

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»

На правах рукописи



ДРАГУНОВ СТАНИСЛАВ ЕВГЕНЬЕВИЧ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРСОНИФИЦИРОВАННЫХ
АКТИВНЫХ ЭКЗОСКЕЛЕТОВ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

2.3.7 – Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Щербаков Максим Владимирович

Волгоград – 2024

Оглавление

Термины и сокращения.....	5
Глава 1 Анализ проблемы проектирования экзоскелетов нижних конечностей	14
1.1 Цели и назначение экзоскелетов	14
1.2 Типизация экзоскелетов	21
1.2.1 Анатомическая локализация усиленных узлов	23
1.3 Особенности экзоскелетов нижних конечностей	25
1.4 Антропометрические данные оператора	27
1.5 Обзор существующих решений экзоскелетов нижних конечностей.....	29
1.5.1 Обзор экзоскелета ExoAtlet.....	29
1.5.2 Обзор экзоскелета LG CLOi SuitBot.....	30
1.5.3 Обзор экзоскелета EksoNR.....	31
1.5.4 Обзор экзоскелета HAL	31
1.5 Типовые этапы проектирования экзоскелетов нижних конечностей.....	32
1.6 Цели и задачи диссертационного исследования	36
1.7 Выводы по первой главе.....	37
Глава 2 Разработка онтологии компонентов АЭНК.....	39
2.1 Основные компоненты АЭНК	39
2.1.1 Источники энергии.....	40
2.1.2 Вид движителей.....	41
2.1.3. Способ получения управляющих сигналов.....	51
2.1.4 Внешний каркас.....	53
2.1.5 Источники питания	55
2.1.6 Драйвер движителей	57

2.1.7 Энкодер.....	58
2.1.8 Контроллер.....	60
2.2 Онтология компонент АЭНК.....	62
2.3 Выводы по второй главе	71
Глава 3 Метод автоматизации проектирования АЭНК под антропометрические данные оператора	72
3.1 Общее описание предлагаемого метода проектирования АЭНК	72
3.2 Формализация требований к АЭНК	78
3.2.1 Формализация входных данных и требований к АЭНК	78
3.2.2 Эксплуатационные требования АЭНК	80
3.3 Проектные процедуры метода автоматизированного проектирования АЭНК	81
3.3.1 Проектные процедуры создания 3D-модели оператора.....	83
3.3.2 Разработка параметризованной 3D-модель АЭНК.....	103
3.3.3 Проектная процедура анализа динамики сборки проектного решения АЭНК	108
3.3.4 Проектные процедуры выбора электро- и радиокомпонент	128
3.4 Выводы по третьей главе.....	131
Глава 4. Разработка системы автоматизированного проектирования АЭНК (САПР АЭНК) и проведение испытаний предложенных подходов	133
4.1 Структура САПР	133
4.2 Тестирование метода автоматизированного проектирования АЭНК и описание испытаний	138
4.3 Результаты тестирования.....	139
4.4 Выводы по 4 главе.....	141

Общие выводы и заключение.....	142
Литература	144
Приложение А - Расширенное описание онтологии компонент АЭНК.....	158
Приложение Б – База данных компонент	159
Приложение В - Параметризованные детали сборки АЭНК.....	160
Приложение Г - АКТ внедрения.....	165

Термины и сокращения

Экзоскелет – устройство, предназначенное для восполнения утраченных функций, увеличения силы мышц человека и расширения амплитуды движений за счёт внешнего каркаса и приводящих частей, а также для передачи нагрузки при переносе груза через внешний каркас в опорную площадку стопы.

Компьютерная модель - компьютерная программа, реализующая абстрактную модель реальной системы на компьютере.

Оператор – человек, управляющий устройством или техникой.

Антропометрические данные - основные физические параметры тела: рост, вес. Измерение данных показателей проводится с целью выявления особенностей физического строения.

Электро- и радиокомпоненты – электронные компоненты — это небольшие детали или устройства, которые используются для создания электронных схем и приборов.

Проектные процедуры - формализованная совокупность действий, в результате выполнения которых принимаются проектные решения.

Эксплуатационные показатели - основные физико-механические свойства конструкций, которые должны сохраняться на всем сроке службы объекта.

Эргономика - наука о комфортных условиях работы. В медицине оптимизация труда способствует повышению эффективности лечебного процесса.

Каркас - внешняя несущая конструкция.

Поточное производство - тип производства, которая характеризуется большими объемами производства однотипных товаров.

Инверсная кинематика - задача нахождения углов А и В, таких, чтобы конечное звено достигло нужной целевой точки.

САПР - система автоматизированного проектирования.

АЭНК - активный экзоскелет нижних конечностей.

Введение

Актуальность темы исследования. В настоящее время активно развиваются технологии проектирования и разработки экзоскелетов и носимых робототехнических устройств, способствующих восстановлению или усилению мускульных функций человека. Экзоскелеты – сложные робототехнические системы, совмещающие в себе электротехнические и информационные компоненты, функционирующие в непосредственном взаимодействии с человеком (оператором экзоскелета). Они предназначены для восстановления опорно-двигательных функций или увеличения силы мышц оператора. На данный момент наиболее проработанными с точки зрения проектирования и производства являются медицинские экзоскелеты нижних конечностей. К перспективам развития этого направления относится создание активных экзоскелетов нижних конечностей (АЭНК), которые выполняют движения без необходимости приложения усилий оператором.

Производство типовых экзоскелетов нижних конечностей в настоящий момент имеет следующую специфику: 1) является достаточно дорогостоящим, так как отдельные проектные процедуры выполняются вручную (например, сборочный чертеж); 2) требует добавления в конструкцию экзоскелетов специальных регуляторов, позволяющих осуществить настройку под оператора; 3) требует процедуры настройки экзоскелета под антропометрические параметры оператора перед началом эксплуатации; 4) специальные регуляторы имеют заданный шаг изменения размера, что приводит к отклонению от реальных параметров операторов и влечет за собой снижение удобства эксплуатации и снижение КПД экзоскелета.

Для снятия ограничений, указанных выше, требуется значительный пересмотр существующих процессов проектирования и производства АЭНК, которые изначально не планируются для использования конкретным оператором в определённых условиях эксплуатации. Кроме этого, необходимо иметь

надежные, быстрые и доступные процедуры оценки антропометрических параметров оператора.

Научная задача настоящего диссертационного исследования состоит в совершенствовании процедур проектирования персонифицированных, т.е. адаптированных под конкретного оператора и условия функционирования, АЭНК за счет новых подходов к компьютерному моделированию системы оператор-экзоскелет и новых процедур автоматизированного проектирования.

Степень разработанности темы исследования

Общими вопросами разработки систем автоматизации проектирования технических систем занимались ученые Норенков И. П., Кудрявцев В. Б., Черепашков А. А., Афанасьев А. Н., Курейчик В. М., Кулик А.А., Комаров В. А., Быков В. П., Hanratty P., Hohl H., Lang C., Versprille K., Lee K. Сформированы общие подходы к проектированию технических систем, в том числе и методы параметризации при компьютерном моделировании, применимые к рассматриваемой предметной области.

Вопросами проектирования экзоскелетов занимаются Яцун С.Ф., Лавровский Э.К., Письменная Е.В., Воробьев А.А., Турлапов Р.П. Их исследования содержат оригинальные результаты проектирования экзоскелетов различного профиля. Тем не менее вопросы, связанные с автоматизацией процессов проектирования для персонифицированных (индивидуальных) экзоскелетов, учитывающих антропометрические данные оператора, находятся на этапе становления. Исследованиями в области проектирования активных экзоскелетов занимаются Сохин И. Г., Дудоров Е. А., Орлов И.А., и другие исследователи.

Информация о коммерческих решениях (например, ExoAtlet, LG CLOi SuitBot, EksoNR, HAL) является закрытой, полученные и опубликованные результаты также сложны для оценки и воспроизведения. Следует отметить, что имеющиеся подходы в проектировании ограничены требованиями к

антропометрическим данным оператора экзоскелета (ограничения на размерные сетки) и являются дорогостоящими.

В результате анализа текущего состояния можно сделать вывод о сдержанном развитии подходов (проектных процедур) для автоматизированного проектирования экзоскелета нижних конечностей.

Объект исследования: персонифицированные активные экзоскелеты нижних конечностей реабилитационного типа.

Предмет исследования: модели и методы автоматизированного проектирования персонифицированных активных экзоскелетов нижних конечностей, учитывающие антропометрические параметры оператора и условия функционирования.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности проектирования персонифицированных активных экзоскелетов нижних конечностей. Под эффективностью понимается снижение времени проектирования без потери качества.

Задачи исследования. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Обзор подходов к проектированию персонифицированных активных экзоскелетов нижних конечностей реабилитационного типа.
2. Разработка онтологической модели электро- и радиокомпонент, включающей в себя технологические характеристики двигателей, аккумуляторов, драйверов, энкодеров и контроллеров, необходимых для подбора вариантов комплектации АЭНК.
3. Разработка метода формирования проектных решений персонифицированных АЭНК как набора проектных процедур на основе требований в виде заданных антропометрических параметров оператора и условий функционирования.
4. Разработка компьютерной модели оператора активного экзоскелета, учитывающей антропометрические особенности оператора.

5. Разработка компьютерной модели активного экзоскелета нижних конечностей, поддерживающей параметризацию на основе данных антропометрии оператора и условий эксплуатации.

6. Разработка процедуры анализа динамики сборки для верификации проектного решения на этапе проектирования.

7. Разработка системы автоматизированного проектирования АЭНК (САПР АЭНК) и проведение испытаний предложенных подходов.

Методы исследования. В работе использованы методы: параметризованного автоматизированного проектирования; компьютерного 2D и 3D-моделирования; онтологического моделирования; методы сбора данных, в том числе 3D-сканирования; модели и методы анализа и синтеза проектных решений.

Гипотеза исследования состоит в том, что внедрение новых процедур автоматизированного проектирования экзоскелетов позволит сократить время проектирования персонифицированного АЭНК без снижения качества.

Научная новизна заключается в совокупности моделей и методе для автоматизированного проектирования активных экзоскелетов нижних конечностей, в частности:

1) метод формирования проектных решений персонифицированных АЭНК, отличающийся новой компьютерной моделью активного экзоскелета нижних конечностей и набором новых проектных процедур сбора и уточнения параметров оператора 3D-сканированием, выбора активных компонент с учетом технических требований и выявления коллизий на этапе проектирования (п. 4 паспорта специальности);

2) компьютерная модель активного экзоскелета нижних конечностей, включающая параметризованную 3D модель АЭНК и математическую модель зависимости элементов АЭНК от антропометрических параметров оператора, позволяющую проектировать персонифицированные проектные решения (п. 6 паспорта специальности);

3) модель оператора активного экзоскелета, в отличие от существующих, включающая облако точек, полученных в результате 3D-сканирования, что позволяет снизить субъективность и повысить точность измерений параметров оператора (п. 7 паспорта специальности);

4) процедура анализа динамики сборки проектного решения АЭНК, отличающаяся сопоставлением компьютерной модели активного экзоскелета и модели оператора, что позволяет выявлять коллизии на этапе проектирования и минимизировать риски несоответствия требованиям (п.8 паспорта специальности).

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость заключается в развитии подходов к автоматизированному проектированию АЭНК, в частности в математическом и программном обеспечении САПР экзоскелетов нижних конечностей, в результате применения которого повышается эффективность проектирования персонифицированных систем АЭНК.

Практическая значимость заключается в использовании разработанных моделей и метода в САПР АЭНК для проектирования и разработки персонифицированных АЭНК.

Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Система автоматизации антропометрического проектирования АЭНК», № 2024680649 от 10 сентября 2024 г.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод формирования проектных решений персонифицированных АЭНК, основанный на наборе новых проектных процедур, включающих в себя: а) компьютерную модель активного экзоскелета нижних конечностей, б) уточненную модель параметров оператора с применением технологии 3D-сканированием, в) процедуру выбора активных компонент с учетом технических требований и г) процедуру анализа динамики сборки для выявления коллизий на этапе проектирования.

2. Компьютерная модель активного экзоскелета нижних конечностей, включающая параметризованную 3D модель АЭНК и математическую модель зависимости элементов АЭНК от антропометрических параметров оператора.

3. Компьютерная модель оператора активного экзоскелета, включающая облако точек, полученных в результате 3D-сканирования, повышающая точность измерений параметров оператора.

4. Проектная процедура анализа динамики сборки проектного решения АЭНК, позволяющая выявлять коллизии на этапе проектирования и минимизировать риски несоответствия требованиям. **Достоверность результатов**, полученных в диссертации, обеспечивается строгостью и корректностью применения математических моделей и процедур проектирования технических систем.

Реализация и внедрение результатов работы.

Результаты работы успешно внедрены в ООО «ЦМИТ ЛЮКС» с целью выполнения проектов по автоматизированному проектированию экзоскелетов нижних конечностей, а также в учебный процесс ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» по направлениям бакалавриата и магистратуры «Информатика и вычислительная техника» по профилю «Искусственный интеллект».

Апробация результатов работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры САПР и ПК, а также на Международных и Всероссийских научных и научно-практических конференциях: Международная научная мульти конференция «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-37» (Казань 2024); XXVIII Байкальская Всероссийская конференция с международным участием «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (Иркутск 2023); «Кибер-физические системы: проектирование и моделирование» (Казань, 2020); «Creativity in Intelligent Technologies and Data Science» (Волгоград, 2017, 2019); "Региональная конференция молодых

исследователей Волгоградской области" (Волгоград, 2017, 2019, 2020); «Мехатроника, автоматика и робототехника» (Новокузнецк, 2019).

Соответствие паспорту научной специальности. Область диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования по пунктам:

- п. 4 – Разработка научных основ построения комплекса средств САПР, включающего информационное, математическое, лингвистическое, методическое, техническое, программное обеспечение непрерывной информационной поддержки жизненного цикла проектируемых объектов;

- п. 6 – Разработка компьютерных моделей, алгоритмов, программных комплексов оптимального проектирования технических изделий и процессов;

- п. 7 – Разработка методов и компьютерных моделей обработки и формирования проектных решений, включая распознавание текстовой, графической информации с использованием современных средств технического обеспечения (3D – сканеров, 3D – принтеров, аддитивных технологий);

- п. 8 – Разработка имитационных компьютерных моделей для оценки и тестирования технических, экономических, экологических характеристик технических объектов проектирования.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 11 научных трудах, из них 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 4 публикации в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus, 5 – в материалах международных конференций. Получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. В диссертации представлены результаты исследований, полученные автором лично. Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, разработке теоретических и прикладных методов их решения, в обработке, анализе, обобщении полученных результатов и формулировке выводов.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации – 166 страниц, включая 109 рисунков, 17 таблиц, список литературы из 108 наименований.

Глава 1 Анализ проблемы проектирования экзоскелетов нижних конечностей

1.1 Цели и назначение экзоскелетов

В биологии понятие «экзоскелет» используется для обозначения внешнего типа скелета у некоторых беспозвоночных животных. Он поддерживает, защищает тело животного от повреждений и является механическим барьером, служащим первым этапом защиты от инфекции [1-4].

В робототехнике «экзоскелет» имеет другие функции, зависящие от области применения: медицинский, военный, промышленный, потребительский [5].

Основное применение роботов-экзоскелетов на современном рынке сосредоточено на реабилитационных услугах в области медицины – тренировка движений мышц и помощь в восстановлении после травм более точным и эффективным способом, чем это было возможно ранее [6]. Они также используются в армии и помогают бороться солдатам с усталостью и предотвращать появление травм в бою [7]. Другие экзоскелеты могут обеспечить эргономическую поддержку рабочим в промышленности и медицине, которые выполняют повторяющиеся действия, находясь в длительном напряжении [8-14].

На сегодняшний день в мире насчитывается более 95 коммерческих моделей экзоскелетов. Экзоскелеты классифицируются различным образом [15].

Первая классификация – по источнику энергии и принципу работы привода. Экзоскелеты можно разделить на:

- активные;
- пассивные;
- квазипассивные.

Активные экзоскелеты в качестве источника энергии используют внешние устройства, преобразующие электрическую энергию в механическую,

пассивные – перераспределение кинетической энергии и остаточной силы человека, квазипассивные экзоскелеты – это машины, в исполнительных механизмах которых реализованы с применением технологий генерации энергии за счет перевода остаточной энергии естественного движения человека [16]. Экзоскелеты активного типа позволяют оператору перемещаться с большой скоростью, также в таких экзоскелетах увеличена сила и амплитуда движений, из недостатков можно выявить дороговизну, зависимость от внешних источников питания и большую массу устройства [17]. Пассивные экзоскелеты не зависят от внешних источников питания и имеют небольшую массу, однако их не получится использовать людям, у которых отсутствует сила мышц [18]. Квазипассивные экзоскелеты, которые являются гибридом пассивных и активных экзоскелетов обладают меньшим весом, чем активные экзоскелеты, они способны работать без источников энергии, так как опираются на управляемое высвобождение энергии во время отрицательных фаз шага [19].

Следующая классификация — это точка приложения экзоскелета.

По локализации экзоскелеты можно разделить на:

- экзоскелет верхних конечностей;
- экзоскелет нижних конечностей;
- экзоскелет-костюм;
- экзоскелет для отдельных частей тела.

Экзоскелеты верхних конечностей позволяют увеличивать силу и амплитуду верхних частей тела, экзоскелеты нижних конечностей облегчают ходьбу и/или нахождение оператора в статическом положении, увеличивают силу и амплитуду движений [20]. Экзоскелеты костюмы предназначены для защиты оператора от внешних факторов, а также для увеличения его выносливости и силы. Экзоскелеты для отдельных частей тела можно разделить на роботизированные экзопротезы (активный тип) и ортезы (пассивный тип). Данные экзоскелеты предназначены для восполнения утраченных функций конечностей [21].

По стоимости (условно) на 2024 год экзоскелеты можно разделить на экзоскелеты:

- низкой стоимости (доступные): 1000—10000 \$;
- средней ценовой категории: 10000—50000 \$;
- высокой стоимости — более 50000 \$.

По области применения экзоскелеты делятся на:

- военные;
- медицинские;
- промышленные;
- потребительские.

Основные направления индустрии экзоскелетов можно увидеть на рисунке 1 [22].



Рисунок 1 – Направления индустрии экзоскелетов

По весу конструкции экзоскелеты делятся на:

- легкие — до 5 кг;
- средней весовой категории — от 5 до 30 кг;
- тяжелые — более 30 кг.

По количеству функций выделяют:

- экзоскелеты простого назначения;
- экзоскелеты двойного назначения;
- экзоскелеты с расширенными функциями.

Существуют экзоскелеты со следующими пользовательскими интерфейсами [23, 24]:

- джойстик: для экзоскелетов. Большим преимуществом работы джойстика является то, что для использования экзоскелета не требуется никаких движений или нервных функций;
- кнопки или панели управления, позволяющие переводить экзоскелет в разные запрограммированные режимы;
- контроль разумом: с помощью нейроинтерфейса размещенного на голове;
- датчики: современные конструкции экзоскелетов могут иметь до 40 различных встроенных датчиков, которые контролируют вращение, крутящий момент, наклон, давление. Объединенная сеть датчиков передает данные обратно на микрокомпьютер для интерпретации и корректировки движения.
- без управления: некоторые пассивные экзоскелеты не имеют кнопок управления или переключателей.

изготовления, экзоскелеты разделяются на изготовленные из:

- жестких материалов, такие как металлы или углеродное волокно.
- гибких материалов во всей конструкции (мягкий экзоскелет или экзокостюм).

По происхождению экзоскелеты бывают:

- самодельные - некоторые из крупнейших компаний сегодня начали свою деятельность в гаражах;
- изготовленные в исследовательских лабораториях;
- изготовленные коммерческими компаниями;
- изготовленные по заказу правительства - в настоящее время только китайское правительство активно разрабатывает экзоскелет.

По назначению экзоскелеты делятся на:

- улучшающие передачу нагрузки;
- увеличивающие крутящий момент и работу;
- повышающие выносливость.

По мобильности пациента существуют:

- мобильные экзоскелеты;
- фиксированные (стационарные) экзоскелеты.

Классификация экзоскелетов представлена на рисунке 2.

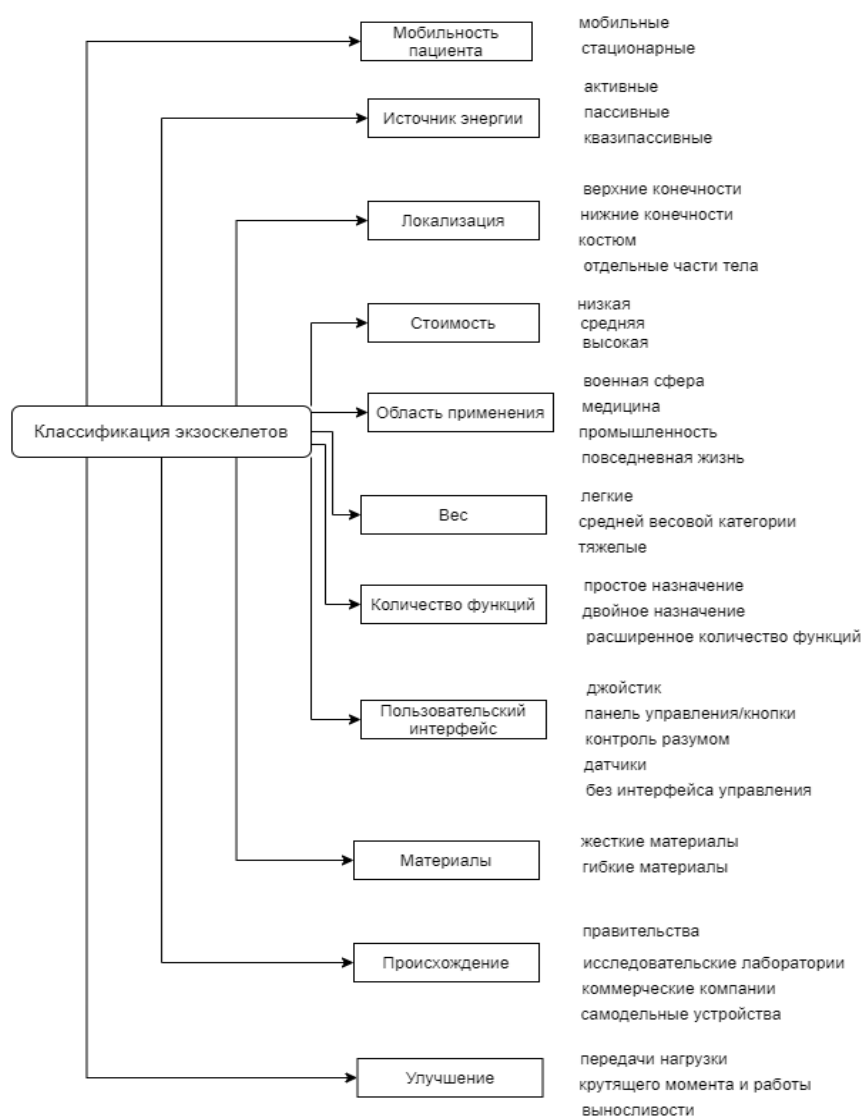


Рисунок 2 – Классификация экзоскелетов

В соответствии с областями применения выделяют 15 критических атрибутов экзоскелетов. [25]

- автономность;
- грузоподъемность;
- время реакции системы управления;
- масса;
- габариты;
- средняя потребность в мощности;
- обеспечение выполнения основных функций в условиях деградации ресурсов оператора;
- эргономичность;
- время, затрачиваемое оператором на приведение экзоскелета в состояние полной готовности;
- заметность (визуальная, радиозаметность);
- акустическое воздействие (на оператора и окружающую среду);
- возможность экстренного снятия с оператора;
- бронезащищённость;
- пожарозащищённость;
- взрывозащищённость.

Для разных областей применения экзоскелетов важны разные атрибуты.

Для военного экзоскелета поля боя критическими являются следующие атрибуты:

- автономность;
- заметность;
- акустическое воздействие;
- время реакции системы управления;
- масса и габариты;
- эргономичность;
- бронезащищённость;

- пожарозащищённость;
- взрывозащищённость;
- возможность экстренного снятия с оператора;
- обеспечение выполнения ряда важнейших функций, таких как обеспечение подвижности, в условиях деградации ресурсов оператора (критический уровень усталости, травма, ранение и т.п.);
- время, затрачиваемое оператором на приведение экзоскелета в состояние полной готовности;
- средняя мощность потребления.

Автономность не является критическим атрибутом, так как для выполнения ряда типовых сценариев, таких как подготовка к вылету летательных аппаратов, возможно привлечение внешней силовой установки.

Критическими атрибутами экзоскелетов, обеспечивающих предупреждение и ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций, являются:

- грузоподъёмность;
- пожарозащищённость;
- взрывозащищённость;
- эргономичность;
- средняя потребляемая мощность;
- возможность экстренного снятия с оператора.

Критическими атрибутами для промышленных и строительных экзоскелетов являются:

- грузоподъёмность;
- эргономичность;
- средняя потребляемая мощность.

Экзоскелеты для медицинского применения должны обладать такими атрибутами, как:

- обеспечение выполнения ряда важнейших функций в условиях деградации ресурсов оператора;

- масса и габариты;
- эргономичность.

1.2 Типизация экзоскелетов

Экзоскелеты являются носимыми устройствами, т.е. размещаются на теле оператора и действуют как поддерживающие устройства, которые увеличивают или восстанавливают работоспособность человека. В системе человек-экзоскелет часть функций, например, поддержание равновесия, остается за человеком, тогда как тяжесть груза или большие усилия ложатся на механизм экзоскелета [26].

В работах [27, 28] представлены методы разработки персонифицированных робототехнических систем, применяемых для восстановления после операционного вмешательства или перенесенных травм.

В рамках анализа предметной области экзоскелетов [29], было проведено исследование рынка коммерческих экзоскелетов разных производителей, таких как Suit, StrongArm, Technologies, и др. Было установлено, что активные экзоскелеты составляют 93% от общего числа, в то время как пассивные экзоскелеты занимают лишь 7%.

Глобальный рынок экзоскелетов оценивается в 568,00 млн долларов США в 2022 году и, по прогнозам, достигнет 9389,81 млн долларов США к 2030 году при среднегодовом темпе роста 42,00% в течение прогнозируемого периода 2022–2028 годов [30].

Основные области применения экзоскелетов представлены на рисунке 3.

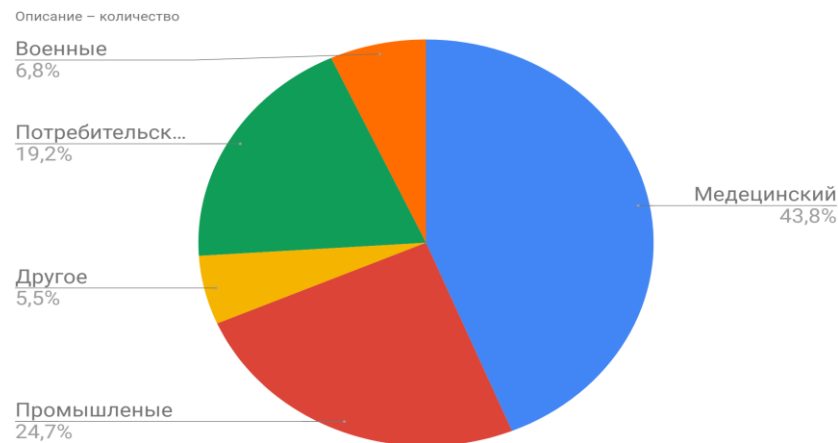


Рисунок 3 - Круговая диаграмма областей применения экзоскелета

Из анализа области стало ясно, что наибольшее распространение получили активные экзоскелеты нижних конечностей, медицинского типа, которые нацелены на реабилитацию и поддержку оператора (рисунке 4).

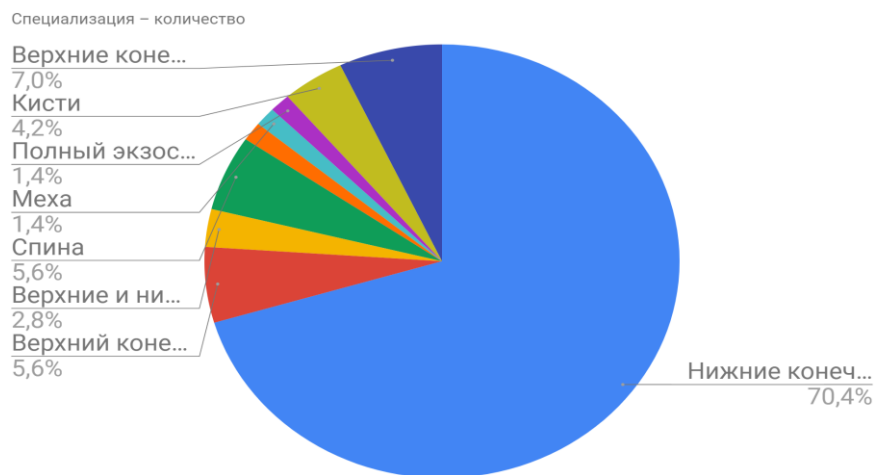


Рисунок 4 - Круговая диаграмма областей компенсации экзоскелетов

Приведенные ниже экзоскелеты разделены по способам использования усилений узла.

1. Пассивные, у которых узлы экзоскелета не имеют активных элементов. К пассивным моделям относят такие проекты, как Robo-Mate, Ekso Works и Fortis.
2. Активные, у которых узлы, у которых узлы экзоскелета имеют активные

элементы. Характерный представитель этого вида - XOS 2.

3. Комбинированные, в которых часть узлов исполнительного механизма экзоскелета усилена приводами, часть же остается пассивными. К данному типу можно отнести BLEEX.

Ниже приведена таблица 1 сравнения достоинств и недостатков экзоскелетов, разделенных по данному признаку.

Таблица 1 - Достоинства и недостатки типов экзоскелетов, разделенных по способам использования усилений узла

Тип	Достоинства	Недостатки
Пассивные	- относительно мало количество элементов конструкция - относительно меньшая масса	- выполняют основную функцию только в конкретных положениях - не увеличивают силовые показатели
Активные	- динамическое усиление	- относительно большое количество элементов конструкция - энергозависимость
Комбинированные	- промежуточный вариант относительно рассматриваемых категорий	- берут на себя нагрузку только частично

1.2.1 Анатомическая локализация усиленных узлов

В зависимости от области локализации экзоскелета могут быть выделены [31-36]:

1) Экзоскелеты нижних конечностей, у которых локально усилены только узлы нижних конечностей. К экзоскелетом данного типа относятся BLEEX и ExoAtlet.

2) Экзоскелеты верхних конечностей, локально усилены только узлы верхних конечностей. Примером может служить экзоскелет Robo-Mate.

3) Экзоскелеты нижних и верхних конечностей. Примеры комбинированных экзоскелетов данного типа: XOS 2, HAL.

К экзопротезам нижних конечностей можно отнести BiOM Ankle, разработанный компанией BiONX (США) под руководством профессора MIT Hugh Herr [37 - 39], экзоскелет спины AWN-02 и рамный коленный ортез Genu Arexa производства германской компании Otto Bock [40].

В таблице 2 приведены сравнения достоинств и недостатков экзоскелетов, разделенных по анатомическое расположению усиленных узлов.

Таблица 2 - Сравнение достоинств и недостатков типов экзоскелетов

Тип	Достоинства	Недостатки
Экзоскелеты нижних конечностей	- Восстановление мобильности: Помогают пациентам с параличом ног встать и ходить. - Снижение нагрузки: Уменьшают усталость при длительной ходьбе или подъеме тяжестей. - Эргономика: Современные модели компактны и адаптируются под анатомию пользователя. - Энергоэффективность: Часто используют пассивные механизмы (пружины, противовесы).	- Ограниченная автономность: Требуют частой подзарядки батарей (2–6 часов работы). - Высокая стоимость: Цена медицинских моделей — от 50,000 до 350,000. - Сложная настройка: Необходима индивидуальная калибровка под рост, вес и походку. - Вес: Даже легкие модели добавляют 10–20 кг.
Экзоскелеты верхних конечностей	- Усиление силы: Увеличивают грузоподъемность рук в 5–20 раз. - Точность: Помогают выполнять мелкую моторику (сборка электроники). - Простота управления: Датчики считывают мышечную активность (ЭМГ) или движения. - Компактность: Меньше механических компонентов, чем у нижних экзоскелетов.	- Ограниченный диапазон движений: Не все модели поддерживают полную амплитуду движений плеча. - Усталость кистей: Давление на пальцы при длительном использовании. - Зависимость от ПО: Сбои в алгоритмах могут нарушить работу.
Экзоскелеты нижних и верхних конечностей	- Максимальная универсальность: Поддержка всего тела. - Синхронизация движений: Алгоритмы координируют работу рук и ног. - Повышение выносливости: Позволяют работать в экстремальных условиях.	- Сложность конструкции: Высокий риск поломки. - Вес: Полные экзоскелеты могут весить 30–50 кг. - Энергопотребление: Работают 1–3 часа без подзарядки.

Тем не менее, в настоящее время практическое применение таких экзоскелетов ограничено из-за нерешенных вопросов, связанных с соответствием механизма экзоскелета биомеханике человека и обеспечением энергии для силовых приводов [41].

1.3 Особенности экзоскелетов нижних конечностей

Экзоскелеты нижних конечностей представляют собой высокотехнологичные устройства, разработанные с учетом биомеханических, медицинских и промышленных требований.

Экзоскелеты обычно состоят из нескольких основных компонентов, включая каркас, приводные механизмы и систему управления [42]. Каркас может быть выполнен из легких, но прочных материалов, таких как углепластик или алюминий, что способствует снижению веса устройства и увеличивает его подвижность. Внутренние механизмы обеспечивают плавное движение и высокую надежность при эксплуатации [43].

Основным элементом экзоскелетов являются приводные механизмы, которые могут быть электрическими, гидравлическими или пневматическими [44]. Электрические экзоскелеты, например, используют электродвигатели и батареи, что делает их более мобильными и удобными в использовании, но требует периодической подзарядки. Гидравлические модели, в свою очередь, обеспечивают большую силу, что может быть полезно в промышленных приложениях, но они зачастую тяжелее и менее удобны [45].

Современные экзоскелеты оснащены сложными системами управления, которые используют сенсоры для распознавания движений пользователя. Они могут адаптироваться к естественной механике ходьбы и предоставлять дополнительную поддержку при необходимости [46].

Эргономичный дизайн является ключевым аспектом разработки экзоскелетов, поскольку они должны быть удобными для носки в течение длительного времени [47-50]. Регулируемые ремни и мягкие вставки помогают

пользователю находить подходящее положение и снижают дискомфорт при использовании устройства. Некоторые модели также имеют возможность индивидуальной настройки под особенности анатомии пользователя.

Экзоскелеты нижних конечностей могут быть сфокусированы на различных функциях, включая поддержку, реабилитацию, увеличение силы и выносливости. Модели, предназначенные для медицинской реабилитации, могут иметь функции, способствующие восстановлению движений, такие как автоматическая коррекция шага и обратная связь о текущем состоянии пользователя. В то время как экзоскелеты для промышленных применений акцентируют внимание на повышении силы и уменьшении физической нагрузки при выполнении трудоемких задач [51-53].

Применение экзоскелетов значительно меняет подход к реабилитации пациентов с ограниченными возможностями, позволяя им восстанавливать двигательные функции и улучшать качество жизни. В промышленности экзоскелеты помогают снижать риск травм и болезней, связанных с физическим трудом, а также повышают общую производительность сотрудников [53].

Несмотря на свою многообещающую природу, экзоскелеты нижних конечностей сталкиваются с несколькими вызовами. Это включает высокую стоимость, необходимость клинических испытаний и вопросы безопасности. Разработка систем, способных адаптироваться к различным условиям эксплуатации и индивидуальным особенностям пользователя, также остается актуальной задачей.

Анализ рынка коммерческих экзоскелетов показал, что наибольшее распространение на данный момент получили активные экзоскелеты нижних конечностей медицинского назначения [54]. Также данный тип экзоскелетов имеет общие конструктивные решения и примеры моделей.

1.4 Антропометрические данные оператора

Антропометрические данные человека представляют собой количественные характеристики его тела, которые используются для описания размеров, форм и пропорций индивида. Эти данные включают в себя различные измерения, такие как рост, вес, длина рук и ног, окружность талии, груди и головы, а также другие параметры [55].

Антропометрические данные играют важную роль, особенно в области проектирования объектов, которые взаимодействуют с человеком, таких как одежда, транспортные средства, рабочие места и устройства, и носимая техника. Знание антропометрических характеристик позволяет создавать более эргономичные и удобные для пользователя продукты, что способствует повышению комфорта и безопасности.

Включение антропометрических данных в процесс САПР также может способствовать более эффективному использованию пространства и ресурсов, а также улучшению взаимодействия человека с техникой. Таким образом, антропометрические данные являются ключевым аспектом, который следует учитывать при автоматизированном проектировании АЭНК [56]. Пример антропометрических данных представлен на рисунке 5.

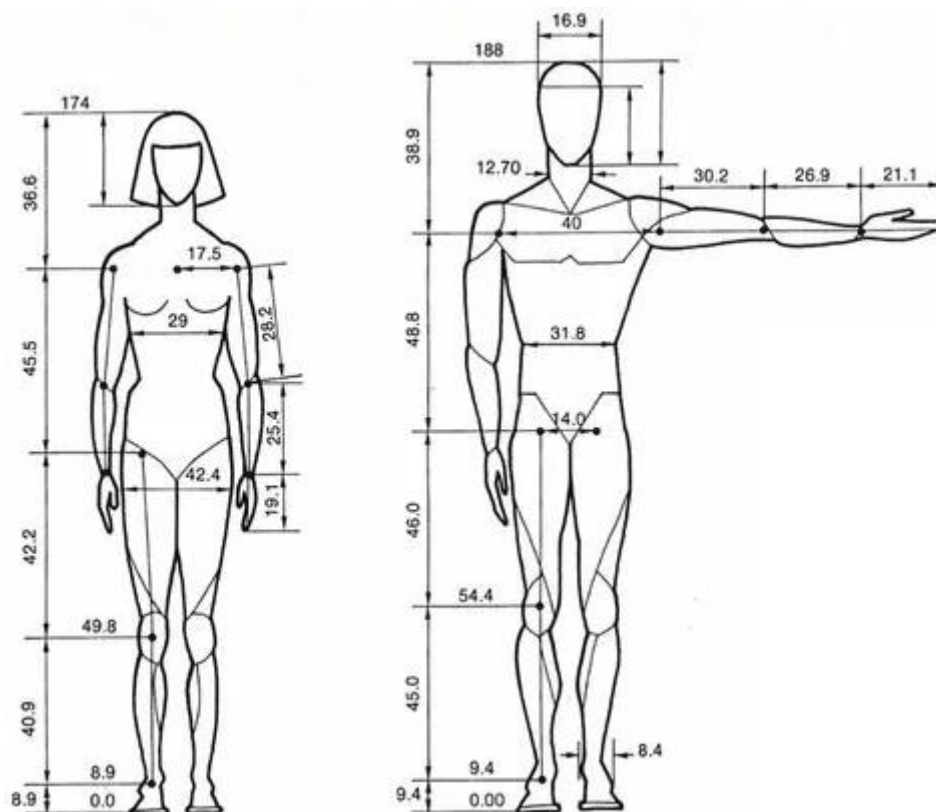


Рисунок 5 - Пример разницы антропометрических данных

В настоящее время вопрос измерения антропометрических параметров является критическим, так как антропометрические особенности отличаются от человека к человеку. Размеры экзоскелета задаются на этапе проектирования, индивидуальный подход требует изменения процедур проектирования. Технологии прямых замеров позволяют производить тестирование экзоскелета только после производства самого экзоскелета. В частности, при определении длины бедра могут возникнуть неточности при выборе точки отсчета для определения длин частей каркаса ввиду разных антропометрических особенностей. Применение технологий 3D-сканирования и создание трехмерной модели оператора позволяют производить компьютерную симуляцию с параметризованной сборкой экзоскелета, для проверки соответствия эргономики [57].

В работах [58,59] показаны принципы изучения возможной и допустимой кинематической структуры экзоскелета и рекомендуются силы фиксации при

креплении к оператору. В работах [60-64] приводится агрегация вариантов реализации экзоскелетов с учетом кинематической совместимости, комфорта, объема, массы, простоты, расширяемости и способности передавать силы, относительных углов между экзоскелетом и человеком, а также процесса надевания и снятия.

1.5 Обзор существующих решений экзоскелетов нижних конечностей

1.5.1 Обзор экзоскелета ExoAtlet

ExoAtlet — это российская разработка экзоскелета реабилитационного типа для нижних конечностей. Он разработан для реабилитации пациентов, перенесших травмы и неврологические заболевания, которые привели к снижению локомоторных функций нижних конечностей или утрате навыка ходьбы.

На рисунке 6 показан данный вид экзоскелета [65].



Рисунок 6 –Экзоскелет ExoAtlet на операторе

1.5.2 Обзор экзоскелета LG CLOi SuitBot

LG CLOi SuitBot поддерживает и укрепляет ноги пользователя, обеспечивая большую подвижность и силу нижних конечностей. Был разработан в сотрудничестве со стартапом SG Robotics, который изучает, как носимые роботы могут улучшить качество жизни [66].

LG заявляет, что устройство удобно расположено и имеет естественно вращающиеся шарниры, которые позволяют CLOi SuitBot двигаться более расслабленно и естественно, в режимах ожидания или передвижения.

Его обувь в виде сандалий и функция автоматической регулировки позволяют пользователю легче надевать и снимать костюм, что отличает LG CLOi SuitBot от многих других экзоскелетов.

LG CLOi SuitBot может подключаться к другим сервисным роботам LG (впервые анонсирован на выставке CES 2018), чтобы стать частью интеллектуальной рабочей сети для доставки информации и инструментов, необходимых на рабочих местах, таких как производство, логистика и распространение. Данная модель представлена на рисунке 7.



Рисунок 7 – Экзоскелет LG CLOi SuitBot на операторе

1.5.3 Обзор экзоскелета EksoNR

EksoNR – единственный экзоскелет, одобренный FDA (управление по контролю за продуктами питания и лекарственными средствами) для лечения приобретенной травмы головного мозга. Ekso bionics помогает физиотерапевтам и врачам клинически реабилитировать пациентов, позволяя им восстановить подвижность. Роботизированный экзоскелет может даже помочь врачам вывести пациентов из инвалидных колясок, ходить с тростью и поддерживать правильную осанку. На рисунке 8 представлена данная модель [67].



Рисунок 8 – Экзоскелет EksoNR

1.5.4 Обзор экзоскелета HAL

Экзоскелет HAL (Hybrid Assistive Limb), разработан японской компанией Cyberdyne [68]. Основная задача этого экзоскелета — максимально облегчить жизнь парализованным людям и позволить им в прямом смысле снова ходить (рис. 9).



Рисунок 9 – Экзоскелет HAL на операторе

Разработчики «HAL» Sankai Y., Kawamoto H., Sakakima H., Ijiri K., Matsuda F., Maeshima S., Osawa A. предложили направления развития экзоскелетов с целью реабилитации пациентов с ограниченными возможностями, которые также могут быть использованы для улучшения физической формы при выполнении различных видов деятельности [69 - 71]. В их работах приводится подробное описание методов проектирования и управления экзоскелетом.

HAL имеет две системы управления, которые могут использоваться вместе в зависимости от условий пользователя. Кибернетическая система добровольного управления использует систему датчиков для выполнения желаемых движений пользователя.

1.5 Типовые этапы проектирования экзоскелетов нижних конечностей

Проектирование технических систем – это процесс создания нового изделия в виде его проекта [72 - 75]. Основная особенность и сложность в проектировании робототехнических систем – это ограниченные возможности декомпозиции на автономно проектируемые части вследствие их

взаимосвязанности при определении ряда основных характеристик робота и необходимости при этом системного подхода к роботу как к единому целому.

При обычном серийном проектировании АЭНК процесс разработки не отличается от принципов разработки других технических систем, общий вид этапов проектирования которых представлен на рисунке 10.

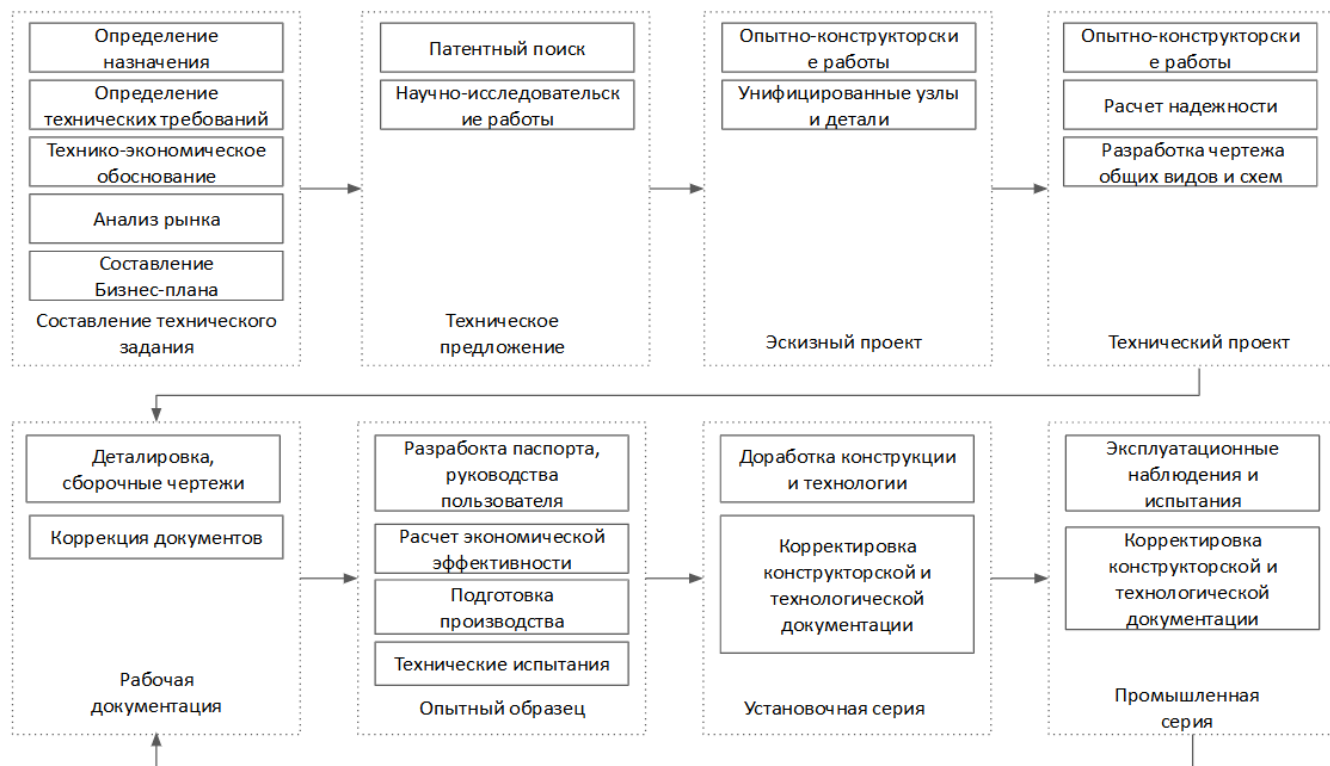


Рисунок 10 - Типовые этапы проектирование технических систем

На первом этапе производится разработка технического задания, предназначенного для согласования параметров и определения требований к разрабатываемой технической системе [76].

Техническое задание – совокупность конструкторских документов, которые должны содержать уточненные технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки документации изделия.

Техническое предложение содержит:

- анализ технического задания заказчика и различных вариантов возможных конструктивных решений;

– сравнительную оценку решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий и др.

Техническое предложение разрабатывается в случае, если это предусмотрено техническим заданием, с целью выявления дополнительных или уточненных требований к изделию (технических характеристик, показателей качества и др.), которые не могли быть указаны в техническом задании, и это целесообразно сделать на основе предварительной конструкторской проработки и анализа различных вариантов изделия.

Эскизный проект [77] разрабатывают с целью установления принципиальных (конструктивных, схемных и др.) решений, дающих общее представление о принципе работы и (или) устройстве экзоскелета, когда это целесообразно сделать до разработки технического проекта или рабочей документации. На стадии разработки эскизного проекта рассматривают варианты экзоскелета и (или) его составных частей.

Эскизный проект может разрабатываться без рассмотрения на этой стадии различных вариантов. При разработке эскизного проекта выполняют работы, необходимые для обеспечения предъявляемых к экзоскелету требований и позволяющие установить принципиальные решения. Перечень необходимых работ определяется разработчиком в зависимости от характера и назначения экзоскелета и согласовывается с заказчиком. На стадии эскизного проекта не повторяют работы, приведенные на стадии технического предложения, если они не могут дать дополнительных данных. В этом случае результаты ранее проведенных работ отражают в пояснительной записке.

Технический проект [78] включает в себя окончательную конструкторскую проработку всех узлов, схем робототехнической системы и его общих видов. При разработке технического проекта выполняют работы, необходимые для обеспечения предъявляемых к робототехнической системе требований и позволяющие получить полное представление о конструкции разрабатываемого

экзоскелета, оценить его соответствие требованиям технического задания, технологичность, степень сложности изготовления, способы упаковки, возможности транспортирования и монтажа на месте применения, удобство эксплуатации, целесообразность и возможность ремонта и т.п.

Разработка рабочей документации включает в себя разработку рабочих чертежей деталей экзоскелета, составление технологической документации, корректировку технического проекта, составление спецификаций, формирование паспорта экзоскелета, инструкции по эксплуатации и ряда других документов. После завершения разработки комплекта рабочей документации осуществляются технологическая подготовка производства и последующие этапы изготовления и отладки разрабатываемого экзоскелета.

Опытный образец (прототип) представляет собой первую итерацию в процессе разработки технической системы, предназначенную для проведения испытаний и отладки данной системы.

Установочная серия необходима для отработки технологий серийного производства для последующего его масштабирования.

Промышленная серия предназначена уже для серийного производства продукции.

Данные этапы разработки соответствуют ГОСТ Р 2.105-2019. Рассмотренные выше экзоскелеты, вышедшие в серийное или мелкосерийное производство, проходят через эти же этапы [79-81].

Недостаточный уровень проработки проблем, связанных с проектированием и апробацией экзоскелетных устройств, обуславливают формирование основных направлений исследований, рассмотренных в работах [82-85], ориентированных на обеспечение энергоэффективного взаимодействия систем приводов исполнительных механизмов экзоскелета при реализации локомоторных движений.

В работах, связанных с разработкой АЭНК [86-90], рассматривался процесс проектирования АЭНК, которые являются технической системой, включающей в себя как механическую, так и электронную часть.

Общей характеристикой этих экзоскелетов является отсутствие индивидуального подхода к проектированию каркаса экзоскелета под антропометрические требования оператора, отвечающего антропометрическим параметрам будущих операторов.

1.6 Цели и задачи диссертационного исследования

Целью данной работы повышение эффективности проектирования персонифицированных активных экзоскелетов нижних конечностей. Под эффективностью понимается снижение времени проектирования без потери качества.

Задачи:

1. Обзор подходов к проектированию персонифицированных активных экзоскелетов нижних конечностей реабилитационного типа.

2. Разработка онтологической модели электро- и радиокомпонент, включающей в себя технологические характеристики двигателей, аккумуляторов, драйверов, энкодеров и контроллеров необходимых для подбора вариантов комплектации АЭНК.

3. Разработка метода формирования проектных решений персонифицированных АЭНК как набора проектных процедур на основе требований в виде заданных антропометрических параметров оператора и условий функционирования.

4. Разработка компьютерной модели оператора активного экзоскелета, учитывающей антропометрические особенности оператора.

5. Разработка компьютерной модели активного экзоскелета нижних конечностей, поддерживающей параметризацию на основе данных антропометрии оператора и условий эксплуатации.

6. Разработка процедуры анализа динамики сборки для верификации проектного решения на этапе проектирования.

7. Разработка системы автоматизированного проектирования АЭНК (САПР АЭНК) и проведение испытаний предложенных подходов.

1.7 Выводы по первой главе

1. Проведен анализ предметной области, показавший рост рынка экзоскелетов.
2. Построена классификация экзоскелетов по следующим основаниям: области применения, области приложения, типу поддержки.
3. Выделены особенности экзоскелетов нижних конечностей реабилитационного типа, которые заключаются в форме каркаса экзоскелетов и местах расположения движителей.
4. Перспективным направлением является разработка активных экзоскелетов нижних конечностей для медицины, рассчитанных на индивидуальный дизайн, отвечающий эргономике тела человека.
5. Выполнен обзор существующих решений, который показал конструктивную специфику: 1) АЭНК являются достаточно дорогостоящим, так как отдельные проектные процедуры выполняются вручную (например, сборочный чертеж); 2) АЭНК требует добавления в конструкцию экзоскелетов специальных регуляторов, позволяющих осуществить настройку под оператора; 3) АЭНК требует процедуры настройки экзоскелета под антропометрические параметры оператора перед началом эксплуатации; 4) регуляторы АЭНК имеют заданный шаг изменения размера, что приводит к отклонению от реальных параметров

операторов и влечет за собой снижение удобства эксплуатации и снижение КПД экзоскелета

6. На основе анализа литературы выделены типовые этапы проектирования экзоскелетов, общей чертой для которых является отсутствие индивидуального подхода к анатомии оператора, что снижает эргономику конструкции.
7. Сформулирована цель и задачи диссертационного исследования.

Глава 2 Разработка онтологии компонентов АЭНК

2.1 Основные компоненты АЭНК

Основные компоненты экзоскелетов представлены в таблице 3. Схема компонент АЭНК представлена на рис. 11 [91].

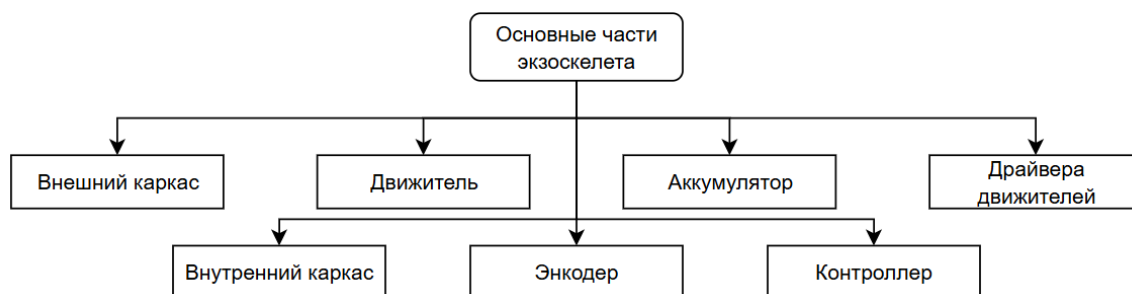


Рисунок 11 – Основные части экзоскелета

Таблица 3 – Основные компоненты АЭНК

№ пп	Наименование компонента	Назначение
1	Внешний каркас	Несущая внешняя конструкция
2	Внутренний каркас	Несущая внутренняя конструкция
3	Двигатель	Устройство, преобразующее энергию двигателя, либо внешнего источника в полезную работу
4	Источник питания	Электрическое оборудование, предназначенное для обеспечения системы энергией, аккумуляирования электрической энергии или изменения её характеристик
5	Драйвер двигателей	Устройства обеспечивающую преобразование электрических управляющих сигналов в воздействия, пригодные для непосредственного управления исполнительными элементами

№ пп	Наименование компонента	Назначение
6	Энкодер	Электронное устройство, позволяющее с необходимой точностью измерить различные параметры вращения
7	Контроллер	Устройство управления в электронике и вычислительной технике

2.1.1 Источники энергии

Наличие или отсутствие источника энергии на самом экзоскелете позволяет разделить их на два класса.

1. Автономные экзоскелеты: эти устройства оснащены собственными источниками энергии, что повышает их мобильность за счёт отсутствия потребности в постоянном подключении к источнику питания.. Примерами таких экзоскелетов могут служить BLEEX и разработка компании Rhadamanthys Systems — автономный экзоскелет Perseus — MEA. Эти устройства способны работать самостоятельно, что делает их удобными для применения в различных условиях.

2. Неавтономные экзоскелеты: у этих конструкций отсутствует собственный источник энергии, и они получают энергию извне. Это может осуществляться через силовые кабели, гидравлические линии или другие методы. Примером неавтономного экзоскелета является XOS 2. Такие экзоскелеты могут обеспечивать высокий уровень мощности, но их использование ограничено наличием источников энергии рядом.

Наиболее распространены автономные экзоскелеты, требующие компактных, легких и эффективных источников энергии, способных обеспечивать длительную автономную работу. Рассмотрим основные варианты, их преимущества и ограничения.

Сравнительный анализ источников питания представлен в таблице 4.

Таблица 4 - Сравнительный анализ источников питания АЭНК

Тип	Достоинства	Недостатки
Автономные	- мобильность - возможность использовать в повседневной жизни	- сложность технического обслуживания в случае поломки - риски связанные с неправильной эксплуатацией - энергозависимость
Неавтономные.	- преимущества, связанные с послаблением в отношении мобильности и количества степеней свободы	- ограниченные функциональные возможности - стационарность

2.1.2 Вид движителей

Экзоскелеты также классифицируются в зависимости от типов установленных на них активных элементов [92]:

1. Экзоскелеты с электрогидравлическими приводами: в этих системах обычно применяются гидравлические цилиндры для передачи силы. Также возможно использование поворотных гидродвигателей, однако их популярность ниже из-за более низкой эффективности, вызванной потерями рабочей жидкости через уплотнения. Примерами таких экзоскелетов являются BLEEX и XOS 2.

2. Экзоскелеты с электромеханическими приводами: эти устройства используют электродвигатели вращательного типа в сочетании с редукторами для передачи мощности. Электромеханические приводы можно встретить в экзоскелетах, таких как EhoAtlet и HAL.

3. Экзоскелеты с электропневматическими приводами: в данном случае в качестве исполнительных элементов применяются пневматические цилиндры, реже используются поворотные двигатели.

4. Экзоскелеты с искусственными мускулами: эти устройства основываются на высокомолекулярных соединениях и обеспечивают характеристики, близкие к человеческим мускулам. В настоящее время проводятся исследования по созданию таких мускулов, использующих электроактивные, химически

активные и фото-активные полимеры.

Кроме того, силовые приводы в биомеханических устройствах классифицируются по типу движения на:

- приводы поступательного движения;
- приводы вращательного движения;
- вибрационные приводы.

Классификация типов движения представлена на рисунке 12 [92].

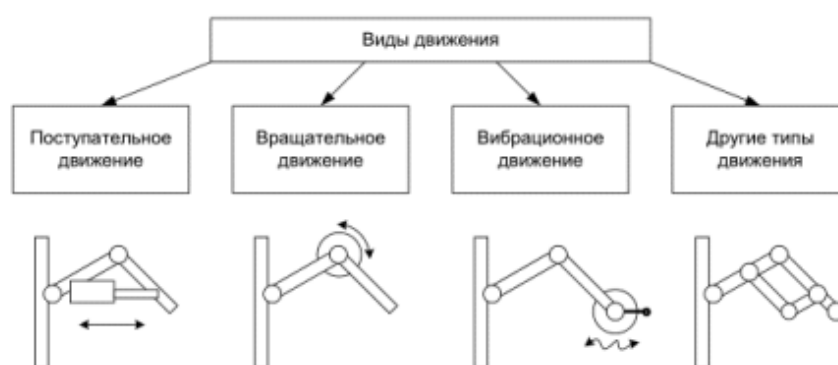


Рисунок 12 - Классификация видов движений силовых приводов

Электродвигатели стали основным типом приводов в современных экзоскелетах благодаря ряду ключевых преимуществ, которые делают их более предпочтительными по сравнению с гидравлическими, пневматическими или другими системами. Вот основные причины их распространённости [93-95]:

Плавное регулирование скорости и усилия: Электродвигатели позволяют точно контролировать крутящий момент и скорость, что критично для синхронизации движений экзоскелета с естественной биомеханикой человека.

Современные драйверы и датчики (энкодеры, гироскопы) обеспечивают мгновенную реакцию на изменения в движениях пользователя.

Бесщеточные двигатели (BLDC) и сервоприводы занимают мало места, что важно для мобильности экзоскелета. Отсутствие тяжелых гидравлических насосов или пневмосистем уменьшает общую массу конструкции. При этом электродвигатели преобразуют до 90% энергии в полезную работу, в отличие от гидравлики (КПД ~50–70%), так же некоторые модели (HAL от Cyberdyne)

возвращают энергию в батарею при торможении. Электродвигатели не создают шума, в отличие от гидравлических насосов.

Классификация по типу передачи представлена на рисунке 13, классификация по типу управления — на рисунке 14 [92].

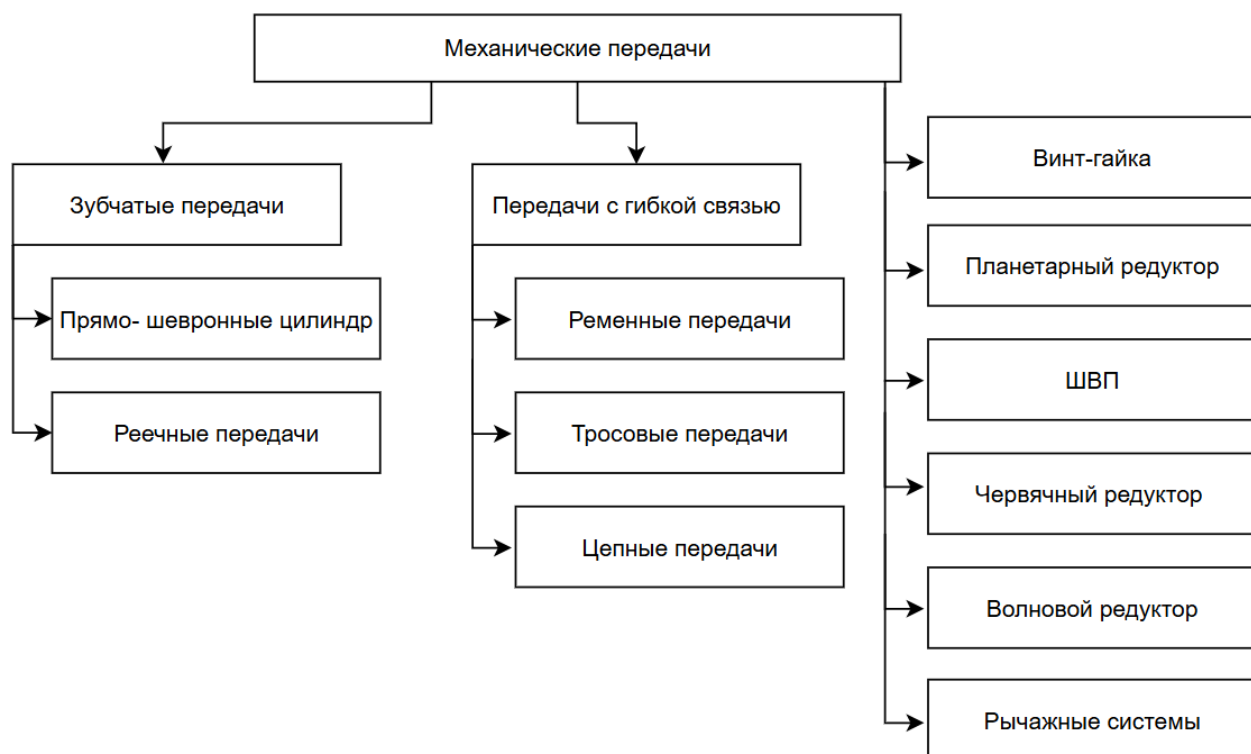


Рисунок 13 - Типы механических передач силовых приводов

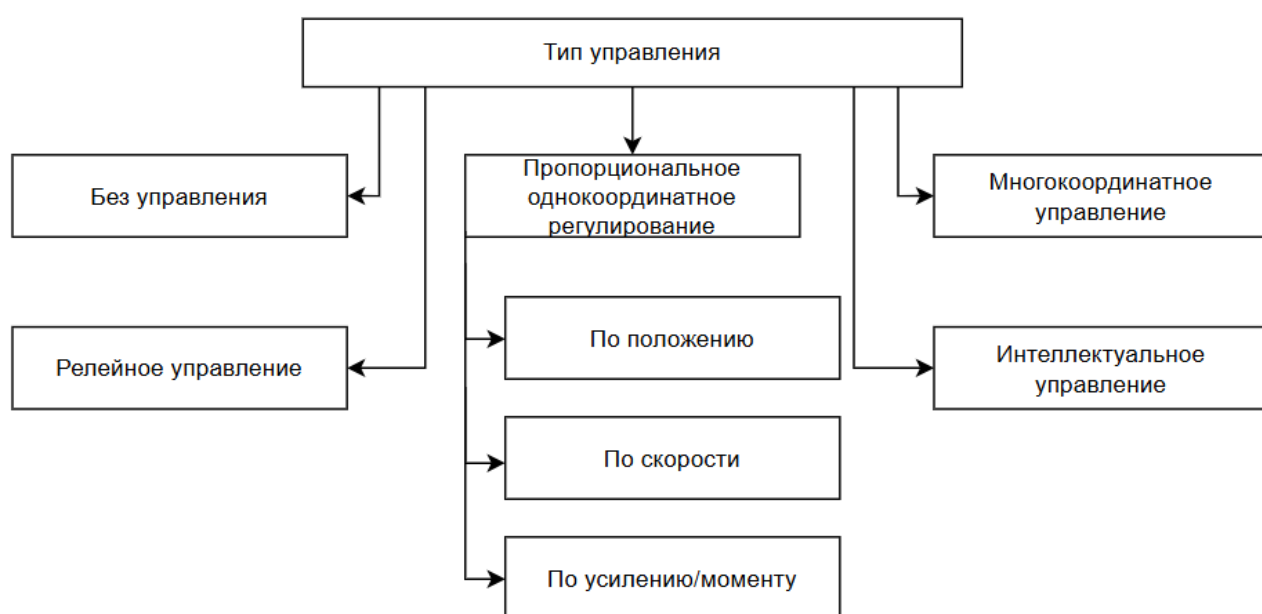


Рисунок 14 - Тип управления в силовом приводе

Многокоординатные приводы позволяют отслеживать одновременно несколько параметров движения [96]. Среди отслеживаемых параметров можно выделить: положение, скорость, крутящий момент, потребляемый ток. Приводы с интеллектуальными регуляторами используют принципы нечеткой логики, нейросетевого управления и другие современные алгоритмы. Эти системы способны динамически адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать высокую точность управления. Классификация приводов по типу используемых электродвигателей представлена на схеме, показанной на рисунке 15.

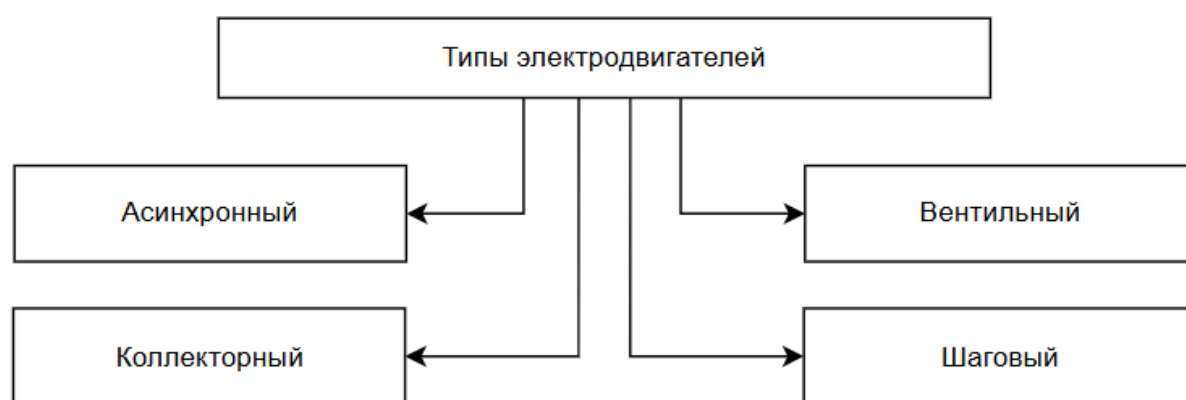


Рисунок 15 - Типы электродвигателей

Коллекторные двигатели постоянного тока (ДПТ) — это тип электродвигателей, которые используют коллектор и щетки для передачи электрического тока в обмотки ротора. Они широко применяются в различных устройствах благодаря своей простоте, надежности и хорошей управляемости. Вот основные аспекты, связанные с коллекторными двигателями постоянного тока [97]:

Структура: ДПТ состоит из статора (неподвижной части), ротора (вращающейся части), коллектора и щеток. Коллектор представляет собой набор металлических пластин, которые соединены с обмотками ротора. Щетки, обычно сделанные из углерода, контактируют с коллектором и обеспечивают подачу тока.

Принцип работы: когда электрический ток проходит через обмотки ротора, он создает магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем статора. Это взаимодействие приводит к вращению ротора. Коллектор и щетки обеспечивают переключение направления тока в обмотках, что позволяет поддерживать вращение (рис. 16).

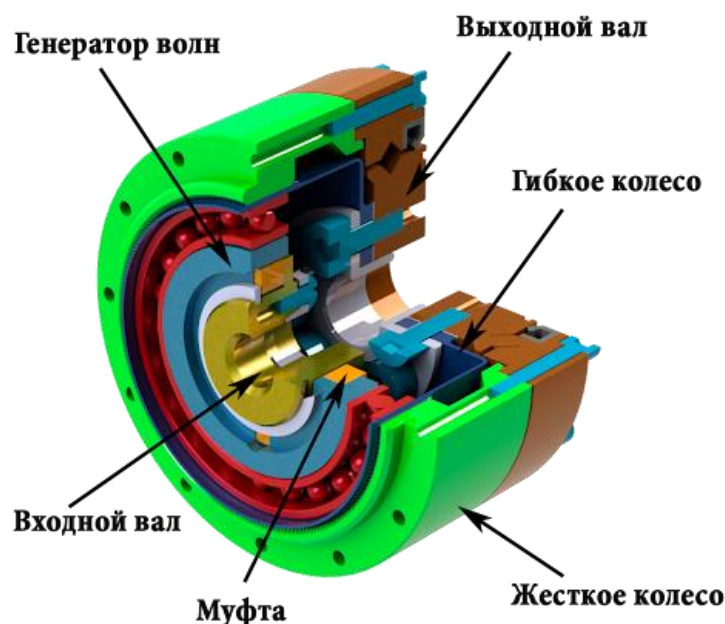


Рисунок 16 - Схема мотор-редуктора.

Серводвигатели — это специальные электродвигатели, которые используются в системах управления для точного позиционирования и управления движением. Они отличаются от обычных двигателей тем, что могут обеспечивать высокую точность, скорость и контроль над положением (рис 17).

Серводвигатели обычно состоят из следующих компонентов:

Ротор: Вращающаяся часть, которая может быть выполнена в виде постоянного магнита или индуктивного элемента.

Статор: Неподвижная часть, которая создает магнитное поле.

Датчик положения: Устройство, которое отслеживает положение ротора (например, энкодер).

Контроллер: Устройство, которое управляет работой серводвигателя,

обрабатывая сигналы от датчика положения и регулируя подачу тока.

Серводвигатели работают на основе обратной связи. Контроллер получает информацию о текущем положении ротора от датчика и сравнивает его с заданным положением. Если есть отклонение, контроллер корректирует подачу тока на двигатель, чтобы вернуть ротор в нужное положение.

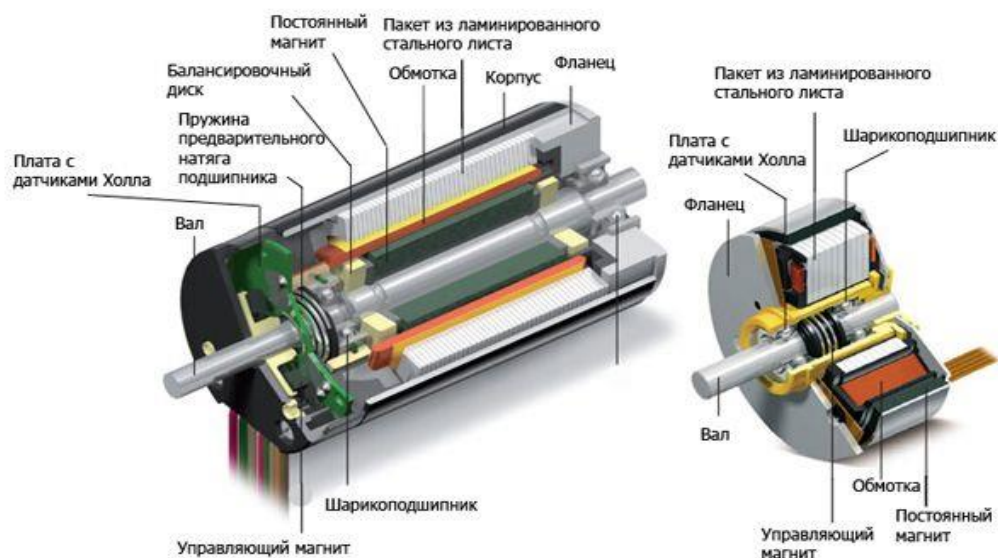


Рисунок 17 - Сервоприводы вращательного движения

Для повышения КПД при меньше мощности могут использоваться с реечными (рис. 18), или винтовыми передачами (рис. 19).

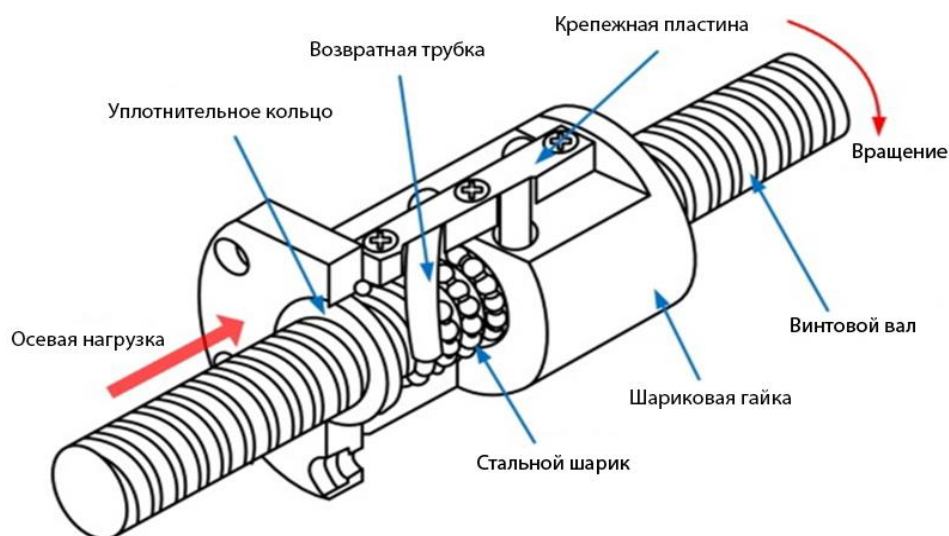


Рисунок 18 - Схема винтовые передачи



Рисунок 19 - Реечная зубчатая рейка

Так же необходимо выделить шаговые электродвигатели — это тип электродвигателей, которые преобразуют электрические импульсы в механическое движение. Они широко используются в системах, где требуется точное позиционирование и контроль угла вращения. Вот основные аспекты, связанные с шаговыми электродвигателями (рис. 20):

Шаговые электродвигатели состоят из следующих компонентов:

Ротор: Вращающаяся часть, которая может быть выполнена из постоянного магнита или магнитного материала.

Статор: Неподвижная часть, которая создает магнитное поле с помощью обмоток.

Контроллер: Устройство, которое управляет подачей электрических импульсов на обмотки статора, обеспечивая вращение ротора.

Принцип работы.

Шаговые электродвигатели работают по принципу последовательного включения обмоток статора. Когда на обмотки подаются электрические импульсы, они создают магнитное поле, которое взаимодействует с ротором, заставляя его поворачиваться на фиксированный угол (шаг). Количество шагов определяет общее вращение ротора.

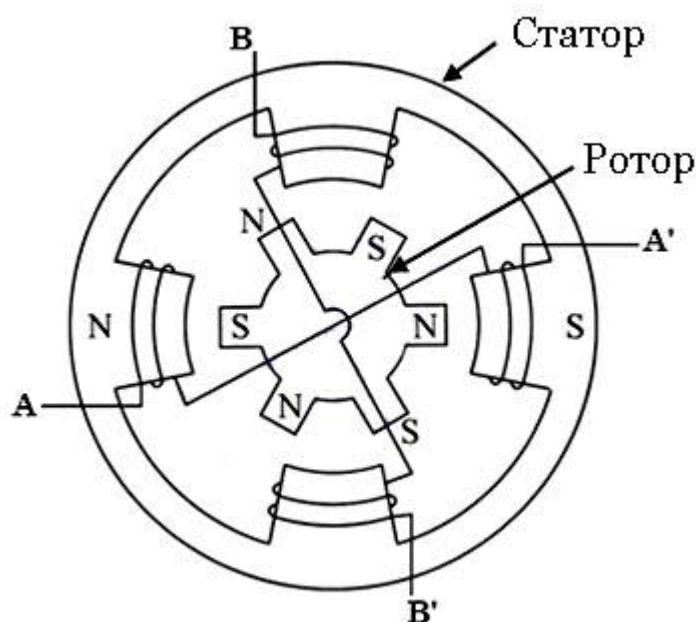


Рисунок 20 - Линейный шагового сервопривода

Так же могут применяться планетарные редукторы - это тип редуктора, который часто используется в сочетании с шаговыми электродвигателями для повышения их производительности и эффективности (рис. 21).

Планетарный редуктор состоит из центральной шестерни (солнца), нескольких планетарных шестерен, которые вращаются вокруг нее, и внешней облоймы (короны). Эта конструкция позволяет передавать крутящий момент и изменять скорость вращения с высокой эффективностью и компактностью.

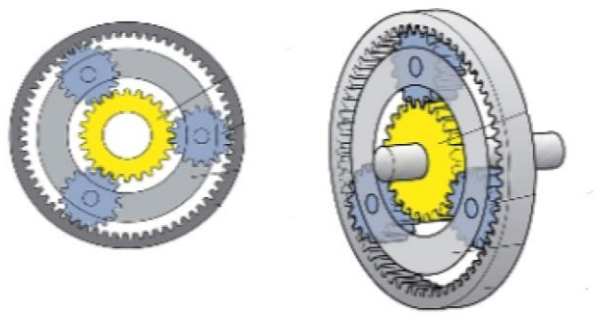


Рисунок 21 - Схема планетарного редуктора

Пневмоприводы в экзоскелетах — это устройства, которые используют сжатый воздух для создания движения и силы. Они становятся все более популярными в разработке экзоскелетов, так как обеспечивают легкость, гибкость и высокую мощность.

Пневмоприводы представляют собой цилиндры, в которых сжатый воздух используется для перемещения поршня. Когда воздух подается в цилиндр, он создает давление, которое заставляет поршень двигаться, что, в свою очередь, приводит в движение конечности классификация пневмоприводов представлена на рисунке 22.

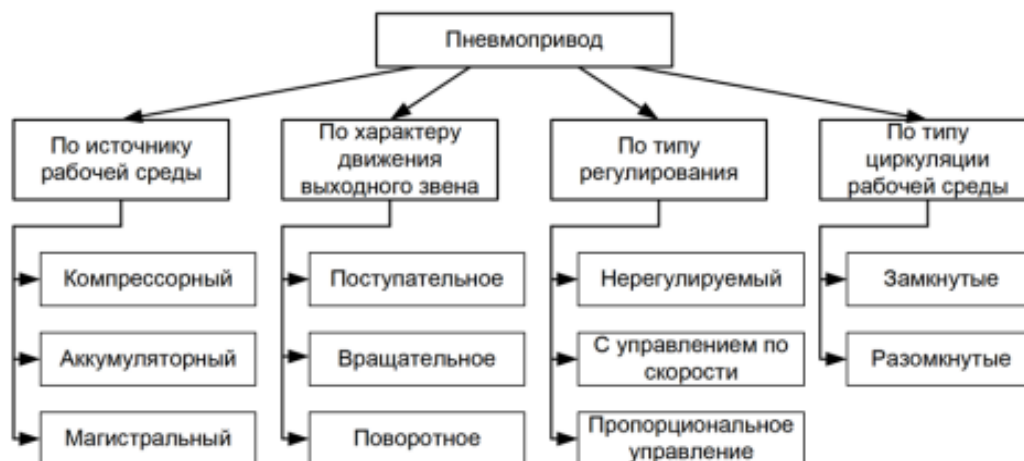


Рисунок 22 - Классификация пневмоприводов

В конструкциях экзоскелетов и тренажеров часто используются регулируемые пневмоприводы. Однако большинство пневмоприводов предназначены для перемещения исполнительного устройства между двумя крайними положениями, которые определяются ходом штока пневмоцилиндра.

В этом процессе система клапанов отвечает за регулирование расхода рабочей среды, что, в свою очередь, позволяет контролировать скорость перемещения.

В отличие от электропневматических и электрогидравлических приводов, где управление осуществляется электрическими сигналами, в электромеханических приводах как управление, так и исполнительная часть зависят от электрических сигналов, при этом редукторы в них имеют более высокий КПД. Перспективным направлением развития пневматических двигателей являются пневмомускулы (рис. 23), которые обеспечивают более линейные силовые характеристики и компактные размеры, но имеют ограниченное линейное перемещение до 25% от номинальной длины.

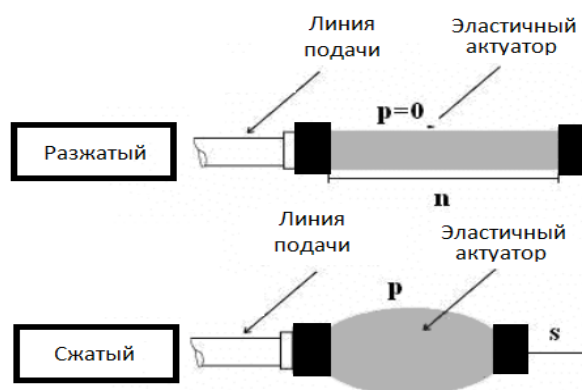


Рисунок 23- Принцип работы пневмомускул

Также есть потенциал в использовании искусственных мускулов на основе электроактивных, химически активных или фотоактивных полимеров, однако текущее развитие этого направления затрудняет их применение в экзоскелетах.

Сравнительный анализ видов силовых приводов представлен в таблице 5.

Таблица 5 - Сравнительный анализ видов силовых приводов АЭНК

Параметр	Электродвигатели	Гидравлика	Пневматика
Точность	Высокая	Средняя	Низкая
Вес	Низкий	Высокий (насосы, шланги)	Средний
Энергоэффективность	До 90%	50–70%	30–50%
Шум	Минимальный	Высокий	Средний
Стоимость	Средняя (драйверы, батареи)	Высокая (насосы, фильтры)	Низкая

2.1.3. Способ получения управляющих сигналов

По способу получения управляющих сигналов экзоскелеты подразделяются на пять типов [100]:

1) Экзоскелеты с программным управлением.

Экзоскелеты с программным управлением представляют собой устройства, которые используют компьютерные алгоритмы и системы управления для координации движений экзоскелета в соответствии с действиями пользователя или заданными программами. Эти экзоскелеты находят применение в различных областях, включая реабилитацию, промышленность и военное дело. Экзоскелеты с программным управлением оснащены датчиками, которые отслеживают движения пользователя, а также контроллерами, которые обрабатывают данные и управляют приводами (пневматическими, электрическими или гидравлическими) для выполнения заданных движений. Программное обеспечение может адаптироваться к различным условиям и задачам, обеспечивая более точное и эффективное управление. Примером может служить ExoAtlet.

2) Экзоскелеты с силовым управлением.

Экзоскелеты с силовым управлением представляют собой устройства, которые используют различные механизмы для усиления физической силы пользователя. Эти экзоскелеты могут быть оснащены различными типами приводов, включая электрические, гидравлические и пневматические, и предназначены для повышения производительности и снижения нагрузки на пользователя.

Экзоскелеты с силовым управлением используют механизмы, которые усиливают движения пользователя, позволяя ему выполнять физически сложные задачи с меньшими усилиями. Эти устройства могут быть активными, где привод обеспечивает дополнительную силу, или пассивными, где экзоскелет использует механические элементы для распределения нагрузки. Примеры

экзоскелетов с силовым управлением — XOS2 и BLEEX.

3) Экзоскелеты с управлением на основе мышечной активности (электромиография).

Экзоскелеты с управлением на основе мышечной активности, также известные как экзоскелеты с электромиографическим (ЭМГ) управлением, представляют собой устройства, которые используют сигналы, генерируемые мышцами пользователя, для управления движениями экзоскелета. Эти экзоскелеты находят применение в реабилитации, спорте и других областях, где требуется точное и интуитивное управление.

Экзоскелеты с управлением на основе мышечной активности используют датчики, которые фиксируют электрические сигналы, возникающие при сокращении мышц. Эти сигналы обрабатываются специальным программным обеспечением, которое интерпретирует их и передает команды на приводы экзоскелета. Это позволяет экзоскелету реагировать на намерения пользователя в реальном времени, обеспечивая более естественное и интуитивное взаимодействие. В пример данного класса экзоскелетов можно привести HAL.

4) Экзоскелеты с управлением на основе нейронной активности (электроэнцефалограмма головного мозга).

Экзоскелеты с управлением на основе нейронной активности представляют собой передовые устройства, которые используют сигналы, генерируемые мозгом пользователя, для управления движениями экзоскелета. Эти экзоскелеты могут быть особенно полезны в реабилитации, нейropsychологии и других областях, где требуется точное и интуитивное управление.

Экзоскелеты с управлением на основе нейронной активности используют электроэнцефалографию (ЭЭГ) или другие методы мониторинга нейронной активности для считывания сигналов, которые возникают при намерении пользователя выполнить определенное движение. Эти сигналы обрабатываются

специальным программным обеспечением, которое интерпретирует их и передает команды на приводы экзоскелета. Это позволяет экзоскелету реагировать на намерения пользователя в реальном времени, обеспечивая более естественное взаимодействие [101].

Таблица сравнения элементов управления представлена в таблице 6.

Таблица 6 - достоинств и недостатков типов управления

Параметры	ЭМГ	ЭЭГ	Силовое управление	Программное управление
Определение	Использует электрические сигналы от мышц	Использует сигналы, генерируемые мозгом	Использует физические механизмы	Использует алгоритмы и ПО
Интуитивность	Высокая, основана на естественных движениях	Высокая, управление с помощью мыслей	Низкая, требует обучения	Низкая, требует настройки
Адаптивность	Высокая, подстраивается под пользователя	Высокая, поддерживает индивидуальные особенности	Низкая, менее гибкая	Средняя, требует настройки
Точность	Высокая, зависит от состояния мышц	Очень высокая, точная интерпретация намерений	Средняя, зависит от механики	Вариативная
Преимущества	Поддержка естественных движений	Интуитивное управление для людей с ограниченной подвижностью	Простота конструкции и надежность	Гибкость и интеграция
Области применения	Реабилитация, спорт, промышленность	Реабилитация, спорт	Промышленность, военные технологии	Научные исследования, автоматизация, медицина
Недостатки	Зависимость от состояния мышц	Может быть сложным в настройке	Ограниченная функциональность	Требуется сложных алгоритмов

2.1.4 Внешний каркас

Каркас экзоскелета — это основная структурная часть устройства, которая, как правило, охватывает тело человека и обеспечивает соединение между различными функциональными компонентами экзоскелета. Он может быть выполнен из различных материалов, таких как алюминий, углепластик, сталь

или другие композитные материалы, что определяет его прочность, легкость и гибкость. Пример каркаса экзоскелета представлен на рисунке 24.



Рисунок 24 - каркас экзоскелета

Основные функции каркаса экзоскелета включают:

- распределение нагрузки: каркас распределяет вес и нагрузку, которые испытывает пользователь при выполнении различных действий, таких как поднятие тяжестей или длительная работа в статических позах;
- передача движений: с помощью механических и электронных компонентов каркас экзоскелета передает движения пользователя на механизмы, которые усиливают или корректируют физические усилия;
- защита: некоторые экзоскелеты разработаны для защиты пользователя от травм или повышения безопасности в опасных производственных условиях;

Конструкция каркаса: каркас экзоскелета состоит из нескольких ключевых компонентов:

- Рамная структура: основная рама обеспечивает жесткость и устойчивость экзоскелета. Она может включать в себя секции для верхних и нижних конечностей, а также спинальные и грудные элементы.
- Соединительные элементы: Суставы и другие механические соединения позволяют каркасу адаптироваться к движениям пользователя. Это могут быть как простые оси, так и сложные механизмы с возможностью изменения углов и размеров.

Выбор материалов для каркаса экзоскелета имеет большое значение для его эффективности. Обычно используют:

- алюминий: легкий и прочный металл, хорошо подходит для мобильных экзоскелетов;
- углепластик: полимерный композитный материал, обладает высоким соотношением прочности к весу, позволяет создавать легкие и жесткие структуры;
- титан: Обеспечивает высокую прочность и коррозионную стойкость, но является более дорогим решением.

Каркас экзоскелета является основополагающим элементом, который определяет его эффективность и функциональность. С технической точки зрения, его проектирование требует глубоких знаний в области материаловедения, механики и эргономики.

2.1.5 Источники питания

Источники питания играют ключевую роль в функционировании экзоскелетов, определяя их автономность, мощность и эффективность. В зависимости от назначения и конструкции экзоскелеты могут использовать различные типы источников энергии. В данной главе будут рассмотрены наиболее распространенные решения, используемые в современных экзоскелетах.

На сегодняшний день электрические источники питания являются наиболее распространенными в экзоскелетах. Они обеспечивают необходимую мощность для двигателей, сенсоров и управляющих систем.

Литий-ионные аккумуляторы: наиболее популярный выбор из-за их высокой энергоемкости и относительно небольшой массы. Они обеспечивают длительное время работы и быструю зарядку.

Литий-polymer (Li-Po) аккумуляторы: обладают хорошей плотностью энергии и могут иметь различные формы, что позволяет их интеграцию в компактные конструкции экзоскелета.

Гибридные экзоскелеты могут сочетать в себе несколько источников энергии, например, комбинацию электрических и механических систем. Это позволяет улучшить автономность и эффективность работы устройства.

Выбор источника питания для экзоскелета зависит от целей его применения:

- Для медицинских экзоскелетов: критически важны легкость, безопасность и удобство работы, что делает литий-ионные и литий-polymer аккумуляторы оптимальным выбором.
- Для промышленных экзоскелетов: Высокая мощность и длительное время работы играют важную роль, что может потребовать использования более мощных аккумуляторов или топливных элементов.
- Для военных экзоскелетов: Автономность и надежность становятся решающими факторами, поэтому предпочтение может отдаваться топливным элементам или другим долговечным решениям.

Выбор источника питания для экзоскелета критически важен для его функциональности и эффективности.

2.1.6 Драйвер движителей

Драйверы движителей являются ключевыми компонентами экзоскелетов, обеспечивающими необходимую силу для выполнения движений. Они преобразуют электрическую энергию, получаемую от источников питания, в механическую, позволяя экзоскелету взаимодействовать с окружающей средой и эффективно поддерживать движения пользователя.

Драйверы двигателей могут быть классифицированы на несколько категорий в зависимости от их конструкции и принципа действия.

Электрические моторы: наиболее распространённый тип драйверов, использующий электрическую энергию для создания вращающего момента. Они могут быть различных типов, включая:

- DC-электродвигатели: Просты в управлении и имеют высокую мощность, но могут требовать редукторов для достижения необходимого крутящего момента.
- Синхронные электродвигатели: обладают высокой эффективностью и точностью управления, что делает их подходящими для сложных задач.
- Шаговые двигатели: позволяют точно управлять углом, что делает их полезными для выполнения детализированных движений.
- Приводы на пневматическом или гидравлическом принципе: используют сжатый воздух или жидкость для создания силы и движения. Эти системы могут обеспечивать высокую мощность и хороший запас энергии, но обычно требуют более сложных конструкций и могут быть менее мобильными.
- Актуаторы с изменяемой геометрией: включают в себя системы, которые изменяют свою форму в зависимости от заданной команды, что позволяет достичь большей гибкости в использовании.

Принцип работы драйверов двигателей экзоскелетов основан на преобразовании различных форм энергии в механическую работу. Например:

- Электрические моторы работают на основе электромагнитных принципов: под воздействием электрического тока создается магнитное поле, которое взаимодействует с ротором, вызывая его вращение.
- Гидравлические и пневматические приводные системы используют изменение давления жидкости или газа для создания силы, действующей на поршень, что приводит к перемещению частей экзоскелета.

Управление драйверами осуществляется с помощью встроенных систем управления и датчиков, которые отслеживают положение и движение пользователя. Это позволяет экзоскелету:

- Адаптироваться к движениям пользователя: Датчики отслеживают движения конечностей и передают информацию в систему управления, которая управляет драйверами для синхронизации движений.
- Регулировать силу и скорость: В зависимости от потребностей пользователя, система управления может изменять параметры работы драйверов, обеспечивая оптимальную поддержку.

Драйверы двигателей — это жизненно важные компоненты экзоскелетов, обеспечивающие выполнение движений и взаимодействие с окружающей средой. Они требуют тщательного проектирования и интеграции с другими системами, что делает их ключевым элементом в разработке эффективных экзоскелетов.

2.1.7 Энкодер

Энкодеры — это устройства, которые преобразуют механическое движение в электрический сигнал, позволяя системе управления отслеживать положение, скорость и направление движений в экзоскелетах. Они играют важную роль в

обеспечении точного контроля над экзоскелетом и взаимодействием с пользователем.

Энкодеры могут быть классифицированы на несколько типов в зависимости от принципа их работы:

- Оптические энкодеры: используют световые лучи для определения положения. Они работают с помощью вращающегося диска, на котором нанесены черные и прозрачные участки, прерывающие световой поток. Оптические энкодеры обладают высокой точностью и разрешением.
- Магнитные энкодеры: используют магниты и магнитные датчики для определения положения. Они более устойчивы к внешним воздействиям и имеют более простую конструкцию, чем оптические аналоги, но могут иметь несколько меньшую точность.

Принцип работы энкодеров основывается на преобразовании механического движения в электрический сигнал. В зависимости от типа энкодера, это может происходить следующим образом:

- Оптические энкодеры: когда диск вращается, световой луч проходит через отверстия на диске и достигает приемника. Измеряя количество проходящих импульсов, система управления может определить угол поворота.
- Магнитные энкодеры: при вращении ротора магнитные поля фиксируются датчиками, которые генерируют электрический сигнал, позволяя системе управлять движением.

Энкодеры в экзоскелетах используются для:

- Контроля движений: Датчики отслеживают положение суставов и конечностей, обеспечивая точное исполнение команд системы управления.

- Синхронизации с движениями пользователя: Используя данные от энкодеров, экзоскелет может адаптироваться к движениям пользователя, обеспечивая поддержку и безопасность.

Энкодеры являются важным компонентом экзоскелетов, обеспечивая точное измерение параметров движения и позволяя контроль над системой. Их выбор и интеграция в проект экзоскелета могут значительно повысить эффективность работы устройства, а также улучшить взаимодействие с пользователем.

2.1.8 Контроллер

Контроллеры представляют собой ключевые элементы управления в экзоскелетах, обеспечивающие обработку данных от сенсоров и управление движениями приводных механизмов. Они выполняют функции обработки информации, принятия решений и управления работой всего устройства.

Основные функции контроллеров в экзоскелетах выполняют несколько важных функций:

- Обработка данных: Сбор и анализ информации от различных сенсоров, таких как энкодеры, акселерометры и гироскопы, для определения текущего состояния экзоскелета.
- Управление приводами: Генерация управляющих сигналов для драйверов, обеспечивающих движение различных компонент экзоскелета, в зависимости от данных, полученных от датчиков.
- Интерфейс пользователя: Обработка ввода от пользователя (например, с помощью кнопок, джойстиков или голосовых команд) и трансляция своих действий на приводы экзоскелета.
- Адаптация и обучение: Возможность настройки и адаптации под движения конкретного пользователя, а также возможность самообучения на основе полученных данных.

Контроллеры могут быть классифицированы на несколько типов в зависимости от архитектуры и назначения:

- Микроконтроллеры: используются в простых экзоскелетах и представляют собой независимые устройства, выполняющие алгоритмы управления. Они часто используются для управления отдельными приводами или компонентами.
- Процессоры реального времени (RTOS): больше подходят для сложных систем, требующих высокоскоростной обработки данных и быстрого реагирования на изменения. Они могут обрабатывать множество задач одновременно.
- ПЛИС (FPGA): Программируемые логические интегральные схемы, которые обеспечивают высокую скорость обработки и могут быть настроены для выполнения различных задач управления в экзоскелете.

Контроллеры работают по следующему принципу:

- Сбор данных: Контроллер на постоянной основе считывает информацию с датчиков и систем обратной связи.
- Обработка информации: на основе собранных данных контроллер анализирует текущее состояние системы и производит расчеты для управления приводами.
- Управление приводами: Контроллер формирует управляющие сигналы и отправляет их на драйверы, заставляя экзоскелет выполнять необходимые движения.

Контроллеры являются важнейшими компонентами экзоскелетов, обеспечивающими взаимодействие между различными датчиками, приводами и пользователем. Они играют решающую роль в адаптации экзоскелета к движениям пользователя, что, в свою очередь, значительно повышает эффективность и безопасность устройства.

2.2 Онтология компонент АЭНК

Результат систематизации информации о компонентах экзоскелетов, показан в виде онтологии по компонентам на рисунке 25 [29] Расширенная Онтология представлена в приложении А.

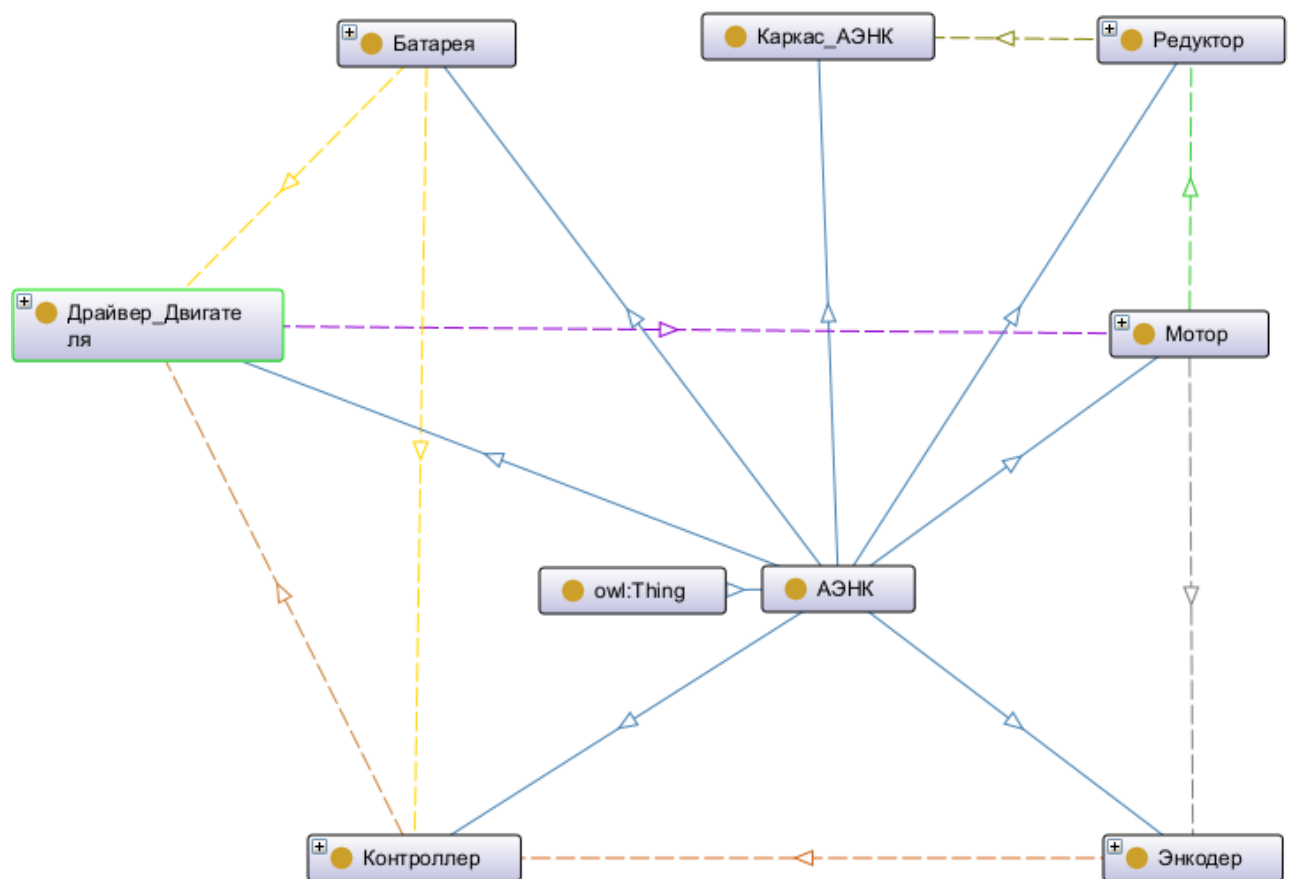


Рисунок 25 – Диаграмма классов онтологии экзоскелетов

В процессе анализа определены характеристики компонент АЭНК, основные варианты управления экзоскелетом, варианты источников энергии и исполнительные механизмы. На основании проведенного анализа в главе 1, для дальнейшего рассмотрения и компонент АЭНК выбраны комбинированный экзоскелет нижних конечностей, приводимый в движение электромеханическими приводами и с питанием от батареи.

Для применения базы данных в программном продукте для подбора электро и радиокомпонент была разработана база данных. База данных состоит из 6 таблиц: «controllers», «actuators», «batteries», «motors», «integratedDrives», «encoders» структура представлена в приложении В.

Контроллер - устройство, управляющая движением экзоскелета. Таблица 7 «controllers» содержит данные о контроллерах и состоит из полей:

Таблица 7 - Параметры контроллеров АЭНК

№	Наименование	Значение	Ед. измерения	Тип данных
1	id	идентификатор	-	int
2	title	название	-	varchar(250)
3	purpose	назначение	-	varchar(250)
4	compatibility	указаны совместимые компоненты	-	varchar(250)
5	powerSupply	ток питания	A	int
6	voltage	рабочее напряжение	V	int
7	program	программа для настройки	-	varchar(250)
8	enginePowerLimit	ограничение на мощность двигателя,	W	int
9	minWorkingTemp	минимальная температура работы	°C	int
10	maxWorkingTemp	максимальная температура работы,	°C	int
11	operatingMode	режим работы	-	varchar(250)
12	PWM_freq	тактовая частота ШИМ силового каскада	кГц	float
13	speedPI_freq	частота дискретизации ПИ-регулятор скорости	кГц	float
14	max_effect	максимальная эффективность	%	int
15	PID_freq	частота дискретизации ПИД-регулятор позиционирования	кГц	float
16	ampPI_freq	частота дискретизации ПИ-регулятор тока	кГц	float

№	Наименование	Значение	Ед. измерения	Тип данных
17	weight	масса	г	int
18	length	длина	мм	int
19	width	ширина	мм	int
20	height	высота	мм	int
21	url	ссылка на интернет-источник с продуктом	-	varchar(250)

Таблица 8 «reducers» содержит данные о редукторах и состоит из полей:

Таблица 8 - Параметры редукторов АЭНК

№	Наименование	Значение	Ед. измерения	Тип данных
1	id	записи	-	int
2	title	название	-	varchar(250)
3	compatibility	указаны совместимые компоненты	-	varchar(250)
4	purpose	назначение	-	varchar(250)
5	reduction	передаточное число	-	int
6	transmittedPower	максимальная передаваемая мощность	W	int
7	torque	номинальный крутящий момент	mNm	int
8	speed	номинальная скорость	rpm	int
9	minWorkingTemp	минимальная температура работы	°C	int
10	maxWorkingTemp	максимальная температура работы	°C	int
11	efficiency	максимальная эффективность	%	int
12	radialLoad	максимальная радиальная нагрузка	H	int
13	axialLoad	максимальная осевая нагрузка (динамическая)	H	int

№	Наименование	Значение	Ед. измерения	Тип данных
14	weight	масса	г	int
15	length	длина	мм	int
16	width	ширина	мм	int
17	height	высота	мм	int
18	url	ссылка на интернет источник с продуктом	мм	varchar(250)

Двигатель - любой тип механического привода (устройства, рабочего органа), имеющий в составе датчик (положения, скорости, усилия и т. п.) и блок управления приводом (электронную схему или механическую систему тяг), автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике (и, соответственно, на устройстве) согласно заданному внешнему значению

Таблица 9 «actuators» содержит данные о двигателях со встроенным датчиком и контроллером позиционирования, состоит из полей:

Таблица 9 - Параметры актуаторов АЭНК

№	Наименование	Значение	Ед. измерения	Тип данных
1	id	Идентификатор	-	int
2	title	название	-	varchar(250)
3	purpose	назначение	-	varchar(250)
4	compatibility	указаны совместимые компоненты	-	varchar(250)
5	power	мощность двигателя,	W	int
6	minWorkingTemp	минимальная температура работы,	°C	int

№	Наименование	Значение	Ед. измерения	Тип данных
7	maxWorkingTemp	максимальная температура работы,	°C	int
8	radialLoad	максимальная радиальная нагрузка,	Н	int
9	axialLoad	максимальная осевая нагрузка,	Н	int
10	ratedTorque	номинальный крутящий момент,	мНм	int
11	ratedSpeed	номинальная скорость,	rpm	int
12	inertia	инерция ротора	гсм ²	int
13	powerSupply	ток питания	А	int
14	voltage	рабочее напряжение	V	int
15	max_effect	максимальная эффективность,	%	int
16	controller	название встроенного контроллера позиционирования, для компактных приводов	-	varchar(250)
17	weight	масса	г	int
18	length	длина	мм	int
19	width	ширина	мм	int
20	height	высота	мм	int
21	url	ссылка на интернет источник с продуктом	-	char

Таблица 10 «motor» содержит данные о двигателях со встроенным датчиком и контроллером позиционирования, состоит из полей:

Таблица 10 - Параметры двигателей АЭНК

№	Наименование	Значение	Ед. измерения	Тип данных
1	id	Идентификатор	-	int
2	title	название	-	varchar(250)
3	purpose	назначение	-	varchar(250)
4	compatibility	указаны совместимые компоненты	-	varchar(250)
5	power	мощность двигателя	W	int
6	minWorkingTemp	минимальная температура работы	°C	int
7	maxWorkingTemp	максимальная температура работы	°C	int
8	radialLoad	максимальная радиальная нагрузка	H	int
9	axialLoad	максимальная осевая нагрузка	H	int
10	ratedTorque	номинальный крутящий момент	Hm	int
11	ratedSpeed	номинальная скорость	rpm	int
12	inertia	инерция ротора	gcm ²	int
13	powerSupply	ток питания	A	float
14	noLoadCurrent	ток без нагрузки	mA	int
15	voltage	рабочее напряжение	V	int
16	max_effect	максимальная эффективность	%	int
17	weight	масса	г	int
18	length	длина	мм	int

№	Наименование	Значение	Ед. измерения	Тип данных
19	width	ширина	мм	int
20	height	высота	мм	int
21	url	ссылка на интернет источник с продуктом	-	varchar(250)

Устройство для хранения энергии с целью последующего её использования. Таблица 11 «batteries» содержит данные об элементах питания и состоит из полей:

Таблица 11 - Параметры батареи АЭНК

№	Наименование	Значение	Ед. измерения	Тип данных
1	id	Идентификатор	-	int
2	title	название	-	varchar(250)
3	type	тип аккумулятора	-	varchar(250)
4	voltage	рабочее напряжение	V	int
5	capacity	ёмкость аккумулятора,	Ah	int
6	weight	масса	г	int
7	length	длина	мм	int
8	width	ширина	мм	int
9	height	высота	мм	int
10	url	ссылка на интернет источник с продуктом	-	varchar(250)

Энкодеры - устройство, предназначенное для преобразования угла поворота вращающегося объекта (вала) в электрические сигналы, позволяющие

определить угол его поворота. Таблица 12 «encoders» содержит данные о датчиках и состоит из полей:

Таблица 12 - Параметры энкодеров АЭНК

№	Наименование	Значение	Ед. измерения	Тип данных
1	id	Идентификатор	-	int
2	title	название	-	varchar(250)
3	compatibility	указаны совместимые двигатели	-	varchar(250)
4	type	тип датчика, предназначение	-	varchar(250)
5	resolution	разрешение, количество доступных линий	-	int
6	numberChannels	количество каналов	-	int
7	maximumRpm	максимальные обрабатываемые обороты,	rpm	int
8	ток питания	ток питания	A	int
9	voltage	рабочее напряжение	V	int
10	minWorkingTemp	минимальная температура работы,	°C	int
11	maxWorkingTemp	максимальная температура работы,	°C	int
12	weight	масса	г	int
13	url	ссылка на интернет источник с продуктом	-	varchar(250)

Таблица 13 - Параметры драйверов двигателей АЭНК

№	Наименование	Значение	Ед. измерения	Тип данных
1	id	Идентификатор	-	int
2	title	название	-	varchar(250)
3	motortype	Тип двигателя	-	varchar(250)
4	powerSupply	ток питания	A	int
5	voltage	рабочее напряжение	V	int
6	power	мощность	W	int
7	interface	Интерфейс управления	-	varchar(250)
8	defenceFunction	защитные функции	-	varchar(250)
9	driverEfficiency	кпд драйвера	%	int
10	PWM frequency	частота ШИМ	-	int
11	feedback	обратная связь	-	varchar(250)
12	weight	масса	г	int
13	length	длина	мм	int
14	width	ширина	мм	int
15	height	высота	мм	int
16	url	ссылка на интернет источник с продуктом	-	varchar(250)

2.3 Выводы по второй главе

1. Проведен анализ основных компонент АЭНК необходимый для понимания структуры АЭНК и построения онтологии электро-и радиокомпонент.
2. Построена онтологическая модель компонент АЭНК необходимая для создания элементной базы данных для подбора электро- и радиокомпонент АЭНК.
3. Спроектирована база данных электро- и радиокомпонент АЭНК необходимая для работы программного обеспечения для автоматизации проектирования АЭНК.

Глава 3 Метод автоматизации проектирования АЭНК под антропометрические данные оператора

3.1 Общее описание предлагаемого метода проектирования АЭНК

Далее описан предлагаемый метод проектирования АЭНК под антропометрические данные оператора.

На верхнем уровне метод можно представить в виде следующей диаграммы “Проектирование АЭНК” [102], выполненной в нотации IDEF0 (рис. 26).

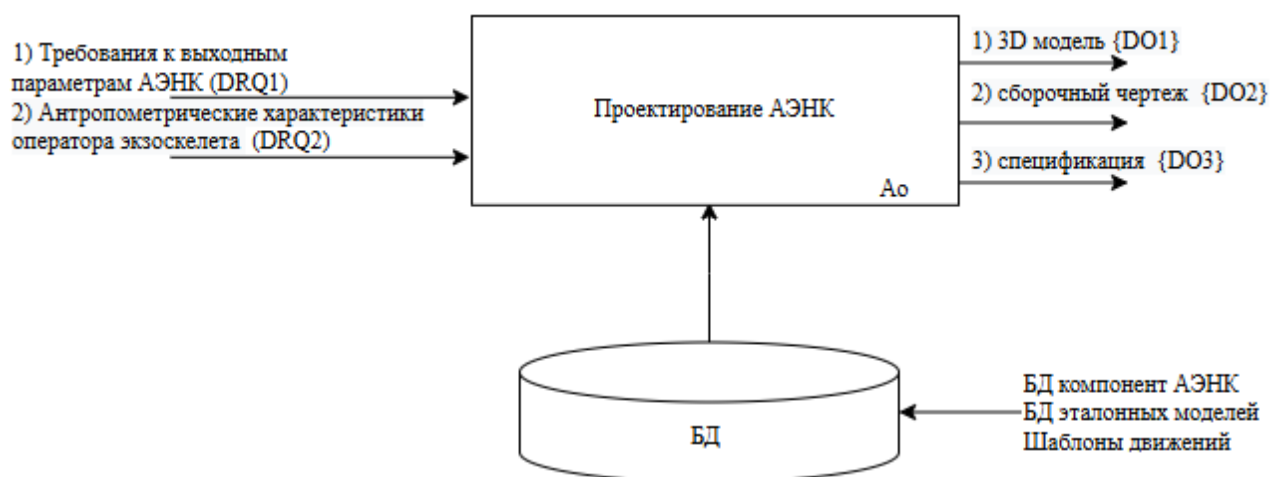


Рисунок 26 - Схема проектной процедуры А0 “Проектирование АЭНК”

Входные данные (DRQ1), связанные с подбором компонент, включают следующие множества:

$$DRQ1 = < Us, kP, m, W, t, tCs, mt >, \quad (1)$$

где Us - назначение АЭНК,

kP – грузоподъемность(кг),

m – масса экзоскелета(кг),

t – время автономной работы (ч),

tCs – время реакции системы управления (с),

mt – материал исполнения основных конструктивных элементов.

Входные данные, необходимые для перестроения каркаса экзоскелета:

$$DRQ2 = \langle h1, h2, l1, l2, oh1, oh2, ol1, ol2, c1, c2, Ta, ba, Omas \rangle, (2)$$

где $h1$ - длина левой голени (мм),

$h2$ - длина правой голени (мм),

$oh1$ - обхват левой голени (мм),

$oh2$ - обхват правой голени (мм),

$l1$ - длина левого бедра (мм),

$l2$ - длина правого бедра (мм),

$ol1$ - обхват левого бедра (мм),

$ol2$ - обхват правого бедра (мм),

$c1$ - размер обуви левой ступни,

$c2$ - размер обуви правой ступни,

ba - длина спинной части (мм),

Ta - обхват талии (мм),

$Omas$ - масса оператора (кг).

Выходные параметры включают в себя 3D-модель созданного экзоскелета ($DO1$), чертеж с размерами каркаса экзоскелета ($DO2$) и спецификацию элементов экзоскелета ($DO3$).

Декомпозируем метод в виде следующих процедур ($A0$):

$$A0 = \langle A1.1, A1.2, A1.3, A1.4, A1.5 \rangle, (3)$$

где $A1.1$ – процедура выбора допустимых компонент,

$A1.2$ – процедура генерации сборок без повторений,

$A1.3$ – процедура параметризации 3D-моделей,

$A1.4$ – процедура совмещения каркаса с N -набором вариантов электро- и радиокомпонент и параметризация каркаса экзоскелета,

$A1.5$ – процедура анализа динамики получившихся сборок.

На основании анализа структуры АЭНК представленном в главе 2, был определён набор необходимых электро- и радиокомпонент таких как: контроллеры - «controllers», актуаторы - «actuators», источник питания - «batteries», моторы - «motors», редукторы - «reducers», энкодеры - «encoders» драйверы двигателей - «drivers».

Разрабатываемый метод предназначен для синтеза компонентов сборки экзоскелета на основе предъявляемых требований. Также учитываются антропометрические параметры оператора. Для реализации метода синтеза компонентов АЭНК необходимо получить антропометрические данные оператора, для параметризации модели АЭНК. Формирование эксплуатационных требований необходимы для подбора подходящих электро- и радиокомпонент, алгоритм подбора представлен в общем виде на рисунке 27.

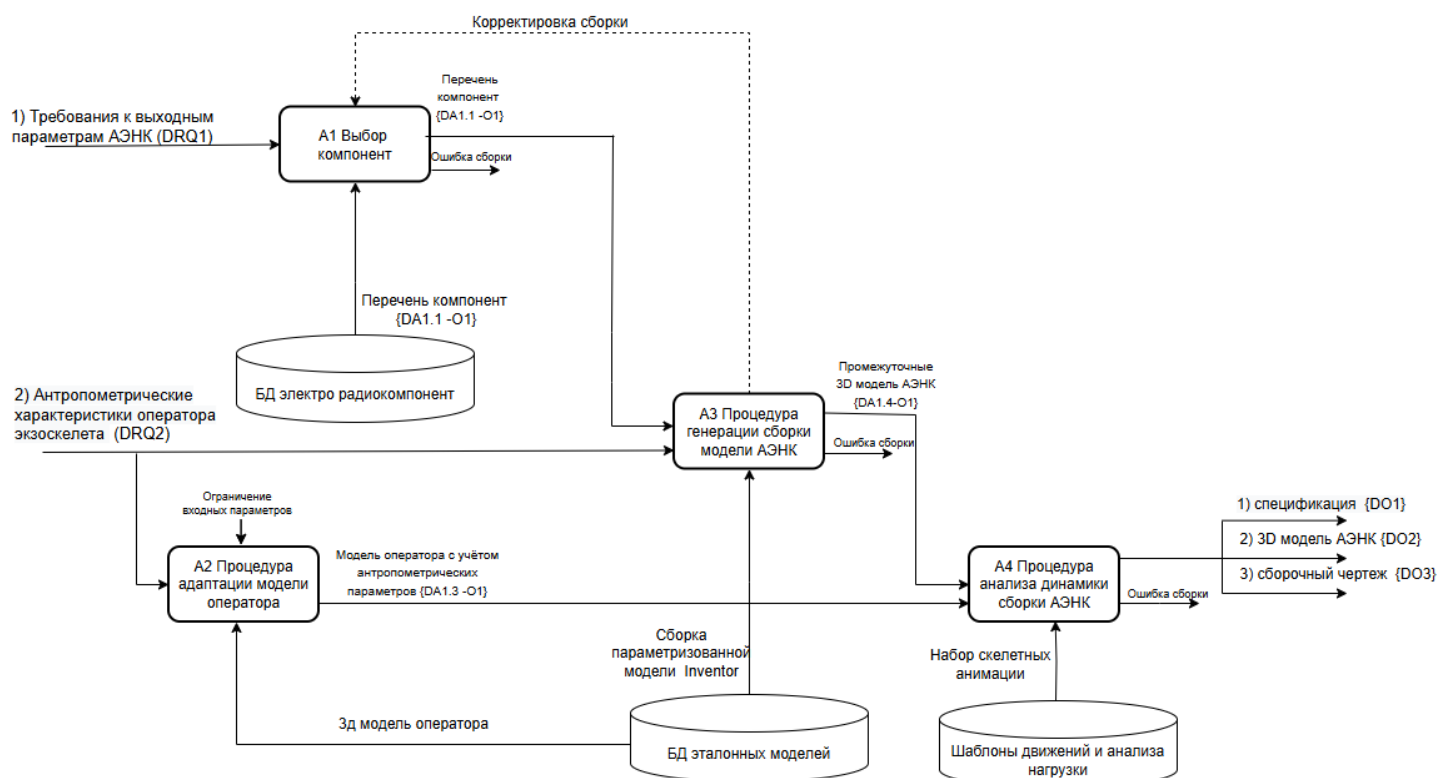


Рисунок 27 - Схема декомпозиции проектной процедуры A0

Первый шаг - на основе входных данных $DRQ1$ формируется список допустимых компонент из базы данных электро- и радиокомпонент, представленных на рисунке 28.

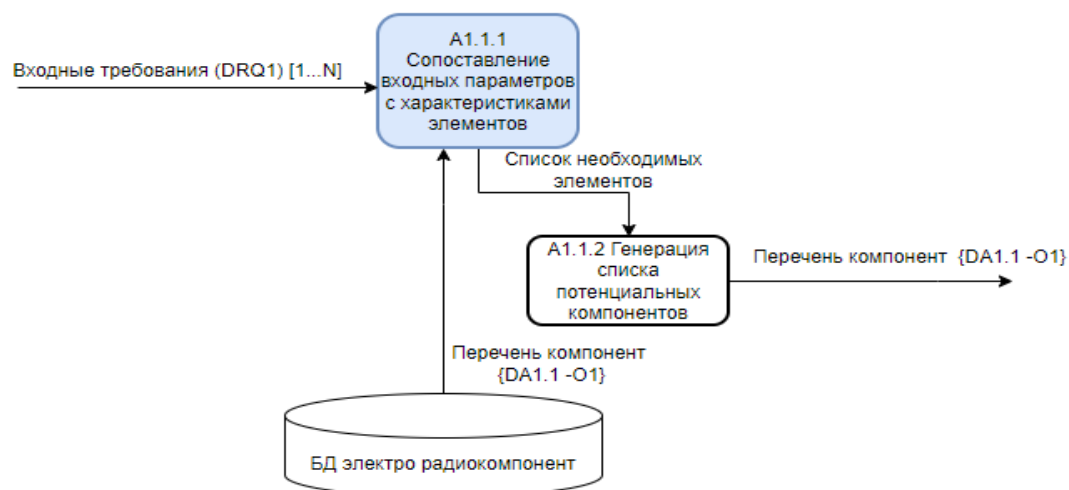


Рисунок 28 - Схема декомпозиции проектной процедуры A1

Второй шаг на основании выбранных допустимых компонент применяется генетический алгоритм для подбора вариантов сборок АЭНК, представленный на рисунке 29.

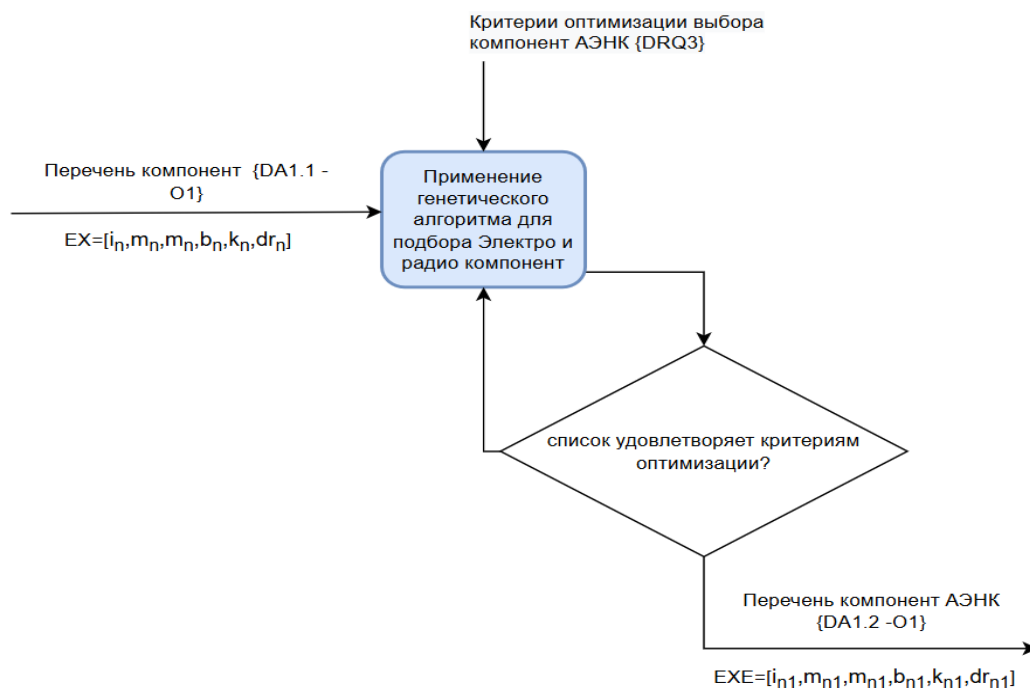


Рисунок 29 - Схема декомпозиции проектной процедуры A2

На основании входных требований определяются допустимые электро- и радиокомпоненты экзоскелета:

$$EX = \langle B, M, D, G, E, C \rangle, \quad (4),$$

где: $B = [V_b, C_b, I_{b_max}]$ — параметры батареи (напряжение, емкость, максимальный ток разряда).

$M = [T_m, V_m, I_m, \eta_m]$ — параметры двигателя (тип, напряжение, номинальный ток, КПД).

$D = [I_{d_max}, V_d, \eta_d]$ — параметры драйвера (максимальный ток, напряжение, КПД).

$G = [i_g, \eta_g, T_{g_max}]$ — параметры редуктора (передаточное число, КПД, максимальный момент).

$E = [R_e, \varepsilon_e]$ — параметры энкодера (разрешение, точность).

$C = [f_c, M_c, I_c]$ — параметры контроллера (частота, память, интерфейсы).

Третий шаг - на основании входных параметров антропометрических данных оператора ($DRQ2$) из эталонной модели оператора (Oex) формируется модель оператора под заданные параметры ($OexS$) для последующей компьютерной симуляции проверки работоспособности варианта сборки, представленном на рисунке 30.

$$OexS = \langle h1_n, h2_n, l1_n, l2_n, oh1_n, oh2_n, ol1_n, ol2_n, c1_n, c2_n, Ta_n, ba_n, Omas_n \rangle, \quad (5)$$

где $OexS = DRQ2$,

n — значение параметра.

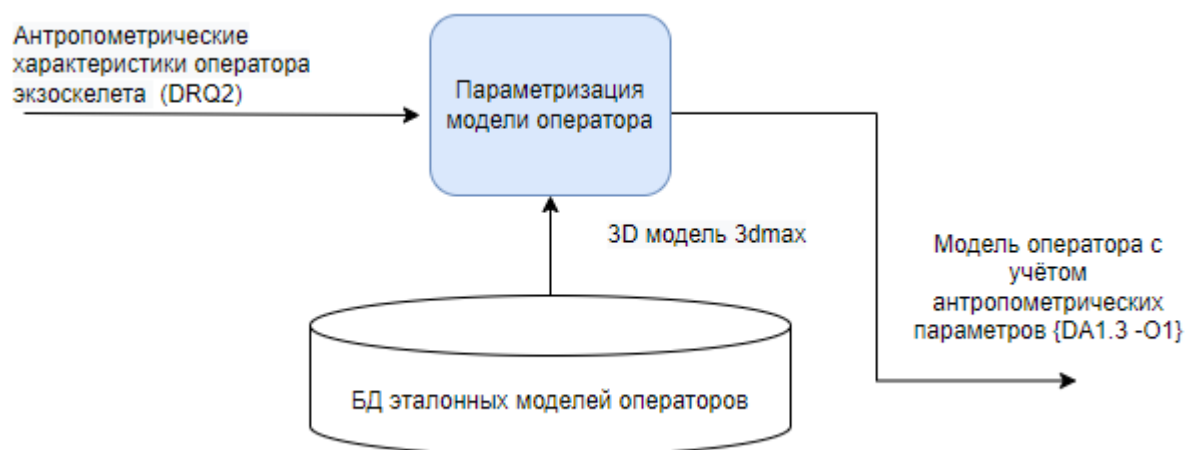


Рисунок 30 - Схема декомпозиции проектной процедуры A2

Четвертый шаг - параметризация эталонной модели экзоскелета *Ope* с антропометрическими данными *DRQ2* для получения подогнанного экзоскелета *OpeS* с вариантами компоновки электро- и радиокомпонент *EXS* представленном на рисунке 31.

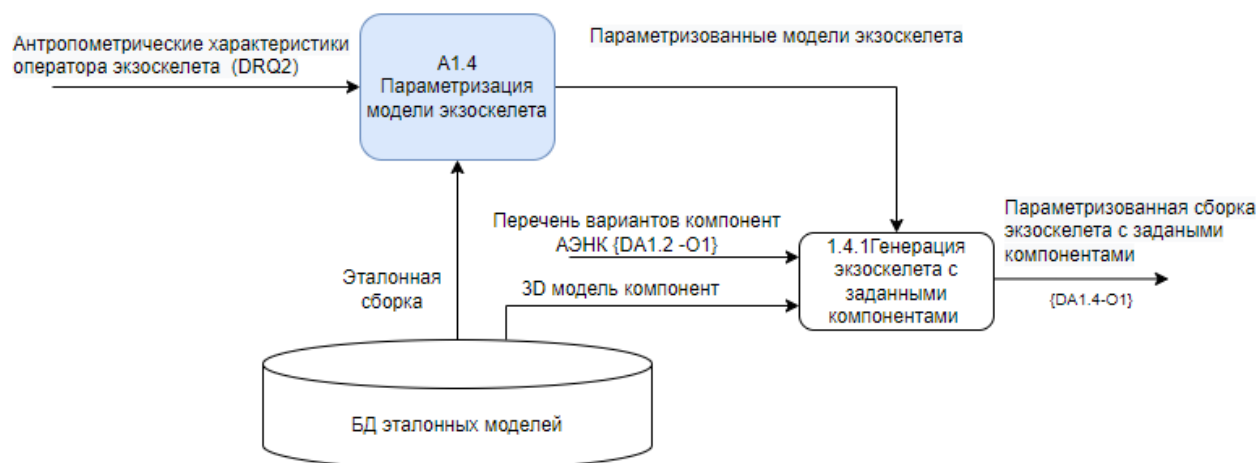


Рисунок 31 - Схема декомпозиции проектной процедуры A3

Пятый шаг - на основании сформированных моделей оператора *OexS*, каркаса экзоскелета *OpeS* и вариантов элементной базы *EXS* производится компьютерная симуляция шаблонов движений для проверки работоспособности созданных вариантов методом проверки коллизий поверхностей построенных моделей.

Варианты сборки fEX , прошедшие проверку, попадают в список возможных вариантов сборки экзоскелета, представленных на рисунке 32.

$$FEX = \langle fEX1, fEX2, \dots fEXN \rangle. \quad (6)$$

где FEX - вариант сборки АЭНК.

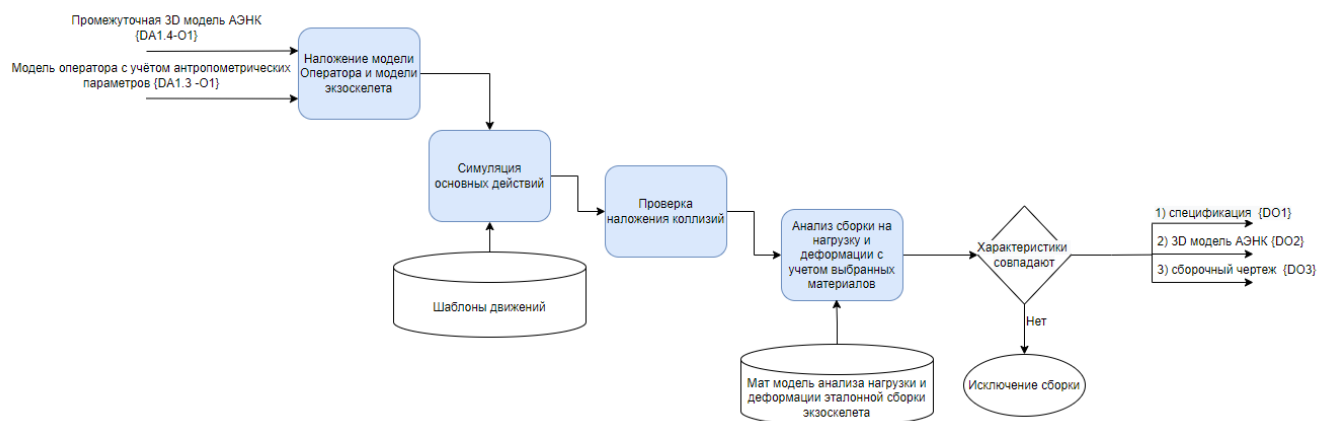


Рисунок 32 - Схема декомпозиции проектной процедуры А1.4

Таким образом набор проектных процедур позволяет произвести индивидуальное проектирование и компьютерное моделирование вариантов сборок экзоскелета нижних конечностей с последующей возможностью выгрузки чертежа, спецификации и 3D-модели.

Результирующая модель АЭНК удовлетворяет эргономическим требованиям и соответствует заявленным показателям эффективности и включает в себя:

- 1) перестроенную 3D-модель АЭНК {DO1},
- 2) сборочный чертеж перестроенной модели {DO2},
- 3) спецификацию электро- и радиокомпонент {DO3}.

3.2 Формализация требований к АЭНК

3.2.1 Формализация входных данных и требований к АЭНК

На основе анализа недостатков существующих подходов к проектированию АЭНК, не учитывающих антропометрические характеристики оператора, в

работе предложена модель оператора. Значения параметров замера необходимо использовать в качестве входных данных для последующих проектных процедур. На рисунке 33 представлены области измерения антропометрических параметров оператора.

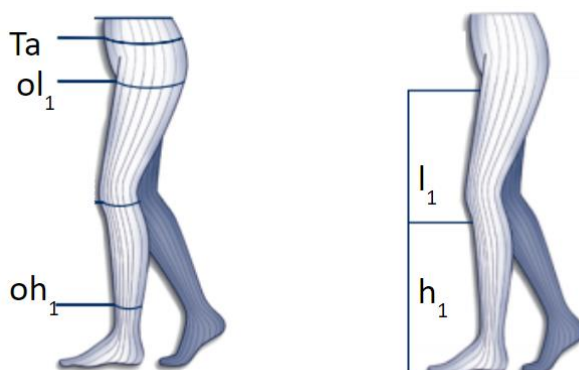


Рисунок 33 - Области измерения антропометрических параметров оператора

Способы измерения и погрешности при измерении параметров оператора представлены в таблице 14.

Таблица 14 - Характеристики измерений антропометрических параметров оператора

№ п.п	Обозначение параметра	Единица измерения	Наименование параметра	Способ измерения	Погрешность
1	h1	см	длина левой голени	измерительная лента	+/- 0.3 см
2	h2	см	длина правой голени	измерительная лента	+/- 0.3 см
3	l1	см	длина левого бедра	измерительная лента	+/- 0.3 см
4	l2	см	длина правого бедра	измерительная лента	+/- 0.3 см
5	oh1	см	обхват левой голени	измерительная лента	+/- 0.3 см

№ п.п	Обозначение параметра	Единица измерения	Наименование параметра	Способ измерения	Погрешность
6	oh2	см	обхват правой голени	измерительная лента	+/- 0.3 см
7	ol1	см	обхват левого бедра	измерительная лента	+/- 0.3 см
8	ol2	см	обхват правого бедра	измерительная лента	+/- 0.3 см
9	c1	см	Размер левой стопы	измерительная лента	+/- 0.3 см
10	c2	см	Размер правой стопы	измерительная лента	+/- 0.3 см
11	Ta	см	Обхват талии	измерительная лента	+/- 1.0 см
12	ba	см	Длина спинной части	измерительная лента	+/- 2.0 см
13	Omas	кг	Вес оператора	Весы	400 г.

Проектирование электро и радиокомпонент осуществляется на основе заданных эксплуатационных требований (DRQ1).

3.2.2 Эксплуатационные требования АЭНК

В рамках анализа области применения экзоскелетов были классифицированы эксплуатационные требования к АЭНК, на основании которых необходимо производить подбор электро-радио компонент (рис. 34):

- мобильность пациента – требования к возможности перемещения экзоскелета в пространстве;
- локализация – область применения экзоскелета относительно тела оператора;
- область применения – область применения экзоскелета;

- количество функций – количество полезных функций выполняемых экзоскелетов;
- материалы – материалы, из которых состоит экзоскелет;
- источник энергии – элемент, питающий активные элементы экзоскелета;
- стоимость – итоговая стоимость экзоскелета;
- вес – общий неснаряжённый вес экзоскелета;
- тип управления – способ передачи экзоскелету команд о паттернах движения.



Рисунок 34 - Классификация экзоскелетов

3.3 Проектные процедуры метода автоматизированного проектирования АЭНК

Для решения проблемы проектирования АЭНК под антропометрические данные оператора предлагается автоматизировать этапы проектирования, применяя методы параметрического синтеза. Inventor API позволяет работать с параметрами модели внутри среды проектирования, меняя исходные модели и чертежи под заданные размеры. Этапы, которые имеют возможность автоматизации, показаны на рисунке 35.

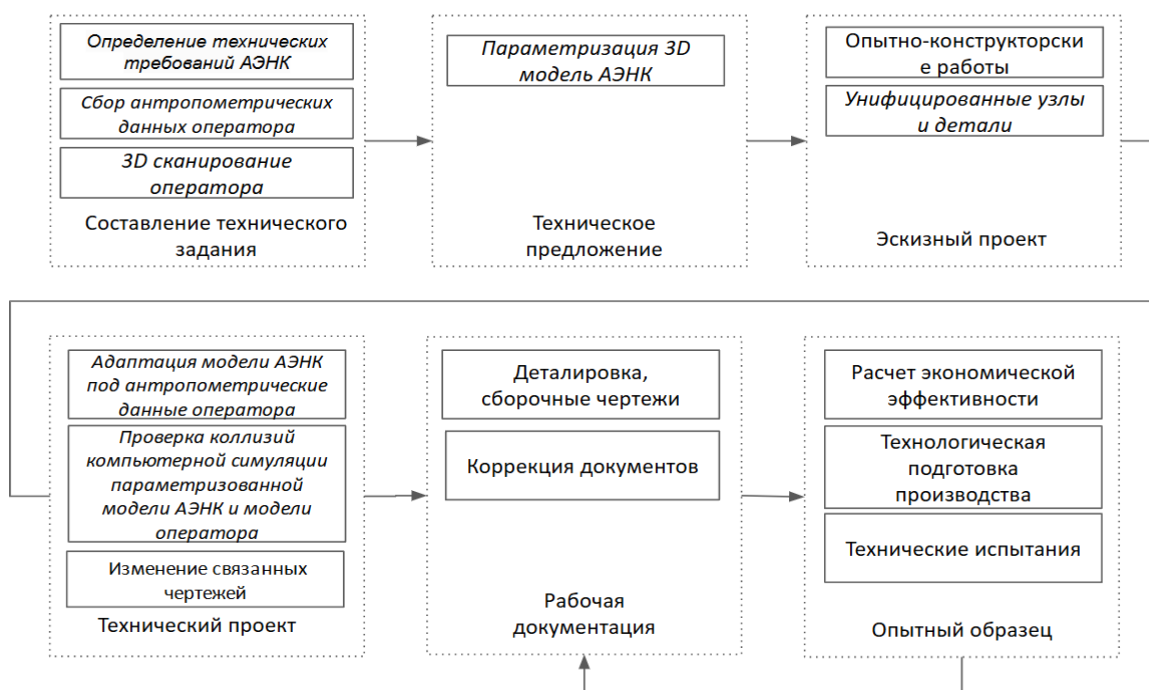


Рисунок 35 - Анализ потенциальных этапов проектирования экзоскелетов нижних конечностей

Для реализации метода необходима разработка набора процедур, включающих в себя:

- Проектную процедуру создания 3D-модели оператора, включающую в себя применение 3D-сканера для повышения точности моделирования эргономики АЭНК под антропометрические данные оператора.
- Разработку параметризованной 3D-модели АЭНК включающую в себя набор параметризованных деталей, необходимых для создания сборки механизма и проведения компьютерных симуляций, позволяющих проверить эргономику АЭНК.
- Проектную процедуру анализа динамики сборки проектного решения АЭНК, включающую в себя применение разработанной параметризованной модели АЭНК с компьютерной моделью оператора, полученной в рамках процедуры создания 3D-модели оператора.
- Проектную процедуру выбора электро- и радиокомпонент, основанную на эксплуатационных требованиях к АЭНК.

3.3.1 Проектные процедуры создания 3D-модели оператора

Процесс сканирования объекта зависит от применяемого 3D-сканера, ключевым параметром является четкость полученной модели.

В работе предлагается метод построения эталонной модели оператора с использованием 3D-сканера, схема метода представлена на рисунке 36.

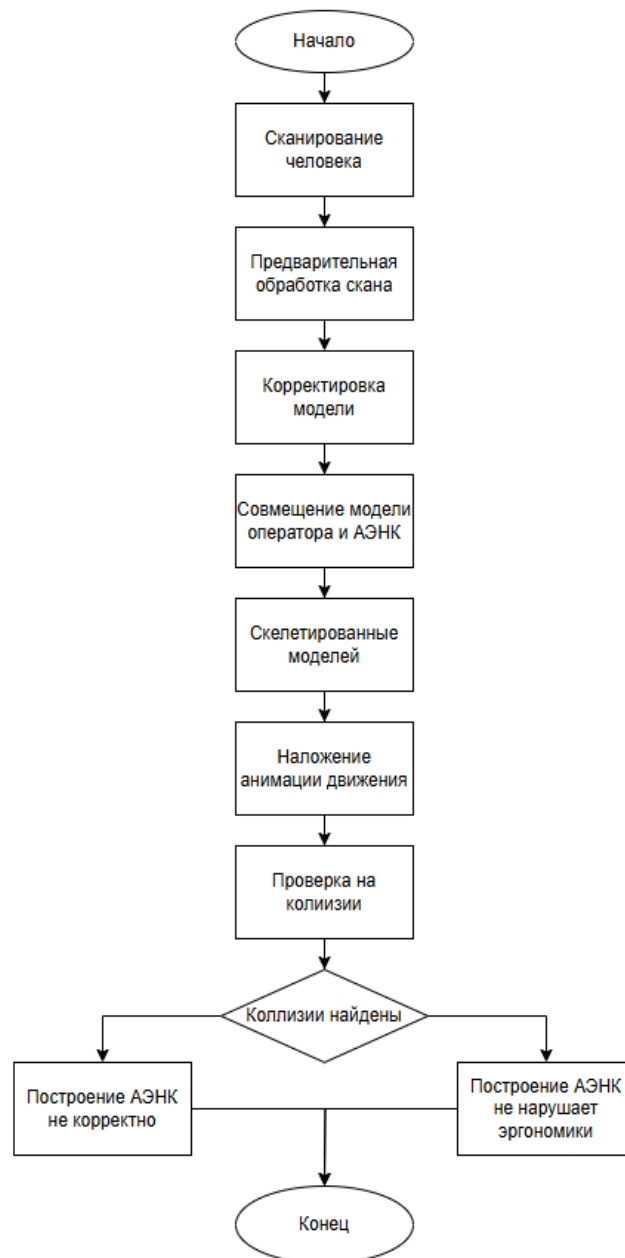


Рисунок 36 - Схема метода построения эталонной модели оператора

На первом этапе построения модели оператора производится сканирование человека, под которого будет разработан персонализированный экзоскелет. 3D-модель человека получают путем его сканирования в положении ног на ширине плеч.

Сканирование человека производится при помощи ручного оптического 3D-сканера, позволяющего получить облако точек, необходимых для построения компьютерной 3D-модели (рисунок 37).

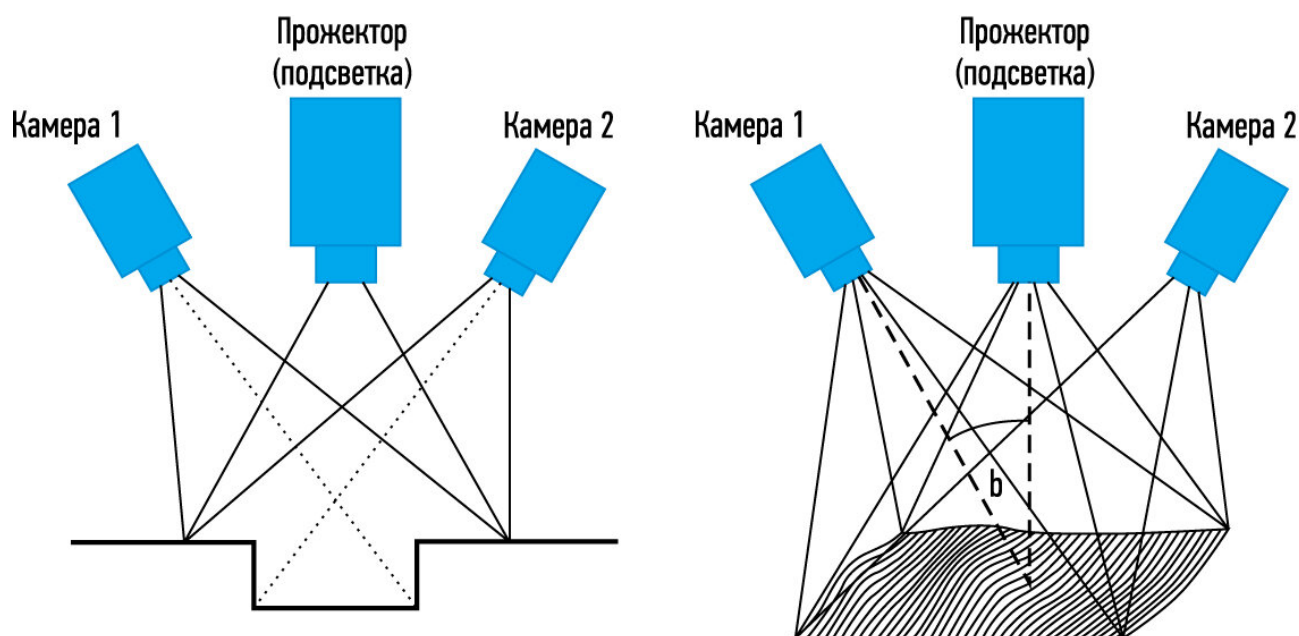


Рисунок 37 - Принцип работы 3D-сканера

Рекомендованные характеристики сканера:

- дистанция сканирования: от 0,4 м до 1 метров;
- скорость сканирования: до 2 000 000 точек в секунду;
- возможность цветного сканирования: 24 бита на пиксель
- режимы работы: free scan;
- точность сканирования: от 0,1 мм;
- размер одного снимка: 214 x 148 мм;
- угол области сканирования: $30 \times 21^\circ$;
- скорость сканирования: 2 млн.точек/сек;

- поддерживаемые форматы: OBJ, PLY, WRL, STL, AOP, ASCII, Disney PTEX, E57, XYZRGB.

Для качественного сканирования необходимо соблюдение следующих условий:

- необходимо обращать внимание на объект на экране, больше, чем на реальный объект, так как во время сканирования на экране компьютера отображаются генерируемые слои;

- необходимо убедиться, что программное обеспечение сканера позволяет точно совмещать кадры. Для этого: нельзя перемещать сканер слишком быстро; необходимо держать объект как можно ближе к центру поля зрения; необходимо сохранять такую ориентацию сканера, которая обеспечивает достаточное заполнение поля зрения поверхностями. Для понимания расстояния до объекта сканирования предусмотрена тепловая карта, которая показана на рисунке 38;

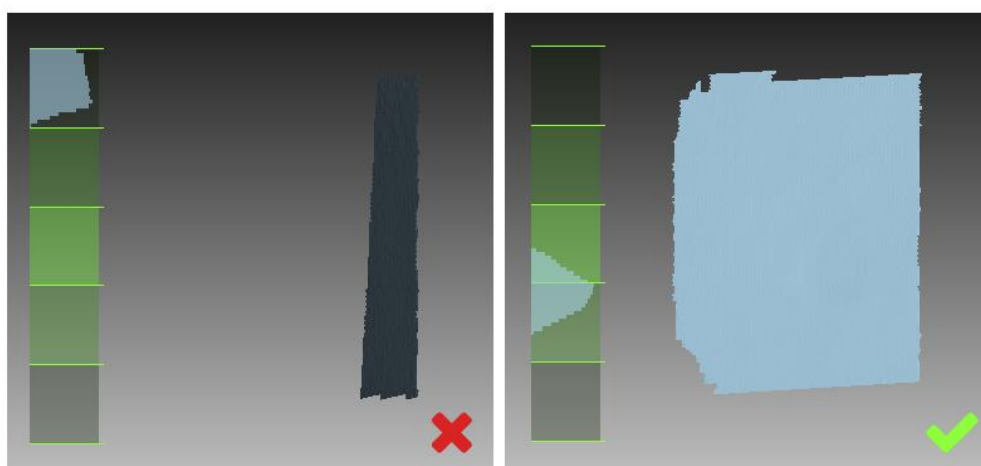


Рисунок 38 - Ориентация сканера и восстановленные поверхности

- если происходит сканирование объекта в несколько сканов, то для успешного их совмещения необходимо снять общий участок в каждом из них;

- если происходит сканирование объекта в один скан, необходимо снять объект со всех сторон независимо от направления, плюс немного больше (360+ градусов);

- нельзя записывать слишком много кадров: необходимо убедиться, что все участки достаточно отсканированы, но нельзя снимать их дважды, за исключением случаев записи областей перекрытия для успешного совмещения.

Подготовка к сканированию объекта.

- необходимо создать равномерное освещение без прямых солнечных лучей;
- свободная область вокруг объекта сканирования 3м².

Завершив сканирование объекта со всех нужных ракурсов и получив достаточное количество данных, можно приступить к обработке 3D-модели оператора.

Процесс создания законченной модели включает в себя следующие этапы:

- 1) ревизия и редактирование сканов;
- 2) сборка сканов;
- 3) глобальная регистрация;
- 4) создание моделей (склейка);
- 5) обработка моделей;
- 6) текстурирование (если необходимо).

На втором этапе необходимо провести предварительную обработку сканов: удалить ненужные поверхности, разделить на отдельные сканы некорректно совмещенные области (если имеются) и вырезать из сцены посторонние объекты [103].

Артефакты полученной модели представлены на рисунке 39.

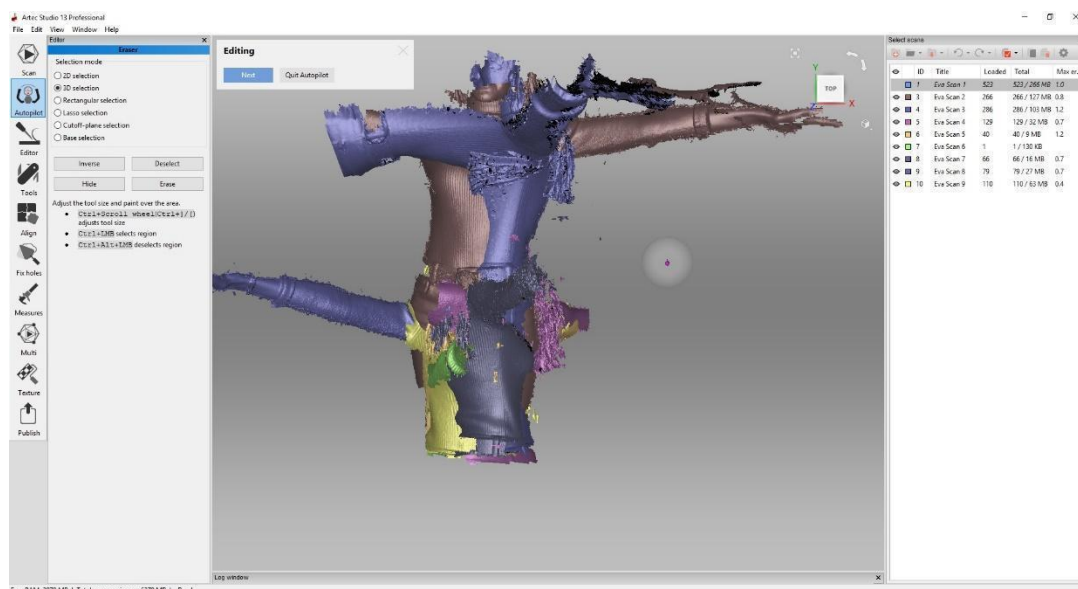


Рисунок 39 - Артефакты модели

При сканировании на сцене могут появляться артефакты. Они представляют собой небольшие поверхности, отстоящие от основных поверхностей. Они подлежат удалению, так как могут испортить модель и образовать ненужные фрагменты. Существует два способа их удаления: перед склейкой (превентивный подход) и после склейки. Превентивный подход предпочтителен, так как он уменьшает вероятность порчи модели, предотвращая приклеивание полигонального шума к главной поверхности.

На третьем этапе производится обработка 3D-модели.

Прежде чем загрузить модель в среду пост обработки необходимо проверить настройки систем измерения, иначе экспортированная модель в единицах измерения будет некорректного размера. Для этого необходимо зайти в меню Customize – Unit setup, и в настройках Display unit scale выбрать единицей измерения Millimeters (рисунок 40).

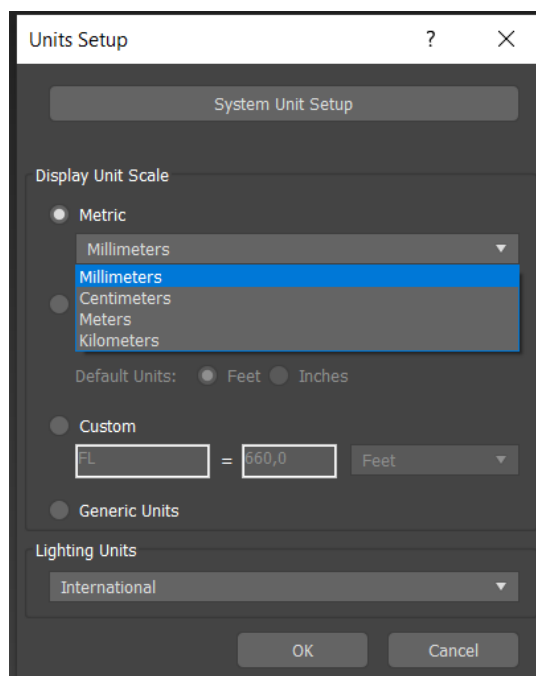


Рисунок 40 - Выбор миллиметров в качестве единиц для отображения

Затем необходимо нажать на кнопку System Unit Setup и в открывшемся окне установить, что Unit будет равен 1,0 Millimeters (рис. 41).

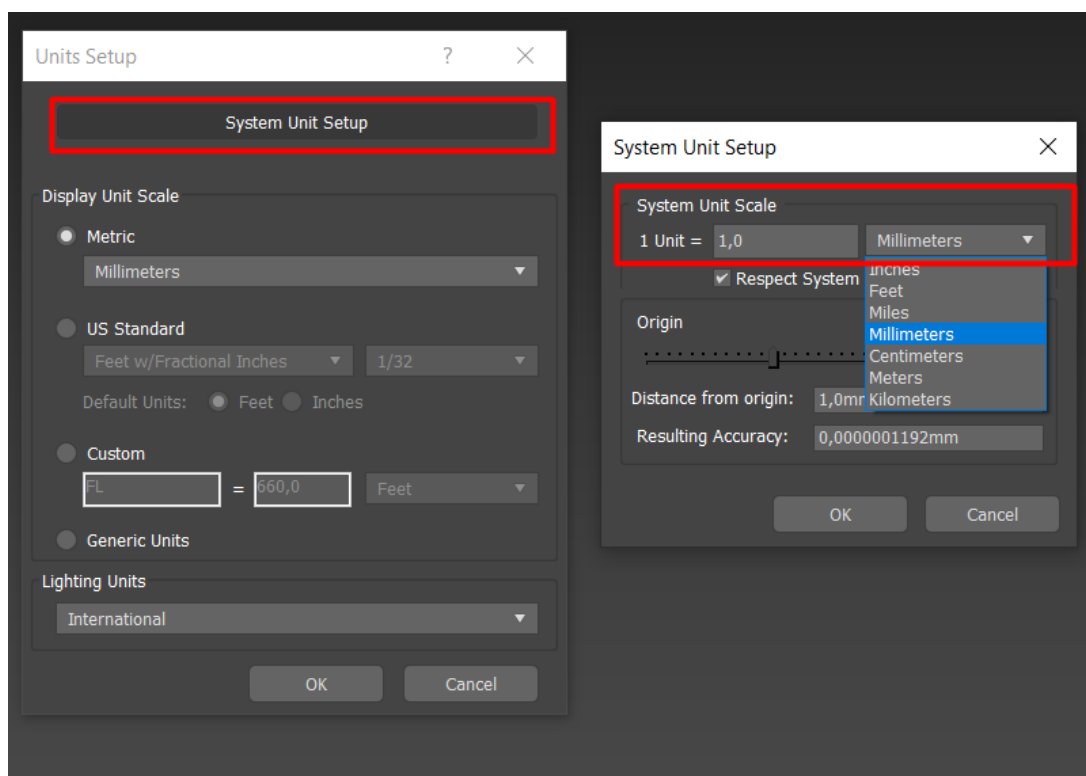


Рисунок 41 - Выбор миллиметров в качестве единиц измерения в системе

Только после проведения данных действий можно загружать модели для дальнейшей обработки.

Необходимо загрузить модель в систему перетягивая (drag&drop) из папки файл obj (рис. 42).

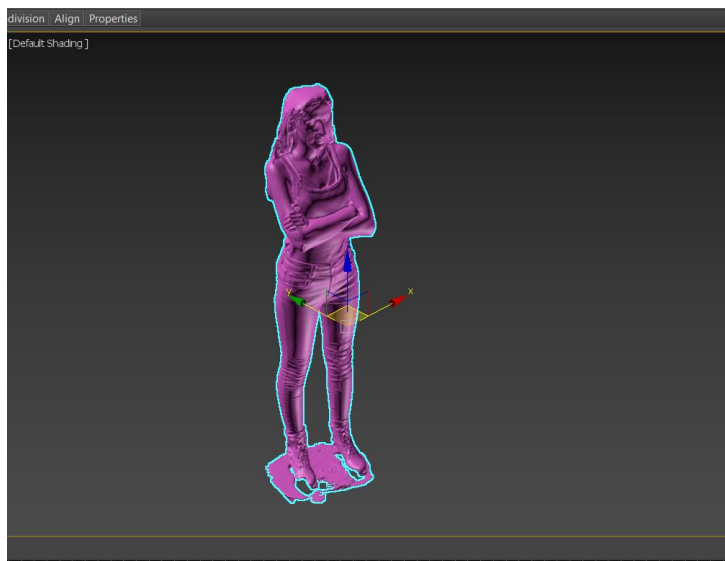


Рисунок 42 - Полученная модель

Сетка модели представлена на рисунке 43.

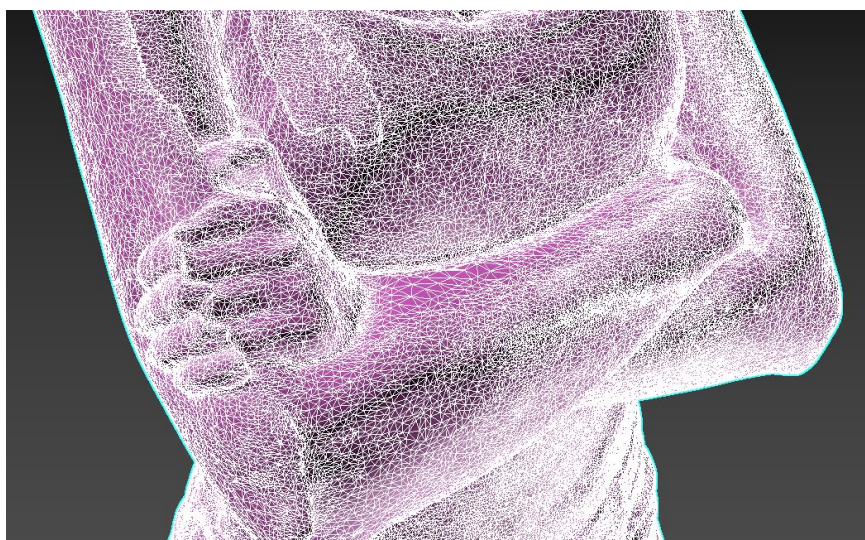


Рисунок 43 - Сетка сканированной модели

Количество полигонов 1 000 000 (рис. 44).

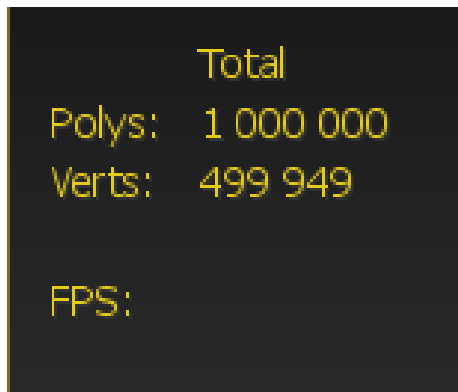


Рисунок 44 - Полигоны модели

Прежде чем оснащать модель “костями” для анимации необходимо оптимизировать модель, чтобы избежать зависания сцены. Для этого можно использовать модификатор ProOptimizer. Чтобы применить данный модификатор к модели необходимо перейти в режим Modify и выбрать из списка модификаторов модификатор ProOptimizer.

Затем необходимо нажать на кнопку Calculate, выделенную на рисунке 45, чтобы модификатор просчитал количество полигонов.

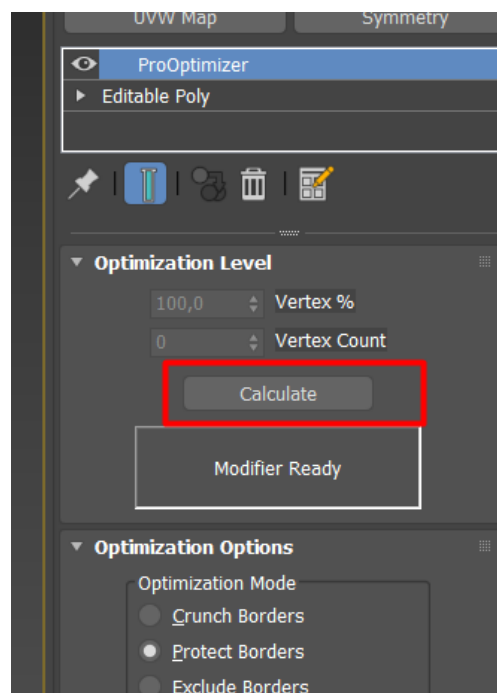


Рисунок 45 - Кнопка для вычисления

После того как модификатор закончит подготовку модели для оптимизации можно менять процент вершин либо установить точное количество (рисунок 46).

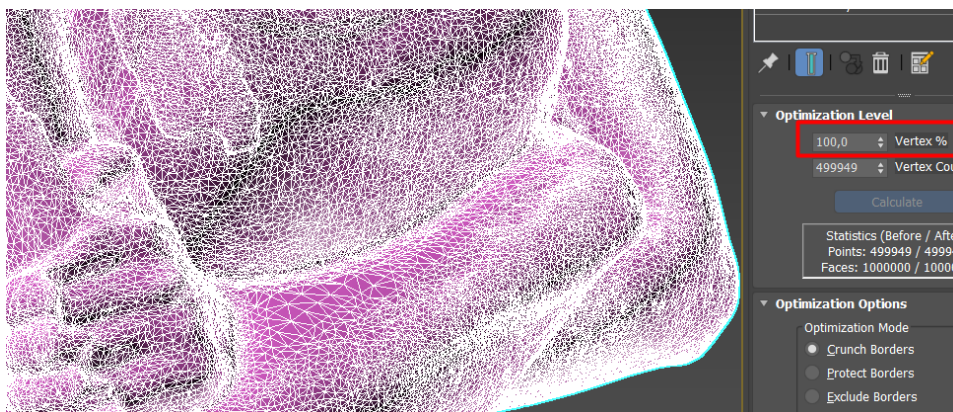


Рисунок 46 - Полная полигональность модели

На рисунке 47 видно, что сетка стала менее плотная. Детализация модели также уменьшилась, однако в рамках данной работы это значение не имеет, так как главной задачей является сохранение длины и ширины нижних конечностей, на что модификатор никакого влияния не оказывает.

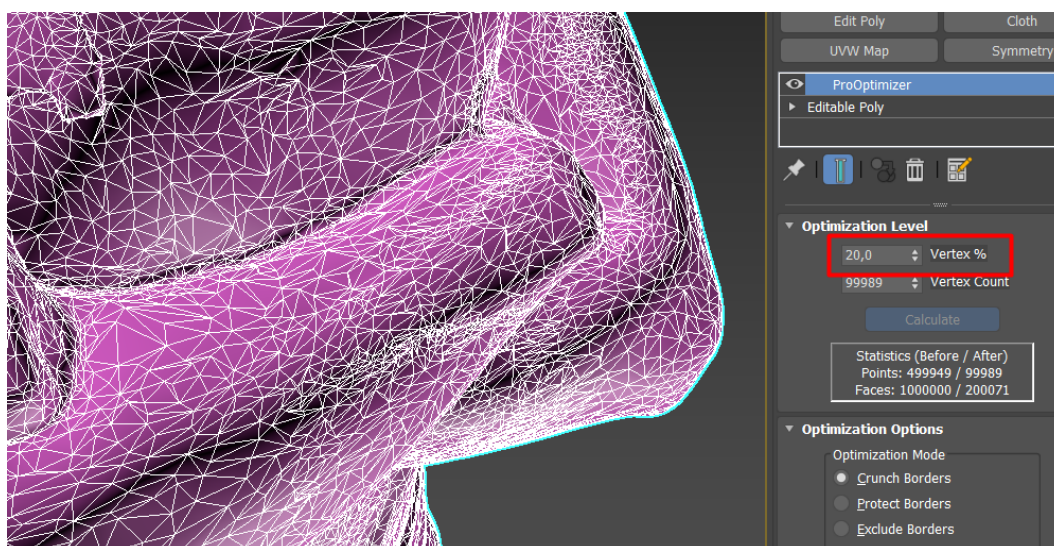


Рисунок 47 - Сокращенная полигональность модели

После оптимизации модель нужно сконвертировать в Editable Poly и удалить артефакты, которые образовались во время сканирования, артефакты выделены на рисунке 48.

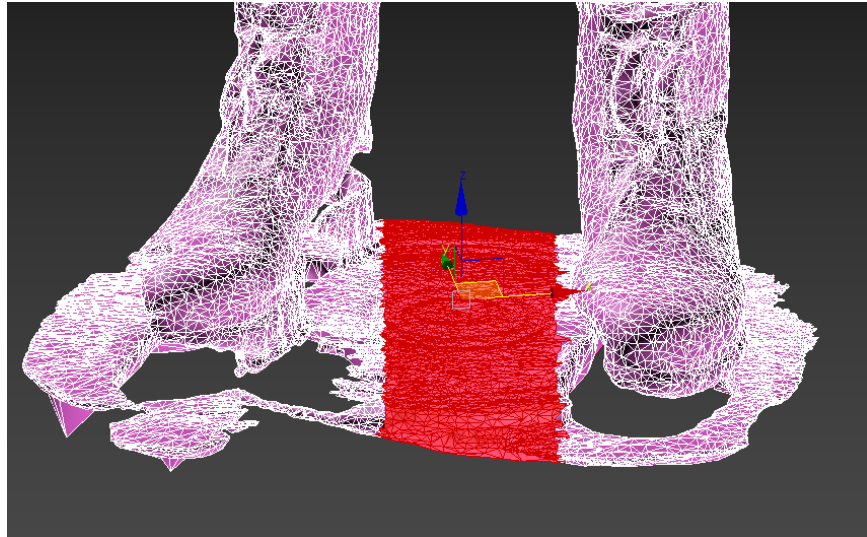


Рисунок 48 - Выделения артефакта для удаления

Главное условие - не изменять размеры модели, не делать ноги тоньше/толще или короче/длиннее.

Для того чтобы работать с моделью в этой программе изначально необходимо экспортировать ее из 3ds Max. Для этого необходимо выделить модель и экспортировать ее в формате obj.

После открытия программы пост обработки мы закрываем окно LightBox, чтобы оно не мешало, нажав на кнопку LightBox (рис. 49).

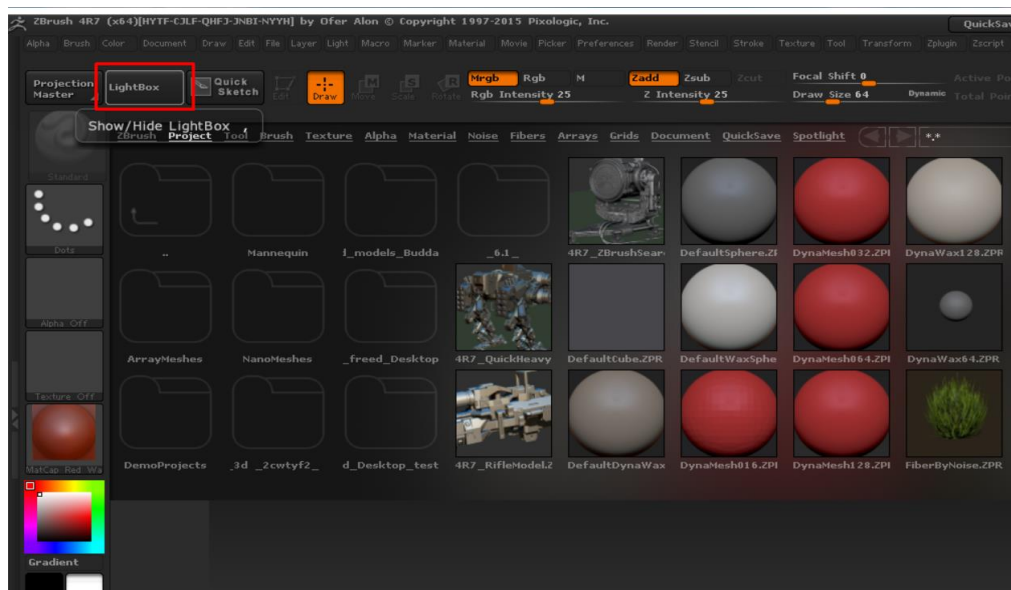


Рисунок 49 - Закрывание окна LightBox

Затем из панели Tool нужно нажать на кнопку Import (рис. 50) и выбрать подготовленную модель.

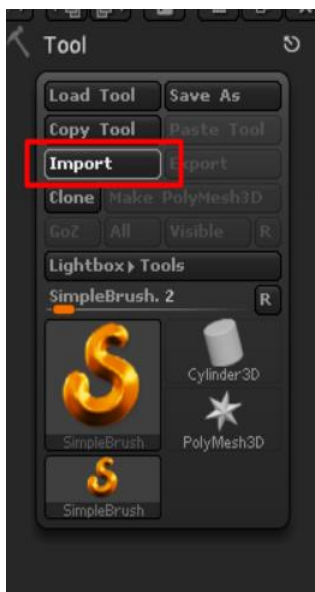


Рисунок 50 - Кнопка импорта модели в Zbrush

Модель появилась в LightBox, для того чтобы поместить ее в сцену нужно нажать на окно сцены и построить (растянуть ее там) также как строятся обычные примитивы в любых программах.

Сразу же после помещения модели необходимо нажать на кнопку edit (рисунок 51). Если этого не сделать выбранный из LightBox объект будет создаваться еще раз, то есть в сцене появится 2 одинаковых модели.



Рисунок 51 - Кнопка Edit

В программе есть множество кистей для скульптинга (рис. 52). Кисть для сглаживания можно вызвать, зажав клавишу Shift.



Рисунок 52 - Кисти ZBrush

Проводить очень качественное скульптурирование не имеет смысла, достаточно сгладить артефакты на нижней части тела. Обработка верхней части тела не обязательна в виду проектирования АЭНК. На рисунке 53 изображена нога человека до и после сглаживания артефакта.

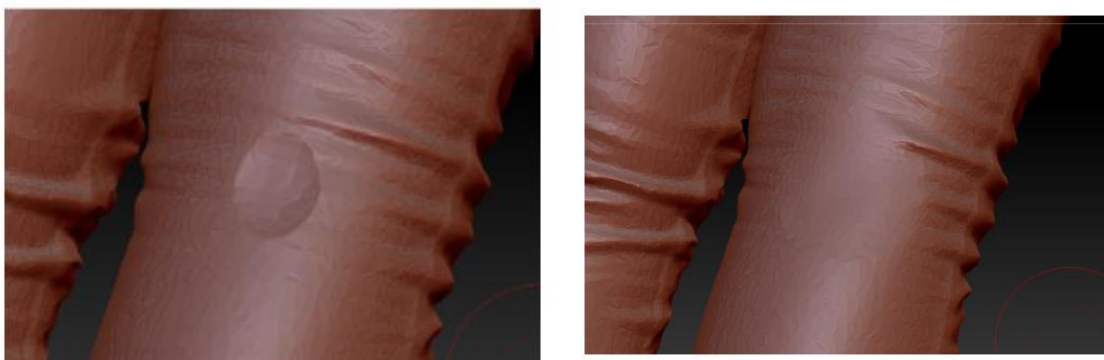


Рисунок 53 - Удаление артефакта на ноге при помощи кисти сглаживания

После модификации модели ее необходимо загрузить обратно в 3ds Max для создания анимации.

Раскрашивать модель не нужно, в примере это сделано для наглядности.

Ретопологию модели делать не нужно так как это увеличит итерационность метода. В рамках данной работы модель с неправильной сеткой будет себя вести аналогично модели с правильной.

На 4 этапе производится объединение модели оператора со скелетом анимации. Скелетом для модели является примитив Biped – иерархия костей, которая присутствует в 3ds Max по умолчанию. Найти ее можно в командной панели во вкладке Create – System (рис. 54).

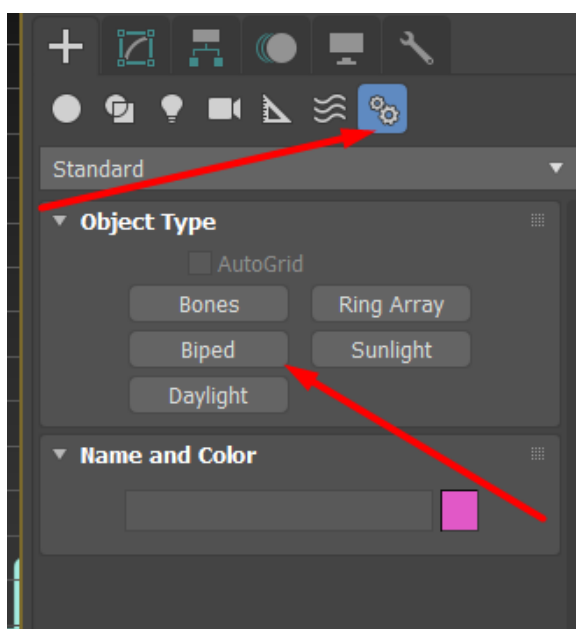


Рисунок 54 - примитив Biped

Необходимо создать скелет, соответствующий размерам модели, и имеющий сочленения в подвижных областях, таких как колени и таз (рис. 55) [104].

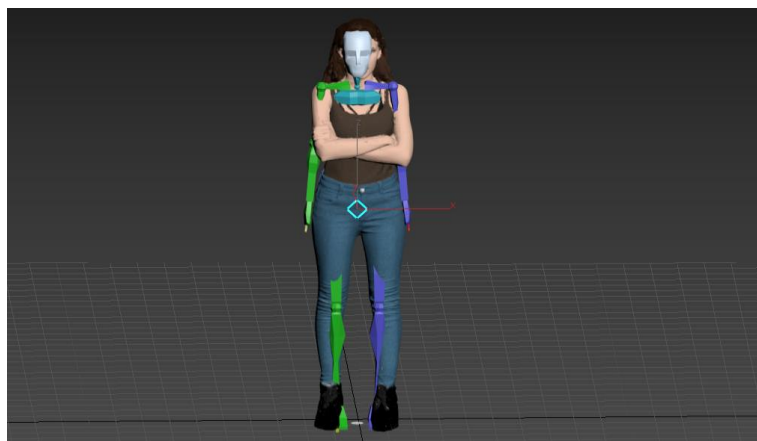


Рисунок 55 - Создание скелета человека

Так как будет производиться настройка экзоскелета нижних конечностей и руки модели скрещены на груди, у скелета руки можно удалить, убрав галочку Arms во вкладке Motion (рис. 56).

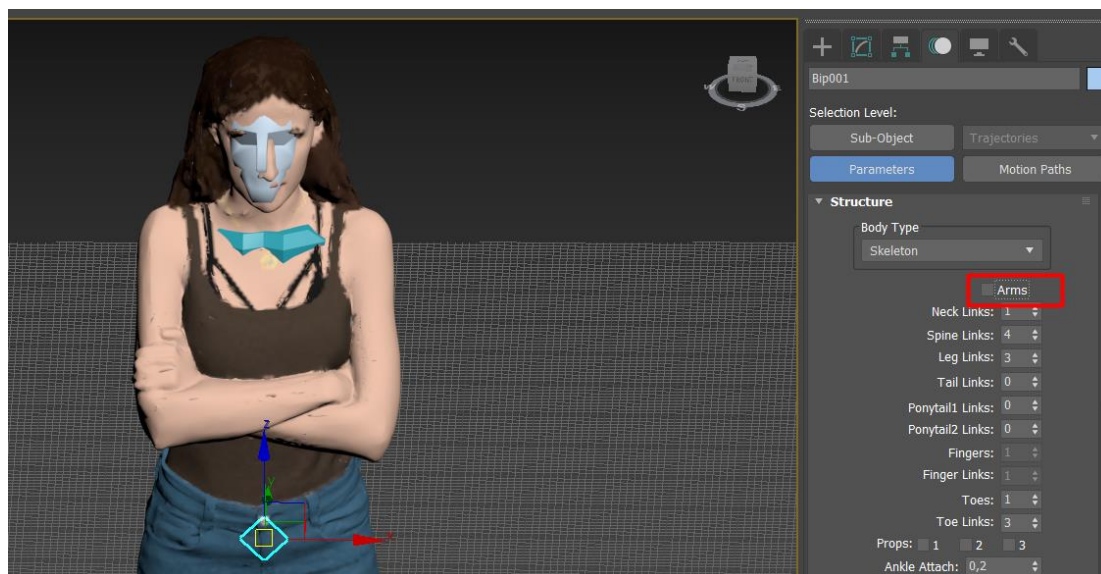


Рисунок 56 - Удаление рук скелета

В данном случае в параметре Body Type был установлен тип Female, параметр Body Type отвечает на первоначальную настройку длины костей модели и может быть отредактирован дополнительно.

Изменить размер костей можно в режиме Figure Mode при помощи кнопки масштабирования элементов.

Подгонять скелет необходимо таким образом, чтобы суставы скелета находились на предполагаемом месте изгиба модели. На рисунке 57 отмечена кнопка активации режима.

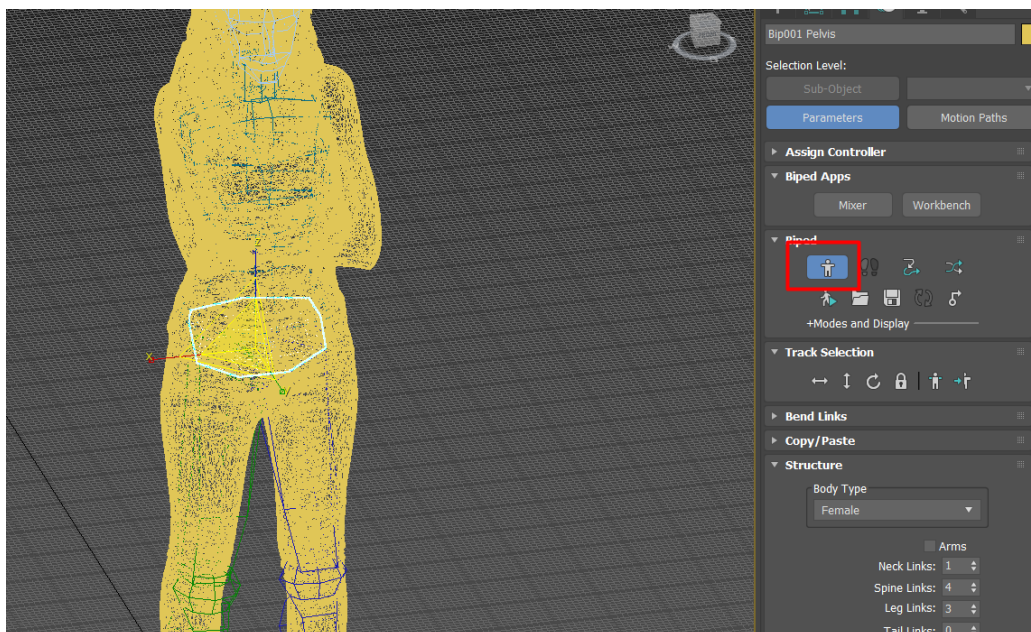


Рисунок 57 - Активация режима Figure Mode

После завершения масштабирования элементов скелета можно переходить к его привязке к модели. Для этого к модели человека необходимо применить модификатор Skin. Для того чтобы добавить кости в список костей модификатора необходимо нажать кнопку Add, выделенную на рисунке 58 и из открывшегося списка примитивов выбрать кость верхнего уровня, в данном случае Bip001.

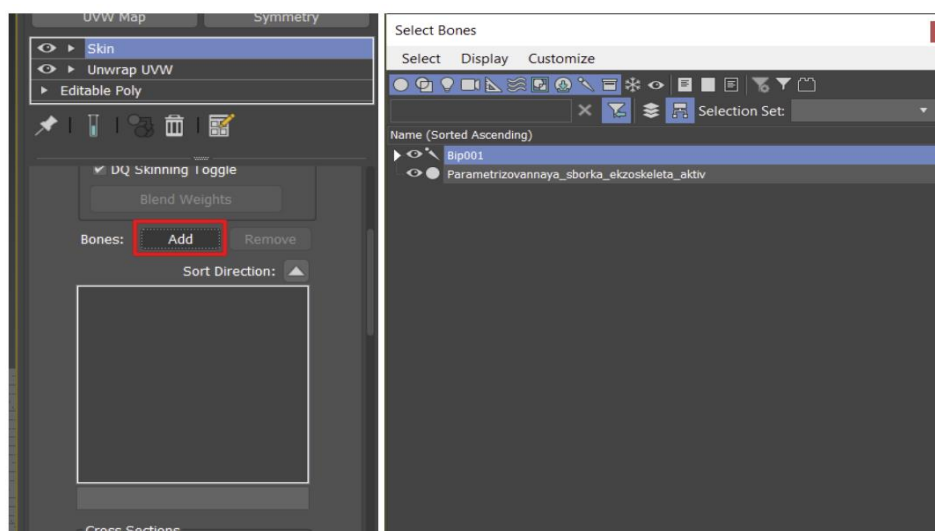


Рисунок 58 - Привязка существующего скелета к скану человека

Важно, чтобы в список попали также дочерние объекты кости верхнего уровня, для этого, прежде чем выбирать кость Bip001 из списка, необходимо удостовериться, что в меню Select установлена галочка напротив Select Children (рис. 59).

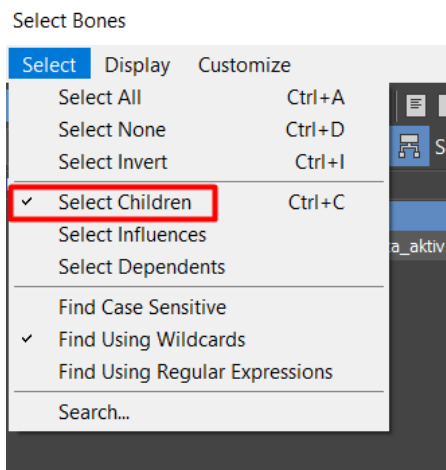


Рисунок 59 - Отметка дочерних объектов кости

Если после привязки костей к модели попробовать переместить какую-нибудь кость, например, ступню Foot, будет видно, что скелет привязался к модели некачественно. Для более точной настройки необходимо нажать на кнопку Edit Envelopes (рис. 60).

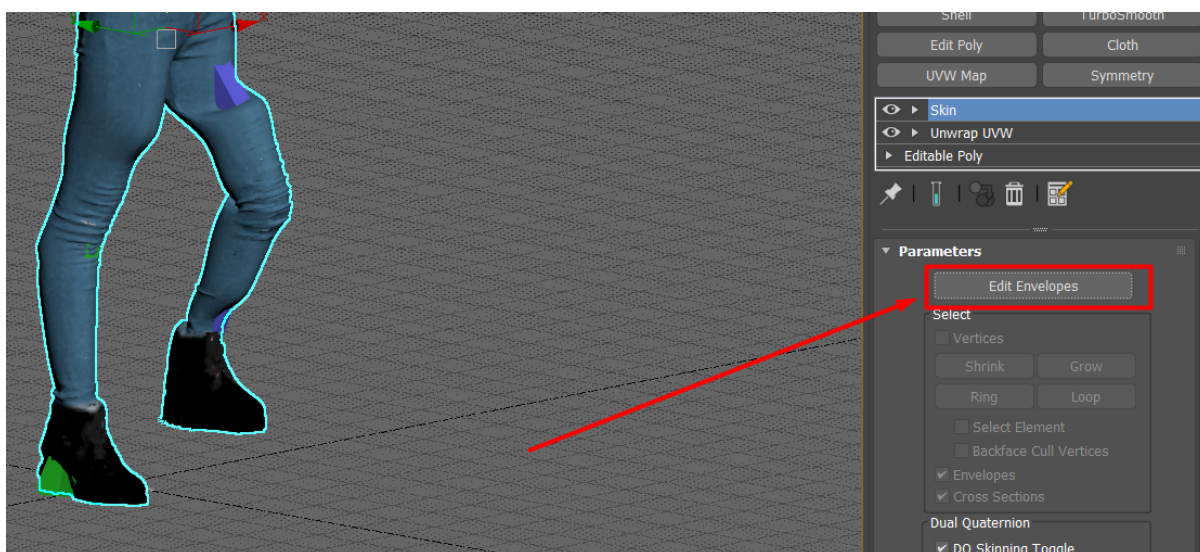


Рисунок 60 - Кнопка Edit Envelopes

У каждой кости имеются контрольные точки (рис. 61), модифицируя которые можно изменить привязку кости к модели.

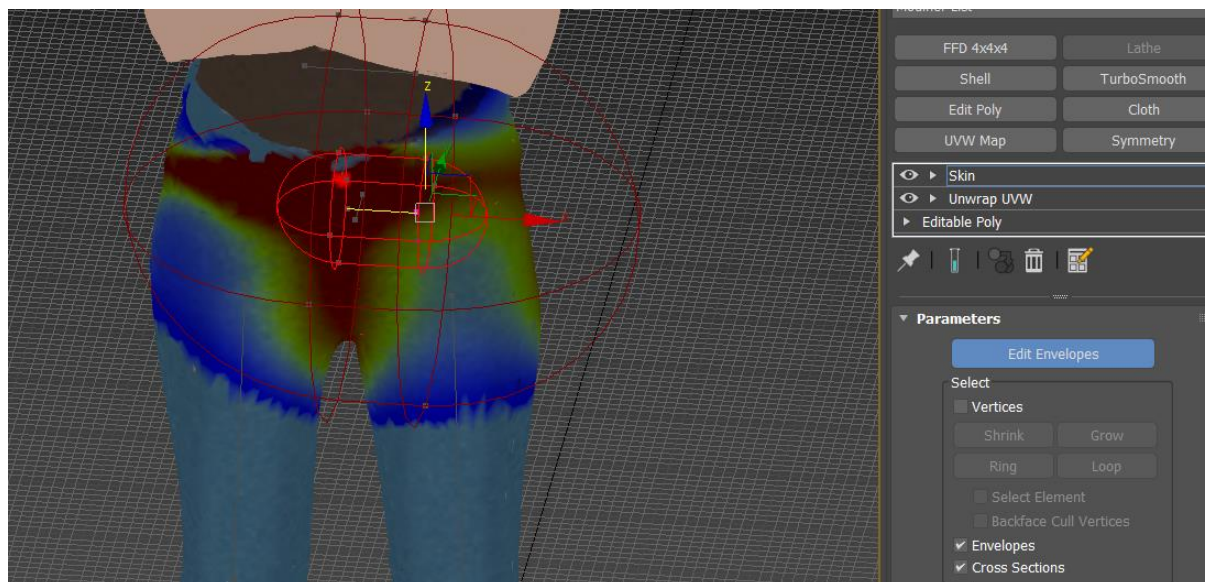


Рисунок 61 - Радиус воздействия кости на оболочку

Точки, отмеченные на рисунке 62, предназначены для перемещения вершин воздействия.

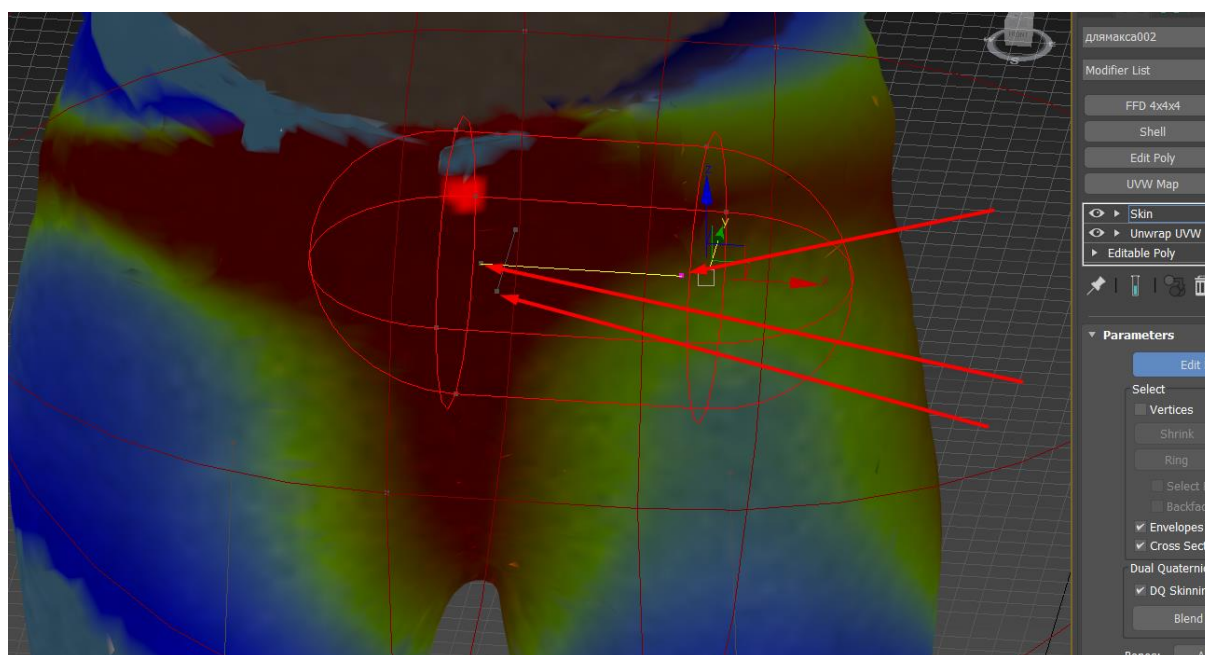


Рисунок 62 - Точки для перемещения вершин воздействия

А перемещая окружности, изображенные на рисунке 63, можно изменить градус.

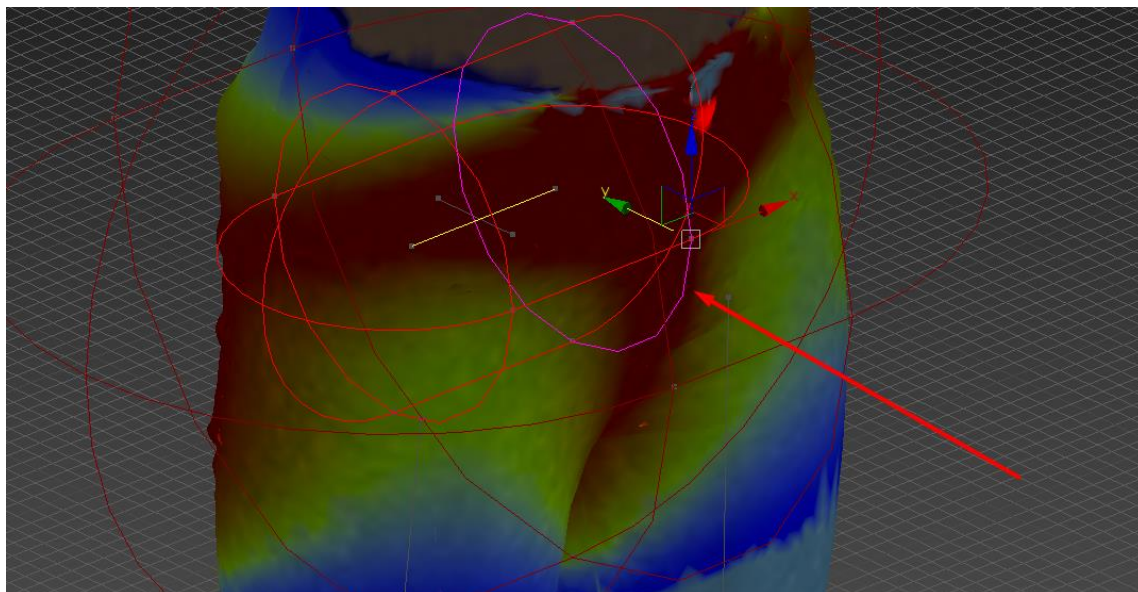


Рисунок 63 - Окружности для изменения радиуса воздействия

Красным цветом отмечена область с максимальным искажением при анимировании, зеленый цвет - среднее влияние, синий - слабое.

Привязку скелета к модели можно настраивать повершинно. Каждой вершине в модели можно установить степень привязки к определенной кости. Такая настройка необходима для того, чтобы настроить более плавную привязку, а также удалить привязку вершин, которые были установлены по умолчанию, но в данном участке не нужны, например, когда кость правой ступни также привязывается к левой ступне. Чтобы редактировать привязку повершинно, необходимо выделить рычаг воздействия и установить галочку Vertices (рис. 64).

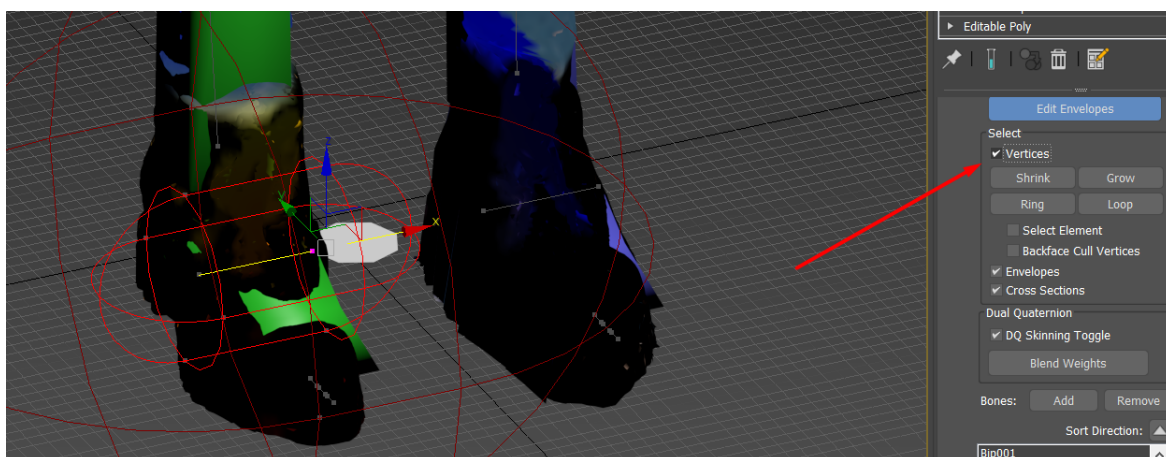


Рисунок 64 - Активация редактирования привязки поверхинно

На рисунке 65 видно, что рычаг правой ноги влияет также на левую ногу (на левой ноге присутствует область, окрашенная в синий цвет). Это значит, что во время анимации, передвижение правой ноги приведет также в движение полигоны левой ноги. Это недопустимо, поэтому данные вершины необходимо исключить из влияния правого рычага.

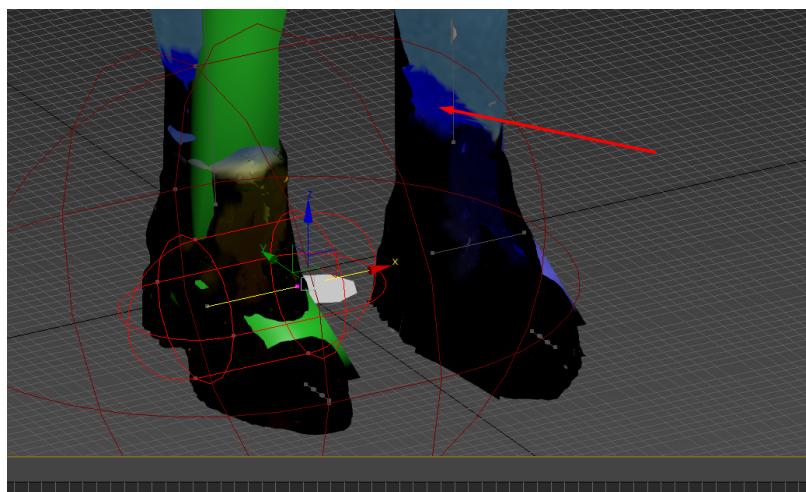


Рисунок 65 - Область на левой ноге, к которой по умолчанию привязались кости правой ноги

Для этого необходимо выделить все задействованные вершины (рис. 66) левой ноги и обнулить абсолютный эффект (рис. 67), нажав на стрелки правой кнопкой мыши.

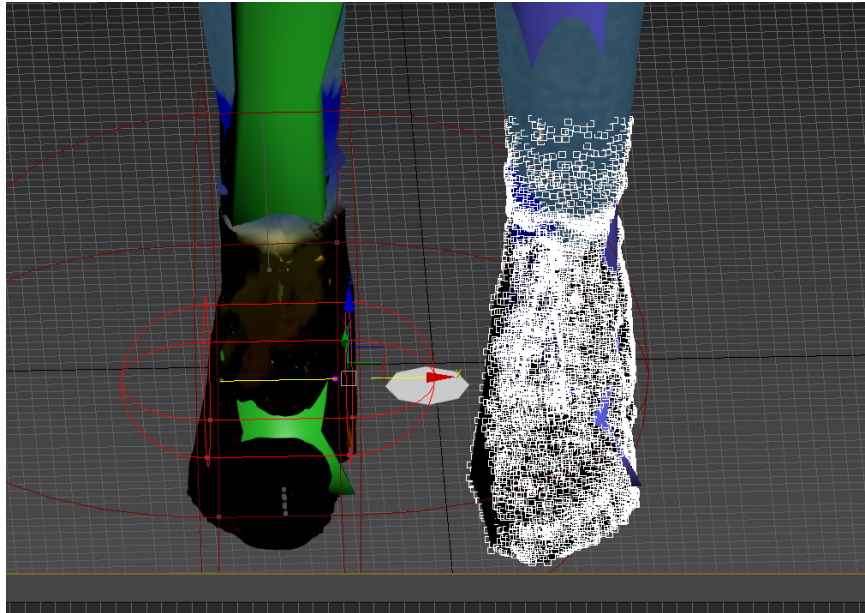


Рисунок 66 - Выделение вершин

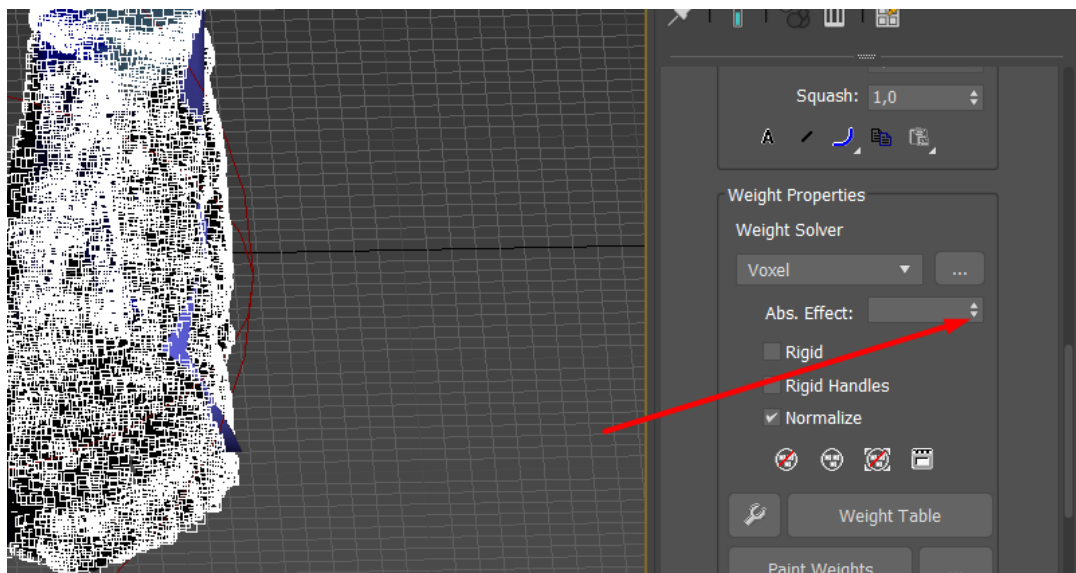


Рисунок 67 - Обнуление эффекта влияния

Если выделить определенную вершину, в ячейке Abs. Effect будет присутствовать конкретное число в процентах, а так как вершин было выделено несколько поле оказалось пустым.

Вершина, выделенная на рисунке 68, имеет значение 0, значит не зависит от выделенного рычага. Область, которая ранее была подсвечена синим цветом теперь цвет не имеет.

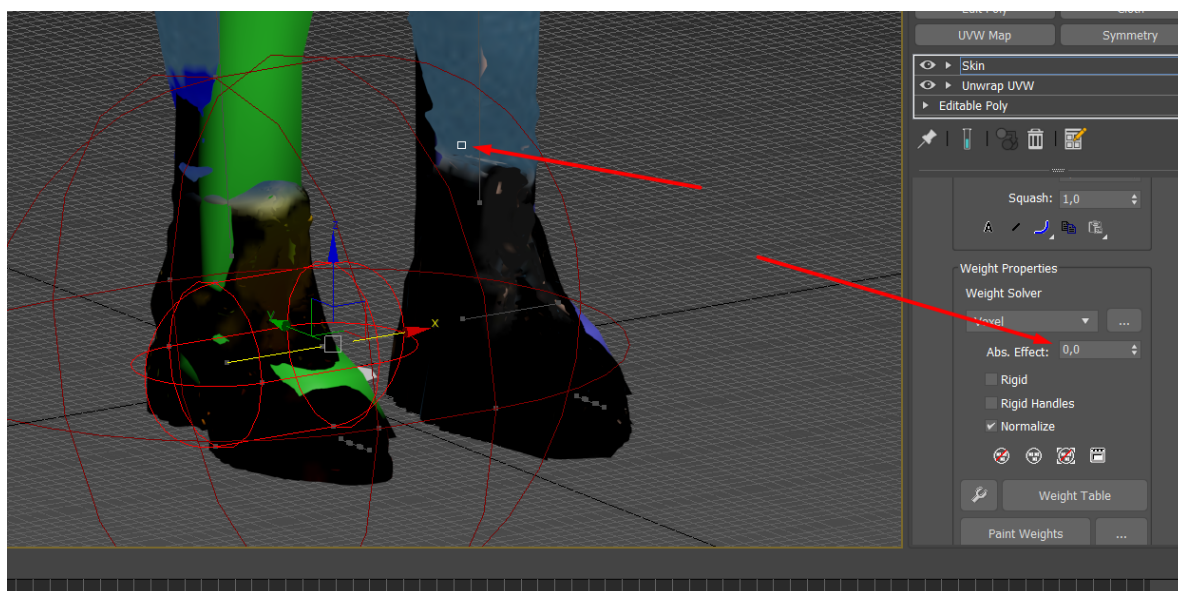


Рисунок 68 - Отсутствие на левой ноге влияния костей правой ноги

Перемещая рычаги влияния и изменяя значение Abs. Effect, необходимо настроить привязку костей к модели таким образом, чтобы анимация модели не приводила к появлению серьезных артефактов. Для наглядности при настройке можно перемещать, сгибать кости и привязывать модель в данном положении.

3.3.2 Разработка параметризованной 3D-модель АЭНК

Для работы системы была спроектирована эталонная модель экзоскелета нижних конечностей в системе Autodesk Inventor 2019 для дальнейшей работы с протоколом Inventor API, на основании которой происходит дальнейшая адаптация деталей экзоскелета под антропометрические данные оператора. В рамках работы используется Inventor API для создания надстройки для параметризации эталонной модели [105].

Список деталей активного экзоскелета:

- Каркас спины: Соединительный элемент экзоскелета, удерживающий спину оператора.
- Каркас бедра: Соединительный элемент экзоскелета, поддерживающий бедро оператора.

- Каркас голени: Соединительный элемент экзоскелета, поддерживающий голень оператора.
- Крепление для ног: Элемент прилегания ног оператора к экзоскелету.
- Каркас левой стопы: Соединительный элемент экзоскелета, поддерживающий левую стопу оператора.
- Каркас правой стопы: Соединительный элемент экзоскелета, поддерживающий правую стопу оператора.
- Электромагнитный привод: Электромагнитный привод для бедра.
- Электромагнитный привод с удлиненным штоком: Электромагнитный привод для коленей.
- Датчик давления: Датчики давления, расположены на бедре, голени и стопе. Для управления приводами.
- Соединительный элемент: Соединительный элемент для шарнира голени и стопы.
- Элемент шарнира: Элемент шарнира, соединяющий каркас спины и бедро.
- Элемент шарнира 2: Элемент шарнира, соединяющий каркас бедро и привод.
- Болт шарнирный: Болт для соединения двух частей шарнирного механизма.
- Обратный болт шарнира: Обратный болт, для шарнирного болта.
- Болт шарнирный стопы: Болт для соединения голени и стопы.
- Обратный болт шарнира стопы: Обратный болт для шарнира стопы.
- Болт для привода: Болт для фиксации приводов.
- Болт для креплений: Болт для фиксации шарнирных соединений бедра и креплений ног.
- Гайка: Гайка для болта креплений спины и голени.
- Болт для крепления датчиков ноги: Болт для фиксации датчиков давления на бедре и голени.
- Болт для датчика стопы: Болт для фиксации датчиков давления на стопе.
- Фиксатор пояса: Ремень соединяющий каркас спины и оператора.

Например, к детали «каркас спины» относятся снятые с оператора мерки обхвата бедер и высоты позвоночника. К пользовательским параметрам относятся:

S1 – ширина бедер;

D1 – толщина бедер;

HSpin – высота позвоночника.

На рисунке 69 показан чертеж параметрической детали «каркас спины», который изменяется за счет входных данных с помощью формул.

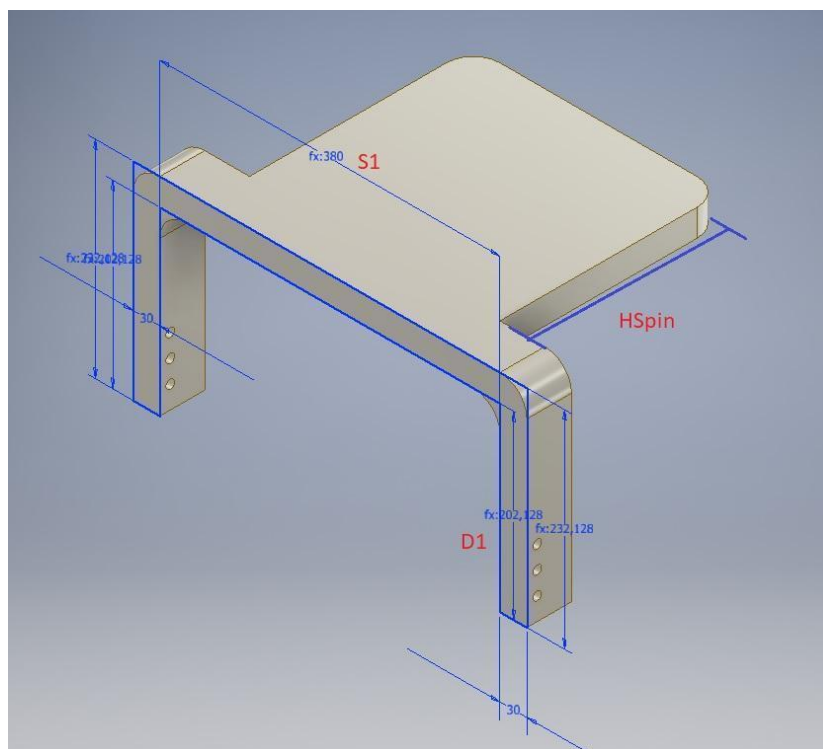


Рисунок 69– 3D-деталь «каркас спины»

Расчет параметров осуществляется по формуле:

$$S1 = \text{Обхват бёдер} / 2.5;$$

$$D1 = \text{Обхват бёдер} / 4.7;$$

$$HSpin = \text{параметрическим данным спины в см.}$$

Параметризация модели позволяет связать значение параметров детали и установить их зависимости, в результате чего изменение одного параметра автоматически меняет значение связанного параметра.

На рисунке 70 показан пример чертежа параметрической детали «каркас бедра».

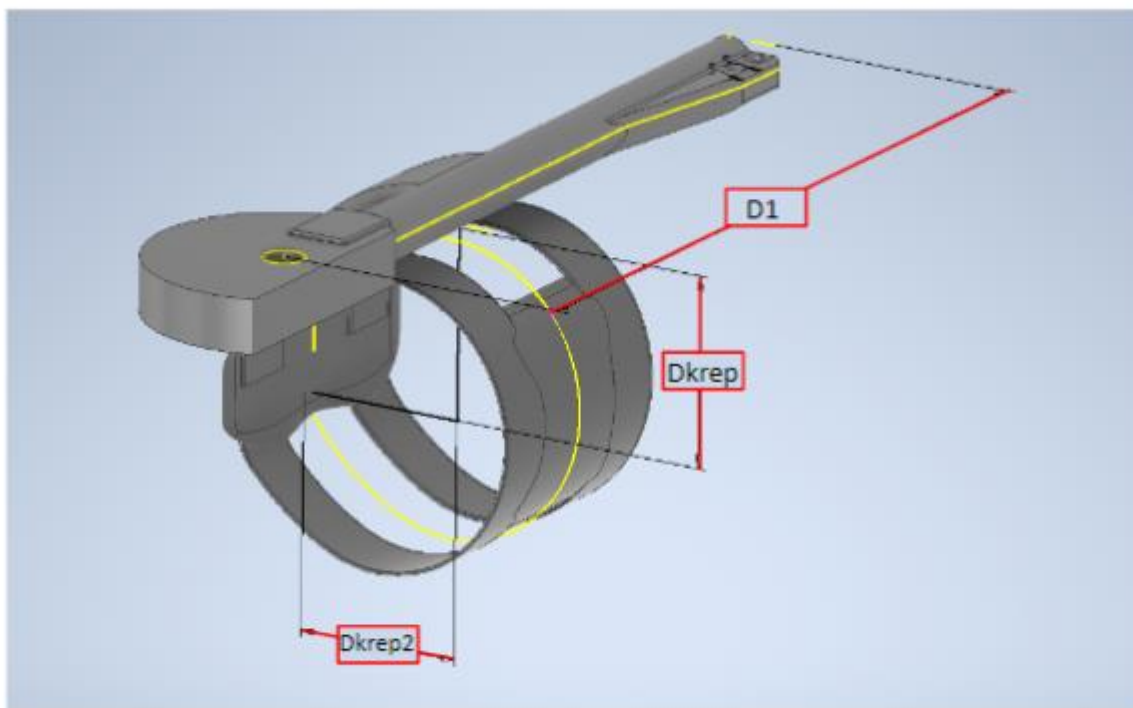


Рисунок 70 – 3D-деталь «каркас бедра»

Расчет параметров осуществляется по формуле:

$$D1 = (\text{Длина бедер} / 3) * 2;$$

$$D2 = (\text{Длина бедер} / 3);$$

$$DKrep = \text{Обхват бедра} / 4;$$

$$DKrep2 = \text{Обхват бедра} / 4;$$

$$DKDat = \text{Обхват бедра} / 5.$$

На рисунке 71 показан чертеж параметрической детали «каркас голени».

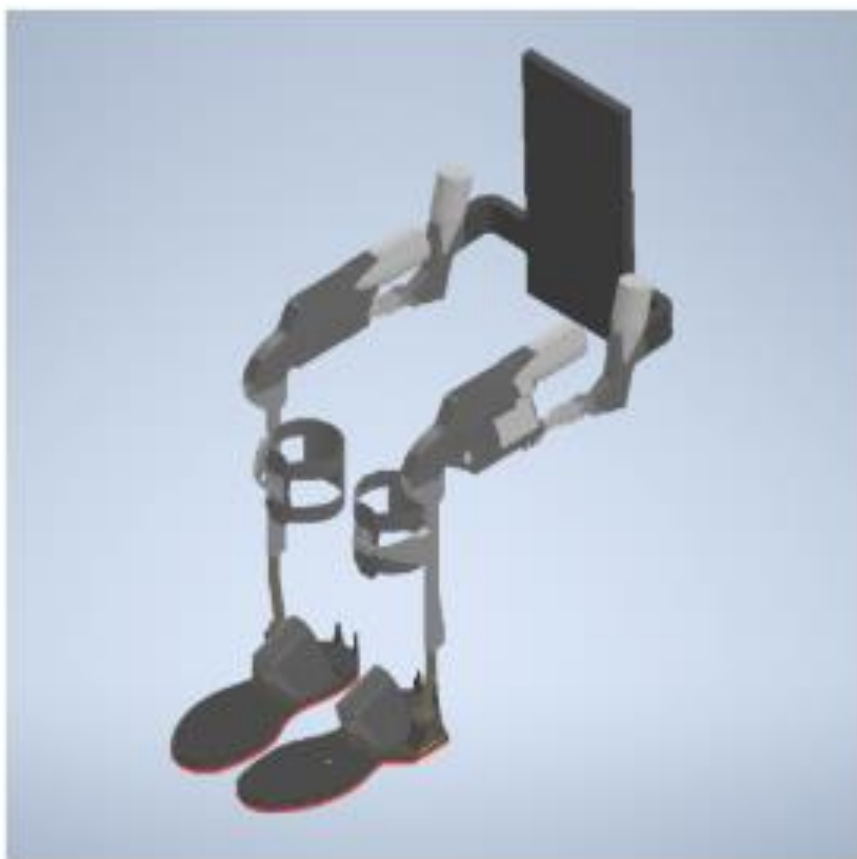


Рисунок 72 – Сборка активного экзоскелета

3.3.3 Проектная процедура анализа динамики сборки проектного решения АЭНК

Усовершенствование метода анализа эргономики экзоскелета позволит провести моделирование подвижности экзоскелета во взаимодействии с геометрической моделью оператора, что что позволяет провести компьютерную симуляцию совместимости на этапе проектирования АЭНК.

Главной особенностью данного метода построения экзоскелета является то, что перед созданием сборки производится анализ его взаимодействия с оператором (в том числе и динамических характеристик) при помощи компьютерного моделирования.

В общем виде усовершенствованный метод представлен на рисунке 73.

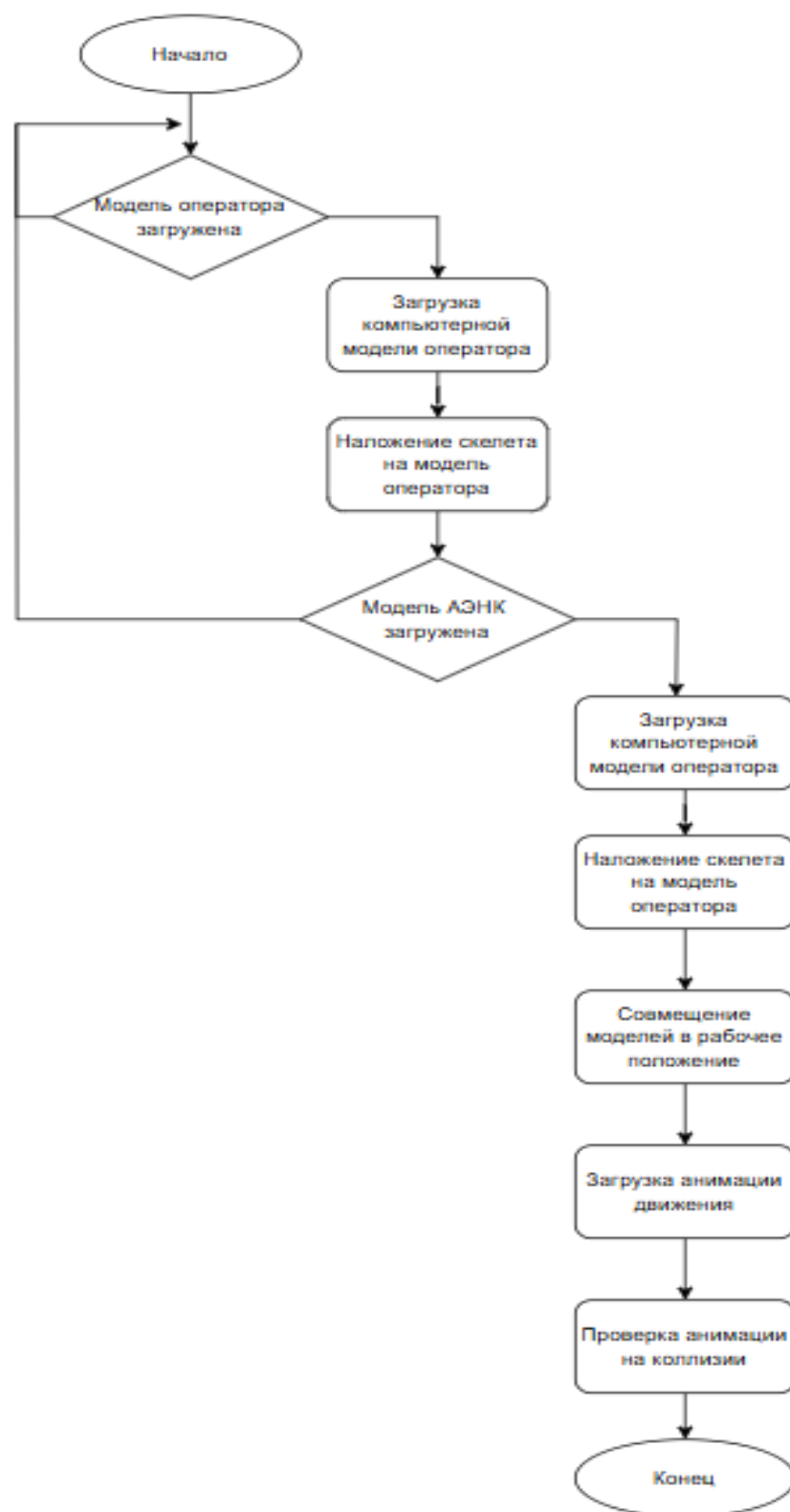


Рисунок 73 – Алгоритм анализа динамики сборки проектного решения
АЭНК

В первую очередь модель разбивается на отдельные объекты, у которых необходимо настроить их опорные точки.

Чтобы разделить детали, необходимо в режиме выбора элементов выделять необходимые области (рис. 74) и выполнить функцию detach (рис. 75). Желательно давать элементам корректные имена.

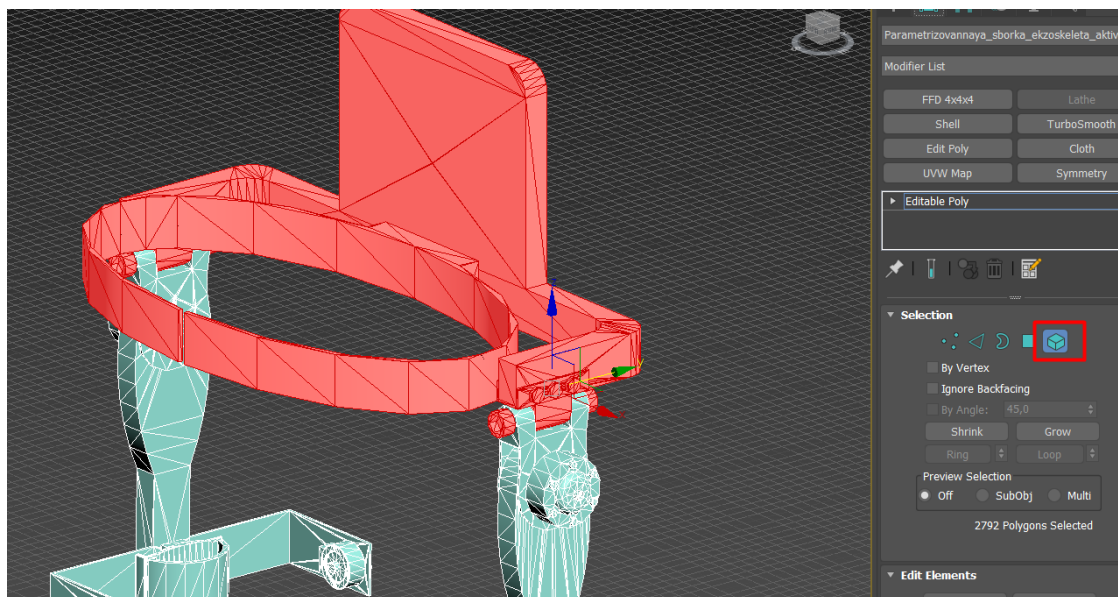


Рисунок 74 - Выделение деталей сборки

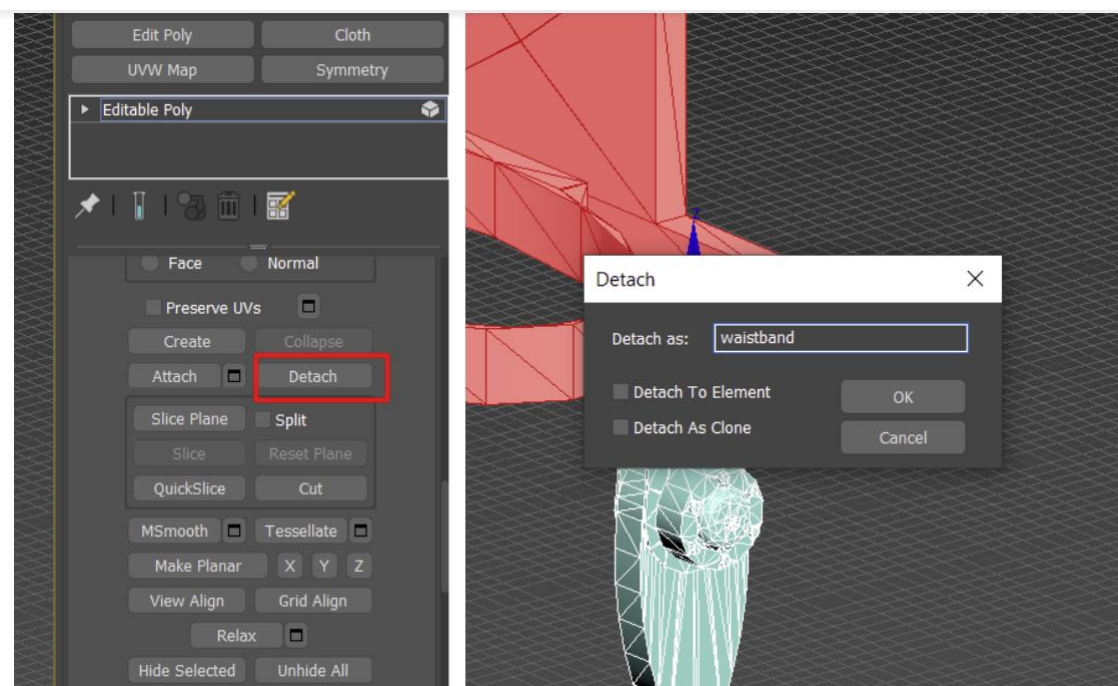


Рисунок 75 - Отсоединение элемента пояса от модели

На рисунке 76 разными цветами показаны отделенные друг от друга детали, правые и левые части также разделены.

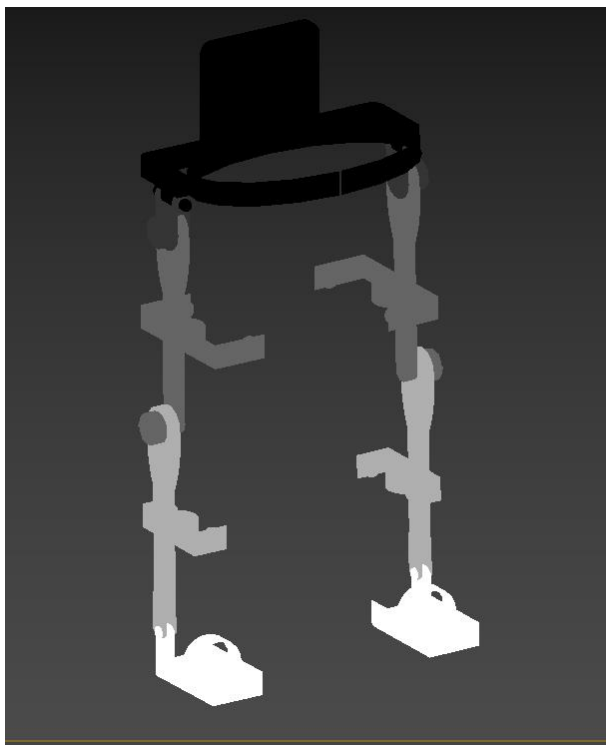


Рисунок 76 – Разделенные детали

Опорные точки деталей будут находиться в подвижных узлах деталей. Перемещение опорных точек (pivot point) происходит, когда нажата кнопка Affect Pivot only в режиме Hierarchy (рис. 77). В этот момент опорная точка модели обводится стрелками.

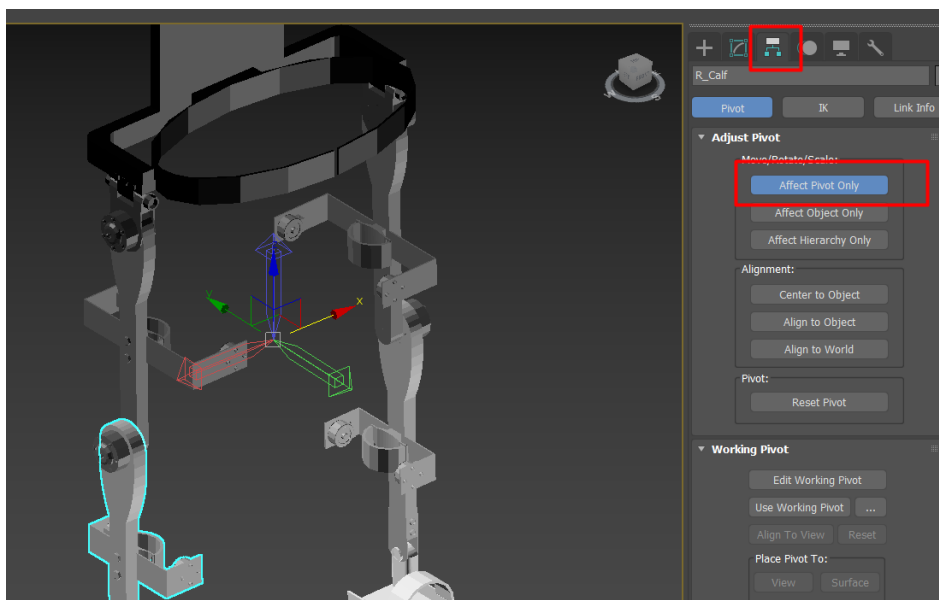


Рисунок 77 - Активация режима модификации опорной точки модели

Завершив перемещение, необходимо еще раз нажать на кнопку Affect pivot only.

Следующим этапом идет визуальная подгонка экзоскелета к человеку. Необходимо отредактировать экзоскелет таким образом, чтоб в положении стоя он максимально качественно сидел на человеке.

Крепление бедра к спине поворачивается таким образом, чтобы элементы голени и бедра прижимались к телу человека, иначе человеку необходимо передвигаться, расставив ноги на ширине плеч, что не является естественной позой человека во время ходьбы.

После того как экзоскелет был полностью настроен визуально, когда человек стоит прямо, можно настраивать сопряжения с использованием функции Rig для последующего создания анимации. На рисунке 78 изображены сгенерированная и оптимизированная сборки.



Рисунок 78 - Сгенерированная и оптимизированная сборки

Скелет экзоскелета составляют кости - примитив Bones. В режиме Right/left необходимо построить кости (примитив Bones) таким образом, чтобы связки костей находились на сочленениях экзоскелета.

Необходимо настраивать привязка к скелету для анимации правой и левой ног экзоскелета одновременно, чтобы в дальнейшем избежать различий в анимации. Скелет экзоскелета отмечен на рисунке 79.

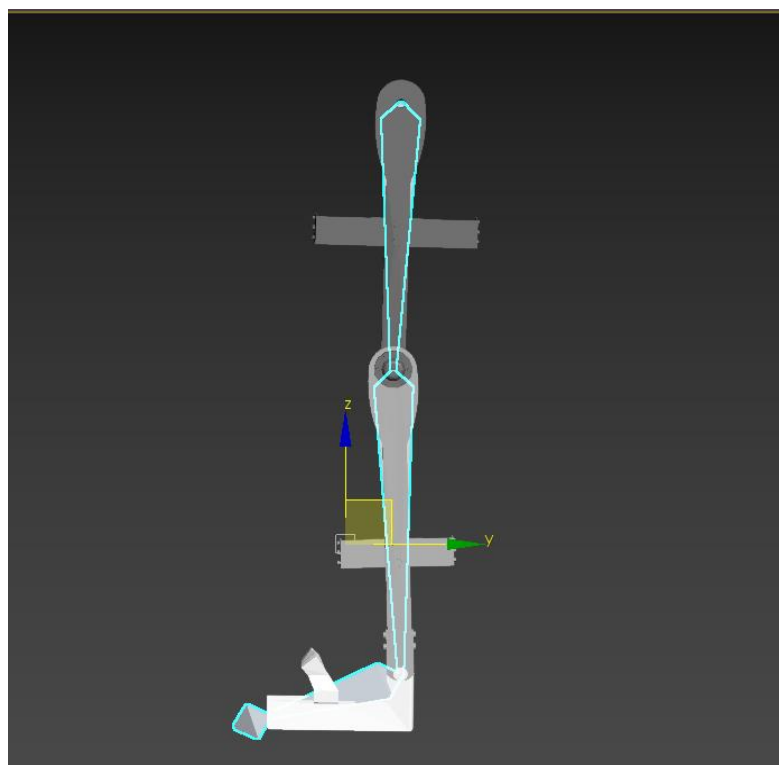


Рисунок 79 - Кости Bones экзоскелета

Затем скелет нужно привязать к модели экзоскелета, для этого к каждой части модели необходимо применить модификатор Skin и в списке выбрать соответствующую кость. Bone007 (рисунок 80) присоединяется к каркасу стопы, Bone006 (рисунок 81) к каркасу голени, Bone005 (рисунок 82) к каркасу бедра.

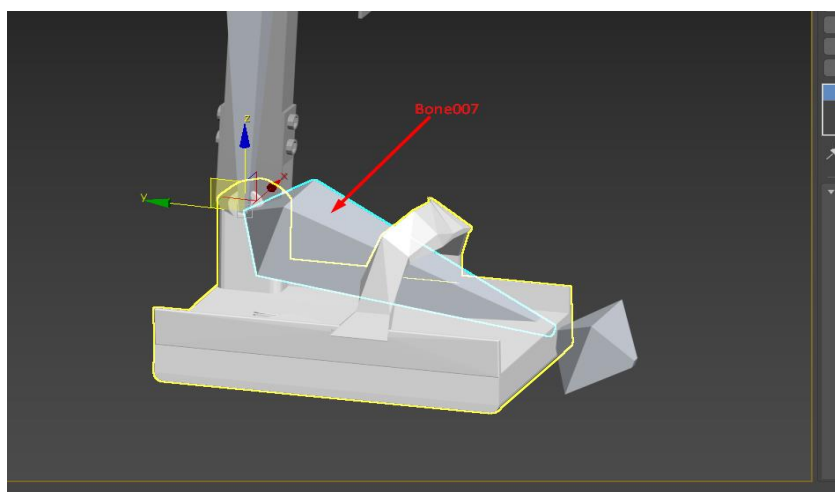


Рисунок 80 - Кость Bone007

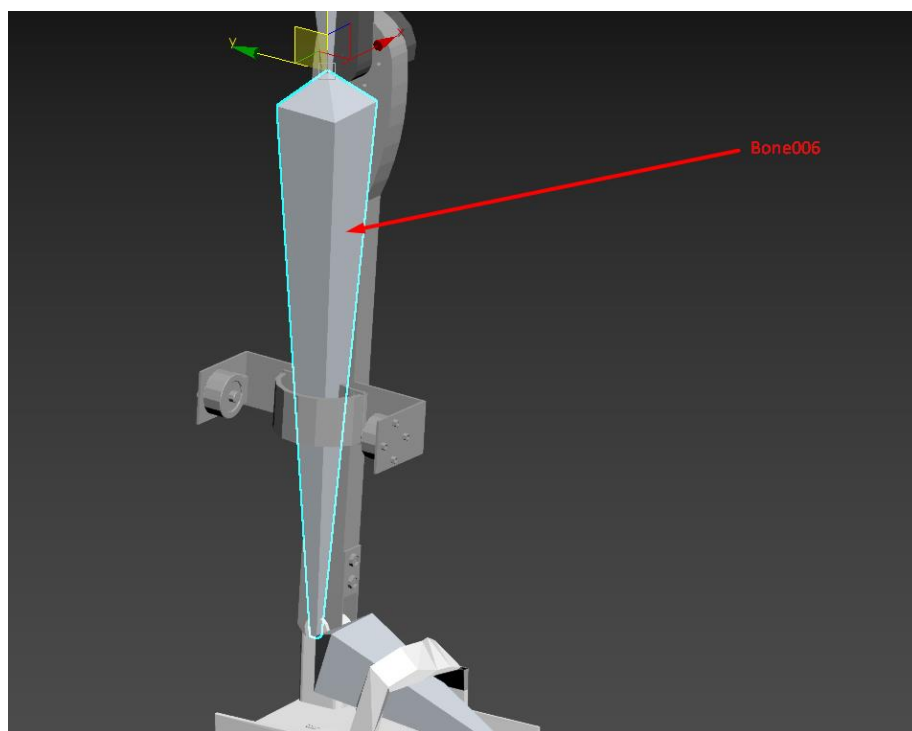


Рисунок 81 - Кость Bone006

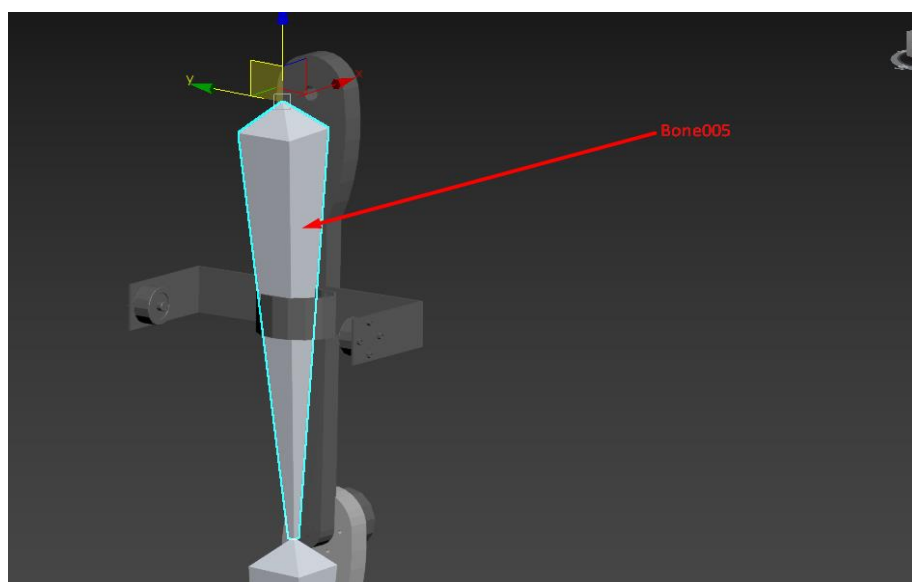


Рисунок 82 - Кость Bone005

Следующий этап - настройка скелета модели. Первый шаг - создание инверсной кинематики от Bone005 к Bone007. (рис. 83).

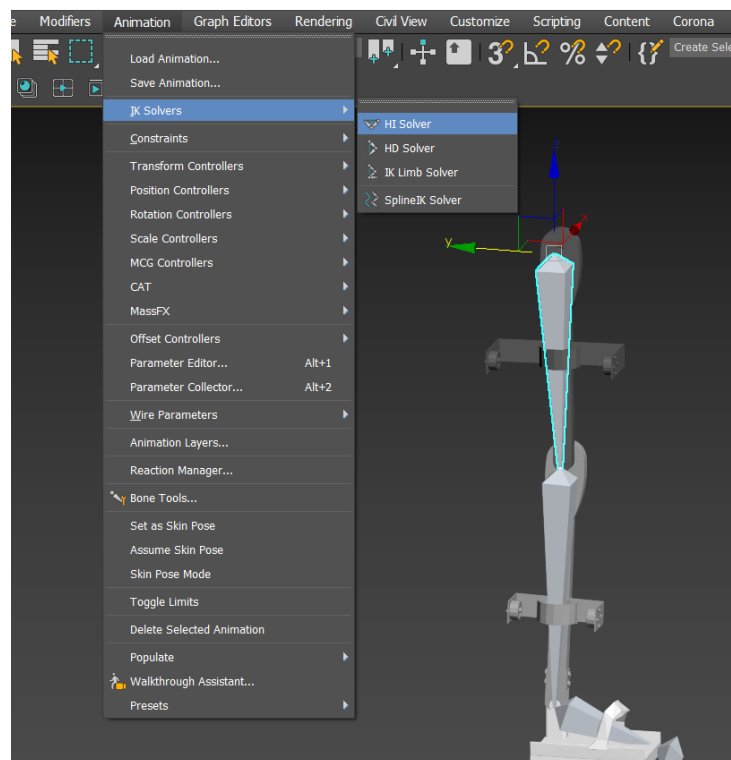


Рисунок 83 - Настройка инверсной кинематики

Появится пунктирная линия (рис. 84), которую надо будет довести до Bone007 и отпустить. При помощи инструмента масштабирования сразу же необходимо настроить параметры модели инверсной кинематики (рис. 85) до тех пор, пока его не станет видно.



Рисунок 84 - Линия, задающая направление инверсной кинематике

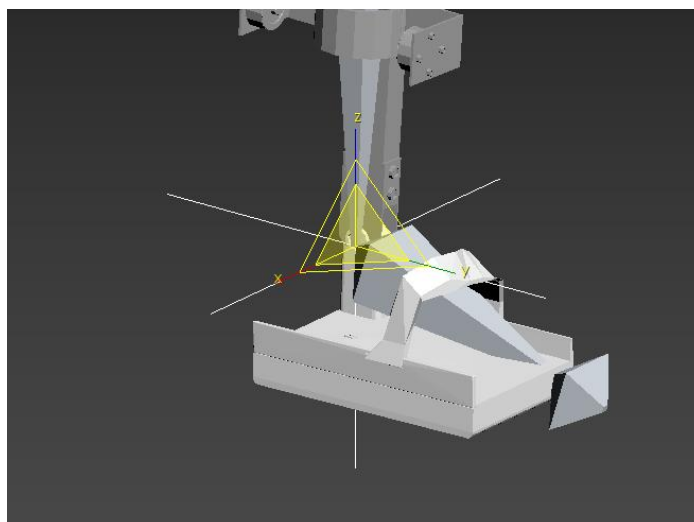


Рисунок 85 - Точка – решатель инверсной кинематики

Перемещающая решатель - инструмент, используемый при анимации для автоматического расчёта движений объектов или костей в системах инверсной кинематики, можно менять положение экзоскелета (рис. 86).

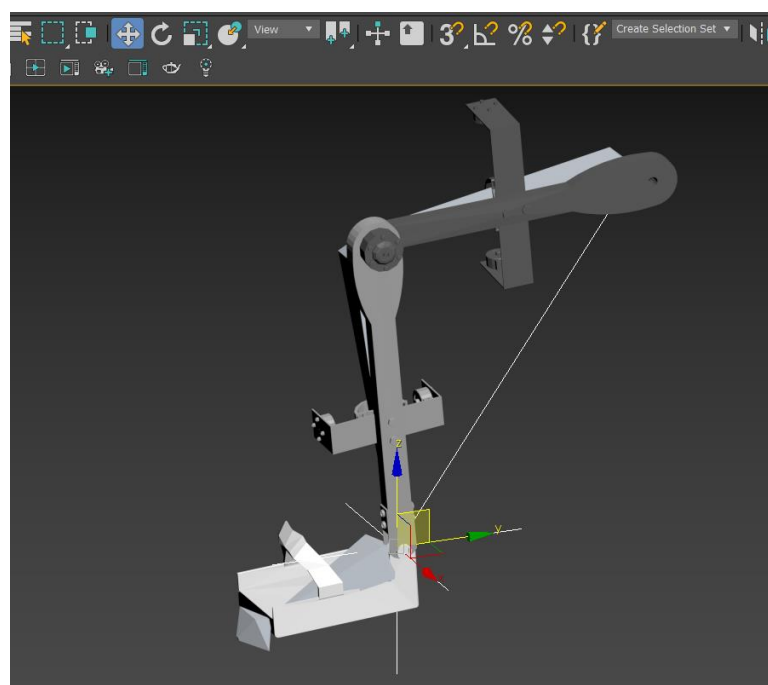


Рисунок 86 - Перемещение решателя инверсной кинематики

Можно создать элемент Circle, подсоединить к нему Line (или любой другой примитив или пустышки). Эта пустышка будет отвечать за вращение

стопы. Необходимо подсоединить ее к решателю инверсной кинематики при помощи инструмента Select&Link. Решатель является дочерним объектом для пустышки, поэтому пунктирную линию необходимо тянуть от решателя к пустышке (рис. 87).

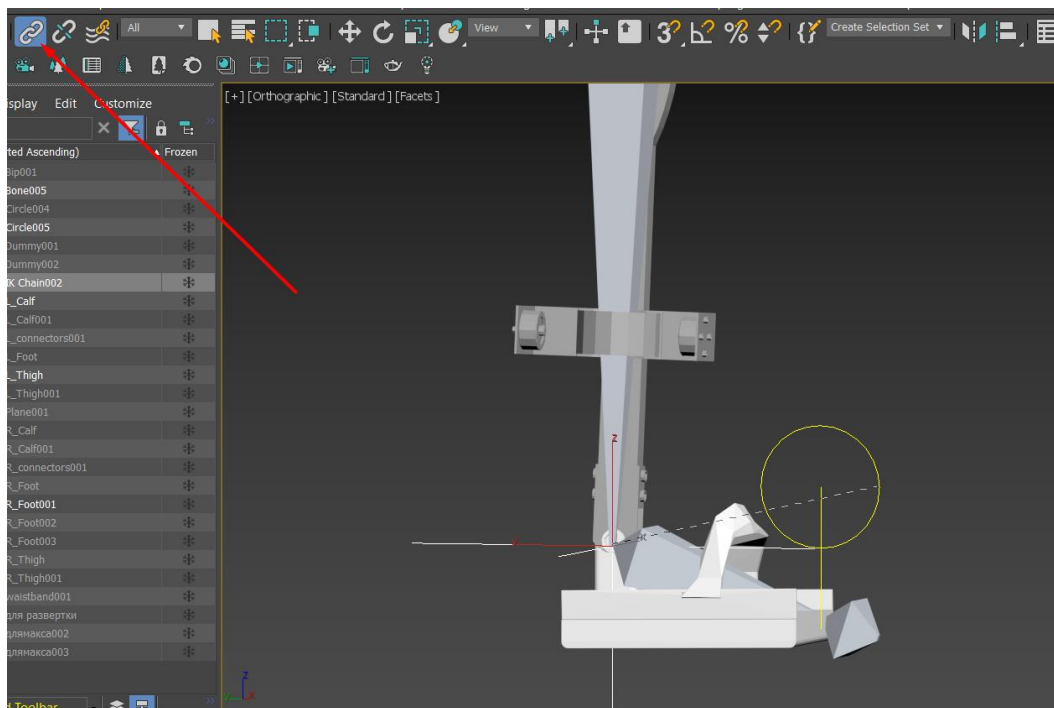


Рисунок 87 - Настройка иерархии от решателя к пустышке

Чтобы стопа перестала вращаться во время приседания персонажа, но ее можно было повернуть вручную, необходимо установить условие, при котором кость будет вращаться только в том случае, если вращать решатель.

Чтобы установить это ограничение необходимо выделить кость стопы, зайти в настройки Assign Controller вкладки Motion, выделить параметр Rotation: Euler XYZ и нажать на кнопку Assign Controller, она отмечена стрелкой на рисунке 88.

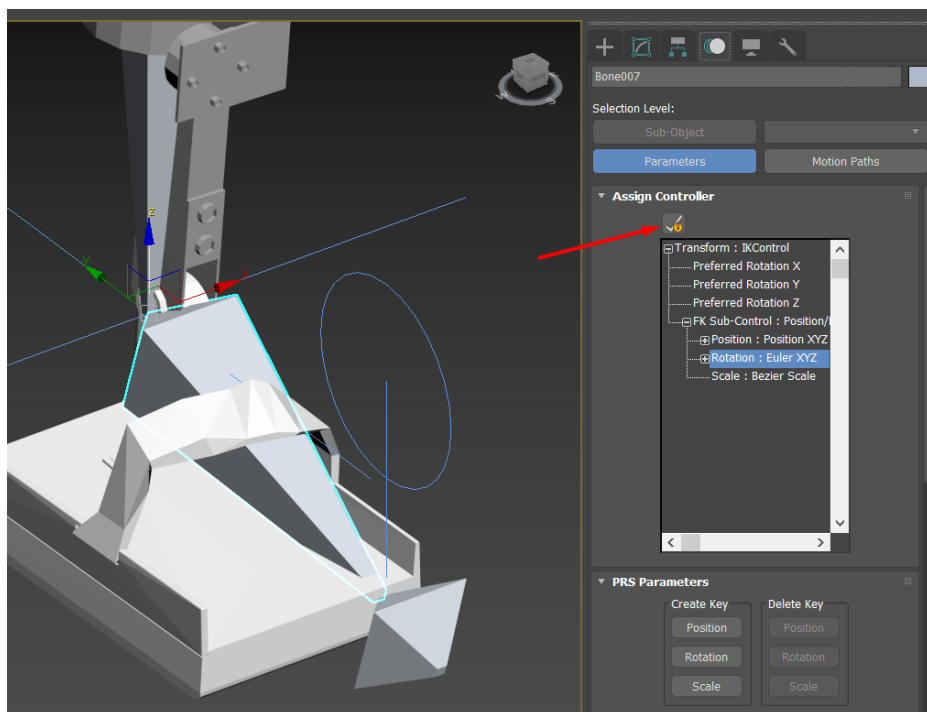


Рисунок 88 - Кнопка Assign Controller

В открывшемся окне необходимо выбрать Orientation Constraint (рис. 89), затем нажать на кнопку Add Orientation Target и выбрать пустышку Circle005 (рис. 90). Если модель стопы перевернется надо установить галочку в пункте Keep Initial Offset (рис. 91).

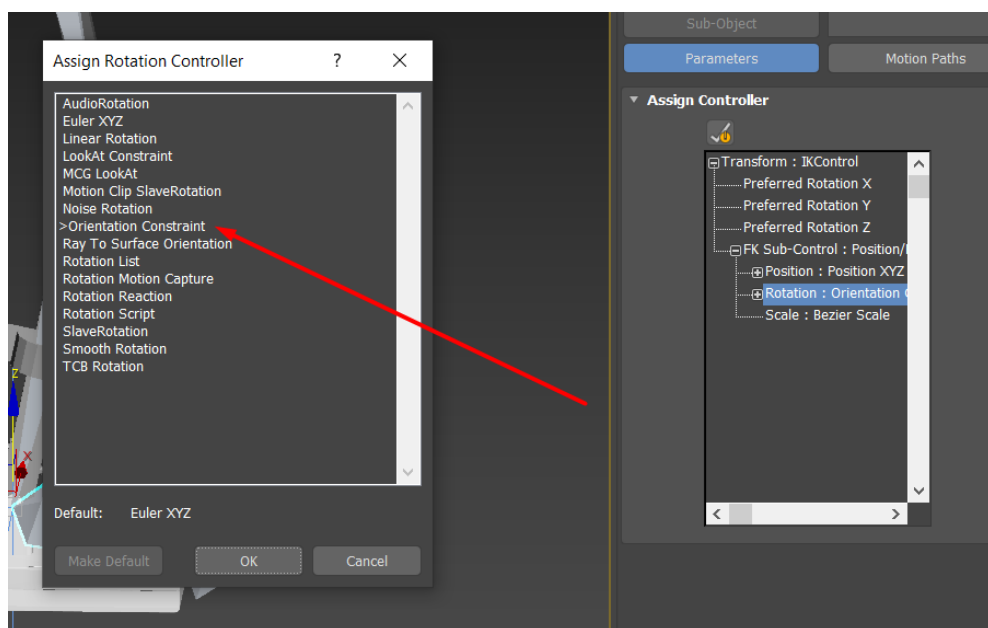


Рисунок 89 - Выбор Orientation Constraint в списке контроллеров

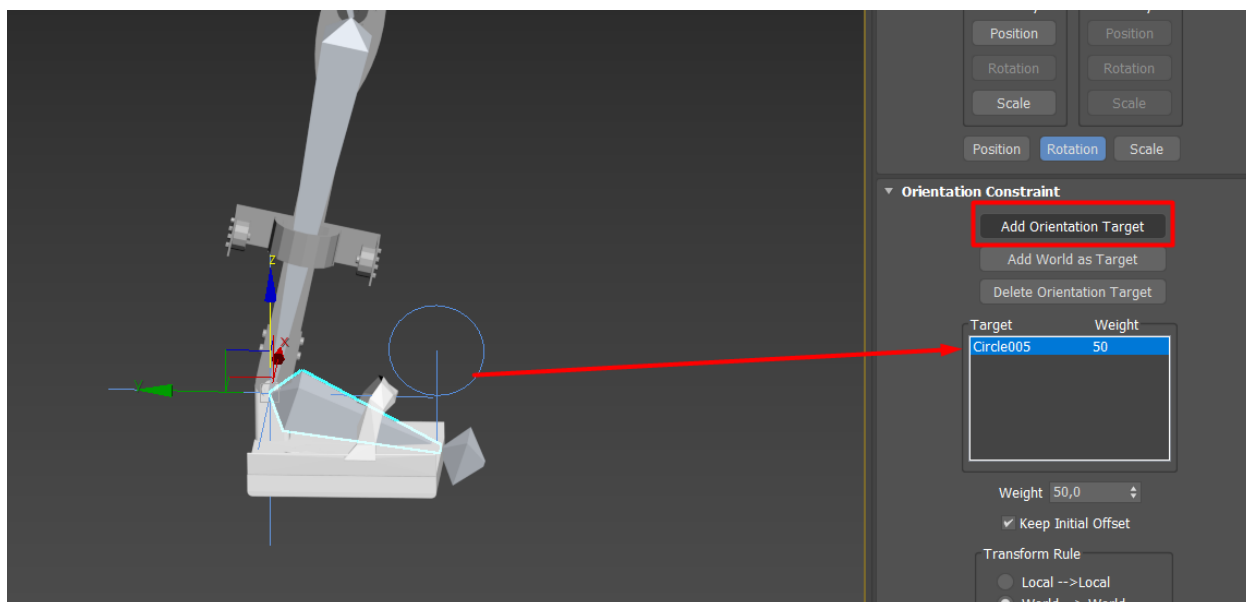


Рисунок 90 - Установка подготовленной пустышки ориентационной целью для вращения стопы

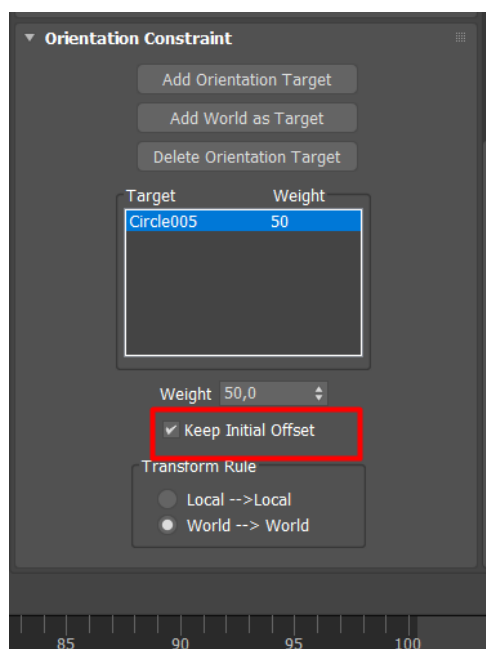


Рисунок 91 - Функция, позволяющая вернуть привязки в первоначальное положение

На следующем этапе необходимо создать анимацию типовых движений оператора в экзоскелете и экспортировать модель вместе с анимационными

ключами. Анимация создается в Autodesk 3ds Max с помощью расстановки ключей анимации.

Для расстановки ключей необходимо активировать Auto Key Mode нажав на кнопку, отмеченную на рисунке 92, перемещать скелет экзоскелета вместе с моделью оператора двигаясь покадрово в шкале трекеров.

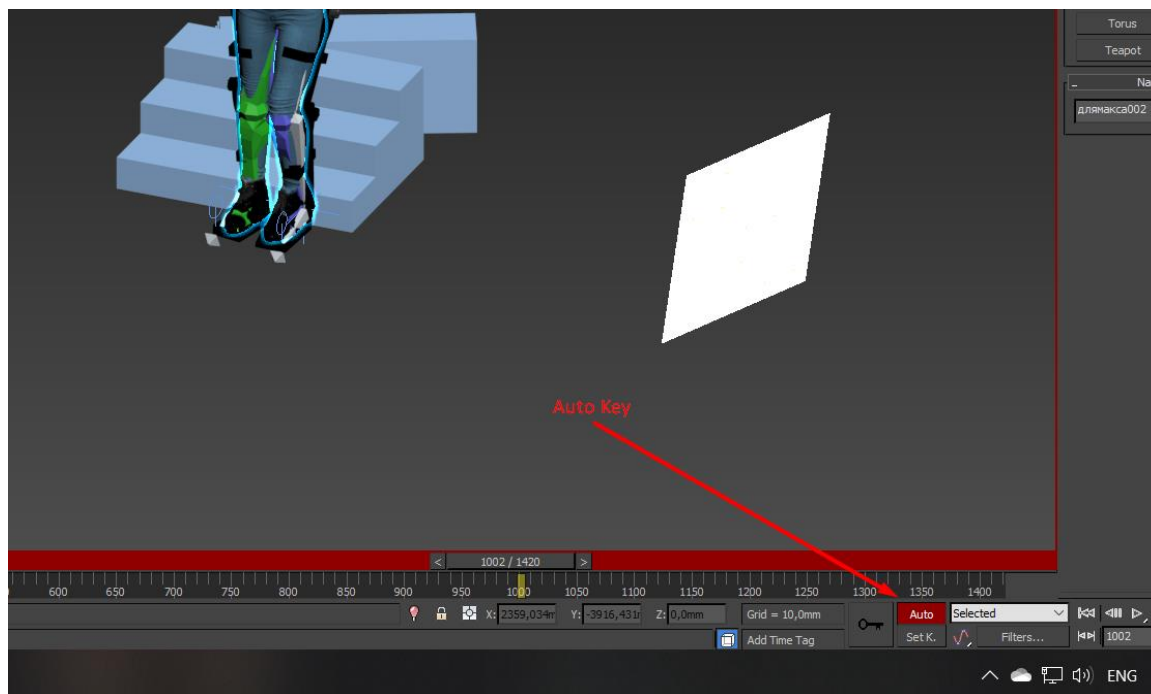


Рисунок 92 - Кнопка активации режима Auto Key Mode

После того как модели были анимированы необходимо переместить их и их анимационные слои. Для этого необходимо выделить модель человека и экзоскелета (без костей), экспортировать выделенное как fbx, в окне экспорта fbx установить галочку напротив Animation и Bake Animation для экспорта не только моделей, но и их анимаций (рис. 93, 94).

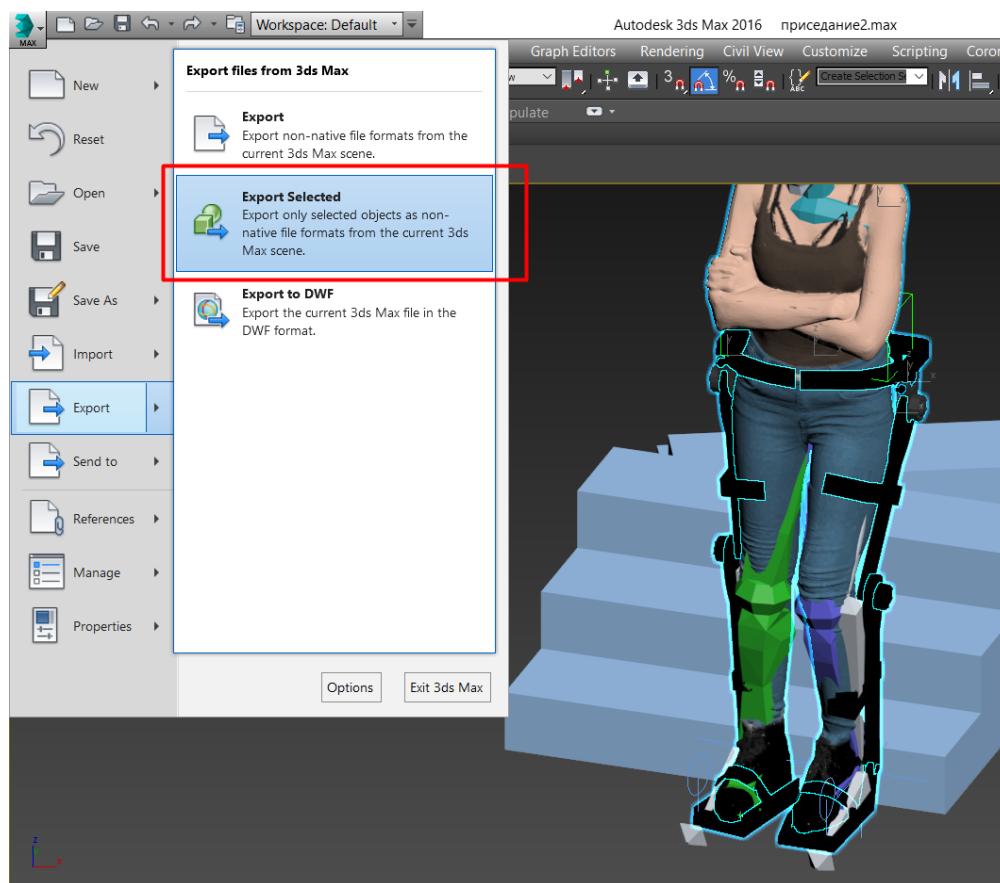


Рисунок 93 - Экспорт выделенной модели

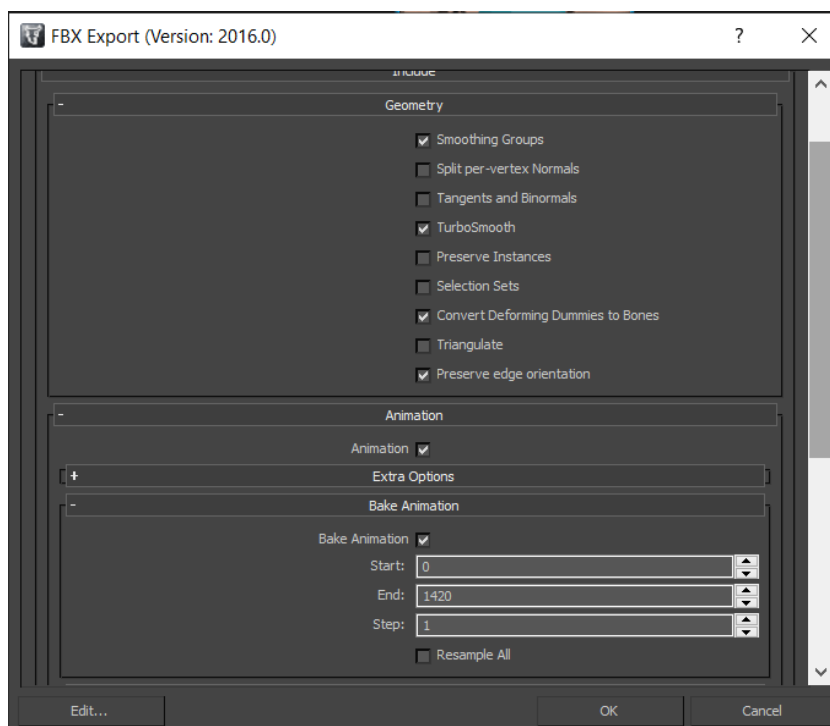


Рисунок 94 - Настройка FBX экспорта

Для реализации метода получен файл в формате fbx, включающий в себя модели человека, экзоскелета и анимаций. Данный файл необходимо поместить в среду симуляции (рис.95) [106].

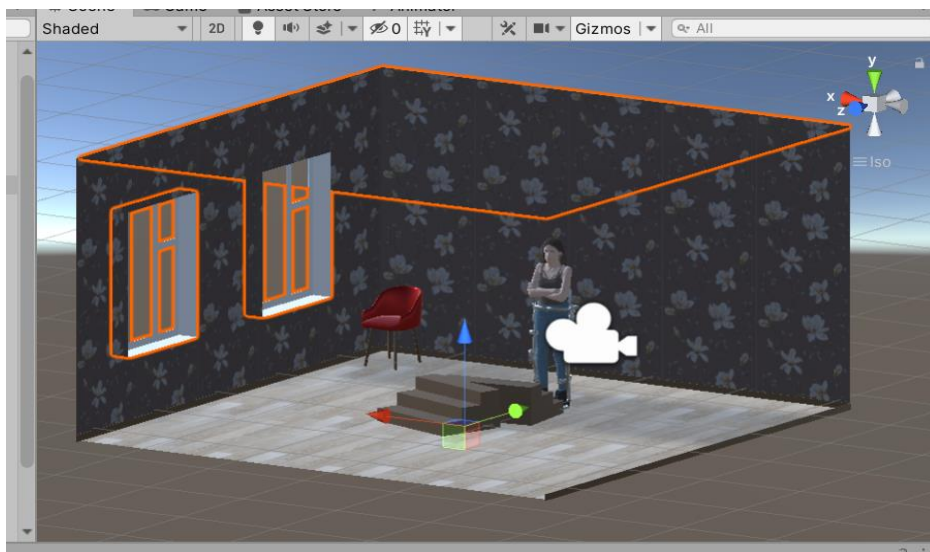


Рисунок 95 - Импортированная в Unity сцена

Следующим шагом следует подгрузка созданной анимации. Импортированная модель уже имеет анимацию. Необходимо перейти в настройки импортированной модели и ограничить время анимации (если это необходимо), переименовать анимацию в Walk (или иначе). Ключи анимации отмечены на рисунке 96.

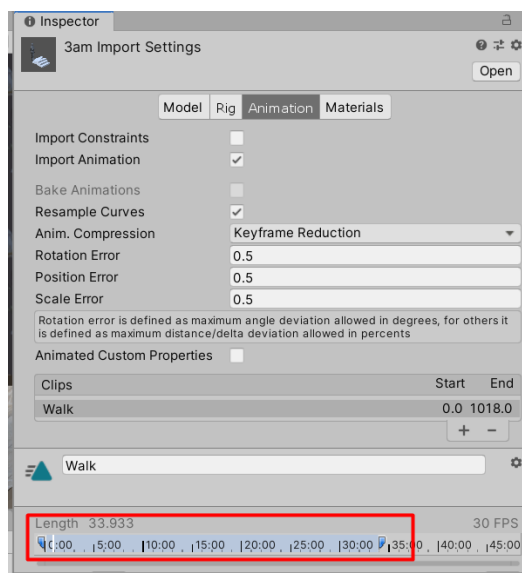


Рисунок 96 - Ключи анимации в сцене

Затем необходимо выделить модель человека в сцене и добавить компонент Animation (рисунок 97). Нажав на кнопку загрузки анимации из сцены, нужно выбрать анимацию Walk (рисунок 98).

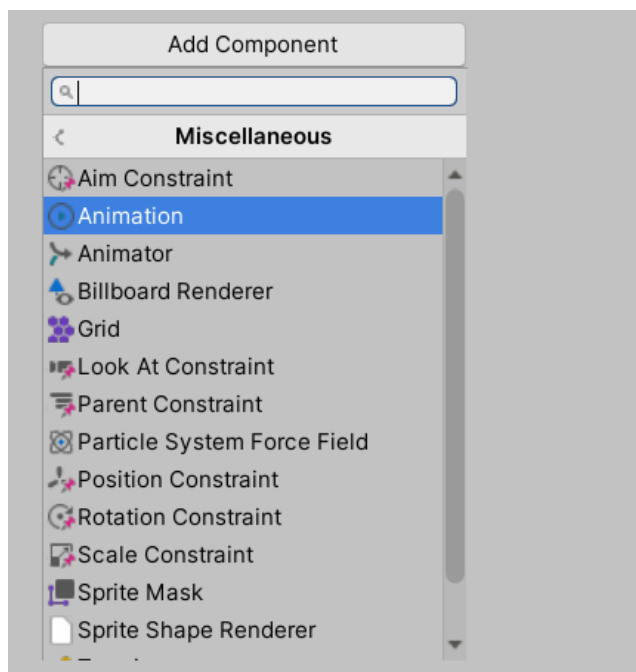


Рисунок 97 - Компонент Animation

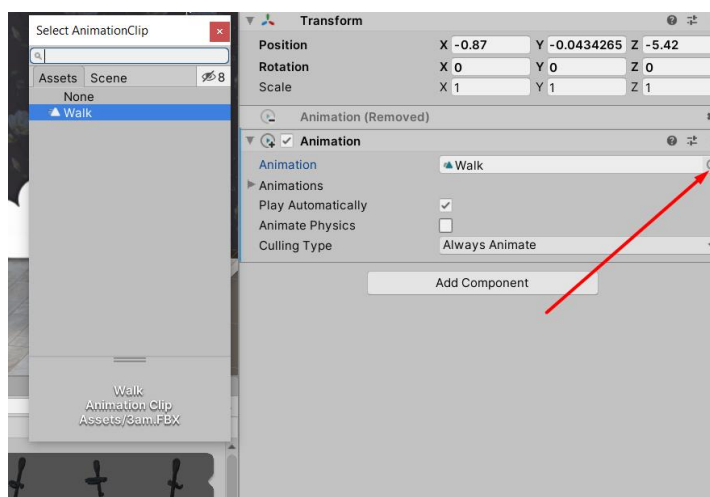


Рисунок 98 - Кнопка для выбора анимаций сцены

Теперь при нажатии на кнопку play персонаж в сцене будет перемещаться. На рисунке 99 сцена запущена.

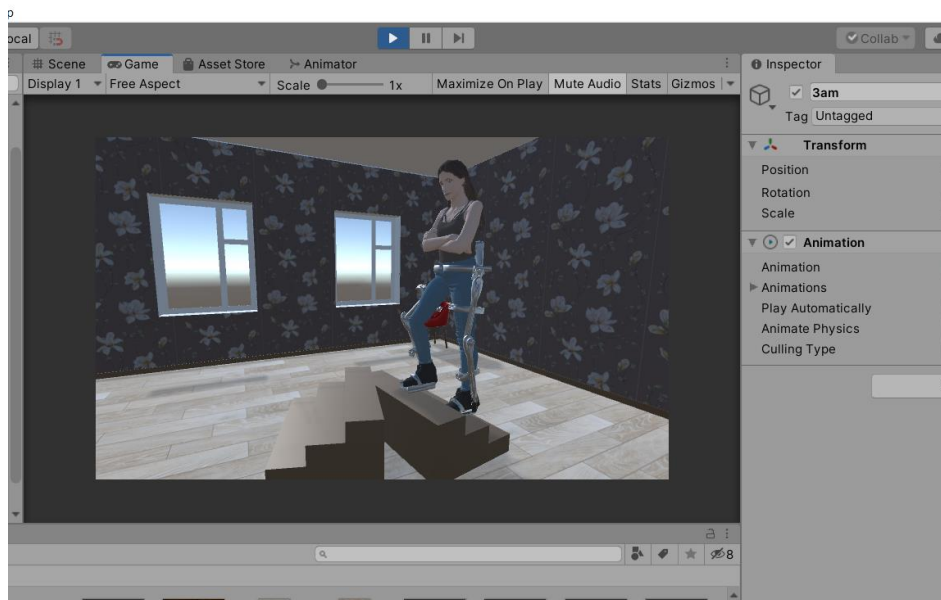


Рисунок 99 - Запуск сцены

Следующим шагом является привязка к модели человека и экзоскелета контроллеров, при помощи которых можно будет отследить пересечение. Контроллерами в данном случае будут выступать примитивы. Боксы Cube для частей экзоскелета и капсулы, сферы для оператора экзоскелета.

Кубы и капсулы / сферы необходимо сделать немного меньшего размера чем основные модели и поместить их внутрь (рис. 100). Для каждого примитива необходимо давать корректное имя чтобы в дальнейшем можно было легко отслеживать в какой именно части ноги произошло пересечение.

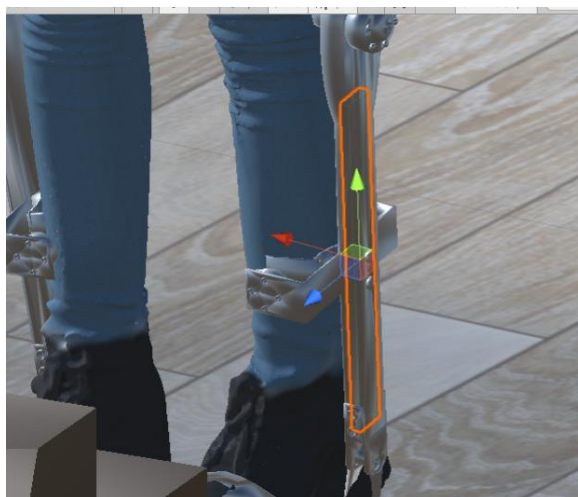


Рисунок 100 - Помещение вспомогательного элемента внутрь экзоскелета

После того как все вспомогательные элементы были помещены в модели экзоскелета и человека, их необходимо закрепить. Для этого необходимо добавить компонент Parent Constraint. Активировать его, установив галочку Is Activate, в ресурсах указать кости Biped или Bones расположенные в том месте куда был помещен вспомогательный элемент (кости из экспортируются по умолчанию вместе с моделью так как экспортируется анимированный объект). На рисунке 101 изображены настройки родительских зависимостей.

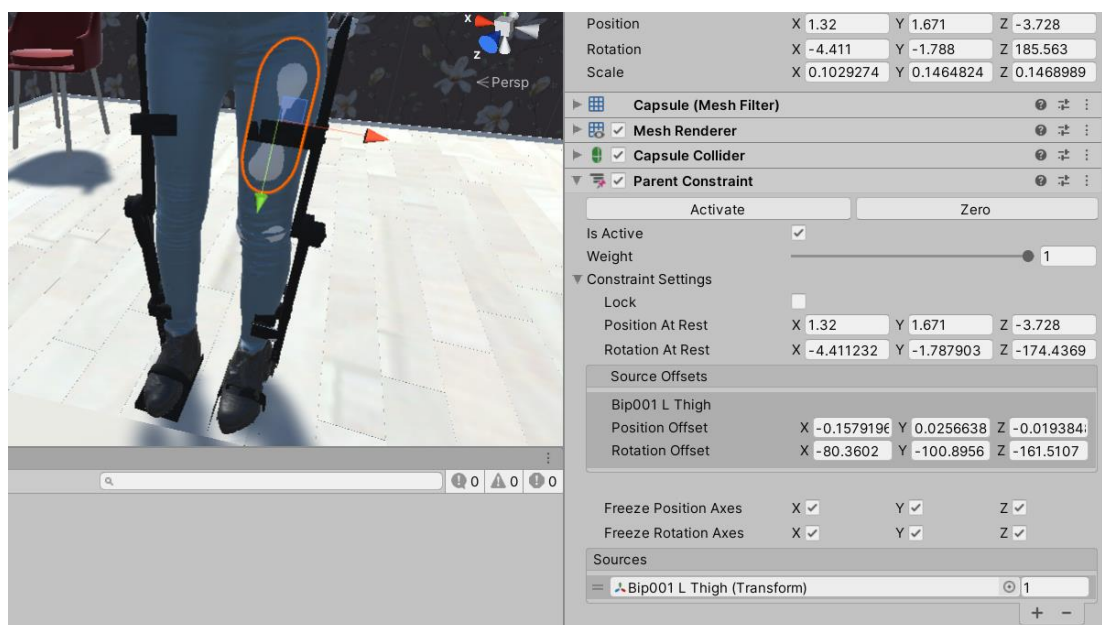
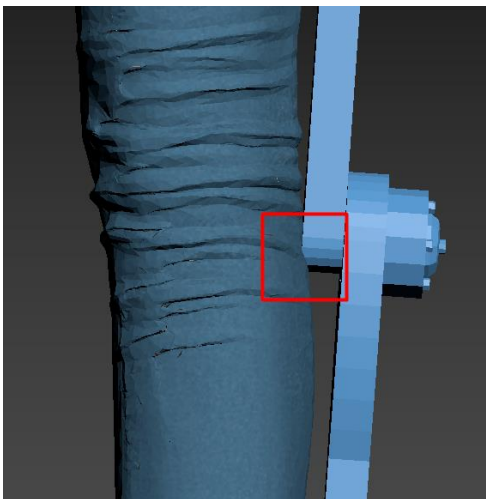
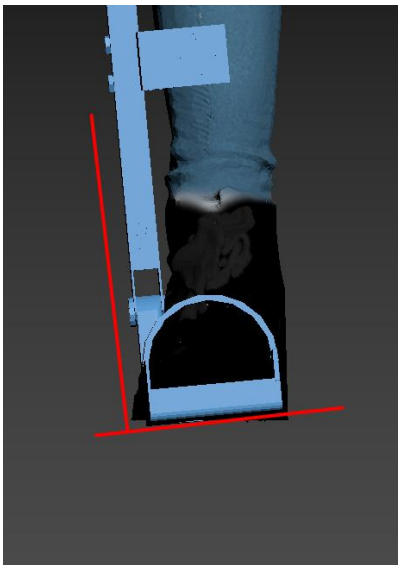


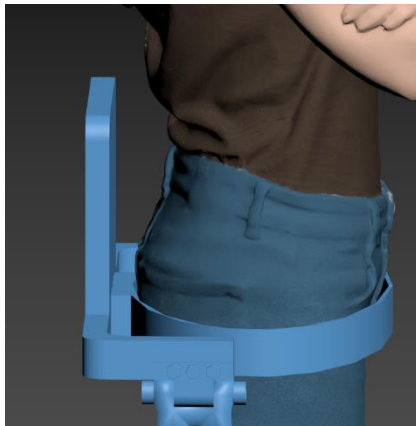
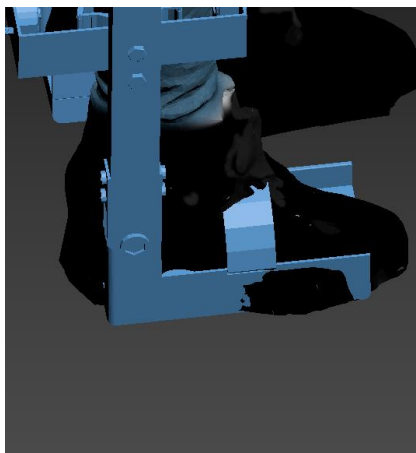
Рисунок 101 - Настройки родительских зависимостей

Ко всем вспомогательным объектам необходимо подключить также компонент Rigidbody. Только объекты сцены со свойством твердого тела (Rigidbody) способны физически взаимодействовать с другими объектами. В данном случае это необходимо для того, чтобы отследить пересечения.

Типичные ошибки, выявляемые при анализе динамики сборки АЭНК, представлены в таблице 15.

Таблица 15 – пример ошибок коллизий тестирования АЭНК

Ошибка	Проблематика	Изображение
Недопустимое пересечение колена человека с каркасом бедра экзоскелета	Во время длительного стояния человека в экзоскелете данный недочет может привести к неприятным ощущениям в области колена из-за излишнего давления деталей экзоскелета.	
Неправильное расположение стопы человека из-за отсутствия индивидуального подхода к разработке каркаса стопы	Данная проблема появляется из-за того, что во время положения человека “ноги на ширине плеч” элемент крепления к поясу и каркасы бедра, голени и стопы экзоскелета располагаются под углом к горизонту. Каркас стопы располагается под углом к плоскости, а данное расположение для твердых элементов недопустимо.	

Ошибка	Проблематика	Изображение
Неправильное расположение каркаса спины экзоскелета	Данный элемент предназначен для снятия нагрузки со спины человека. Элемент необходимо конструировать под индивидуальные особенности человека. В сгенерированной сборке элемент не касается спины и не приносит пользы оператору.	
Малый размер каркаса стопы экзоскелета.	Данная конструкция каркаса стопы приводит к свисанию стопы в задней части что при длительном стоянии вызовет усталость и дискомфорт.	

3.3.4 Проектные процедуры выбора электро- и радиокомпонент

На первом этапе мы запрашиваем у пользователя эксплуатационные требования к АЭНК (DRQ2). После их ввода происходит подбор без повторений подходящих компоненты, и выводится список доступных комбинаций деталей. Если их несколько, позволяем пользователю выбрать подходящий набор. Иначе, сообщаем о том, что доступных вариантов нет.

Каждый компонент описывается как элемент из множества возможных вариантов:

Батарей:

$$B=\langle b_1, b_2, \dots, b_n \rangle, \quad (7)$$

где:

$$b_i=(V_{bi}, C_{bi}, I_{bi\max});$$

Двигатели:

$$M=\langle m_1, m_2, \dots, m_k \rangle, \quad (8)$$

где:

$$m_j=(V_{mj}, I_{mj}, T_{mj}, \eta_{mj});$$

Драйверы:

$$D=\langle d_1, d_2, \dots, d_l \rangle, \quad (9)$$

$$\text{где } d_p=(V_{dp}, I_{dp\max}, \eta_{dp});$$

Редукторы:

$$G=\langle g_1, g_2, \dots, g_m \rangle, \quad (10)$$

где:

$$g_q=(i_q, \eta_{gq}, T_{gq\max});$$

Энкодеры:

$$E=\langle e_1, e_2, \dots, e_r \rangle, \quad (11)$$

Контроллеры:

$$C=\langle c_1, c_2, \dots, c_s \rangle, \quad (12)$$

Все возможные комбинации компонентов образуют декартово произведение:

Каждая комбинация $s \in S$ имеет вид:

Комбинация s допустима, если выполняются условия:

1. Электрическая совместимость:
2. Токовая нагрузка:
3. Механическая совместимость:

где T_{req} — требуемый момент экзоскелета.

4. Интерфейсы:

5. Контроллер c_{scs} и энкодер e_r должны поддерживать протоколы драйвера d_p .

Разрабатываемый метод предназначен для синтеза компонентов сборки экзоскелета на основе предъявляемых требований, а именно

- время работы;
- суммарный вес;
- выходной момент;
- суммарная стоимость.

Для каждой допустимой комбинации $s \in S_{\text{valid}}$ вычисляется значение целевой функции:

$$F(s) = w_1 \cdot t(s) + w_2 \cdot \frac{1}{W(s)} + w_3 \cdot T_{\text{out}}(s) - w_4 \cdot C(s) - P(s), \quad (12)$$

где:

$t(s) = (C_{bi} \cdot V_{bi}) / P_{\text{total}}$ — время работы,

$P_{\text{total}} = P_{\text{motor}} + P_{\text{driver}} + P_{\text{controller}}$,

$P_{\text{motor}} = V_{mj} \cdot I_{mj} \cdot (1 - \eta_{mj})$.

$W(s) = w_b + w_m + w_d + w_g + w_e + w_c$ — суммарный вес.

$T_{\text{out}}(s) = T_{mj} \cdot i_q \cdot \eta_{gq}$ — выходной момент.

$C(s) = \text{cost}(b_i) + \text{cost}(m_j) + \dots$ $C(s) = \text{cost}(b_i) + \text{cost}(m_j) + \dots$ — суммарная стоимость.

w_1, w_2, w_3, w_4 — весовые коэффициенты.

Задача сводится к поиску комбинации s^* , максимизирующей $F(s)$:

Алгоритм подбора представлена на рисунке 102.

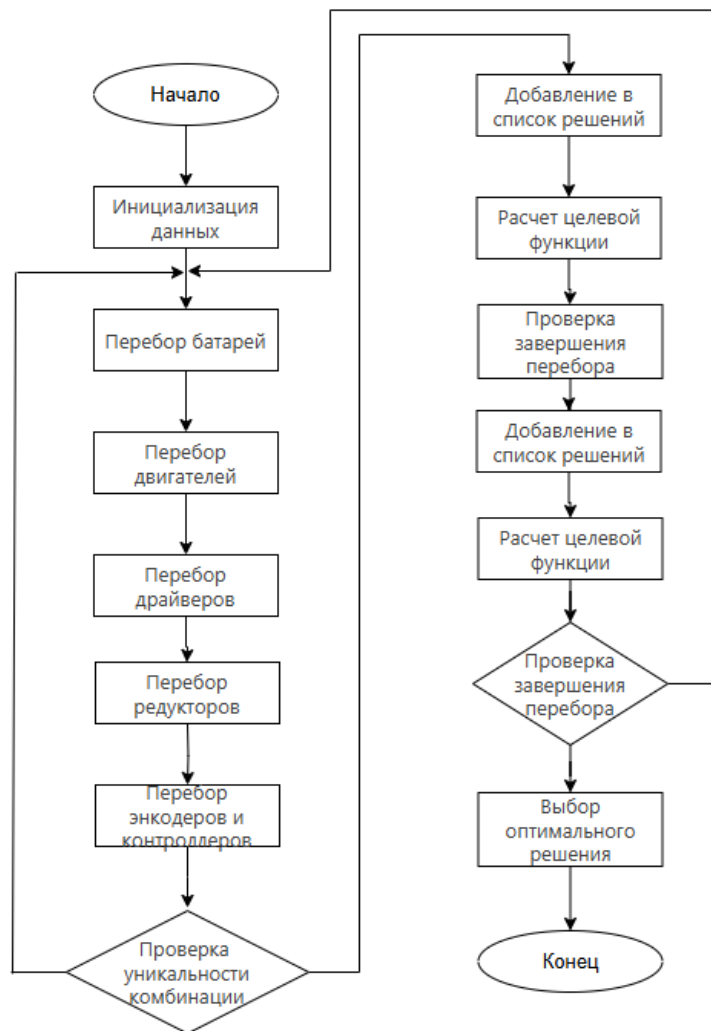


Рисунок 102 – Общий алгоритм синтеза компонентов сборки экзоскелета на основе предъявляемых требований

3.4 Выводы по третьей главе

1. Приведено описание метода формирования проектных решений персонифицированных АЭНК, отличающегося новой компьютерной моделью активного экзоскелета нижних конечностей и набором новых проектных процедур сбора и уточнения параметров оператора 3D-сканированием, выбора активных компонент с учетом технических требований и выявления коллизий на этапе проектирования.

2. На базе Autodesk Inventor была спроектирована параметризованная унифицированная эталонная модель АЭНК, необходимая для подстройки под антропометрические данные оператора.
3. Разработаны проектные процедуры создания 3D-модели оператора отличающиеся от существующих индивидуальным подходом к проектированию АЭНК.
4. Разработана параметризованная 3D-модель АЭНК, отличающаяся от существующих унифицированностью каркаса, на основе анализа коммерческих вариантов АЭНК
5. Разработана проектная процедура анализа динамики сборки проектного решения АЭНК, отличающаяся от существующих методом совмещения компьютерной модели оператора с вариантами АЭНК.

Глава 4. Разработка системы автоматизированного проектирования АЭНК (САПР АЭНК) и проведение испытаний предложенных подходов

4.1 Структура САПР

Для проектирования подсистемы проектирования экзоскелета в системе Autodesk Inventor, необходимо использовать Inventor API [107].

API или интерфейс прикладного программирования – это термин, используемый для описания функциональности, предоставляемой приложением, которая позволяет использовать ее через собственноручно разработанную программу. Например, можно использовать API-интерфейс Inventor для написания программы, которая будет выполнять те же типы операций, которые можно выполнять при интерактивном использовании Inventor.

Наличие API позволяет расширить функционал Inventor. Inventor, по необходимости, представляет собой общую систему САПР, что означает, что она не нацелена на какую-либо конкретную отрасль или не используется для моделирования только определенных типов продуктов. Предоставляя API, Inventor позволяет добавлять дополнительные функции и оптимизировать повторяющиеся операции, чтобы сделать его более оптимальным для индивидуальных потребностей.

API важен по причине, что он позволяет сторонним приложениям интегрироваться с Inventor. Именно через API продукты для PDM, NC и FEM могут взаимодействовать с Inventor.

Разрабатываемая подсистема проектирования создана для изменения параметров экзоскелета под параметры оператора. При вводе снятых заранее параметров с оператора, программа меняет размеры частей экзоскелета с учетом антропометрических параметров человека и выдает измененную сборку.

Программная реализация выполнена на языке C#. Для реализации интерфейса используется платформа Windows Forms .NET [108].

Выбор обусловлен тем, что на данном языке удобно создавать десктопные приложения. Язык относится к объектно-ориентированным. Также используется удобная среда разработки Visual Studio, имеющая огромные возможности. Она была достигнута из-за работы CLR машины, ведь в отличие от других, компилятор CLR запускает разработанное приложение на виртуальном процессоре. Поэтому в случаях возникновения каких-либо ошибок, это никак не повлияет на работу других программ в системе, но это также означает, что для запуска программы необходимо дополнительное время. Соответственно программы написанные на языке программирования C# более надежные, но менее быстрые, нежели те же программы, написанные на C++.

Inventor предоставляет функциональность через свой API, и есть разные способы доступа к API. Inventor и САПР АЭНК представляют собой компоненты, обеспечивающие доступ к API-интерфейсу Inventor, база данных Inventor Data, хранит данные к которым обращаются файлы. ipt и iam. Standalone EXE и Application программы подсистемы проектирования экзоскелета. На рисунке 103 приведенной ниже диаграмме показаны различные способы доступа к API-интерфейсу Inventor.

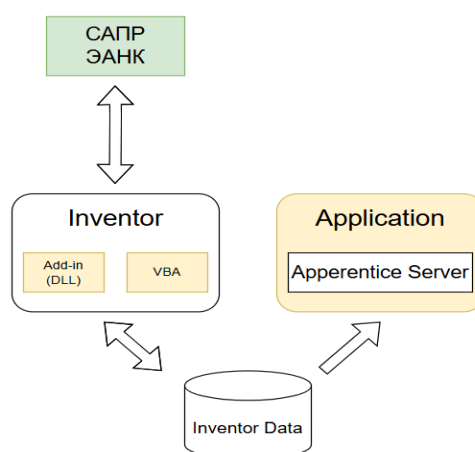


Рисунок 103 - Способы доступа к API-интерфейсу Inventor

Программа написана на языке C# и работает в совокупности с Autodesk Inventor. Обмен данными между программами происходит через Inventor API.

Перед запуском программы должна быть открыта сборка активного или пассивного экзоскелета в программе Autodesk Inventor для корректной работы подсистемы проектирования экзоскелета. При запуске программы запускается диалоговое окно, напоминающее о начале сборки в программе Autodesk Inventor.

После заполнения всех активных вкладок в интерфейсе программы параметрами оператора и нажатия кнопки «Генерация», программа запоминает и обрабатывает введенные значения. Обработка введенных значений происходит в соответствии с проектными процедурами, которые изменяют определенные параметры деталей. Изменение параметров деталей с помощью формул подробно описаны в главе 3 п. 3.3.2.

Следующим этапом идет преобразование эталонной модели, описанной в п. 3.3.2. Если полученное значение антропометрических данных оператора меньше минимального значения, то ему автоматически присваивается минимально допустимое значение. Если полученное значение больше максимального значения, то ему присваивается максимально допустимое значение. Таким образом проверяются все значения параметризованных деталей. После чего проверенные значения записываются в пользовательские параметры деталей.

На выходе мы получаем изменённую сборку экзоскелета под параметры оператора.

Интерфейс программы с полями для заполнения представлен на рисунке 104.

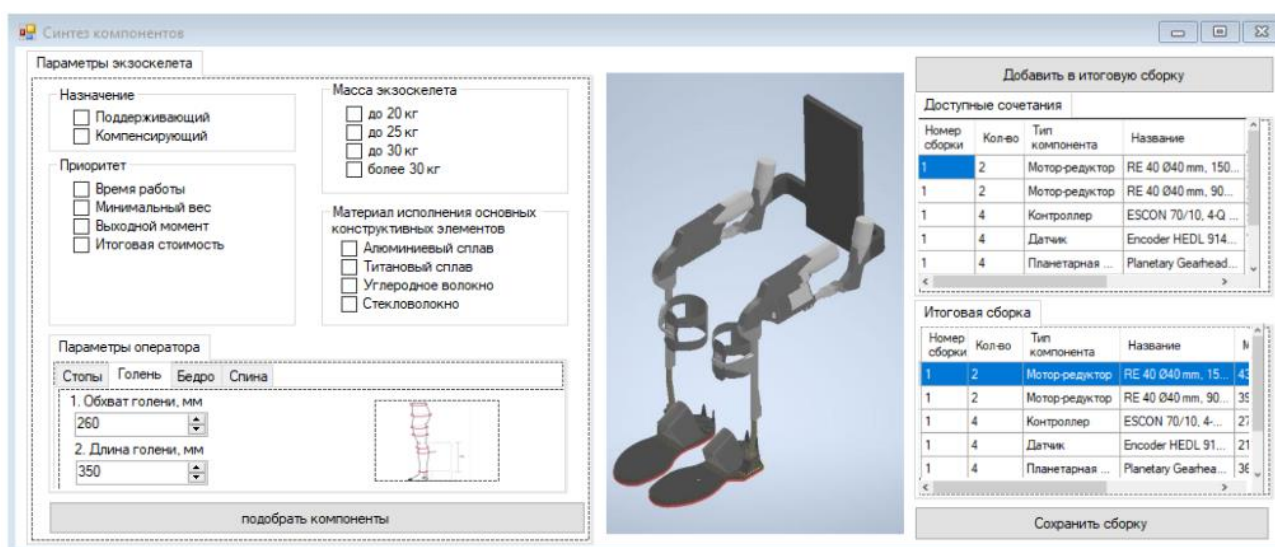


Рисунок 104 – Интерфейс программы

Результат построения 3D-модели Inventor представлен на рисунке 105.

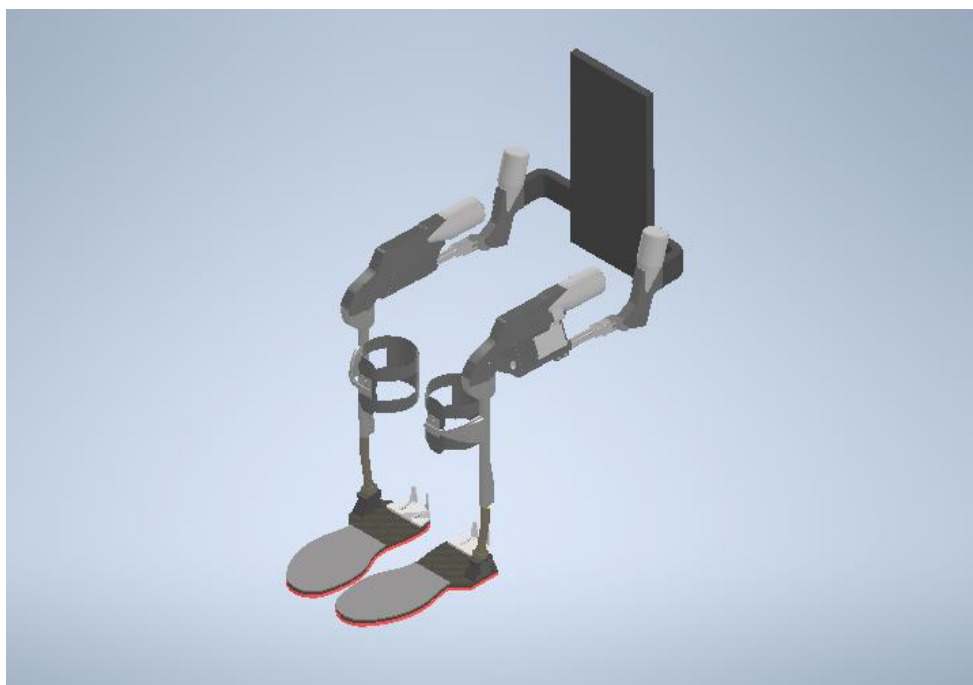


Рисунок 105 – Собранная сборка на основе параметров, загруженных из json файла

Параметризированные компоненты показаны на рисунке 106.

В таблице 16 указаны параметры, снятые с нижних конечностей операторов с помощью сантиметра.

Таблица 16 – Размеры нижних конечностей операторов

Часть тела	Место замера	Оператор				
		1	2	3	4	5
Талия	Обхват бедра	930мм	940 мм	1010 мм	900 мм	1100 мм
	Спина	200 мм	150 мм	240 мм	190	280 мм
Бедро	Длина бедра	430 мм	380 мм	480 мм	410 мм	500 мм
	Обхват бедра	530 мм	500 мм	570 мм	550 мм	500мм
Голень	Длина голени	440 мм	400 мм	500 мм	420 мм	520 мм
	Обхват голени	400 мм	340 мм	440 мм	400 мм	410 мм
Стопа	Длина стопы	280 мм	240 мм	320 мм	230 мм	330 мм
	Обхват стопы	110 мм	100 мм	135 мм	90 мм	120 мм

На первом этапе были взяты параметры оператора 1 из таблицы 10. При редактировании параметров сборки производился ручной переход и редактирование параметров деталей. Во время изменения пользовательских параметров использовались формулы для расчета размеров детали. Расчет проводился по формулам, указанным в главе 3 п. 3.3.2.

4.3 Результаты тестирования

Результаты эксперимента представлены в таблице 17. График сравнения представлен на рисунке 109.

Таблица 17 – Сравнение времени, потраченного на изменение параметров сборки.

Номер теста	Требования к АЭНК	Время вручную / САПР АЭНК
1	Экзоскелет для реабилитации пациентов. Способен работать до 2 часов, с массой до 20 кг под данные оператора 1	54-56 мин. / 5-6 мин.
2	Экзоскелет для реабилитации пациентов. Способен работать до 3 часов, с массой до 30 кг под данные оператора 1	48 - 50 мин. / 4-5 мин.
3	Экзоскелет для реабилитации пациентов. Способен работать от 2 часов, с массой до 20 кг под данные оператора 2	28 - 30 мин. / 5-6 мин.
4	Экзоскелет для реабилитации пациентов. Способен работать от 3 часов, с массой до 20 кг под данные оператора 2	36 -38 мин. / 3-4 мин.
5	Экзоскелет для реабилитации пациента. Способен работать до 5 часов, основной каркас из стекловолокна, вес до 23 кг. под данные оператора 1	41 - 43 мин. / 6-7 мин

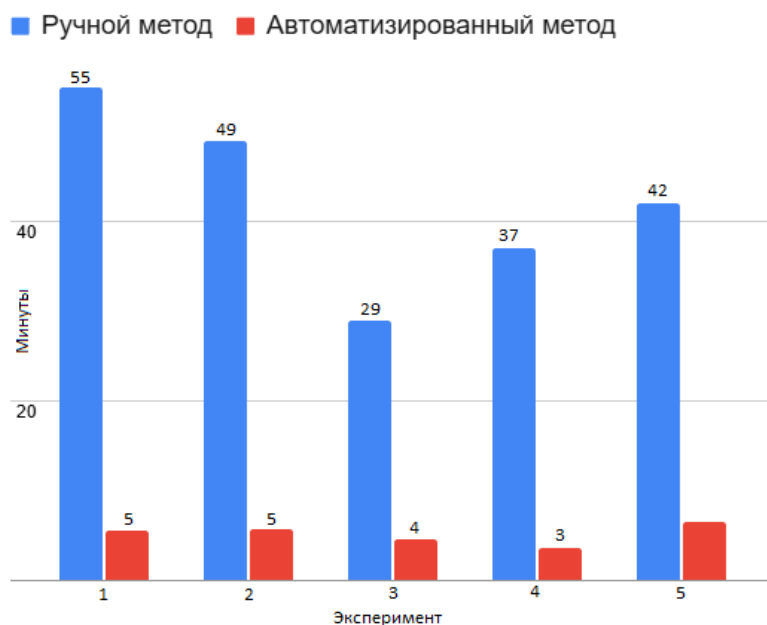


Рисунок 109 – Результаты экспериментов

В следствии чего можно сделать вывод, что применение САПР АЭНК, позволило сократить время параметризацию АЭНК в 8.34 раз.

4.4 Выводы по 4 главе

1) Реализован программный модуль для параметризации сборки экзоскелетов двух типов на языке C# с применением Inventor API.

2) Проведено испытание проектной процедуры анализа динамики АЭНК подбора электро- и радиокомпонент. Позволившее сократить время на индивидуальное проектирование АЭНК по в 8.34 раз.

3) Был проведен эксперимент с параметризацией разработанных сборок, в ходе которого была доказана эффективность предложенного метода.

Общие выводы и заключение

1. Проведен обзор подходов к проектированию персонифицированных активных экзоскелетов нижних конечностей реабилитационного типа, в результате которого был сделан вывод о возможности построения параметризованной 3D-модели экзоскелета, размеры деталей которого зависят от 1) антропометрических параметров оператора и 2) формализованных условий эксплуатации и назначения.

2. Разработана онтологическая модель электро- и радиокомпонент, включающая в себя характеристики 34 двигателей, 35 аккумуляторов, 23 драйверов, 25 энкодеров и 3 контроллеров, необходимых для подбора вариантов комплектации АЭНК.

3. Разработан метод формирования проектных решений персонифицированных АЭНК как набор 3 новых проектных процедур, учитывающий в качестве требований персональные антропометрические параметры оператора и условия функционирования.

4. Разработан метод построения компьютерной модели оператора активного экзоскелета, который позволил получать точные измерения за счет 3D-сканирования оператора и получения облака точек и полигонов.

5. Разработана компьютерная модель АЭНК, включающая параметризованную 3D-модель АЭНК и математическую модель зависимости элементов АЭНК от антропометрических параметров оператора, содержащую 41 деталь, 12 из которых являются параметризованными.

6. Разработана процедура анализа динамики сборки, которая позволяет осуществлять верификацию проектного решения на этапе проектирования за счет выявления коллизий наложением проектных решений и 3D-модели оператора. Данная процедура существенным образом минимизирует риски производства АЭНК, не удовлетворяющего требованиям.

7. Разработана система автоматизированного проектирования АЭНК (САПР АЭНК) и выполнены испытания предложенных подходов на пяти различных АЭНК.

8. Полученные теоретические результаты, которые реализованы в САПР, позволяющие уменьшить время на проектирования до 8.34 раз и получать персонифицированные проектные решения.

Литература

1. Kelechava, B. Powered Exoskeletons [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blog.ansi.org/2016/06/powered-exoskeletons/#gref>
2. Exoskeleton Robots are on the Verge of Exponential Market Growth [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://exoskeletonreport.com/what-is-an-exoskeleton/>
3. Экзоскелет (биология) [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://ru.ruwiki.ru/wiki/Экзоскелет_\(биология\)](https://ru.ruwiki.ru/wiki/Экзоскелет_(биология))
4. Kazerooni, H. Exoskeletons for Human Performance Augmentation. In: Siciliano B., Khatib O. (eds) Springer Handbook of Robotics. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2008.
5. Воробьев А.А., Андриященко Ф.А., Засыпкина О.А., Соловьева И.О., Кривоножкина П.С., Поздняков А.М. Терминология и классификация экзоскелетов // Вестник ВолГМУ. 2015. №3 (55). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/terminologiya-i-klassifikatsiya-ekzoskeletov>
6. Пенин А.С., Пенина Г.О., Ткалич В.Л. Патентное исследование экзоскелетов с целью определения вероятного направления будущих разработок в этой области: анализ открытых источников // BISSA. 2019. №1. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/patentnoe-issledovanie-ekzoskeletov-s-tselyu-opredeleniya-veroyatnogo-napravleniya-buduschih-razrabotok-v-etoy-oblasti-analiz-otkrytyh>
7. Захаров А.В., Антохин Е.А., Воронин Л.Л. Методический подход к оценке активных экзоскелетов военного назначения [https://viek.ru/58/vie_21_4\(58\)-111-120.pdf](https://viek.ru/58/vie_21_4(58)-111-120.pdf)
8. A Survey on Static Modeling of Miniaturized Pneumatic Artificial Muscles With New Model and Experimental Results [Электронный ресурс] – Режим доступа:-

https://www.researchgate.net/publication/328209567_A_Survey_on_Static_Modeling_of_Miniaturized_Pneumatic_Artificial_Muscles_With_New_Model_and_Experimental_Results

9. H. Kazerooni C.A., Foley robotic mechanism for grasping sacks //IEEE transactions on automation science and engineering. – 2005. – Т. 2. – №. 2. – С. 111-120.
10. H. Kazerooni Human power amplifier for lifting load with slack prevention apparatus : пат. 6886812 США. – 2005.
11. Pratt J. E. et al. The RoboKnee: an exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking //IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004. – IEEE, 2004. – Т. 3. – С. 2430-2435.
12. Lajeunesse V., Vincent C., Routhier F., Careau E., Michaud, F. Exoskeletons design and usefulness evidence according to a systematic review of lower limb exoskeletons used for functional mobility by people with spinal cord injury. // Disabil Rehabil Assist Technol. – 2016. – №11. – P. 535-547.
13. Hristic D., Vukobratovic M. Development of active aids for handicapped //Proc. III International Conference on _bio-Medical Engineering (Sorrento, 1973). – 1973.
14. Kong K., Jeon D. Design and control of an exoskeleton for the elderly and patients //IEEE/ASME Transactions on mechatronics. – 2006. – Т. 11. – №. 4. – С. 428-432.
15. Щербина, К. К. Исследование направления развития экзоскелетов опорно-двигательного аппарата / К. К. Щербина, М. А. Головин, М. В. Золотухина // Физическая и реабилитационная медицина. – 2019. – Т. 1, № 4. – С. 5-14. – DOI 10.26211/2658-4522-2019-1-4-5-14. – EDN NOIQHP.
16. Yang, K., Fei Jiang, Q., Lai Wang, X., Wu Chen, Y., Yan Ma, X. Structural design and modal analysis of exoskeleton robot for rehabilitation of lower limb // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – №1087.

17. С. Ф. Яцун, В. Е. Павловский, Б. В. Лушников Экзоскелеты: Анализ конструкций, классификации, принципы создания, основы моделирования "Университетская книга", 2014. – 149 с.

18. Types And Classifications of Exoskeletons // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://exoskeletonreport.com/2015/08/types-and-classifications-of-exoskeletons/> .

19. Петрова Л. Н., Шевцов А. В., Петров А. А., Яхин Д. Х. Опыт разработки пассивного экзоскелета для реабилитации нижних конечностей у детей с ДЦП // Человек. Спорт. Медицина. 2019. №S2. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-razrabotki-passivnogo-ekzoskeleta-dlya-reabilitatsii-nizhnih-konechnostey-u-detey-s-dtsp>

20. Воробьев А. А., Андриющенко Ф. А., Засыпкина О. А., Кривоножкина П. С. К методике определения анатомически зависимых параметров экзоскелета верхней конечности Экзар // Волгоградский научно-медицинский журнал. 2015. №1. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-metodike-opredeleniya-anatomicheskii-zavisimyyh-parametrov-ekzoskeleta-verhney-konechnosti-ekzar>

21. Ferris D. P., Czerniecki J. M., Hannaford B. An ankle-foot orthosis powered by artificial pneumatic muscles //Journal of applied biomechanics. – 2005. – Т. 21. – №. 2. – С. 189-197.

22. Exoskeleton Market - Global Industry Assessment & Forecast // www.vantagemarketresearch.com [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.vantagemarketresearch.com/industry-report/exoskeleton-market-1250>

23. Аведиков Г. Е., Жмакин С. И. Экзоскелет: конструкция, управление // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. — 2014. — С. 84—90.

24. Борисов А., В., Эмпирический и теоретический подходы к управлению движением экзоскелета // Вестник Балтийского федерального

университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2017. №3. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/empiricheskiy-i-teoreticheskiy-podhody-k-upravleniyu-dvizheniem-ekzoskeleta> (дата обращения: 17.02.2025).

25. Экзоскелеты: принцип действия, конструкция, применение [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://top3dshop.ru/blog/exoskeleton-explained-review.html?srsId=AfmBOoptwH7ZKp-AoOSh1LuUDVolbDIYHE-qs91zC42skXJ9WH8gA0tB>

26. А. А. Геворкян, С. В. Котов, В. Ю. Лиждвой. Роботизированная механотерапия: возможность применения экзоскелета для нижних конечностей у пациентов с нарушением функции ходьбы при рассеянном склерозе / // Альманах клинической медицины. — 2020. — Т. 48, № 1. — С. 7-12.

27. Давыдов В. К. Особенности механики рабочего прототипа реабилитационного экзоскелета нижних конечностей // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. №4-1 (79). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-mehaniki-rabochego-prototipa-reabilitatsionnogo-ekzoskeleta-nizhnih-konechnostey>

28. Louie, D., Eng, J. Powered robotic exoskeletons in post-stroke rehabilitation of gait // A scoping review: Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. – 2016.

29. С.С. Попова, С.Е. Драгунов, А.В. Матохина Анализ мирового рынка коммерческих экзоскелетов // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине : сб. науч. тр. V междунар. науч. конф. (17-21 декабря 2018 г.). В 2 ч. Ч. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://portal.tpu.ru/files/departments/publish/Sbornik_InfTehmol_P1.pdf.

30. Анализ размера и доли рынка экзоскелетов – тенденции роста и прогнозы

[Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/exoskeleton-market>

31. Пат. 2793174 Российская Федерация, МПК А61F 2/50, А61F 2/50, А61Н 3/00, В25J 1/02, В25J 9/10. Промышленный экзоскелет для верхних и нижних конечностей / Яцун С.Ф., Яцун А.С. № 2021139417; заявл. 28.12.2021 опубл. 29.03.2023 Бюл. № 10. – с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://exomed.org/wp-content/uploads/2024/02/elibrary_53729797_57162606.pdf

32. Патент 135640 Российская Федерация. Промышленный экзоскелет для верхних и нижних конечностей / Яцун С.Ф., Яцун А.С., Логунов Е.Р., Никулин Я.С., Терехов Д.В. № : 2022505070; заявл. 22.11.2022 опубл. 03.03.2023 Бюл. № 3 - 2 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://exomed.org/wp-content/uploads/2024/02/elibrary_50429227_86435677.pdf

33. A review of exoskeleton-type systems and their key technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.academia.edu/6275563/A_review_of_exoskeleton-type_systems_and_their_key_technologies

34. Exoskeleton Market - Global Industry Assessment & Forecast // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.vantagemarketresearch.com/industry-report/exoskeleton-market-1250>

35. Лавровский, Э. К., Письменная, Е. В. О регулярной ходьбе экзоскелетона нижних конечностей при дефиците управляющих воздействий / Э. К.Лавровский, Е. В. Письменная // Российский журнал биомеханики. – 2014. – Т. 18, № 2: – С. 208 – 225

36. Long, Y., Du, Z.-j, Wang, W., Dong, W. Development of a wearable exoskeleton rehabilitation system based on hybrid control mode. // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2016. – №13.

37. Bionic ankle 'emulates nature' [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://news.mit.edu/2014/hugh-herr-bionic-ankle-emulates-nature-0417>

38. A Brand-New Kick [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.bostonmagazine.com/2013/11/26/prosthetics-research-boston-biom-ankle-prosthetic/>

39. Emily R., Seong H., Christian L., Duncan R. C. Variable-stiffness prosthesis improves biomechanics of walking across speeds compared to a passive device [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/382332328_Variable-stiffness_prosthesis_improves_biomechanics_of_walking_across_speeds_compared_to_a_passive_device

40. Рамный коленный ортез Genu Arexa [Электронный ресурс] – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ottobock-shop.ru/catalog/medical-orthoses-knee/50K13N/>

41. От RoboCup до RoboAssist: современное состояние индустрии экзоскелетов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/first/articles/726138/>

42. Соколовский В.А. Визуальная схема расположения основных элементов нагрузочного экзоскелета [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/42504/1/Sokolovskiy_Vizualnaya.pdf

43. Анализ структуры экзоскелетов [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://top3dshop.ru/blog/exoskeleton-explained-review.html?srsId=AfmBOoqr3hMWhttNkWvH1wbU5ot4adfhcmziq_eaJk5Qe4fWmQlBOwMk

44. Бодров Е. Э., Мубаракшин А. Р., Ахметдинов Д. А., Моисеев В. С. Обзор основных типов приводных механизмов // НАУ. 2016. №5-1 (21). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-osnovnyh-tipov-privodnyh-mehanizmov>

45. Оразов А.Т. Разработка и исследование гидропневматического привода экзоскелетного устройства. - Уфа, 2018. - 160 с.

46. Хоружко М. А., Сесекин Г. Н., Болдырева Н. В., Шамшин М. О., Кастальский И. А., Миронов В. И., Пимашкин А. С., Казанцев В. Б. Мобильная система управления экзоскелетом с помощью электромиографических сигналов мышц человека // Современ. технол. мед.. 2017. №4. [Электронный

ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/mobilnaya-sistema-upravleniya-ekzoskeletom-s-pomoschyu-elektromiograficheskikh-signalov-myshts-cheloveka>

47. Schiele, A. Fundamentals of ergonomic exoskeleton robots. –2008.

48. Munoz, L.M., Ergonomics in the Industry 4.0: Exoskeletons. – 2017.

49. Орлов И. А., Алисейчик А. П., Меркулова А. Г., Комарова С. В., Белая О. В., Грибков Д. А., Подоприсветов А. В., Павловский В. Е., Ефимов А. Р., Бетц К. В. Актуальность использования промышленных экзоскелетов для снижения количества профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата верхней части тела // Мед. труда и пром. экол.. 2019. №7. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnost-ispolzovaniya-promyshlennyh-ekzoskeletov-dlya-snizheniya-kolichestva-professionalnyh-zabolevaniy-oporno-dvigatel'nogo> (дата обращения: 18.02.2025).

50. Chen, B., Ma, H., Qin, L.-Y, Gao, F., Chan, K.-M, Law, S.-W., Qin, L., Liao, W-H. Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons. // Journal of Orthopaedic Translation. – 2015. – №5.

51. Вережкин А.А. Практическое применение экзоскелетов в промышленности и строительстве [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.str-t.ru/reports/19/>.

52. Таможный В. А. Проектирование и создание опытных образцов нижних конечностей промышленного экзоскелета // Инновации и инвестиции. 2021. №1. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-i-sozdanie-opytnyh-obraztsov-nizhnih-konechnostey-promyshlennogo-ekzoskeleta> (дата обращения: 17.02.2025).

53. Таможный В.А. Проектирование и создание опытных образцов нижних конечностей промышленного экзоскелета // Инновации и инвестиции. 2021. №1. - [Электронный ресурс] – Режим доступа:

<https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-i-sozdanie-opytных-obraztsov-nizhnih-konechnostey-promyshlennogo-ekzoskeleta> (дата обращения: 06.05.2023)

54. Анализ размера и доли рынка экзоскелетов – тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/exoskeleton-market>

55. Антропометрические характеристики человека. [Электронный ресурс] [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/5566550/page:13/>.

56. Гусева Марина Анатольевна, Гетманцева Варвара Владимировна, Андреева Елена Георгиевна, Петросова Ирина Александровна Параметризация цифровой антропометрической информации для 3D-проектирования швейных изделий // Территория новых возможностей. 2019. №2. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/parametrizatsiya-tsifrovoy-antropometricheskoy-informatsii-dlya-3d-proektirovaniya-shveynyh-izdeliy> (дата обращения: 18.02.2025).

57. Дьякова Галина Николаевна, Смеян Вероника Евгеньевна, Кордикова Елена Ивановна 3D-сканирование и последующее изготовление анатомических моделей методами аддитивных технологий // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2023. №1 (265). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/3d-skanirovanie-i-posleduyuschee-izgotovlenie-anatomicheskikh-modeley-metodami-additivnyh-tehnologiy> (дата обращения: 18.02.2025).

58. Näf, M., Junius, K., Rossini, M., Rodriguez-Guerrero, C., Vanderborght, B., Lefeber, D. Misalignment compensation as a way to ensure full human-exoskeleton kinematic compatibility: state of the art and evaluation. // Applied Mechanics Reviews. –2019. – №70.

59. Вережкин А. А., Ковальчук А. К., Кулаков Д. Б., Семенов С. Е. Анализ и выбор кинематической структуры исполнительного механизма экзоскелета // Машиностроение и компьютерные технологии. 2014. №7.

[Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-vybor-kinematicheskoy-struktury-ispolnitelnogo-mehanizma-ekzoskeleta>

60. А. А. Воробьев, А. В. Петрухин, О. А. Засыпкина, П. С. Кривоножкина, А. М. Поздняков Экзоскелет как новое средство в абилитации и реабилитации инвалидов (обзор) // Современ. технол. мед.. 2015. №2. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekzoskelet-kak-novoe-sredstvo-v-abilitatsii-i-reabilitatsii-invalidov-obzor> (дата обращения: 18.02.2025).

61. Блинов А. О., Борисов А. В., Кончина Л. В., Куликова М. Г., Маслова К. С. Моделирование движения активного экзоскелета с пятью управляемыми электроприводами звеньями // Российский журнал биомеханики. 2023. №4. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-dvizheniya-aktivnogo-ekzoskeleta-s-ryatu-u-pravlyaemyimi-elektroprivodami-zvenyami> (дата обращения: 17.02.2025).

62. Ревняков Е. Н., Пикалов М. И. Экспериментальное исследование параметров ходьбы и приседаний в зависимости от параметров звеньев нижних конечностей // Colloquium-journal. 2019. №25 (49). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-parametrov-hodby-i-prisedaniy-v-zavisimosti-ot-parametrov-zveniev-nizhnikh-konechnostey>

63. Robotic exoskeleton: For a better quality of life // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.maxonmotor.com/maxon/view/application/Robotic-exoskeleton-For-a-better-quality-of-life>

64. Lg to usher in new era of ai robotics with wearable robot // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.lgnewsroom.com/2018/08/lg-to-usher-in-new-era-of-ai-robotics-with-wearable-robot/>

65. ЕхоАтлет [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://exoatlet.ru/ru/exoatlet/>

66. Интеллектуальный экзоскелет LG [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://chudo.tech/2018/08/27/v-lg-sozdali-intellektualnyj-ekzoskelet/>

67. The next step in NeuroRehabilitation eksobionics // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://eksobionics.com/eksonr/>
68. What's HAL? // [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.cyberdyne.jp/english/products/LowerLimb_medical.html
69. Kawamoto, H., Sankai, Y. Power assist method based on phase sequence and muscle force condition for HAL / H. Kawamoto, Y. Sankai // Advanced Robotics. –Vol.19, No.7. – 2005. – pp. 717-734.
70. Sankai, Y. Leading Edge of Cybernics: Robot Suit HAL / Y. Sankai // SICEICASE International Joint Conference. – Вехсо. – 2006.
71. Бедняк С.Г., Еремина О.С. Роботизированные экзоскелеты HAL (почувствуй себя HAL'ra); Сборник научных трудов Sworld, 2014; № 1; 49-51.
72. Юревич Е.И. Основы робототехники: учебное пособие/ Е. И. Юревич. — 2-е изд. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 401 с.
73. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
74. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Костюков В.А., Гайдук А.Р., Федоренко Р.В., Гуренко Б.В., Крухмалев В.А., Медведева Т.Н. Проектирование роботов и робототехнических систем: Учебное пособие – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 196 с.
75. Проектирование роботов и робототехнических систем : учебно-методическое пособие / Сиб. федер. ун-т, Политехн. ин-т ; сост. А. Н. Сочнев. - Красноярск : СФУ, 2023. - 110 с.
76. ГОСТ 2.118-73 ЕСКД. Техническое предложение. Издания Международный стандартный книжный номер. Использование и издательское оформление. – М. : Стандартиформ, 2007. -5с.
77. ГОСТ 2.119-73 ЕСКД. Эскизный проект. Издания Международный стандартный книжный номер. Использование и издательское оформление. – М. : Стандартиформ, 2007. -5с.

78. ГОСТ 2.120-73 ЕСКД. Технический проект. Издания Международного стандартного книжного номера. Использование и издательское оформление. – М. : Стандартин-форм, 2007. -5с.

79. Котов Е. А., Друк А. Д., Клыпин Д. Н. Разработка экзоскелета нижних конечностей человека для медицинской реабилитации // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178).

80. Патент 135640 Российская Федерация. Промышленный экзоскелет для верхних и нижних конечностей / Яцун С.Ф., Яцун А.С., Логунов Е.Р., Никулин Я.С., Терехов Д.В. № : 2022505070; заявл. 22.11.2022 опубл. 03.03.2023 Бюл. № 3 - 2 с

81. Патент RU156507U1 Российская Федерация, МПК А622В99/00. Экзоскелет нижних конечностей / П.А. Безмен, С.Ф. Яцун, А.С. Яцун; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ЮЗГУ. - № 20151073223/12; заявл. 04.02.2015; опубл. 10.11.2015.

82. Даминов В. Д., Ткаченко П. В. Экзоскелеты в медицине: мировой опыт и клиническая практика Пироговского Центра // Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н. И. Пирогова. 2017. №4-2. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekzoskelety-v-medicine-mirovoy-opyt-i-klinicheskaya-praktika-pirogovskogo-tsentra>

83. Лавровский, Э. К., Письменная, Е. В. Алгоритмы управления экзоскелетом нижних конечностей в режиме одноопорной ходьбы по ровной и ступенчатой поверхностям / Э. К. Лавровский, Е. В. Письменная // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2014. – № 1. – С. 44 – 51.

84. Лавровский Э.К., Письменная Е.В. Об управлении процессом регулярной ходьбы экзоскелетом нижних конечностей при помощи электроприводов. // DOI: 10.17587, МАУ, №3, 2018 vol. 19, №. 3, pp. 160—168.

85. Динь Д. Ч., Разработка системы управления электроприводами экзоскелета на основе нейронной сети : - Санкт-Петербург, 2022. - 163 с.

86. Пассивный экзоскелет нижних конечностей человека / Н.Д. Бабанов, М.Г. Мощенков, Г.П. Егоров, О.В. Кубряк // Динамика сложных систем - XXI век. - 2019. - № 4. - С. 23-28

87. Яцун С. Ф., Рукавицын А. Н. Разработка биоинженерного мехатронного модуля для экзоскелета нижних конечностей человека // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. №4-5. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-bioinzhenernogo-mehatronnogo-modulya-dlya-ekzoskeleta-nizhnih-konechnostey-cheloveka>

88. Saypulaev, M. R. Development of the Lower Extremity Exoskeleton Dynamics Model Using in the Task of the Patient Verticalization / M. R. Saypulaev, Yu. Yu. Zuev, G. R. Saypulaev // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2096. — Art. 0120421

89. Guo, Q., Li, S., & Jiang, D. (2015). A Lower Extremity Exoskeleton: Human-Machine Coupled Modeling, Robust Control Design, Simulation, and Overload-Carrying Experiment. Mathematical Problems in Engineering, 2015(1)

90. Поезжаева Е. В., Соколов Д. А., Курочкина В. К. Развитие конструктивных схем экзоскелетов // Молодой ученый. — 2018. — №1. — С. 21-23. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/187/47607/>

91. К вопросу применения экзоскелетов в промышленной и строительной сфере - история разработок, виды, классификация [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.str-t.ru/reports/18/>

92. Научно-технический отчёт Создание научно-исследовательской лаборатории современных методов и робототехнических систем для улучшения среды обитания человек: отчёт НИР/ /Яцун С.Ф. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2014. – 166 с.

93. Виды и типы электродвигателей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.nporusgidro.com/blog/elektrodvigateli/vidy-i-tipy-elektrodvigateley/>

94. Виды электродвигателей: классификация [Электронный ресурс] – Режим доступа:

https://gkgidromash.ru/stati/vidy_elektrodvigateley_klassifikatsiya/

95. Малюшин С. В. Некоторые вопросы применения электродвигателей в современном машиностроении // Вестник науки. 2021. №7 (40). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-voprosy-primeneniya-elektrodvigateley-v-sovremennom-mashinostroenii>

96. Слободян С. М. Многомернокоординатный привод микроуправления // Известия ТПУ. 2003. №5. классификация [Электронный ресурс] – Режим доступа:

<https://cyberleninka.ru/article/n/mnogomernokoordinatnyy-privod-mikroupravleniya>

97. Коллекторный электродвигатель постоянного тока [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ru.about-motors.com/motorcontrol/brushdcmotor/>

98. Серводвигатели: принцип работы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.pvamper.ru/stati/servodvigateli-princip-raboty>

99. Шаговые двигатели и особенности их применения [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://kit-e.ru/shagovye-dvigateli/>

100. G. Karnup, V. Naumov, O. Telminov Overview of exoskeleton control methods: from buttons to neural networks DOI: 10.22184/1992-4178.2022.221.10.70.75

101. Шестаков В. К. Интерфейс взаимодействия оператора и экзоскелета, использующий электроэнцефалографию // Вестник науки. 2024. №6 (75). применения [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/interfeys-vzaimodeystviya-operatora-i-ekzoskeleta-ispolzuyuschiy-elektroentsefalografiyu>

102. Драгунов, С.Е. Метод автоматизированного проектирования экзоскелета с учетом антропометрических данных пользователя / С.Е. Драгунов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. - 2024. - Т. 12,

№ 2. – 12 с применения [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://moitvivi.ru/ru/journal/pdf?id=1545>.

103. User guide Artec Studio [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://docs.artec-group.com/as/10/artec_studio_userguide_en.pdf

104. Анимация персонажей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/258587/>

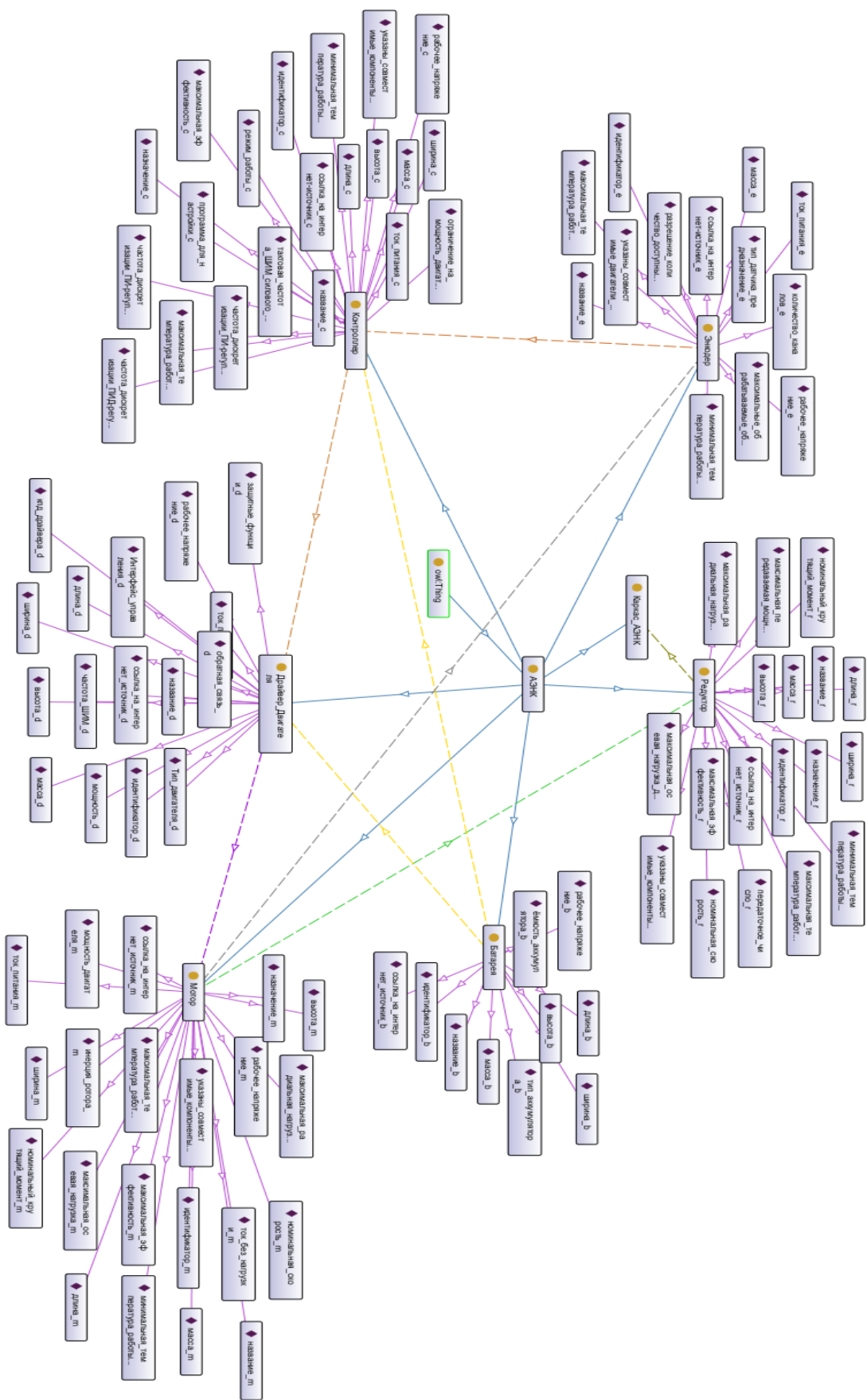
105. Создание параметрической детали в Autodesk Inventor: пустоты и параметризация [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://infars.ru/blog/sozдание-parametricheskoy-detali-pustoty-i-parametrizatsiya/>

106. Анимлируем 3d-персонажа [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/803113/>

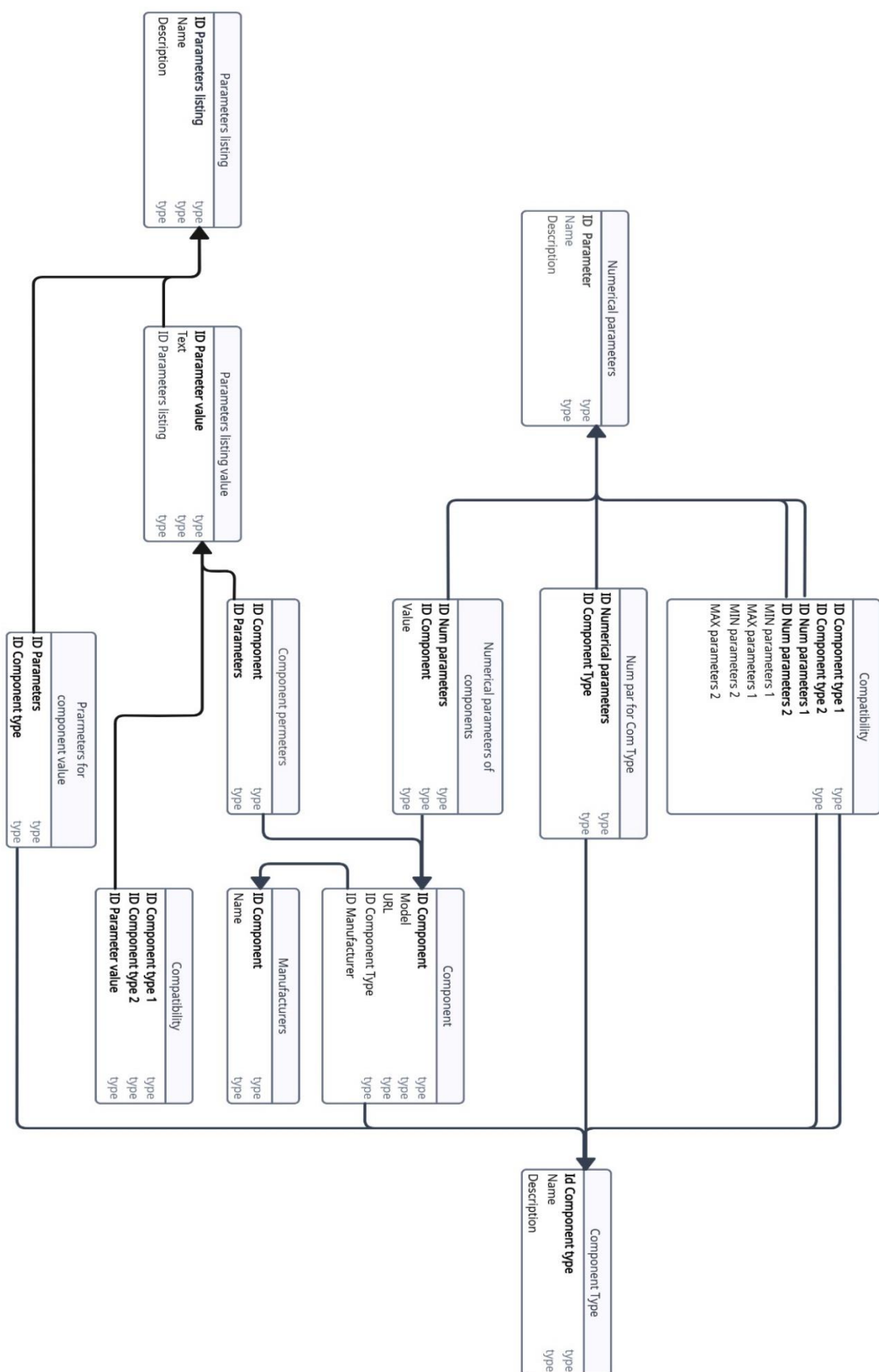
107. Autodesk Inventor API. Первые шаги [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ru.wikibooks.org/wiki/Autodesk_Inventor_API._%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B2%D1%8B%D0%B5_%D1%88%D0%B0%D0%B3%D0%B8

108. Приложение в Visual Studio [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://metanit.com/sharp/windowsforms/1.1.php>

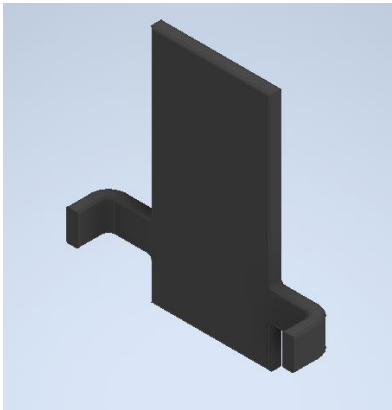
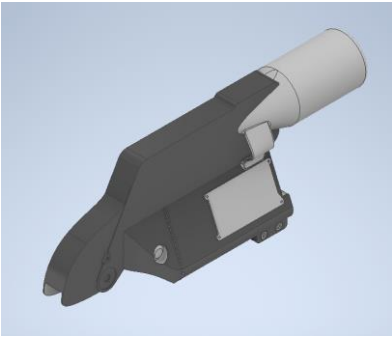
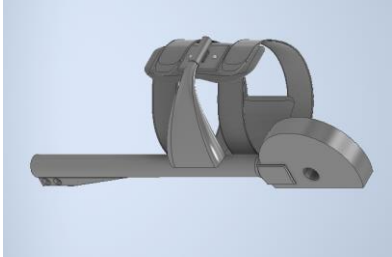
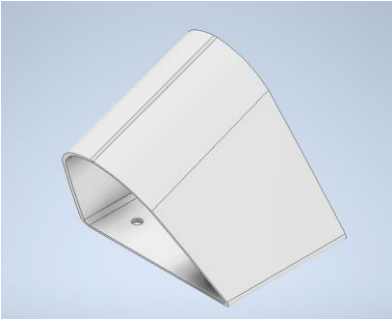
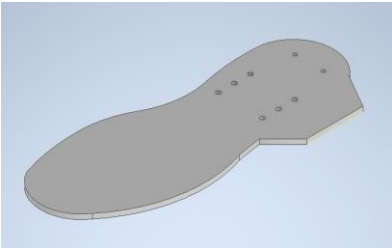
Приложение А - Расширенное описание онтологии компонент АЭНК

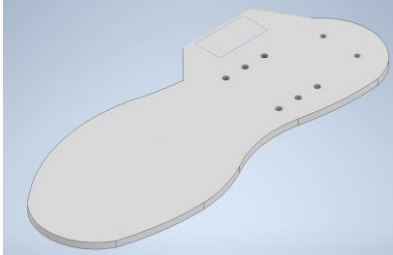


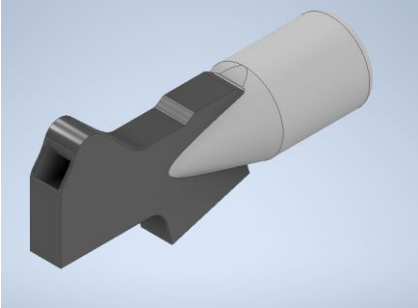
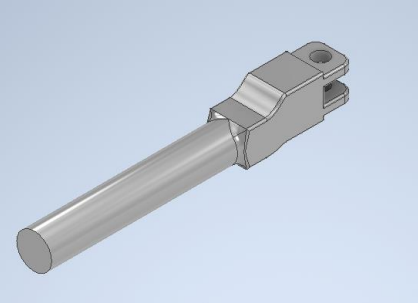
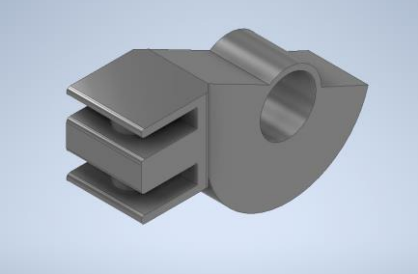
Приложение Б – База данных компонент

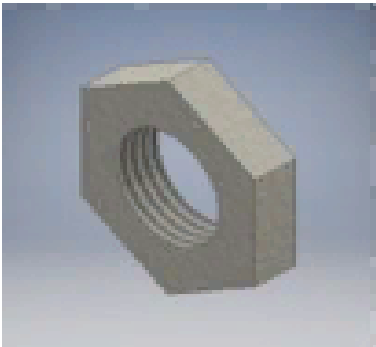


Приложение В - Параметризованные детали сборки АЭНК

Название	Миниатюра	Количество
Каркас спины		1 шт.
Каркас бедра		2 шт.
Каркас голени		2 шт.
Крепление для ног		4 шт.
Каркас левой стопы		1 шт.

Название	Миниатюра	Количество
Каркас правой стопы		1 шт.
Электромагнитный привод		2 шт.
Электромагнитный привод с удлиненным штоком		2 шт.
Датчик давления		12 шт.

Название	Миниатюра	Количество
Соединительный элемент		2 шт.
Элемент шарнира		2 шт.
Элемент шарнира 2		2 шт.
Болт шарнирный		2 шт.
Обратный болт шарнира		2 шт.

Название	Миниатюра	Количество
Болт шарнирный стопы		2 шт.
Обратный болт шарнира стопы		2 шт.
Болт для привода		24 шт.
Болт для креплений		14 шт.
Гайка		6 шт.

Название	Миниатюра	Количество
Болт для крепления датчиков ноги		32 шт.
Болт для датчика стопы		16 шт.

Приложение Г - АКТ внедрения



Малое инновационное предприятие
Центр Молодежного Инновационного Творчества
ЛАБОРАТОРИЯ ЮНЫХ КОНСТРУКТОРОВ
www.cmit.vstu.ru

Общество с ограниченной ответственностью
«Центр молодежного инновационного творчества
«Лаборатория юных конструкторов»
ИНН 3444262162, КПП 344401001, Юр. адрес: 400005,
г. Волгоград, пр-т Ленина 28, комната В1402-2
Директор: Матохина Анна Владимировна, e-mail:
cmit.lux.volgograd@gmail.com тел. 8 902 384 48 78

Акт о внедрении результатов диссертационной работы Драгунов Станислава Евгеньевича на тему «Система автоматизации антропометрического проектирования АЭНК»

Комиссия ООО ЦМИТ «ЛЮКС» в составе Матохиной А.В и Щербаковой Н.Л. рассмотрел вопрос об использовании результатов диссертационной работы Драгунов Станислава Евгеньевича и установила следующее.

Разработанное в рамках диссертационного исследования приложения внедрено в корпоративную систему поддержки принятия решений и используется нашими специалистами в проектной работе.

директор ООО ЦМИТ ЛЮКС

Матохина Анна Владимировна

главный инженер ООО ЦМИТ ЛЮКС

Щербакова Наталья Львовна

