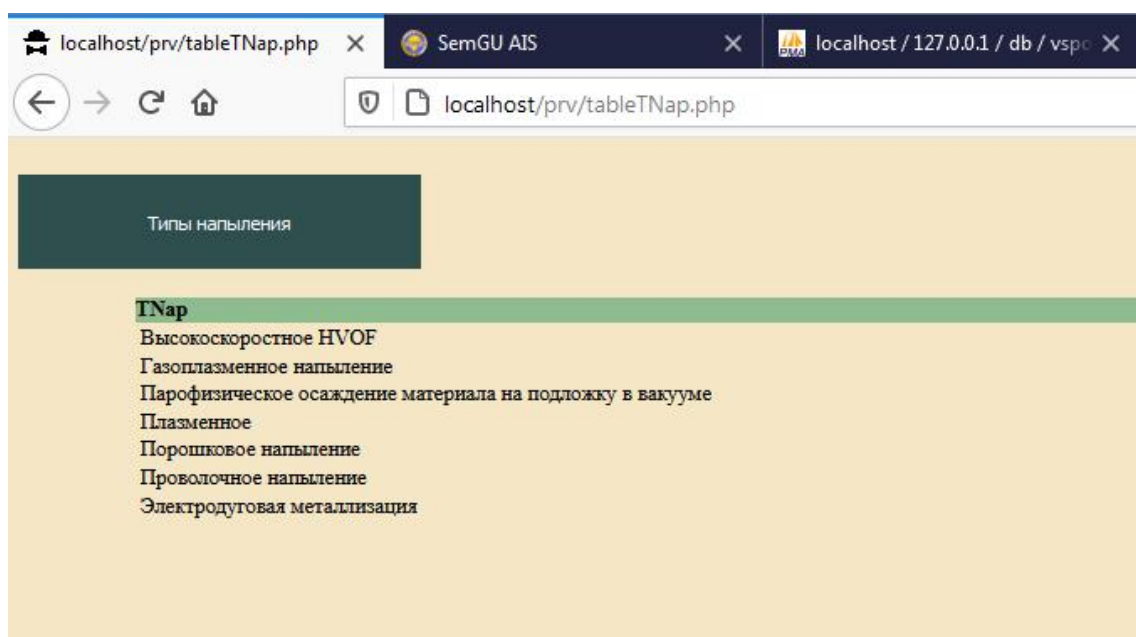


Рисунок 63 – Типы напыления

Во вкладке Вспомогательное оборудование можно просмотреть Вспомогательное оборудование, используемое при производстве имплантов, провести разные операции по редактированию данной категории (рисунок 64).

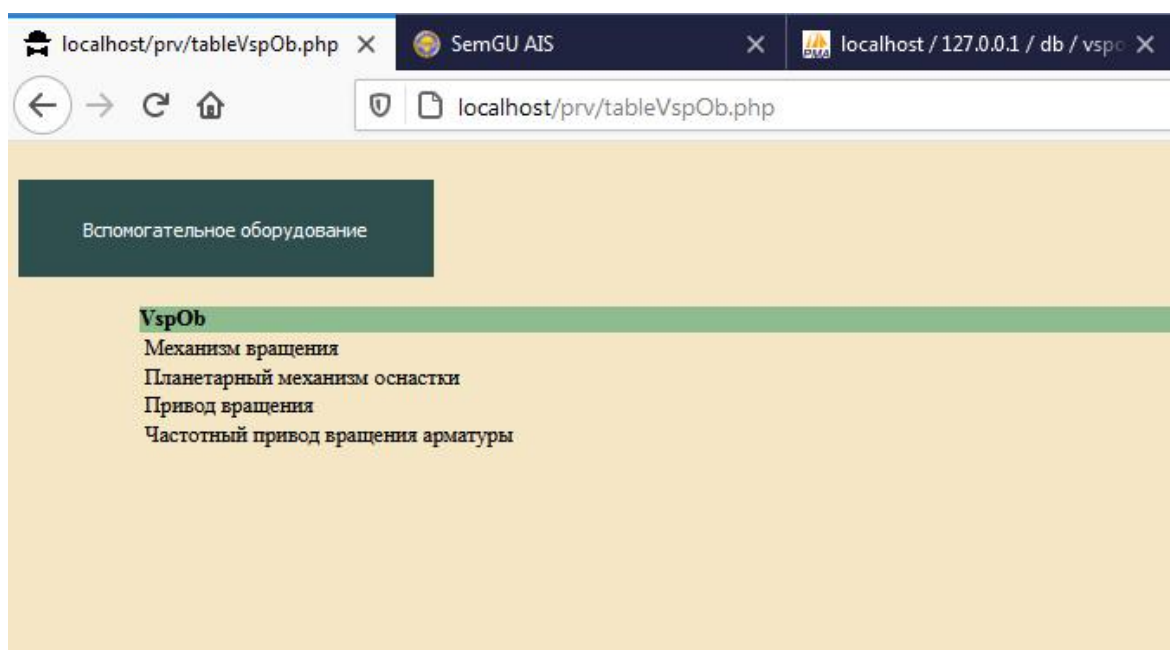


Рисунок 64 – Вспомогательное оборудование

Во вкладке Производители установок можно просмотреть основных Производителей установок плазменного напыления, провести разные операции по редактированию данной категории (рисунок 65).

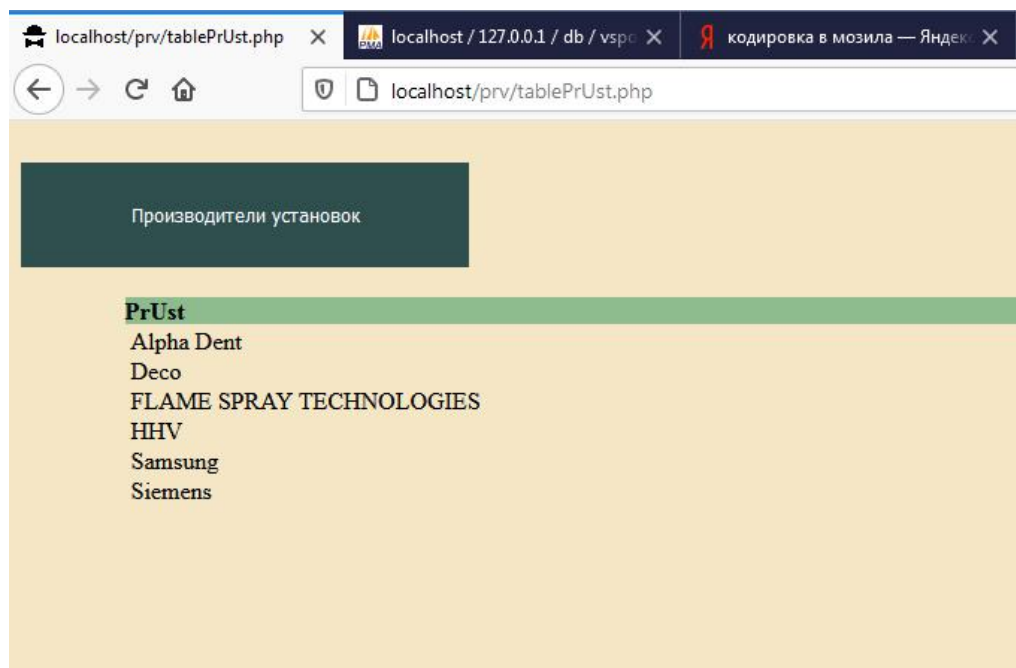


Рисунок 65 – Производители установок

В категории Импланты есть 2 вкладки Импланты и Физические размеры имплантов.

Во вкладке Импланты можно проделать операции с имплантами и физическими размерами имплантов (рисунок 66). В этой таблице размещена информация по видам имплантов: тип импланта, материал изготовления импланта, фирма-производитель, оборудование, на котором изготавливается имплант, программное обеспечение, используемое при изготовлении импланта, веб-сайты производителя.

Импланты						
KodImp	Imp	M	FP	Link	П	FO
1	Зубные импланты	титан	MISS	http://pergam-stanko.ru/item_134.htm	Фрезерование, токарная обработка	TB Deco Tomos Becher ENC 162
2	Зубные импланты	титан	Zimmer	http://www.zimmerussia.ru/corporate/about-zimmer/about-us.html	Фрезерование, токарная обработка	Siemens Sinumerik Rollomatic
3	Имплант тазобедренного сустава	титан	DePuy	http://travmaorto.ru/264.html	Фрезерование, токарная обработка, горячая штамповка	Siemens PLM NX Anca TX7+
4	Имплант тазобедренного сустава	титан	Poldi Anticoro	http://vscst.ru/2015/04/beznoska/	Печать 3D принтере, фрезерование, токарная обработка	FANUC Schutte 305
5	Импланты коленного сустава	титан	Poldi Anticoro	http://www.anca.com/News/The-Sharp-E-Newsletter/July-2010/Knees-Please-Orthopedic-Implant-Grinding?lang=ru-RU&page=2	Фрезерование, токарная обработка	Siemens PLM NX Anca TX7+
6	Импланты коленного сустава	титан	Zimmer	http://www.zimmerussia.ru/corporate/about-zimmer/about-us.html	Фрезерование, токарная обработка	Siemens Sinumerik Rollomatic
7	Эндопротез плечевого сустава	титан	MATHYS	http://www.mdsokol.ru/surgery/orthopedy/o04.shtml	Фрезерование, токарная обработка	Siemens PLM NX Anca TX7+
8	Эндопротез плечевого сустава	титан	Zimmer	http://www.zimmerussia.ru/corporate/about-zimmer/about-us.html	Фрезерование, токарная обработка	Siemens Sinumerik Rollomatic
9	Имплант локтевого сустава	титан	Bionet Merk	http://www.mdsokol.ru/surgery/orthopedy/o04.shtml	Фрезерование, токарная обработка, горячая штамповка	TB Deco DECO 13
10	Имплант локтевого сустава	титан	Zimmer	http://www.zimmerussia.ru/corporate/about-zimmer/about-us.html	Фрезерование, токарная обработка	Siemens Sinumerik Rollomatic
11	Имплант голеностопного сустава	титан	Poldi Anticoro	http://www.anca.com/News/The-Sharp-E-Newsletter/July-2010/Knees-Please-Orthopedic-Implant-Grinding?lang=ru-RU&page=2	Фрезерование, токарная обработка	Siemens PLM NX Anca TX7+
12	Имплант голеностопного сустава	титан	Zimmer	http://www.zimmerussia.ru/corporate/about-zimmer/about-us.html	Фрезерование, токарная обработка	Siemens Sinumerik Rollomatic
13	Имплант лучезапястного сустава	титан	Link	http://subterrained.ru/products/ct-12/ct-73-94-izgotovlenie-individualnyh-endoprotezov.html	Печать 3D принтере, фрезерование, токарная обработка	Delcam plc Anca TX7+
14	Имплант лучезапястного сустава	титан	Zimmer	http://www.zimmerussia.ru/corporate/about-zimmer/about-us.html	Фрезерование, токарная обработка	Siemens Sinumerik Rollomatic
15	Мезофаланговый сустав пальца кисти	титан	Poldi Anticoro	http://www.anca.com/News/The-Sharp-E-Newsletter/July-2010/Knees-Please-Orthopedic-Implant-Grinding?lang=ru-RU&page=2	Печать 3D принтере, фрезерование, токарная обработка	ArtCAM Anca TX7+
16	Плоско-фаланговый сустав пальца кисти	титан	Poldi Anticoro	http://www.anca.com/News/The-Sharp-E-Newsletter/July-2010/Knees-Please-Orthopedic-Implant-Grinding?lang=ru-RU&page=2	Фрезерование, токарная обработка	TB Deco DECO 13
0	Имплант конечностей	титан	Zikk	www.zikk.com	Фрезерование, токарная обработка	Tomos Becher ENC 162 Siemens Sinumerik

Рисунок 66 – Импланты

Во вкладке Добавить новую запись в таблицу «Импланты» можно добавить новый тип импланта со всеми характеристиками (рисунок 67).

Добавить новую запись в таблицу "Импланты"

KodImp

TImp

M

FP

Link

TI

PO

O

Добавить

Рисунок 67 – Импланты

Во вкладке Физические размеры имплантов можно просмотреть основные параметры имплантов: длину, диаметр, ширину, длину дуги, длину зажима, диаметр зажима, длина прямоугольника, высота, длина проксимального стебля, длина дистального стебля, диаметр стебля. Эти физические параметры имплантов используются при отборе имплантов параметрическим методом для последующего напыления (рисунки 68, 69).

Физические размеры имплантов

KodImp	Dlina	Diametr	Shirina	DlinaDugi	DlinaZagima	DiametrZagima	DlinaPr	Vysota	DlinaPrSt	DlinaDisSt	DiametrSt
1	10	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0.02	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0

Рисунок 68 – Физические размеры имплантов

Добавить новую запись в таблицу "Физические размеры имплантов"

KodImp
 Dlina
 Diametr
 Shirina
 DlinaDugi
 DlinaZagima
 DiametrZagima
 DlinaPr
 Vysota
 DlinaPrSt
 DlinaDisSt
 DiametrSt

Добавить

Рисунок 69 – Добавление записи в таблицу «Физические размеры имплантов»

Во вкладке Установки плазменного напыления можно просмотреть основную информацию по существующим установкам плазменного и микроплазменного напыления: название установок, способ напыления, тип напыления, расстояние до напыляемого объекта, вспомогательное оборудование, используемое при плазменном напылении, фирма-производитель данной установки (рисунки 70, 71).

NazvUst	SNap	TNap	RDoOb	VspOb	PrUst
Alpha	спрей	Плазменное	300	Привод вращения	Alpha Dent
FORVAK	спрей	Плазменное	270	Частотный привод вращения арматуры, планетарный механизм оснастки	Siemens
Мультипроцессная система MP-50	спрей	Плазменное, высокоскоростное HVOF, газоплазменное порошковое и проволоочное, электродуговая металлизация	300	Частотный привод вращения арматуры, планетарный механизм оснастки	FLAME SPRAY TECHNOLOGIES
Установка для микроплазменного напыления УМПН-02	спрей	Плазменное	300	Привод вращения	Институт электросварки имени Е.О.Патона
УСТАНОВКА ННВ-6.6	спрей	Парофизическое осаждение материала на подложку в вакууме	300	Механизм вращения	ЦВК
Установки напыления тонких пленок TF600	спрей	Плазменное	300	частотный привод вращения арматуры, - планетарный механизм оснастки	ННВ

Рисунок 70 – Установки плазменного напыления

localhost/prv/formUstNap.php

localhost/prv/formUstNap.php

Главная страница Ян... Сервисы Яндекса Главная страница Ян... Сервисы Яндекса

Добавить новую запись в таблицу "Установки плазменного напыления"

NazvUst

SNap

TNap

RDoOb

VspOb

PrUst

Добавить

Рисунок 71 – Добавление записи в таблицу «Установки плазменного напыления»

Вкладка Координаты содержит информацию по табличным данным о координатах робота, которые используются для построения траектории движения робота Fanuc LR Mate 200id в виртуальном симуляторе Roboguide. J-значение обобщенной координаты робота, t- время движения робота (задается в секундах), v – скорость движения робота (рисунки 72, 73) [99, 100].

localhost/prv/tableCoord.php

localhost / 127.0.0.1 / db / vspc

кодировка в мозила — Яндекс

Как поменять кодировку в мс

Настройки

localhost/prv/tableCoord.php

Поиск

Координаты

t	J	v
1	79.5	1
2	79.4	10
3	79.3	10.1
4	79.2	10.2
5	79.1	10.5
6	79	10.4
7	78.9	10.1
8	78.8	10.5
9	78.5	10.4
10	78	10.3
11	76.5	10.5
12	75.5	10.4
13	74.7	10.5
14	73.5	10.1
15	73	10

Рисунок 72 – Координаты

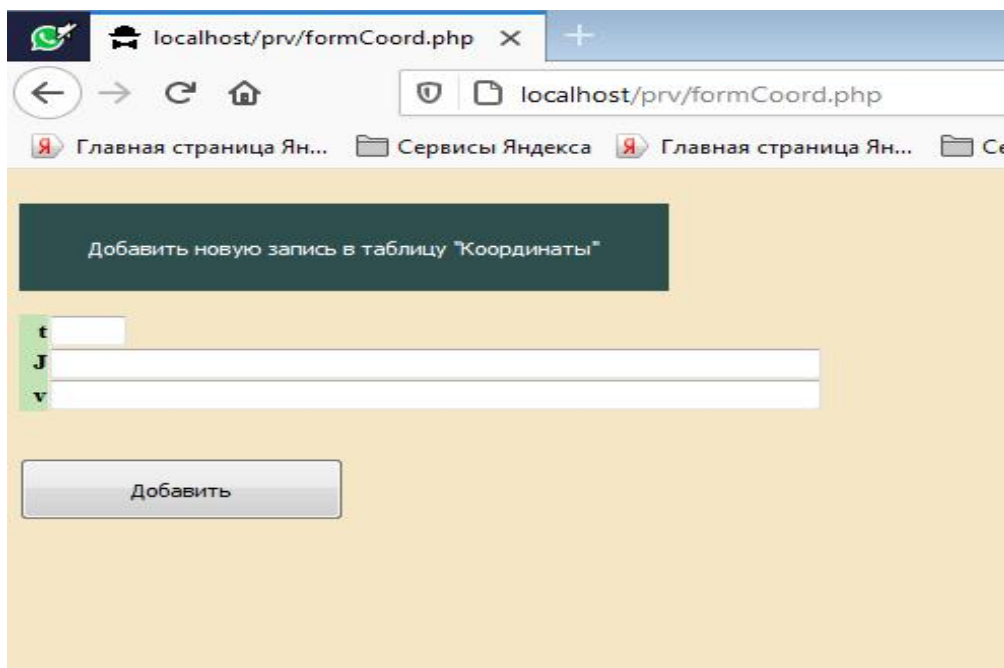


Рисунок 73 – Добавление записи в таблицу «Координаты»

4.3 Моделирование плазменного напыления поверхности имплантов

Для моделирования траекторий с базы данных имплантов в MS SQL Server Management Studio передаются координаты, время и скорость движения в среду Matlab, где затем по ним строится сплайн Эрмита четвертого порядка. С целью программной реализации движений робота манипулятора, разработанные модели имплантов передаются в программу для симуляции робота Roboguide V 9.40.

Загружаем промежуточные значения координат, найденные по сплайну Эрмита четвертого порядка, в данную программу.

Этапы разработки симуляционной программы движения робота для напыления импланта по выбранной траектории можно представить следующим образом (рисунок 74).



Рисунок 74 – Этапы создания симуляционной программы

1-этап. Выбор модели робота

Программа FANUC ROBOGUIDE V 9.40 дает возможность выбора модели робота и установления всех необходимых опций. Выбираем тип робота Fanuc LR Mate 200 id (рисунок 75).

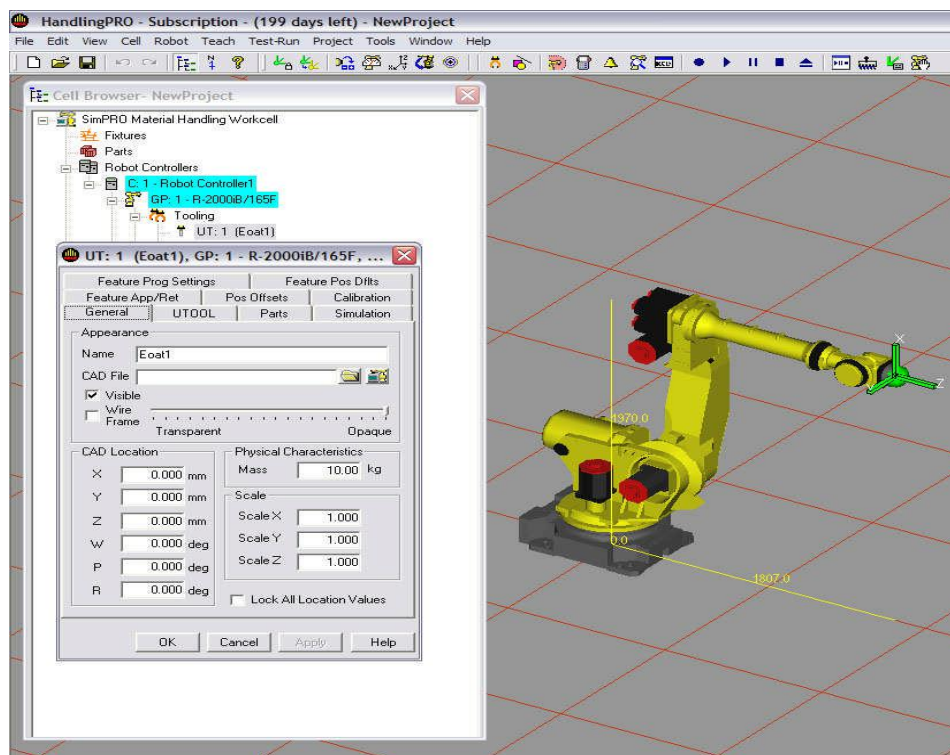


Рисунок 75 – Выбор робота

2-этап. Установка параметров робота (рисунок 76)

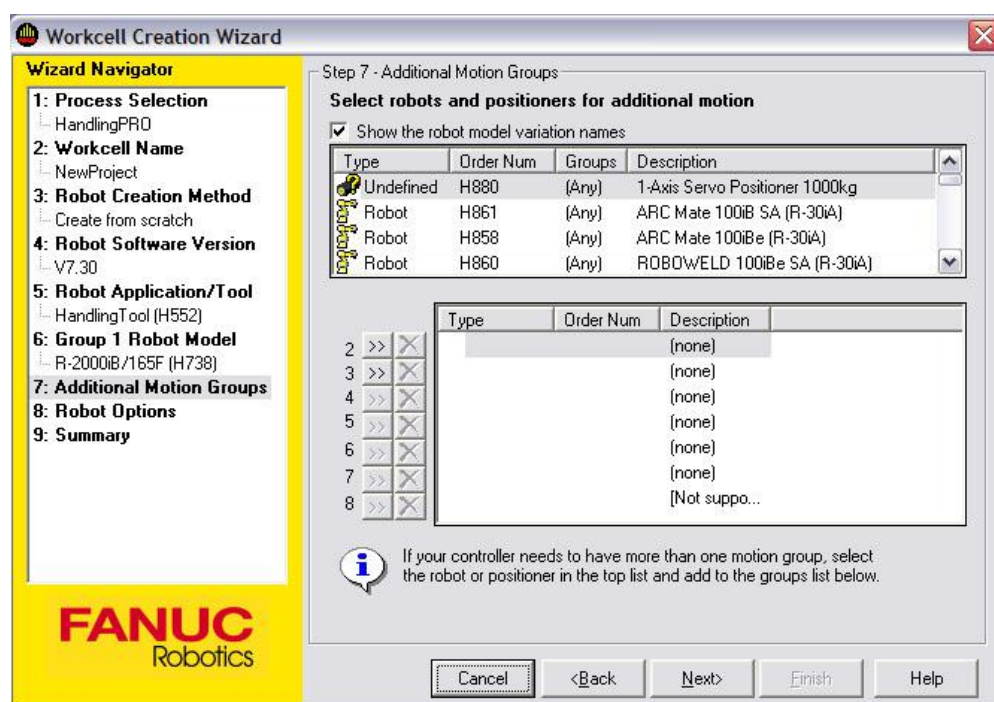


Рисунок 76 – Установка опций

3-этап. Импорт детали

После выбора робота и установки необходимых опций импортируем модель импланта из Geomagic Design X в формате *.igs в Roboguide (рисунок 77).

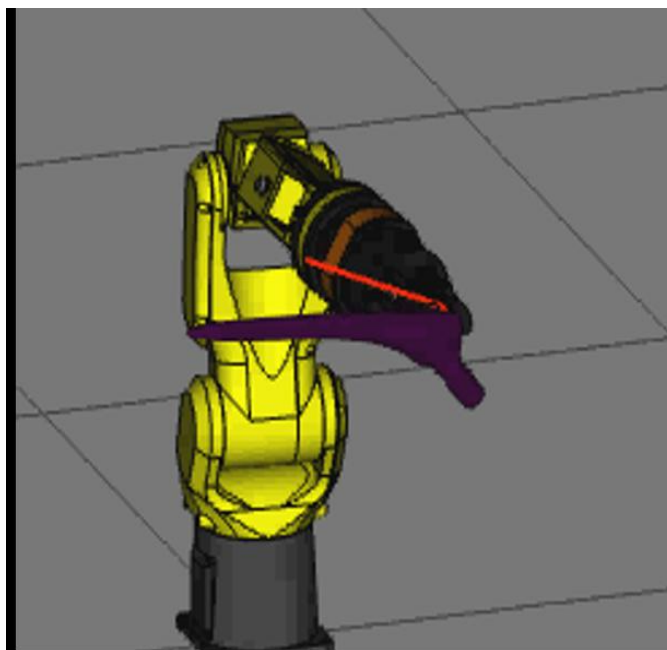


Рисунок 77 – Импорт 3d модели импланта

4-этап. Настройка свойств детали

На этом этапе настраиваются свойства осей, относительно которых расположена деталь, устанавливаются размеры детали.

5-этап. Задание позиций движения

Затем задается движение робота. Используя опцию Определение положения в точке задаем нужные координаты для каждой позиции (рисунок 78).

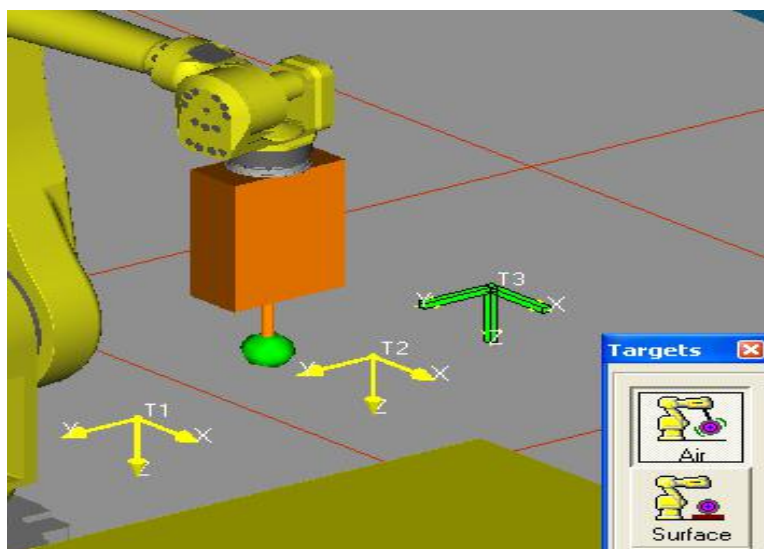


Рисунок 78 – Задание позиций робота

По переданным координатам и значениям скорости созданные цели объединяются в группы целей (рисунок 79).

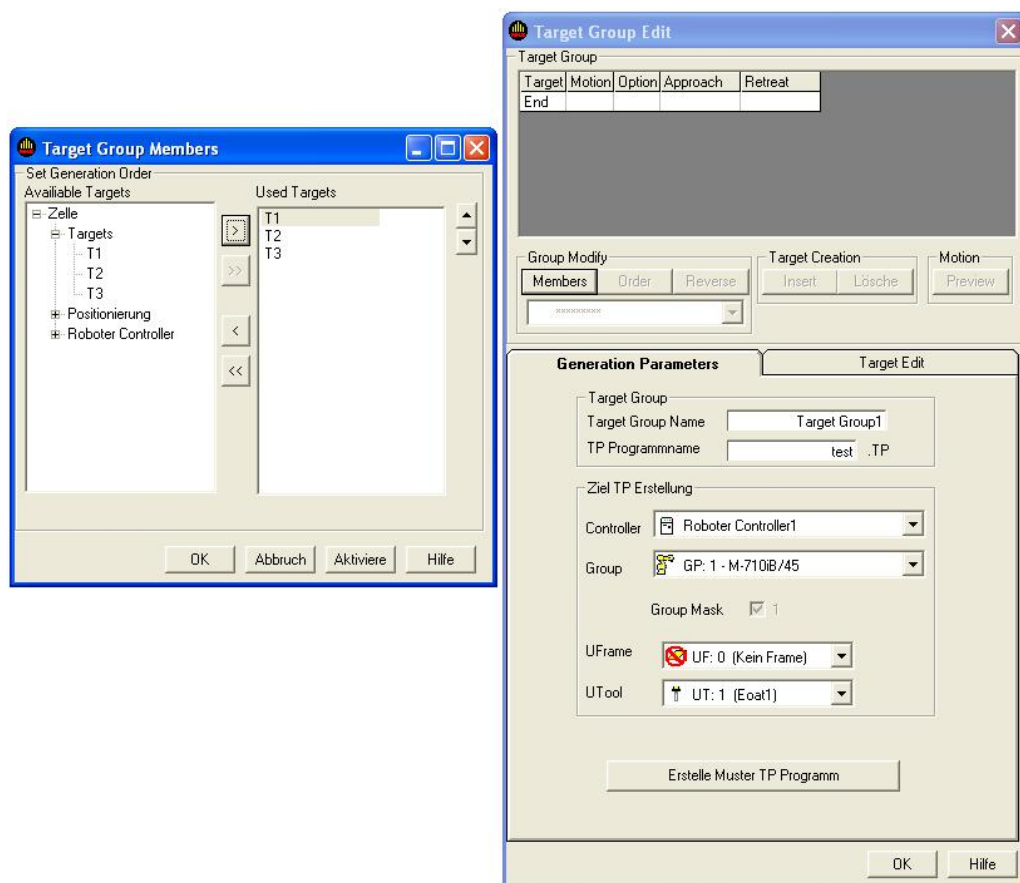


Рисунок 79 – Задание группы целей

6-этап. Генерирование программы движения

По группе целей строится симуляция программы движения (рисунок 80, 81, 82).

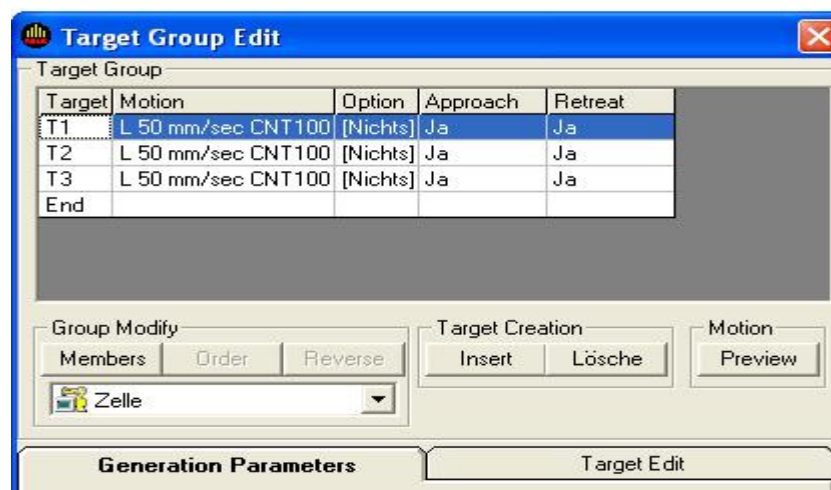


Рисунок 80 – Настройка свойств позиций

Motion Edit

CONFIG:

X mm
Y mm
Z mm

W deg
P deg
R deg

☒ Direct Entry
☐ Bump Relative

Рисунок 81 – Настройка свойств движений

Target Group Edit

Target Group

Target	Motion	Option	Approach	Retreat
T1	L 50 mm/sec CNT100	[Nichts]	Ja	Ja
T2	L 50 mm/sec CNT100	[Nichts]	Ja	Ja
T3	L 50 mm/sec CNT100	[Nichts]	Ja	Ja
End				

Group Modify:
Target Creation:
Motion:

Generation Parameters

Target Edit

Motion Line Data

☒ L 50 mm/sec CNT100

☒ Approach

☒ Retreat

Orientation

Auto Adjust

☒ Change tool spin orientation along the targets
☐ Change tool spin orientation along the next target
☐ Blend orientation from first to last target
☐ Set orientation to normal of closest surface
☐ Set the orientation same as T1

Auto Search for reachable ☐ Move Robot while searching

Manual Adjust

Select target(s) from the grid, press Start, and click on surface.

Рисунок 82 – Настройка свойств TP-программы

После установления всех свойств ТР-программы генерируется движение робота по обозначенным позициям (Приложение В).

Было построено генерирование движения робота для отобранных шести имплантов (рисунки 83, 84, 85, 86, 87, 88).

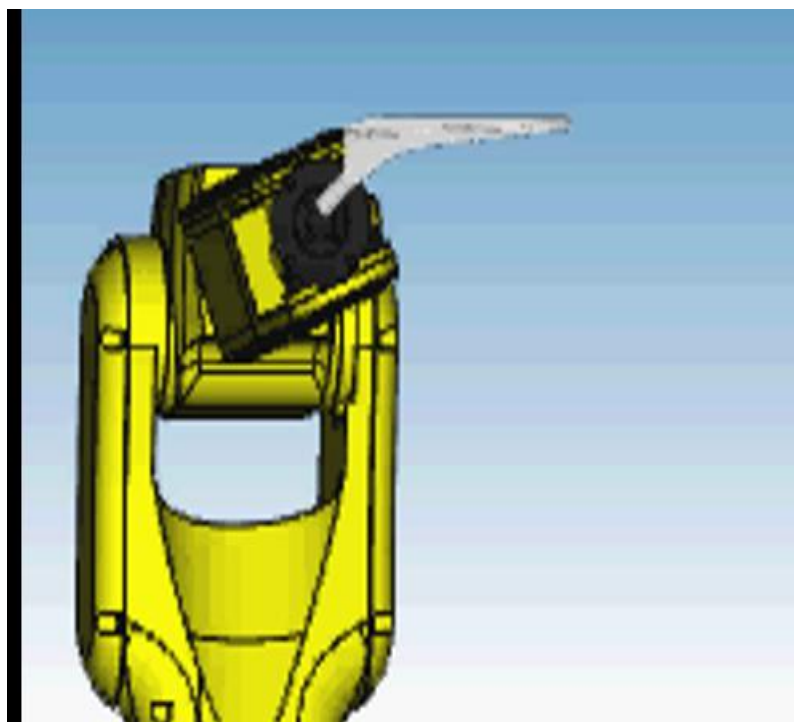


Рисунок 83 – Генерирование ТР программы для составляющей импланта тазобедренного сустава

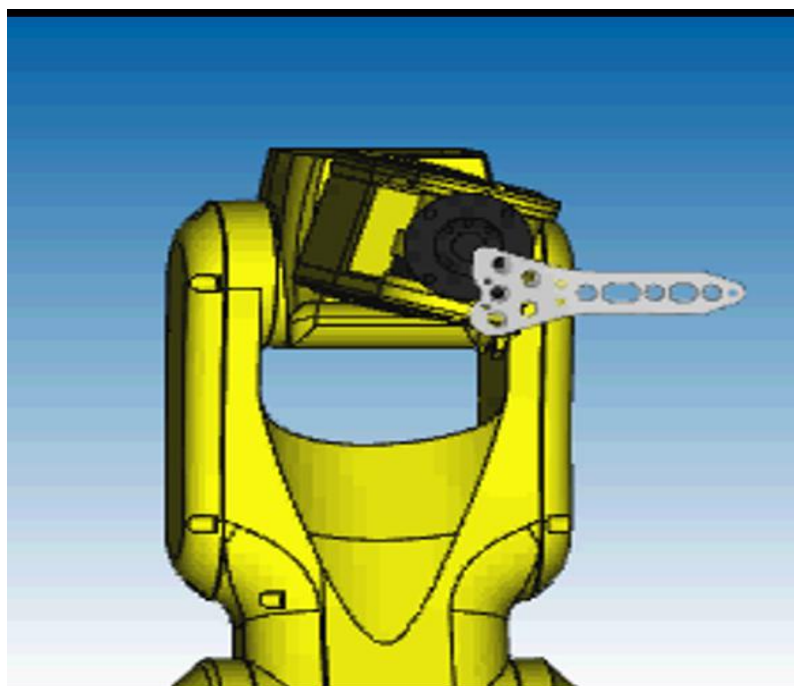


Рисунок 84 – Генерирование ТР программы для составляющей импланта голени

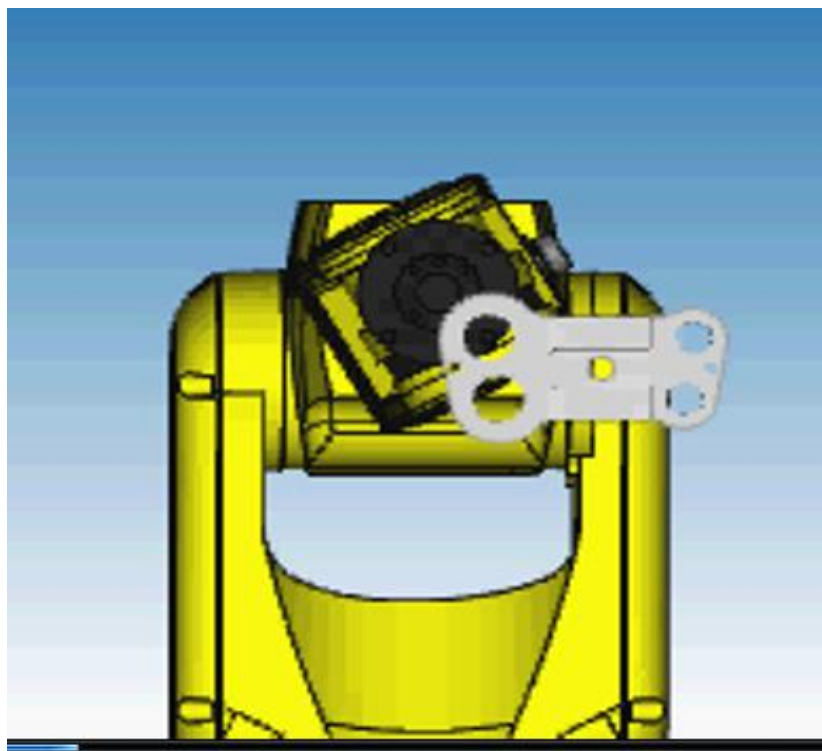


Рисунок 85 – Генерирование ТР программы для составляющей импланта позвоночного

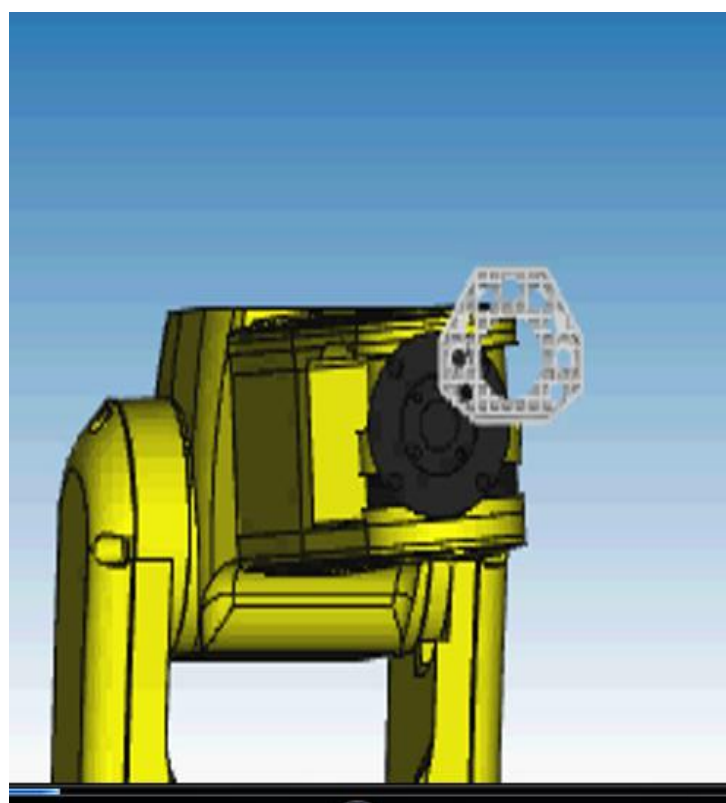


Рисунок 86 – Генерирование ТР программы для составляющей шейного импланта

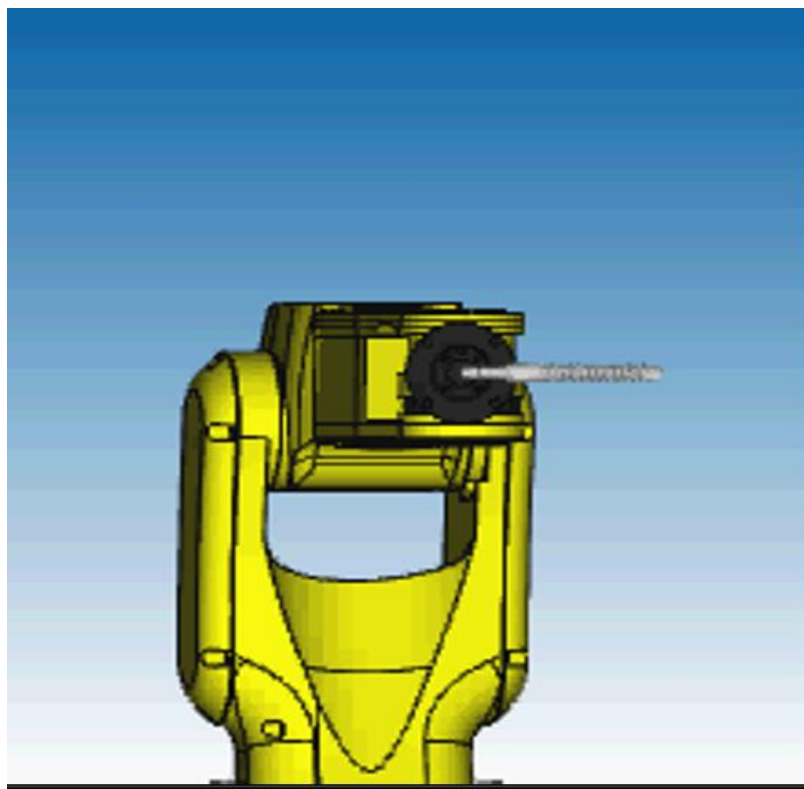


Рисунок 87 – Генерирование TP программы для составляющей импланта суставов пальцев

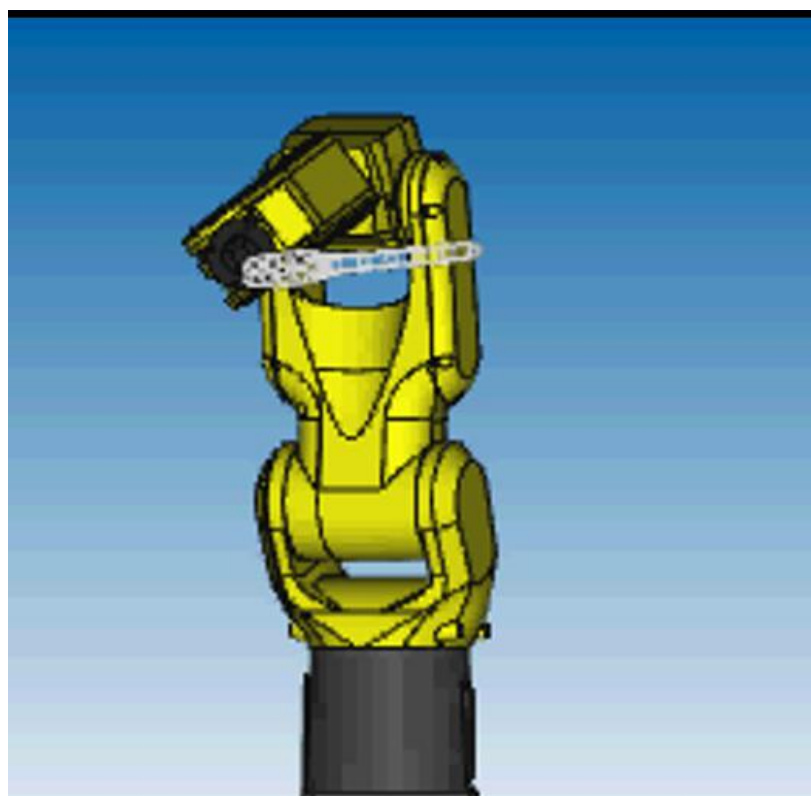


Рисунок 88 – Генерирование TP программы составляющей импланта плечевого сустава

Выводы к разделу 4

По результатам исследований по данной главе создано приложение "Информационная система моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры", позволяющая работать с базой данных имплантов. Приложение предназначено для: учета существующих и возможных имплантов различных производителей; просмотра данных имплантов по типу применения и материала изготовления; просмотра данных имплантов по геометро-топологическим размерам составляющих; просмотра данных программного обеспечения при построении 3d моделей имплантов для станков с ЧПУ; учета физических размеров имплантов; обновления, записи элементов, добавления новых полей.

Была разработана модель движения робота по координатам и скоростям для напыления поверхности импланта. Для этого были проделаны следующие шаги: для моделирования траекторий с базы данных имплантов в MS SQL Server Management Studio были переданы координаты, время и скорость движения в среду Matlab, где затем по ним был построен сплайн четвертого порядка с использованием полиномов Эрмита.

Для построения программных движений робота Fanuc LR Mate 200id7, выбранные 3D модели имплантов были загружены в симулятор движений Roboguide V 9.40 и по координатам были сгенерировано движение робота для напыления шести видов отобранных имплантов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная диссертационная работа представляет теоретическое и экспериментальное исследование по разработке информационной системы моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры.

В результате проведенных исследований на основе параметрического метода классификации была разработана система классификации имплантов по возможности напыления при помощи манипуляционного робота. Были разработаны 3d модели шести отобранных имплантов.

Смоделировано решение задачи построения траектории в среде Matlab с использованием полиномов Эрмита третьего и четвертого порядков.

Было создано приложение "Информационная система моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры" для работы с базой данных имплантов.

Была разработана модель движения робота по координатам и скоростям для напыления поверхности импланта.

Совокупность полученных в работе результатов позволила создать научные основы информационной системы моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры.

Научные и практические результаты работы получены в ходе выполнения исследований в рамках проекта программно-целевого финансирования «0006/ПЦФ-2017 «Выпуск титановой продукции для дальнейшего использования в медицине». Зарегистрированы программы для ЭВМ: «Информационная подсистема для работы с базой данных имплантов» от 19 августа 2020г. №11699», «Информационная система моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры» от 16 февраля №15189.

Результаты диссертации перспективны для создания наукоемкого производства, внедрение в производство информационной системы моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры позволяет оптимизировать процесс плазменного напыления. Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс ТОО «Neola».

Основные результаты диссертации представлены в 13 работах, из них 5 в изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки, 1 статья в журнале, входящего в базу данных Scopus: International Journal of Computing (Vol. 19(2) 2020, p. 224-232) с процентилем по CiteScore в базе данных Scopus 55%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Карымсакова И.Б., Денисова Н.Ф. Использование полиномов Эрмита четвертого порядка для создания модели напыления манипуляционным роботом имплантов при помощи виртуального симулятора Roboguide // Вестник ВКГТУ. – 2019. – №2. – С. 139-145.
- 2 Карта слов // <https://kartaslov.ru/>. 25.05.2017.
- 3 Искусственный интеллект - угроза или помощник для человечества? // <https://www.bbc.com/russian/features-38931070>. 30.05.2017.
- 4 Уникальная операция по стволотомозговой имплантации в Каэтанах // <http://whc.ifps.org.pl/ru/2014/05/ru-pniowe/>. 30.05.2017.
- 5 Больные с искусственными клапанами сердца // В кн.: Руководство по кардиологии: в 3 т. / под ред. Г.И. Сторожакова, А.А. Горбаченкова. – М., 2008. – Т. 2. – 512 с.
- 6 Mexicans get microchipped over kidnapping fears // New Scientist. – 2008, August – 22.
- 7 Имплантация // <http://www.membrana.ru/particle/12781>. 26.07.2017.
- 8 Эндопротез // <https://doclvs.ru/medpop9/endop.php>. 26.07.2017.
- 9 Как устроен эндопротез? // <https://lechimvs.ru/kak-ustroen-endoprotez.html>. 26.07.2017.
- 10 Об эндопротезировании // <https://legscorrection.ru/plastic/endoprosthesis.php>. 26.07.2017.
- 11 Буйлова Т.В., Цыкунов М.Б., Карева О.В. и др. Федеральные клинические рекомендации. реабилитация при эндопротезировании тазобедренного сустава в специализированном отделении стационара // Вестник восстановительной медицины. – 2016. – №5. – С. 6-20.
- 12 Горбатов Р.О., Клеменова И.А., Новиков А.В. и др. Ревизионное эндопротезирование крупных суставов с использованием индивидуальных гибридных эндопротезов // Современные проблемы науки и образования. – 2019. – №4. – С. 36-45.
- 13 Николаев Н.С., Малюченко Л.И., Преображенская Е.В. и др. Применение индивидуальных вертлужных компонентов в эндопротезировании тазобедренного сустава при посттравматическом коксартрозе // Гений Ортопедии. – 2019. – №2. – С. 207-213.
- 14 Павлов Д.В. Опыт эндопротезирования голеностопного сустава при посттравматических артрозах // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №3. – С. 156-157.
- 15 Эндопротезирование суставов // <https://doctor-matienko.ru/endoprotezirovanie-sustavov/>. 17.08.2017.
- 16 Зубное протезирование на имплантатах // <https://dentaltechnic.info/index.php/implanty/zubnoe-protezyrovanie>. 18.08.2017.
- 17 Суров О.Н. Зубное протезирование на имплантах. – М.: Медицина, 1993. – 208 с.

- 18 Производство зубных имплантов MIS // <http://dentalcentr.com.ua/proizvodstvo-zubnyh-implantov-mis.html>. 20.08.2017.
- 19 Хирурги ждут титановый имплант, напечатанный на 3d-принтере // <https://spinet.ru/news/?id=2112>. 25.08.2017.
- 20 Роботы для напыления // <http://irobs.ru/robotyi-dlya-napyleniya1>. 30.08.2017.
- 21 LR-mate-200id-71 // <http://robots/fanuc-lr-mate-200id-71.html>. 05.09.2017.
- 22 Роботы Fanuc // <https://www.fanuc.eu/ru/ru>. 05.09.2017.
- 23 Zhu S.L. et al. Effect of porous NiTi alloy on bone formation: A comparative investigation with bulk NiTi alloy for 15 weeks in vivo // Materials Science & Engineering C. – 2008. – Vol. 28(8). – P. 1271-1275.
- 24 Lee B.H. et al. Effect of surface structure on biomechanical properties and osseointegration // Materials Science & Engineering C. – 2008. – Vol. 28(8). – P. 1448-1461.
- 25 Borisov Yu., Kislitsa A., Voynarovich S. Microplasma wire spraying // Proceed. of the internat. thermal Spray conf. and Exposition ITSC 2004 “Thermal Spray Solutions Advances in Technology and Application”. – Osaka, 2004. – P. 657-661.
- 26 Alontseva D., Borisov Yu., Voinarovych S. et al. Development of technology of microplasma spraying for the application of biocompatible coatings in the manufacture of medical implants // Przegląd Elektrotechniczny. – 2018. – №7. – P. 94-97.
- 27 Alontseva D. Introduction to Coating Design and Processing // In book: ASM Handbook. – Almere. 2013. – Vol. 5A. – 412 p.
- 28 Мультипроцессная система MP-50 // <http://www.flamespraytech.ru/equipment/MP-X>. 25.09.2017.
- 29 Установка вакуумная для напыления зубных протезов FORVAK-0,5 (Булат) // <https://by.all.biz/ustanovka-vakuumnaya-dlya-napyleniya>. 30.09.2017.
- 30 Ионно-плазменное напыление и травление // <https://zcvr.ru/cat>. 30.09.2017.
- 31 Установки напыления тонких пленок NHV TF600 для лабораторных НИОКР или производства // <https://theseuslab.by/p65114553>. 30.09.2017.
- 32 Установка для микроплазменного напыления // <https://plazmotron.uaprom.net/p350230-ustanovka-dlya-mikroplazmennogo.html>. 02.10.2017.
- 33 Оборудование для высокоскоростного напыления // <https://tspc.kz/oborudovanie-i-materialy/oborudovanie-dlya-napyleniya/oborudovanie>. 02.10.2017.
- 34 Оборудование для напыления // <http://www.msht.ru/catalog/998/>. 02.10.2017.
- 35 Ионно-плазменное напыление // <http://inlinecom.ru/ionno-plazmennoe-napylenie/>. 05.10.2017.
- 36 Технология напыления тонких пленок // <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2195/doc/49951/>. 10.10.2017.

- 37 Alontseva D., Krasavin A., Kolesnikova T. et al. Modeling of Processes Taking Place during Powder Coating Treatment by an Electron Beam or a Plasma Jet // *Acta Physica Polonica A*. – 2014. – Vol. 125, №6. – P. 1275-1279.
- 38 Циркониевые импланты // <https://zubi5.ru/implanty/tsirkonievye-implanty.html>. 10.10.2017.
- 39 Кохлеарная имплантация // <http://slyshimvmeste.kg/2018/09/kohlearnaya-implantatsiya/>. 15.10.2017.
- 40 Слуховая стволомозговая имплантация // <http://www.rusmedserv.com/entsurgery/acoustical-brainstem-implantation/>. 20.10.2017.
- 41 Типы искусственных клапанов // <https://www.rkdc.ru/page/tipy-iskusstvennyh-klapanov.php>. 20.10.2017.
- 42 Личный идентификационный код-имплантат // https://yandex.ru/patents/doc/RU2010116732A_20111110. 25.10.2017.
- 43 Имплантаты сетчатки // <https://amp.ru.autograndad.com>. 27.10.2017.
- 44 Имплантат парализованных конечностей // <https://amp.ru.autograndad.com/6669490/1/implantat-paralizovannykh-konechnostey.html#article>. 30.10.2017.
- 45 Имплант позвоночного диска при грыже // <https://dr-zavalishin.ru/services/implant-pozvonochno-go-diska-pri-gryzhe/>. 31.10.2017.
- 46 Ринопластика // <https://www.mosplastica.ru/services/plasticheskaya-khirurgiya/rinoplastika/>. 06.11.2017.
- 47 Классификация // <http://nofxsss2007.narod.ru/gos/7.htm>. 10.11.2017.
- 48 Методы классификации // <http://www.aiportal.ru/articles/autoclassification/methods-class.html>. 10.11.2017.
- 49 Иманбаева М.Б., Зуби Ю.Х., Избасканова А.С. Тотальное эндопротезирование тазобедренного сустава с керамика-керамической парой трения в отдаленном периоде наблюдения от 5 до 10 лет // *Вестник КазНМУ*. – 2015. – №2. – С. 278-281.
- 50 Джаксыбаев М.Н., Жумагулов М.О. Оперативное лечение тазобедренных и коленных суставов у пациентов страдающих сахарным диабетом // *Вестник КазНМУ*. – 2016. – №3-1. – С. 239-241.
- 51 Вильямс Д., Роуф Р. Импланты в хирургии. – М.: Медицина, 1978. – 552 с.
- 52 Кирпичев И.В. Структура коксартроза в различных возрастных группах у больных, нуждающихся в первичном эндопротезировании тазобедренного сустава // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – №4. – С. 4-9.
- 53 Алиев А.Г., Коваленко А.Н., Амбросенков А.В. и др. Показания и результаты первичного и ревизионного эндопротезирования локтевого сустава // *Гений ортопедии*. – 2020. – №4. – С. 602-607.
- 54 Чирков Н.Н., Николаев Н.С., Горбатов Р.О. и др. Ревизионное эндопротезирование крупных суставов с использованием индивидуальных эндопротезов // *Современные проблемы науки и образования*. – 2019. – №5. – С. 15-21.

- 55 Нехлопочин С.Н., Нехлопочин А.С., Швец А.И. Классификация имплантов для реконструкции передней и средней опорных колонн позвоночника // Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. – 2019. – Т. 82, №3. – С. 15-26.
- 56 Адамова А.А., Шведова А.Г., Чудовский И.В. Имплантология в сочетании с инженерными системами // Технологии инженерных и информационных систем. – 2019. – №2. – С. 25-32.
- 57 Karymsakova I.B., Krak Yu.V., Denisova N.F. Criteria for implants classification for coating implants using plasma spraying by robotic complex // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. – 2017. – Vol. 5, Issue 3. – P. 44-52.
- 58 Датчики // <https://arturtut.blogspot.com/>. 30.11.2017.
- 59 Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Системы числового программного управления: учеб. пос. – М.: Изд. Логос, 2005. – 296 с.
- 60 Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Программирование систем числового программного управления. – М.: Изд. Логос, 2008. – 344 с.
- 61 Босинзон М.А. Современные системы ЧПУ и их эксплуатация: учеб. – М.: Академия, 2009. – 192 с.
- 62 Ловыгин А.А., Васильев А.В. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. – М.: Изд. Эльф ИПР, 2006. – 286 с.
- 63 Байков В.Д., Вашкевич С.Н. Решение траекторных задач в микропроцессорных системах ЧПУ. – Л: Машиностроение, 1986. – 106 с.
- 64 Вертикально-фрезерный станок с ЧПУ DMU-50 // <http://vsestankitut.com/germany/dmu-50.html>. 12.12.2017.
- 65 3д моделирование // <http://progamaster.com/entsiklopediya-pk/363-3d-modelirovanie>. 15.12.2017.
- 66 Алексапольский Н.М. Фотограмметрия. – М.: Геодезиздат, 1956. – Ч. 1. – 412 с.
- 67 Лобанов А.Н. Фотограмметрия. – М.: Недра, 1984. – 552 с.
- 68 Карымсакова И.Б. Денисова Н.Ф. Методы интеллектуального анализа данных в задачах распознавания образов // Вестник Национальной Академии Наук РК. – 2017. – №366, ч. 2. – С. 110-114.
- 69 SolidWorks // <https://b2b.partcommunity.com/community>. 20.12.2017.
- 70 Универсальный 3д сканер Scan 3d universe // <https://on-v.com.ua/novosti/tehnologii-i-nauka/universalnyj-3d-skaner-scan3d>. 25.12.2017.
- 71 Geomagic design X // <https://www.artec3d.com/ru/3d-software/geomagic-design-x>. 08.01.2018.
- 72 Как выбрать подходящую технологию 3D - сканирования? // <https://3dtoday.ru/blogs/top3dshop/3d-scanning-technology/>. 09.01.2018.
- 73 Geomagic Design X – быстрый путь от 3D-скана к CAD-модели // <http://blog.iqb-tech.ru/geomagic-design-x>. 10.01.2018.
- 74 Имплантация зубов 3d // <http://protezi-zubov.ru/implantatsiya/3d.html>. 15.01.2018.

75 Karymsakova I.B., Denisova N.F., Kumargazhanova S.K. et al. Robotic plasma spraying system for implants of complex structure: methods and solutions // International Journal of Computing. – 2020. – Vol. 19(2). – P. 1-2.

76 Карымсакова И.Б., Денисова Н.Ф., Крак Ю.В. Усовершенствование методов построения систем создания имплантов с использованием современных производственных решений // Матер. междунар. науч. конф. «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI'2017)». – Херсон: Издательство ПП Вишемирський В.С., 2017. – С. 69-70.

77 Karymsakova I.B., Krak Yu.V., Denisova N.F. Criteria for implants classification for coating implants using plasma spraying by robotic complex // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. – 2017. – Vol. 5, Issue 3. – P. 44-52.

78 Karymsakova I.B., Denisova N.F., Krak Y.V. Modeling of implants and process of dusting by the handlingrobot on implants by means of the virtual Roboguide simulator // Vestnik Vostochno-Kazhastanskogo universiteta imeni D. Serikbaeva. – 2018. – Vol. 1, №3, Part 2. – P. 105-110.

79 Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. – М.: Наука, 1978. – 400 с.

80 Krak Yu.V. Dynamics of Manipulation Robots: Numerical-Analytical Method of Formation and Investigation of Computational Complexity // Journal of Automation and Information Sciences. – 1999. – Vol. 31, Issue 1-3. – P. 212-128.

81 Krak Yu.V. Method for construction of dynamics equations for manipulating robots in numerical-analytical form // Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya. – 1993. – №1. – P. 137-141.

82 Завьялов У.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. – М.: Наука, 1980. – 113 с.

83 Кириченко Н.Ф., Сорока Р.А., Крак Ю.В. Манипуляционные роботы. Алгоритмическое и программное обеспечение средств управления движением: учеб. пос. – Киев: КГУ, 1987. – 83 с.

84 Обзор средств MATLAB и ToolBox'ов для приближения данных // <https://refdb.ru/look/1629442-pall.html>. 10.02.2018.

85 Золотых Н.Ю. Matlab в научных исследованиях. – Нижегородск, 2004. – 177 с.

86 Обзор средств Matlab и ToolBox'ов для приближения данных // <http://geum.ru/next/art-295114.php>. 15.02.2018.

87 Карымсакова И.Б., Денисова Н.Ф., Крак Ю.В. Усовершенствование методов построения систем создания имплантов с использованием современных производственных решений // Матер. 14-й междунар. науч.-практ. конф. «Математическое и программное обеспечение интеллектуальных систем» (MPZIS-2017). – Днепр: ДНУ, 2017. – С. 112-113.

88 Карымсакова И.Б., Денисова Н.Ф., Крак Ю.В. Разработка роботизированной системы для плазменного напыления имплантов // Winter InfoCom 2017: матер. 5-й междунар. науч.-практ. конф. - Киев, 2017. – С. 81-82.

89 Карымсакова И.Б., Крак Ю.В, Денисова Н.Ф. Особенности процесса создания 3d модели импланта тазобедренного сустава в Geomagic Design X // Матер. междунар. науч. конф. «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI'2018)». – Херсон: Издательство ПП Вишемирський В.С., 2018. – С. 68-69.

90 Karymsakova I.B., Smagulov S.K., Bekenova D.B. Use of robotic systems for plasma spraying of implants // Proceed. of internat. educat. forum "The didactic hub: Europe-Asia". – Semey s., 2018. – P. 202-206.

91 Карымсакова И.Б., Крак Ю.В, Денисова Н.Ф. Использование роботизированного комплекса для нанесения биопокровов на импланты для поврежденных частей тела // Матер. междунар. науч.-практ. конф. и 18-го междунар. науч. семинара «Современные проблемы информатики в экономике, управлении и образовании и преодоления последствий Чернобыльской катастрофы». – Свितязь, 2018. – С. 22-25.

92 Карымсакова И.Б., Денисова Н.Ф., Смагулов С.К. Особенности процесса производства имплантов с использованием станков с ЧПУ и роботизированного комплекса // Вестник Государственного университета имени Шакарима г. Семей. – 2018. – №3(83). – С. 117-120.

93 Карымсакова И.Б, Бекенова Д.Б. Моделирование траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры // Матер. междунар. науч.-практ. конф. "Творчество молодых ученых инновационному развитию Казахстана". - Усть-Каменогорск, 2019. – Ч. 4. – С. 104-108.

94 Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М. Matlab 7. Программирование, численные методы. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 737 с.

95 Представление данных с помощью модели "сущность-связь" // http://www.mstu.edu.ru/study/materials/zelenkov/ch_2_1.html. 20.02.2018.

96 Проектирование базы данных // <http://www.bseu.by>. 25.02.2018.

97 Программирование на php // <https://www.tadviser.ru/index.php>. 27.02.2018.

98 Что такое php? // <https://www.php.net/manual/ru/intro-what-is.php>. 28.02.2018.

99 А.С. 11699 РК. Информационная подсистема для работы с базой данных имплантов (программа для ЭВМ) / И.Б. Карымсакова, Н.Ф. Денисова, Т.М. Бекмухаметова и др.; опубл. 19.08.20.

100 А.С. 15189 РК. Информационная система моделирования траекторий для построения роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической структуры (программа для ЭВМ) / И.Б. Карымсакова, Н.Ф. Денисова, Т.М. Бекмухаметова, Д.Б. Бекенова, опубл. 16.04.21.

Авторское свидетельство



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

АВТОРПЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚТАРДЫҢ
МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ

ҚУӘЛІК

2021 жылғы «16» ақпан № 15189

Автордың (ардың) жөні, аты, әкесінің аты (егер ол жеке басым куәландыратын құжатта көрсетілсе):
КАРЫМСАКОВА ИНТИРА БЕКЕНОВНА, ДЕНИСОВА НАТАЛЬЯ ФЕДОРОВНА, БЕКМУХАМЕТОВА
ТАТЬЯНА МАХМУТОВНА, БЕКЕНОВА ДАРИҒА БЕКЕНҚЫЗЫ

Авторлық құқық объектісі: ЗЕМ-ге арналған бағдарлама

Объектінің атауы: Информационная система моделирования траекторий для построения
роботизированных систем плазменного напыления на импланты сложной геометро-топологической
структуры

Объектіні жасаған күні: 10.02.2021

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ АРНАУЛЫҚ ПАТЕНТ ҚИЯСАТ АГЕНТТІГІ

Құжат тіркелу нөмірі: 15189

Авторлық құқық: Бекінілген авторлық құқық

Полнота: Полнота

Осыған қол қойды: Оспанов Е.К.

ҚҚД қол қойылды

QR code

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения



ИП «TerraService»
ИНН 850614302407
Адрес: г.Нур-Султан, ул.Сейфуллина,
2/2, кв.1
ИИК KZ419983TB0000434684
АО «First Heartland Jysan Bank»
БИК TSESZKZK
Директор: Аитов Рамиль Рамизович

Акт

внедрения результатов диссертационной работы
Карымсаковой Индиры Бекеновны
на тему «Информационная система моделирования траекторий для
построения роботизированных систем плазменного напыления на
импланты сложной геометро-топологической структуры»,
представленную на соискание степени доктора философии (PhD) по
специальности 6D070300 – Информационные системы (по отраслям)

Разработанное Карымсаковой И.Б. приложение
"Информационная система моделирования траекторий для
построения роботизированных систем плазменного напыления на
импланты сложной геометро-топологической структуры", созданное
в ходе выполнения исследований в рамках проекта программно-
целевого финансирования «0006/ПЦФ-2017 «Выпуск титановой
продукции для дальнейшего использования в медицине», внедрено в
производственный процесс ТОО «Neola».

Эффективность внедрения: напыление титановых имплантов с
использованием роботизированной техники дает возможность
создать поверхности на имплантах, которые обеспечивают лучшую
приживаемость. Также имеются следующие преимущества:
оптимизация обработки изделия, экономия времени, повышение
качества напыленной поверхности, высокая точность нанесения,
экономия порошкового материала, проведение альтернативных
операций, возможность изменения и управления процессом
автономно, оптимизация процесса микроплазменного напыления
деталей.

Директор ТОО «Neola»



Аитов Р.Р.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ТР программа

```
1: !SimPRO Auto-Generated TPP
2: !Target Group1
3:
4: UFRAME_NUM[GP1]=0
5: UTOOL_NUM[GP1]
6:L P[1] 10mm/sec CNT100
7:L P[2] 10mm/sec CNT100
8:L P[3] 10mm/sec CNT100
9:L P[4] 10mm/sec CNT100
10:L P[5] 10mm/sec CNT100
11:L P[6] 10mm/sec CNT100
12:L P[7] 10mm/sec CNT100
13:L P[8] 10mm/sec CNT100
14:L P[9] 10mm/sec CNT100
15:L P[10] 10mm/sec CNT100
16:L P[11] 10mm/sec CNT100
17:L P[12] 10mm/sec CNT100
18:L P[13] 10mm/sec CNT100
19:L P[14] 10mm/sec CNT100
20:L P[15] 10mm/sec CNT100
21:L P[16] 10mm/sec CNT100
22:L P[17] 10mm/sec CNT100
23:L P[18] 10mm/sec CNT100
24:L P[19] 10mm/sec CNT100
25:L P[20] 10mm/sec CNT100
26:L @P[21] 10mm/sec CNT100
[End]
```

-