

Школа Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»
 Отделение школы (НОЦ) Отделение электронной инженерии

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Проектирование экзоскелета

УДК 616.728-089.22-76-047.86:004.896.032.26

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Д81	Володин Александр Владимирович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Иванова В.С.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гасанов М.А.оглы	Д.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Авдеева И.И.	–		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Кулагин А.Е.	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Дикман Е.Ю.	К.Т.Н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
УК(У)-10	Способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности
УК(У)-11	Способен формировать нетерпимое отношение к коррупционному поведению
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в инженерной деятельности, связанной с разработкой, проектированием, конструированием, технологиями производства и эксплуатации биотехнических систем

ОПК(У)-2	Способен осуществлять профессиональную деятельность с учетом экономических, экологических, интеллектуально правовых, социальных и других ограничений на всех этапах жизненного цикла технических объектов и процессов
ОПК(У)-3	Способен проводить экспериментальные исследования и измерения, обрабатывать и представлять полученные данные с учетом специфики биотехнических систем и технологий
ОПК(У)-4	Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности
ОПК(У)-5	Способен участвовать в разработке текстовой, проектной и конструкторской документации в соответствии с нормативными требованиями
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способность к разработке и интеграции биотехнических систем и технологий
ПК(У)-2	Способность к проведению технического обслуживания биотехнических систем и медицинских изделий
Профессиональные компетенции университета	
ДПК(У)-1	Способность выбирать метод и разрабатывать программу экспериментальных исследований, проводить медико-биологические исследования с использованием технических средств, выбирать метод обработки результатов исследований

Школа Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности

Направление подготовки (специальность) 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»

Отделение школы (НОЦ) Отделение электронной инженерии

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Е.Ю. Дикман
 «__» _____ 2022 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
1Д81	Володин Александр Владимирович

Тема работы:

Проектирование экзоскелета	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	от 21.04.2022 № 111-90/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является экзоскелет плечевого пояса для повседневного использования людьми с ограниченными возможностями верхних конечностей. Каркас экзоскелета изготавливается в соответствии с анатомическими особенностями руки человека из биологически инертных материалов. Максимальная грузоподъемность при сгибании в локтевом суставе – 8 кг, при вращении в плечевом – 3 кг. Общая масса каркаса – не более 3 кг.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Аналитический обзор литературных источников с целью выяснения мировых достижений в области экзоскелетостроения. Анализ и сравнение экзоскелетов с разными типами приводов. Анализ конструкций жкзоскелетов верхних конечностей. Обоснование выбора привода и выполненные расчеты. Экспериментальное исследование работы ПМ Описание способа реализации системы управления. Разработка модели каркаса экзоскелета. Изготовление макета шарнирного соединения с ПМ</p>

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Чертеж общего вида корпуса экзоскелета плечевого пояса, спецификация, рисунки, таблицы.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Гасанов М.А.оглы
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Авдеева И.И.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Иванова В.С.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Д81	Володин Александр Владимирович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1Д81	Володин Александр Владимирович

Школа	ИШНКБ	Отделение школы (НОЦ)	Отделение электронной инженерии
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	12.03.04

Проектирование экзоскелета

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Оклад руководителя –70 000 руб. Оклад инженера – 50 000 руб.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Премимальный коэффициент руководителя 30%; Премимальный коэффициент инженера 20%; Доплаты и надбавки руководителя 20%; Доплаты и надбавки инженера 20%; Дополнительной заработной платы 12%; Накладные расходы 16%; Районный коэффициент 30%.</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды 30,2 %</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Определение потенциального потребителя результатов исследования, SWOT-анализ разработанной стратегии</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Определение структуры работы. Расчет трудоемкости выполнения работ. Подсчет бюджета исследования</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Рассчитать показатели финансовой эффективности, ресурсоэффективности и эффективности исполнения</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Альтернативы проведения НИ</i>
4. <i>График проведения работ</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСТН	Гасанов Магеррам Али оглы	д.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Д81	Володин Александр Владимирович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
1Д81		Володин Александр Владимирович	
Школа	ИШНКБ	Отделение (НОЦ)	Отделение электронной инженерии
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Биотехнические системы и технологии 12.03.04

Тема ВКР:

Проектирование экзоскелета	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
Введение	<p><i>Объект исследования:</i> экзоскелет плечевого пояса на пневматических мышцах <i>Область применения:</i> медицинская реабилитация <i>Рабочая зона:</i> малое производственное помещение <i>Размеры помещения:</i> 5x3 м <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> паяльное оборудование, SLS 3D принтер, ПК, компрессор, баллон малого давления. <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> проектирован и печать элементов каркаса, пайка и программирование микросхем, сборка изделия, отладка приводов, подзарядка АКБ</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке:	<p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.03.2022) ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. ГОСТ Р ИСО 6385-2016. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем. ГОСТ 21889-76. Система «человек-машина». Кресло человека- оператора. Общие эргономические требования. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания</p>
2. Производственная безопасность при разработке:	<p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – повышенная температура поверхностей оборудования, изделий; – повышенное напряжение в электрической цепи, – факторы, связанные с повышенным образованием электростатических зарядов

	<ul style="list-style-type: none"> – сосуды, работающие под давлением – импульсное лазерное излучение; – неподвижные режущие, колющие, обдирающие, разрывающие части твердых объектов. <p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – отсутствие или недостатки необходимого искусственного освещения; – повышенный уровень шума; – повышенный уровень вибраций на рабочем месте; – запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны; – неудовлетворительный микроклимат; – физические и нервно-психические перегрузки. <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: использование вытяжных устройств, звукоизоляционных материалов, средств индивидуальной защиты. Соблюдение требований безопасности ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ.</p>
<p>3. Экологическая безопасность при разработке</p>	<p>Воздействие на селитебную зону: при выполнении работы влияние на селитебную зону не происходит.</p> <p>Воздействие на литосферу: загрязнение токсичными соединениями тяжелых металлов при нарушении правил утилизации литий-ионных аккумуляторов и элементов искусственного освещения</p> <p>Воздействие на гидросферу: загрязнение сточными водами и отходами жизнедеятельности.</p> <p>Воздействие на атмосферу: загрязнение атмосферы парами свинца и олова во время процесса пайки соединительных проводников и радиоэлементов на печатных платах</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке</p>	<p>Возможные ЧС: пожары, поражение электрическим током; природные катастрофы (наводнения, цунами, ураган и т.д.); геологические воздействия (землетрясения, оползни, обвалы, провалы территории и т.д.);</p> <p>Наиболее типичная ЧС: возгорание и пожар вследствие короткого замыкания</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Авдеева Ирина Ивановна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Д81	Володин Александр Владимирович		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности

Направление подготовки 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»

Уровень образования бакалавриат

Отделение школы (НОЦ) Отделение электронной инженерии

Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2021 /2022 учебного года)

Форма представления работы:

бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата Контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.02.2022	Обзор литературы.	10
15.03.2022	Проектирование модели каркаса экзоскелета.	20
01.05.2021	Разработка экспериментального макета шарнирного соединения с ПМ. Выполнение расчетов для используемого привода. Проведение экспериментов.	20
15.05.2022	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	20
25.05.2022	Социальная ответственность.	20
17.06.2022	Оформление расчетно-пояснительной записки	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Иванова В.С.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Дикман Е.Ю.	к.т.н.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит: 106 страниц, 44 рисунка, 23 таблицы, 29 источников и 1 приложение.

Ключевые слова: экзоскелет, наручный, пневматические мышцы, плечевой пояс, медицинская реабилитация, биомеханика, полиамидный пластик; exoskeleton, medical rehabilitation, pneumatic muscle, upper limbs.

Объектом исследования является экзоскелет плечевого пояса на пневматических мышцах. Целью данной работы является разработка легкого и удобного экзоскелета плечевого пояса для повседневного использования людьми с ограниченными возможностями верхних конечностей в период реабилитации после перенесенных заболеваний.

Задачи:

1. Обоснование выбора привода и выполниие расчетов.
2. Разработка модели каркаса экзоскелета
3. Описание способа реализации системы управления
4. Изготовление макета шарнирного соединения с ПМ

В соответствии с намеченной целью и задачами исследования были определены следующие методы:

1. Анализ и сравнение экзоскелетов с разными типами приводов, выявление преимуществ и недостатков.
2. Экспериментальный метод, включающий проведение эксперимента для определения степени сокращения пневматической мышцы в реальных условиях, анализ и обобщение полученных данных.
3. Моделирование программными средствами зависимости усилия, создаваемого пневматической мышцей от относительной степени сокращения.

На данный момент медицинская реабилитация пациентов с использованием экзоскелетов получила широкое применение, однако разработки использующие пневматические мышцы в качестве привода остаются перспективной новинкой, имеющей ряд преимуществ в области медицинской реабилитации.

Оглавление

Введение.....	14
1 Обзор литературы	15
1.1 Анализ разработок медицинских экзоскелетов	15
1.2 Обзор патентных разработок экзоскелетов с разными типами приводов .	19
1.3 Применение экзоскелетов верхних конечностей для медицинской реабилитации	23
1.4 Анализ конструкций экзоскелетов верхних конечностей	25
2. Выбор и обоснование конструкции, выполнение расчетов.....	32
2.1 Обоснование выбора конструкции для экзоскелета.....	32
2.2 Рассмотрение биомеханики плечевого пояса для определения максимальной амплитуды движений	34
2.3 Обоснование выбора ПМ в качестве привода для медицинской реабилитации пациентов	36
2.4 Подбор параметров ПМ и определение их точек крепления	37
3 Проектирование каркаса экзоскелета плечевого пояса.....	46
3.1 Выбор материала конструкции с учётом условий эксплуатации	46
3.2 Разработка конструкции каркаса.....	48
3.3.1 Проектирование нижней части каркаса.....	50
3.3.2 Проектирование верхней части каркаса	51
3.4 Способы крепления груза и деталей конструкции между собой.....	53
3.5 Прочностной расчет для шарнирного соединения и оплетки ПМ	57
4 Описание системы управления пневматическим приводом	60
4.1 Выбор способа подключения и реализация управления ПМ	60
4.2 Расчёт времени работы в режиме автономного использования	63
4.3 Результаты разработки экзоскелета плечевого пояса	65
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	67
5.1 Потенциальные потребители результатов исследования	67
5.2 Анализ конкурентных технических решений	68

5.3 SWOT-анализ.....	70
5.4 Планирование работ по научно-техническому исследованию	72
5.4.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	72
5.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	73
5.4.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	74
5.5 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	77
5.5.1 Расчет материальных затрат НТИ.....	77
5.5.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ.....	78
5.5.3 Основная заработная плата исполнителя темы	79
5.5.4 Расчет дополнительной заработной платы	81
5.5.5 Отчисления во внебюджетные фонды.....	82
5.5.6 Накладные расходы	83
5.5.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .	83
5.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	84
6 Социальная ответственность	87
Введение.....	87
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	87
6.2 Производственная безопасность	89
6.2.1 Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека	90
6.2.2 Производственные факторы, связанные с повышенным образованием электростатических зарядов	90
6.2.3 Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий	91
6.2.4 Сосуды, работающие под давлением.....	92
6.2.5 Импульсное лазерное излучение.....	92

6.2.6 Неподвижные режущие, колющие, обдирающие, разрывающие части твёрдых объектов	93
6.2.7 Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения	94
6.2.8 Повышенный уровень шума.....	95
6.2.9 Повышенный уровень вибрации	95
6.2.10 Вредные вещества.....	96
6.2.11 Отклонение показателей микроклимата.....	96
6.2.12 Физические и нервно-психические перегрузки.....	97
6.3 Экологическая безопасность.....	97
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	98
Заключение	100
Список использованных источников	102
Приложение А Чертеж общего вида	105

Введение

Состояние разработки и внедрения экзоскелетов проанализировано в литературе как отечественных, так и зарубежных источников. В настоящее время приоритетными областями применения экзоскелетов являются военная промышленность и реабилитационная медицина.

Большинство созданных экзоскелетов не находят масштабного применения в реабилитации пациентов с ограниченной функцией верхних и нижних конечностей из-за большой массы конструкции, зависимости от внешних источников питания и высокой стоимости [1].

К основным группам, нуждающимся в экзоскелетах, относятся пациенты с параличом верхних и нижних конечностей. Медицинский экзоскелет предназначен для помощи людям с ограниченными возможностями. Это специальное биомеханическое устройство для реабилитации при потере или ограничении подвижности конечностей. В основе его работы лежит принцип повторения биомеханических движений человека и пропорционального уменьшения усилий, необходимых для их выполнения [2].

В зависимости от тяжести состояния пациента экзоскелет можно носить временно или постоянно. Устройством пациент способен управлять самостоятельно. Их используют как средство реабилитации после сложных операций или перенесенного инсульта, а также для постоянного ношения при возникновении проблем с опорно-двигательной системой, в том числе у пожилых людей [1].

Целью данной работы является разработка легкого и удобного экзоскелета плечевого пояса для повседневного использования людьми с ограниченными возможностями верхних конечностей в период реабилитации после перенесенных заболеваний.

1 Обзор литературы

1.1 Анализ разработок медицинских экзоскелетов

Согласно первому Всемирному докладу об инвалидности, подготовленному совместно ВОЗ и Всемирным банком, в настоящее время в мире насчитывается более одного миллиарда людей с ограниченными возможностями. Приблизительно 15% населения мира имеют ту или иную форму инвалидности. Из них 2-4% испытывают значительные функциональные трудности. По данным ВОЗ, от 2% до 3% детей в мире имеют инвалидность. Было показано, что нарушения в работе нервной системы составляют 21,4% всех нарушений, определяющих развитие инвалидности в детском возрасте [3].

Развитие биоинженерии, как одного из приоритетных научных направлений России позволит значительно повысить качества жизни инвалидов и больных с нарушениями опорно-двигательного аппарата и проходящих реабилитацию. Одним из инновационных направлений биоинженерии в реабилитации людей с ограниченными возможностями движения является применение экзоскелета – мехатронного устройства в виде внешнего каркаса человека, разработанная для дополнения физических возможностей пользователя.

Экзоскелеты, как правило, повторяют биомеханику человека для пропорционального увеличения усилий при движениях, а также могут повышать защищенность человека от внешних воздействий. В системе человек-экзоскелет часть функций, например, поддержание равновесия, остается за человеком, тогда как тяжесть груза или большие усилия ложатся на механизм экзоскелета.

Медицинские экзоскелеты предназначены для абилитации и реабилитации больных, они способны расширять амплитуду движений и увеличивать остаточную силу мышц, а также выступать в качестве тренажера и могут использоваться как средство реабилитации для пациентов с вялым параличом верхних конечностей.

В медицинских целях используются следующие экзоскелеты:

HAL, Hybrid Assistive Limb (Cyberdyne, Япония) предназначен для реабилитации и восстановления пациентов с травмами спинного мозга, двигательной системы и нервно-мышечными нарушениями. Управление экзоскелетом HAL осуществляется с помощью электромиографических электродов, расположенных на теле, которые считывают биоэлектрические сигналы с мышц человека. Положение туловища человека в пространстве определяется потенциометрами, датчиками силы реакции опоры, гироскопами и акселерометрами. Однако общий вес устройства составляет 23 кг, а максимальное время автономной работы - 2,5 часа, при этом стоимость составляет 4 200 долларов США [4]. Из-за большого веса и габаритов экзоскелет не подходит для использования в реабилитации детей с ограниченными возможностями. На рисунке 1 приведен внешний вид экзоскелета HAL;



Рисунок 1 – Внешний вид экзоскелета HAL

REX (REX Bionics, Новая Зеландия) обеспечивает дополнительную поддержку человеческого тела в пространстве во время движения. Управление осуществляется с помощью джойстика и планшетного компьютера. Экзоскелет весит 38 кг и предназначен для использования людьми с ростом от 142 до 193 см и весом до 100 кг. Огромный вес и габариты устройства, а также высокая стоимость (150 000 долларов США) делают его недоступным для широкого использования [5]. На рисунке 2 приведен внешний вид экзоскелета REX;



Рисунок 2 – Внешний вид экзоскелета REX

reWalk (ARGO Medical Technologies, Израиль) является одним из самых современных и сложных экзоскелетов. Экзоскелет оснащен интеллектуальной системой управления и датчиками наклона, которые определяют наклон тела вперед и передают сигналы на опорную ногу. Она позволяет людям с параличом нижних конечностей вставать и ходить на костылях. Экзоскелет весит 25 кг и предназначен для пациентов весом до 80 кг. Стоимость устройства составляет 100 000 долларов США. Он питается от аккумулятора, помещенного в специальный рюкзак. Экзоскелет способен работать в течение трех часов без подзарядки. Однако его использование возможно только людьми с сохраненной функцией верхней конечности [6]. На рисунке 3 показан внешний вид экзоскелета reWalk.



Рисунок 3 – Внешний вид экзоскелета reWalk

Titan Arm (Университет Пенсильвании, США) представляет собой сложный роботизированный манипулятор для верхних конечностей, который может добавить 18 кг силы руке.. По словам разработчиков, манипулятор также будет полезен для людей, перенесших инсульт или мышечную травму, после которых они могут заново научиться управлять своими конечностями. Экзоскелет состоит из носимого на спине силового блока, управляющей электроники и каркаса, который крепится к руке пользователя. Titan Arm весит 9 кг, а его стоимость составляет 2000 долларов США [7]. На рисунке 4 показан внешний вид экзоскелета Titan Arm.



Рисунок 4 – Внешний вид экзоскелета Titan Arm

Armeo Power (Hocoma AG, Швейцария) – первый роботизированный тренажер с шестью активизируемыми степенями свободы для проведения одновременной терапии всей руки от плеча до пальцев. Экзоскелет специально разработан для пациентов с инсультом, травматическим повреждением головного мозга или другими неврологическими расстройствами, а также для пациентов с острыми двигательными нарушениями при отсутствии активности мышц верхних конечностей. Экзоскелет подходит для пациентов с разным ростом и размером рук. ArmeoPower сочетает в себе индивидуальный, эргономичный подход к восстановлению конечностей с интерактивными упражнениями в виртуальной 3D-среде [8]. Единственным недостатком экзоскелета является его стационарность

и возможность использования только в специализированных медицинских учреждениях. На рисунке 5 приведен внешний вид экзоскелета Armeo Power.



Рисунок 5 – Внешний вид экзоскелета Armeo Power

1.2 Обзор патентных разработок экзоскелетов с разными типами приводов

Основной проблемой экзоскелетов являются габаритные и тяжелые приводы. Обычно в конструкции экзоскелетов, предназначенных для подъема грузов, используются гидравлические цилиндры (US 2013/0102935 A1, 25.04.2013). Они достаточно мощные и могут работать с высокой точностью. Однако такие цилиндры имеют большую массу и требуют наличия шлангов и трубок. Для медицинской реабилитации необходимо обеспечить полную амплитуду движений пользователя при минимально возможной массе привода. Решить данную проблему могут пневматические приводы (CN201870775 U, 22.06.2011), а также сервоприводы на электронной основе (US 2011/0066088 A1, 17.03.2011) и (US 7857774 B2, 28.12.2010).

В таблице 1 приведены патентные разработки активных экзоскелетов с различными типами привода.

Таблица 1 – Патентные разработки

Патент	Характеристика	Недостатки
US 7857774 B2, 28.12.2010	Экзоскелет с электроприводом	Ограниченность движений из-за установки электромоторов непосредственно в тазобедренных и коленных суставах Длительное время калибровки устройства под конкретного пользователя
US 2013/0102935 A1, 25.04.2013	Экзоскелет с гидроприводом	Невысокие параметры срока службы (до $5 \cdot 10^6$ циклов) Невысокое время срабатывания исполнительных устройств (0,06-0,1 с).
US 2011/0066088 A1, 17.03.2011	Экзоскелет с электроприводом	Невысокая скорость передвижения (не более 0,3 м/с), обусловленная ограниченными возможностями возвратнопоступательных электроприводных исполнительных механизмов. Наличие рывков при движении
CN201870775 U, 22.06.2011	Экзоскелет с пневмоприводом	Является стационарным, движения возможны только в сагиттальной плоскости

Экзоскелет с электроприводом (US 7857774 B2, 28.12.2010), состоящий из опорной рамы, двух опорных стоек, четырех электромоторов, установленных в тазобедренном и коленном суставах, батарей и блока управления с биоэлектрическими датчиками и датчиками силы, расположенными в тазобедренном суставе и на тыльной стороне стопы пользователя, показан на рисунке 6.

Недостатками данного устройства являются: невозможность вращения пользователя вокруг центральной оси в экзоскелете, невозможность плавного перемещения подвижных элементов каркаса экзоскелета без использования демпфирующих устройств, ограниченная свобода экзоскелета из-за непосредственного крепления электродвигателей в тазобедренном и коленном суставах, а также длительное время калибровки под конкретного пользователя (до двух месяцев).

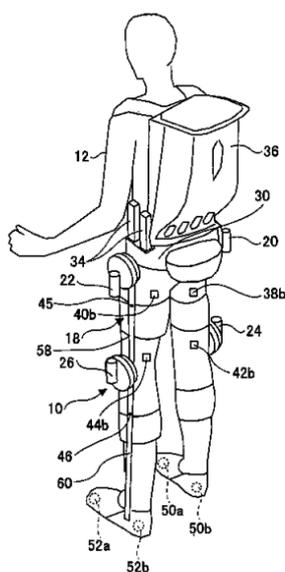


Рисунок 6 – Патент США №7857774, А61Н 1/00 от 28.12.2010

Экзоскелет с гидравлическим приводом (US 2013/0102935 А1, 25.04.2013), включающий две роботизированные нижние конечности, гидравлические цилиндры для сгибания коленного и тазобедренного суставов, устройство управления, насос с электродвигателем и источник питания, показан на рисунке 7. Движение управляется центральным контроллером, который получает сигналы от двух датчиков положения, расположенных в голеностопных суставах экзоскелетной конструкции.

Недостатками данной конструкции являются необходимость поддержания равновесия пользователем и обеспечения начального импульса для движения конечностей, что ограничивает диапазон действия экзоскелета, а также низкий срок службы актуаторов (до $5 \cdot 10^6$ циклов) и время реакции (0,06-0,1 секунды).

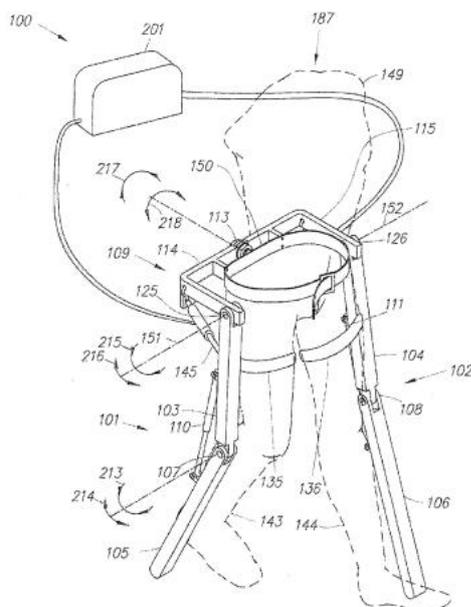


Рисунок 7 – Заявка США №2013/0102935, А61Н 3/06 от 25.04.2013

Экзоскелет с электроприводом (US 2011/0066088 А1, 17.03.2011), включающий неподвижный опорный элемент таза, две роботизированные нижние конечности, первичные и вторичные приводы для таза, колена и лодыжки, систему управления, состоящую из акселерометров, инклинометров, датчиков расстояния, давления и движения, клавиатуру и джойстик, показан на рисунке 8.

К недостаткам этого устройства относятся низкую скорость перемещения (не более 0,3 м/с) и наличие рывков при движении из-за ограниченной мощности возвратно-поступательного электропривода.

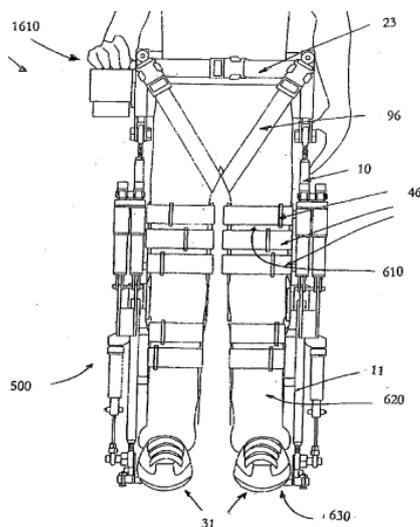


Рисунок 8 – Заявка США №2011/0066088, А61Н 1/02 от 17.03.2011

Экзоскелет с пневматическим приводом (CN201870775 U, 22.06.2011), состоящий из приводимой в движение рамы, включающей опорную раму с шарнирами, в которых закреплены опорные стойки, включающие, в свою очередь, тазобедренные, коленные и голеностопные звенья. Электropневматическая система включает в себя пневматические мышцы, компрессор, регулятор давления, пневматический клапан и контроллер.

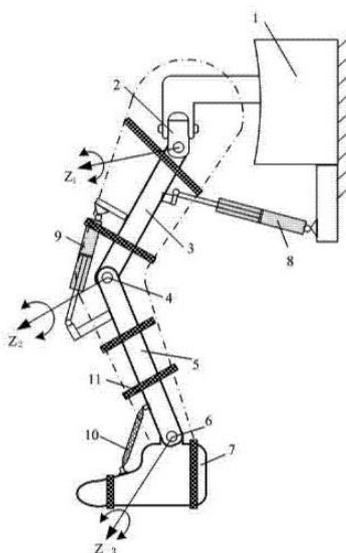


Рисунок 9 – Патент КНР № 201870775, А61Н 3/00 от 22.06.2011

Данный экзоскелет наиболее близок для медицинской реабилитации благодаря использованию пневматических мышц в качестве привода, однако экзоскелет является стационарным, а приводной механизм позволяет перемещать конечности устройства только в сагиттальной плоскости.

1.3 Применение экзоскелетов верхних конечностей для медицинской реабилитации

Несмотря на большое разнообразие экзоскелетов для ходьбы, роль верхних конечностей в жизни каждого человека трудно переоценить: дети без их помощи не могут полноценно познавать мир, а взрослые не могут вести активную самостоятельную жизнь. В то время как для людей с ограниченными возможно-

стями нижних конечностей были разработаны различные средства передвижения, такие как инвалидные коляски, ходунки и автомобили, для пациентов с параличом верхних конечностей не было предложено адекватного системного технологического решения, несмотря на предпринятые попытки.

Медицинским показанием к применению экзоскелета верхней конечности является симптоматический комплекс верхнего вялого парализа, который возникает при многих заболеваниях и может привести к инвалидности. Пациенты с верхним вялым параличом теряют свои функции социальной адаптации, их навыки самообслуживания становятся невозможными, и они вынуждены полагаться на других в вопросах ухода. Данный синдром диагностируется по следующим признакам:

- Снижение силы мышц верхних конечностей до 1, 2 и 3 баллов, что соответствует умеренному или глубокому параличу.

- Ограниченная скорость и диапазон движений проксимальных и дистальных конечностей: ограничение или неспособность согнуть или выпрямить руку в плечевом или локтевом суставе; неспособность поднять руку до уровня груди или выше; неспособность отвести руку от туловища

- Ограничение вращения или невозможность вращения верхней конечности; снижение мышечного тонуса проксимальных и дистальных отделах верхней конечности или смешанный мышечный тонус с преобладанием гипотонии

- Сухожильные рефлексы рук снижены или отсутствуют, контрактура суставов верхних конечностей отсутствует [1].

При этом симптоматическом комплексе происходит анатомо-физиологическое разделение между центральной и периферической нервной системой, при этом нарушается как обратная, так и прямая связь. Эффективность реабилитации основана на механизмах биологической обратной связи. Терапия биологической обратной связью оправдала себя при активации адаптивных систем мозга во время развития патологических процессов в ЦНС. Фармакологическое лечение этих состояний в первую очередь направлено на восстановление прямой связи между центральной нервной системой и периферией. Восстановление обратной

связи между периферической и ЦНС - задача, которая решается в основном с помощью физиотерапевтических процедур, массажа и лечебной физкультуры.

Экзоскелет является одним из лучших способов восстановления обратной связи. Он оказывает совершенно безвредное воздействие на классические рефлекторные рецепторные зоны мышц и сухожилий верхних конечностей, восстанавливает активность рефлекторной дуги и передает двигательную информацию в соответствующие сегменты спинного мозга. В свою очередь, спинной мозг активирует «спящие» двигательные зоны коры головного мозга по восходящим путям. Восстанавливая биологическую обратную связь между периферической и ЦНС, экзоскелет активизирует механизмы саморегуляции в соответствии с законами нейрофизиологии, одновременно улучшая прямое влияние ЦНС на периферическую. Результатом является нефармакологическая коррекция патологического развития нервной системы и увеличение объема, скорости и амплитуды движений верхних конечностей [1]. Неоспоримым фактом является и то, что при полной подвижности суставов верхних конечностей снижается вероятность возникновения контрактур мышц и суставов.

Положительные эффекты от использования экзоскелета можно разделить на две группы: ранние, связанные с возможностью расширения диапазона движения верхней конечности непосредственно при использовании экзоскелета, и отсроченные, связанные с тренировкой мышц и устранением последствий мышечных и суставных контрактур.

1.4 Анализ конструкций экзоскелетов верхних конечностей

Все существующие конструкции экзоскелетов верхних конечностей можно классифицировать следующим образом:

- по источнику энергии и принципу работы привода: пассивные экзоскелеты и активные экзоскелеты;
- по кинематическому строению: повторяющие строение человеческой руки и не повторяющие строение человеческой руки;

– по месту приложения ассистирующего усилия: к кисти, к предплечью, к плечу, комбинированное;

– по назначению: для поднятия груза, для работы с тяжёлым инструментом (гайковёрт, перфоратор и т.п.), для работы руками выше уровня груди.

Среди многообразия возможных конструктивных вариантов можно выделить несколько основных конструктивных схем, применяемых в проектировании экзоскелетов верхних конечностей:

1. Схема экзоскелета плечевого сустава. Данная схема реализует вращение только в плечевом суставе, повторяя кинематическое строение верхних конечностей. Такой вариант конструкции используется для ассистирования и поддержки плеча пользователя. Экзоскелет, построенный по данной схеме может быть как пассивным с применением упругих элементов и противовесов, так и использовать активные типы приводов. Схема приведена на рисунке 10.

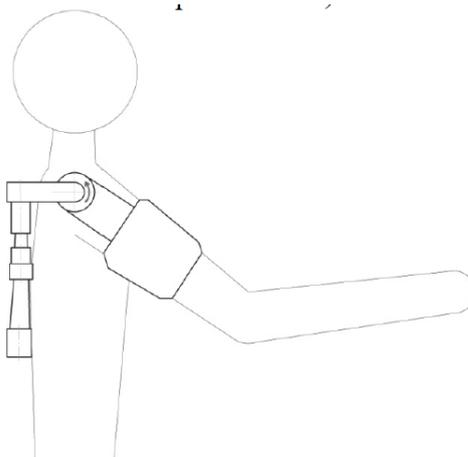


Рисунок 10 – Схема антропоморфного экзоскелета плечевого сустава

Вариант данной схемы с активным плечевым суставом реализован в экзоскелете МАТЕ, внешний вид которого приведен на рисунке 11. Экзоскелет МАТЕ разработан итальянскими компаниями Comau и IUVO совместно с исландской ортопедической компанией Ossur. Экзоскелет выполнен в двух размерах и надевается на верхнюю часть тела. Благодаря спиральным пружинам, связанным с двумя сервоприводами, экзоскелет снимает нагрузку с плечевых мышц при работе с тяжелыми предметами. Амплитуда движения, превышающая возможности человеческой руки ограничивается во избежание травм. Экзоскелет

может быть установлен в одно из пяти положений в зависимости от выполняемой работы. Плюс к этому можно выбрать один из семи уровней помощи. Масса экзоскелета составляет 3 кг [9].



Рисунок 7 – Внешний вид экзоскелета MATE

2. Схема антропоморфного активного экзоскелета. Данная схема использует каркас, повторяющий кинематическое строение руки пользователя, и реализует движение с помощью активных приводов, установленных в локтевой и плечевой суставы. Схема приведена на рисунке 11.

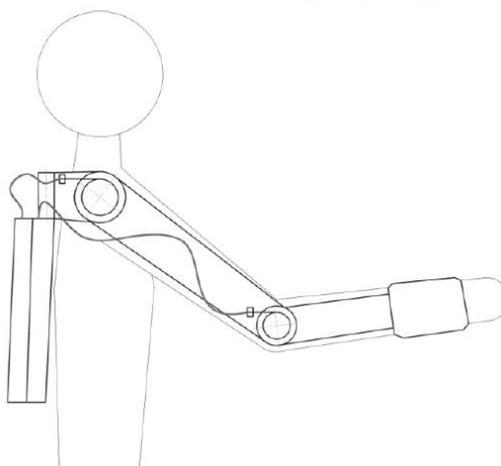


Рисунок 11. – Схема антропоморфного активного экзоскелета верхних конечностей

Данная схема реализована в экзоскелете Muscle Suit, разработанный японской компанией Innophys который использует развитую систему управления для повторения биомеханики человеческой руки. Muscle Suit представляет собой силовой тазобедренный экзоскелет с поддержкой спины для подъема тяжестей.

Сила генерируется с помощью воздушных мышц спины, которые вызывают вращение вокруг бедер. Он использует сжатый воздух, который хранится в баллоне высокого давления, прикрепленном к задней панели. В качестве альтернативы возможно подключение костюма к шлангу для подачи сжатого воздуха, который обычно используется на многих рабочих площадках. Масса экзоскелета составляет 5,5 кг, а грузоподъемность – 30 кг [10]. Внешний вид экзоскелета показан на рисунке 12.



Рисунок 12. – Внешний вид экзоскелета Muscle Suit

3. Схема пассивного экзоскелета «третья рука». Данная схема использует пассивный каркас для поддержки предплечья пользователя, построенный на механизме пантографа с применением упругих элементов. Конструкция не повторяет кинематическое строение руки человека и служит только в качестве опоры. Каркас представляет собой параллелограмм, построенный на шарнирах, внутри которого установлены пружины сжатия и растяжения. Схема приведена на рисунке 13.

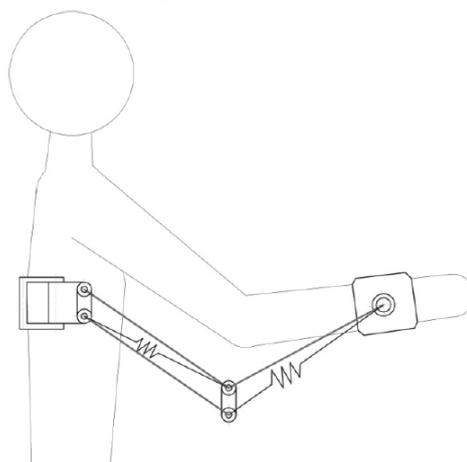


Рисунок 13 – Схема пассивного экзоскелета «третья рука»

Данная схема реализована в экзоскелете Came-Kong, разработанным китайской компанией SAME-TV, производящей оборудование для фото и киноиндустрии. Экзоскелет закрепляется на теле человека с помощью жилета, а управляющие приводы крепятся непосредственно к предплечью. Основной задачей экзоскелета является оператору при длительной работе с громоздким оборудованием и тяжелыми грузами. Внешний вид экзоскелета показан на рисунке 14. Применение пружинных пантографов в конструкции компенсирует тряску при движении оператора, повышая мобильность и качество съемки. Данная конструкция предоставляет большую степень свободы и позволяет без труда поднимать оборудование до уровня головы и опускать его вниз. Масса экзоскелета в сборе составляет 14 кг [11].



Рисунок 14 – Внешний вид экзоскелета Came-Kong

4. Комбинированная схема экзоскелета. Данная схема использует каркас, в котором поддержка осуществляется с помощью звена, соединяющего плечо и предплечье пользователя. Экзоскелет, построенный по данной схеме использует пружины и активные приводы, при этом поддержка плеча и предплечья пользователя при опускании руки осуществляется при помощи одного упругого элемента. Схема приведена на рисунке 15.

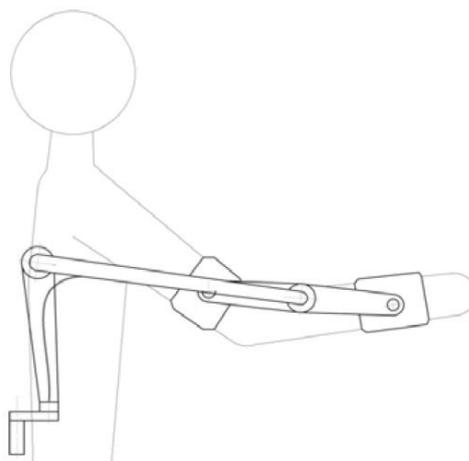


Рисунок 15 – Комбинированная схема экзоскелета

Данная схема реализована в экзоскелете Proludic, разработанным компанией Exhausts. Благодаря рычагам, оснащенным регулируемой пружиной, возможно адаптировать грузоподъемность под заданную нагрузку, процесс регулировки занимает несколько секунд. Грузоподъемность экзоскелета составляет до 25 кг. Каркас стабилизирует и защищает позвоночник пользователя [12]. Внешний вид экзоскелета показан на рисунке 16.



Рисунок 16 – Внешний вид экзоскелета Proludic

Среди описанных конструкций для медицинской реабилитации наиболее подходящей является антропоморфная схема активного экзоскелета, приведенная на рисунке 11. Она повторяет кинетическое строение руки человека и задействуют активные приводы, обеспечивающие полную амплитуду движений как в

локтевом, так и в плечевом суставе. Пассивные варианты, использующие пружины, обеспечивают поддержку и упругую связь, однако лишены возможности привести конечность в движение. Комбинированный схема является интересным вариантом поскольку позволяет удерживать руку в любом положении и плавно ее упускать, но активный привод не обеспечивает достаточной амплитуды движений при подъеме руки вверх.

2. Выбор и обоснование конструкции, выполнение расчетов

2.1 Обоснование выбора конструкции для экзоскелета

Экзоскелет предоставляет возможность осуществлять подъем дополнительного груза, что позволяет пациентам с частичной атрофией мышц вести обычный образ жизни и выполнять повседневные дела. При этом масса каркаса и приводов является определяющим фактором при проектировании экзоскелета.

Разрабатываемый экзоскелет проектируется для свободного вращения руки в плечевом суставе и подъема грузов до 8 кг (с учетом массы каркаса) при сгибании руки в локтевом суставе. При этом масса самого каркаса вместе с приводами не должна превышать 3 кг.

Несмотря на возможность реализовать полную амплитуду движений, ни одна из описанных схем не обеспечивает свободы движений конечности из-за жесткой механической связи стандартных типов привода с каркасом экзоскелета. Однако на примере Muscle Suit в антропоморфной схеме активного экзоскелета реализована упругая связь, она достигается благодаря использованию пневматических мышц (ПМ), которые совмещают свойства упругих пружин пассивного каркаса и при этом способны привести конечность в движение. Данный вариант реализации будет использован в качестве основы при разработке экзоскелета верхних конечностей. Доработанная антропоморфная схема активного экзоскелета с реализацией упругой связи в плечевом суставе показана на рисунке 17.

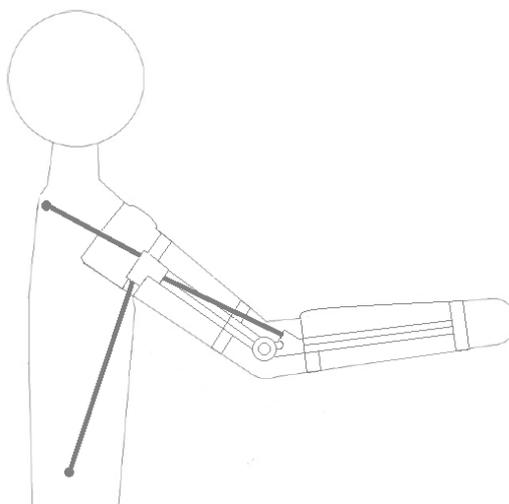


Рисунок 17 – Схема разрабатываемого экзоскелета.

В соответствии с биомеханикой движения руки человека плечевой сустав осуществляет вращение в трех плоскостях, локтевой сустав обеспечивает сгибание предплечья в диапазоне от 60 до 180 градусов по отношению к плечу, а лучезапястный осуществляет вращение кисти на 180 градусов. Важно, чтобы конструкция экзоскелета не ограничивала движений в локтевом и лучезапястном суставе, а каркас был изготовлен из биологически инертных материалов.

Экзоскелет разрабатывается в соответствии с анатомическими особенностями человеческой руки, повторяя изгибы плеча и предплечья. Размеры каркаса экзоскелета подбираются индивидуально, а модель позволяет задать необходимые параметры для проектирования экзоскелета под конкретного пользователя. Участки для измерений представлены на рисунке 18.

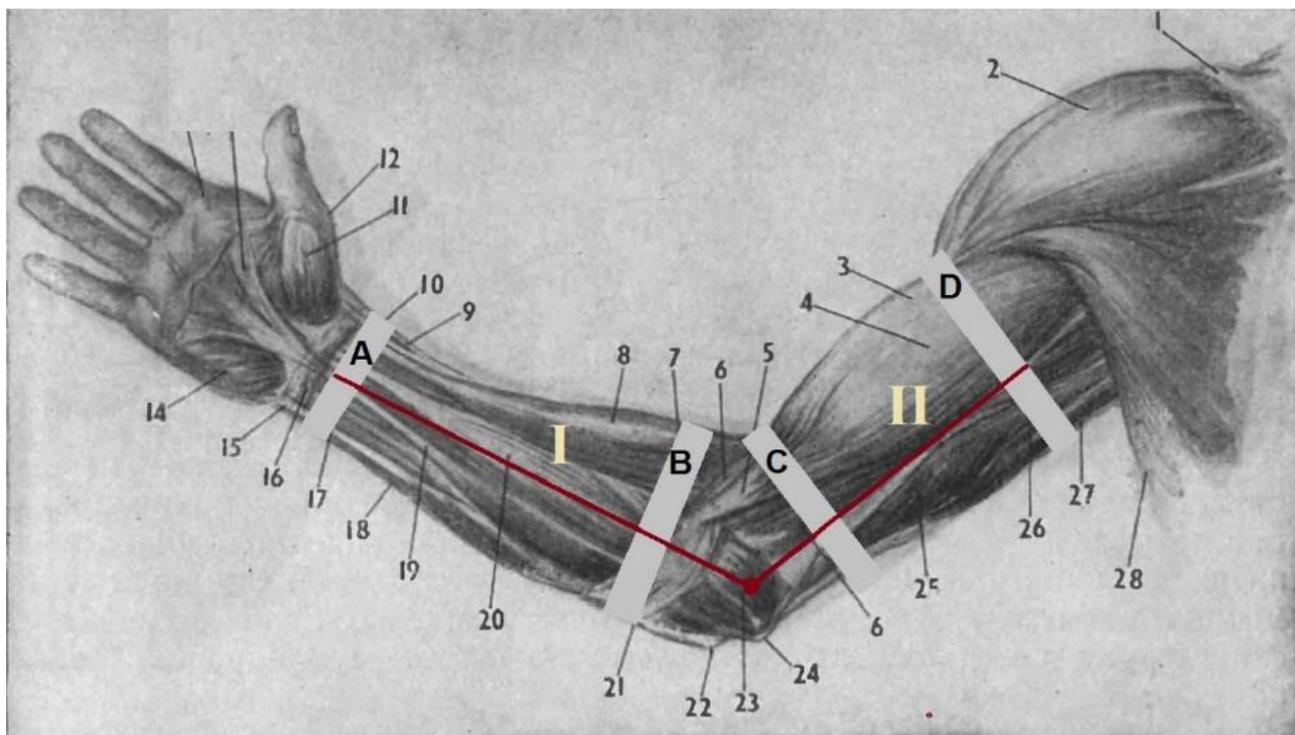


Рисунок 18 – Участки измерений для проектирования каркаса

Основные размеры, от которых зависят все остальные размеры каркаса это длина частей плеча и предплечья относительно оси вращения локтя. В соответствии с проведенными измерениями: длина плеча до сгиба локтя (II) – 230 мм, предплечья (I) – 280 мм. Значения обхвата руки в четырех местах: запястье (A) –

170 мм, предплечье (В) – 310 мм, плечо у локтя (С) – 290 мм, плечо у дельтовидной мышцы (D) – 370 мм. Экзоскелет проектируется в соответствии с указанными размерами и небольшим запасом.

2.2 Рассмотрение биомеханики плечевого пояса для определения максимальной амплитуды движений

Понимание биомеханики плечевого и локтевого сустава имеет решающее значение в разработке конструкции экзоскелета плечевого пояса. С целью определения минимально необходимого количества ПМ и точек их крепления рассмотрим биомеханику данных суставов подробнее.

Человеческую руку можно представить как кинетическую модель с пятью степенями свободы, включающей в себя три вращательные степени в плечевом суставе и две в локтевом. Плечевой сустав является шаровидным и обеспечивает максимальную гибкость. Движения в плечевом суставе совершаются в трех взаимно-перпендикулярных плоскостях: фронтальной (а), сагитальной (б) и горизонтальной (в). На рисунке 19 показана кинетическая схема плечевого сустава в каждой из плоскостей.

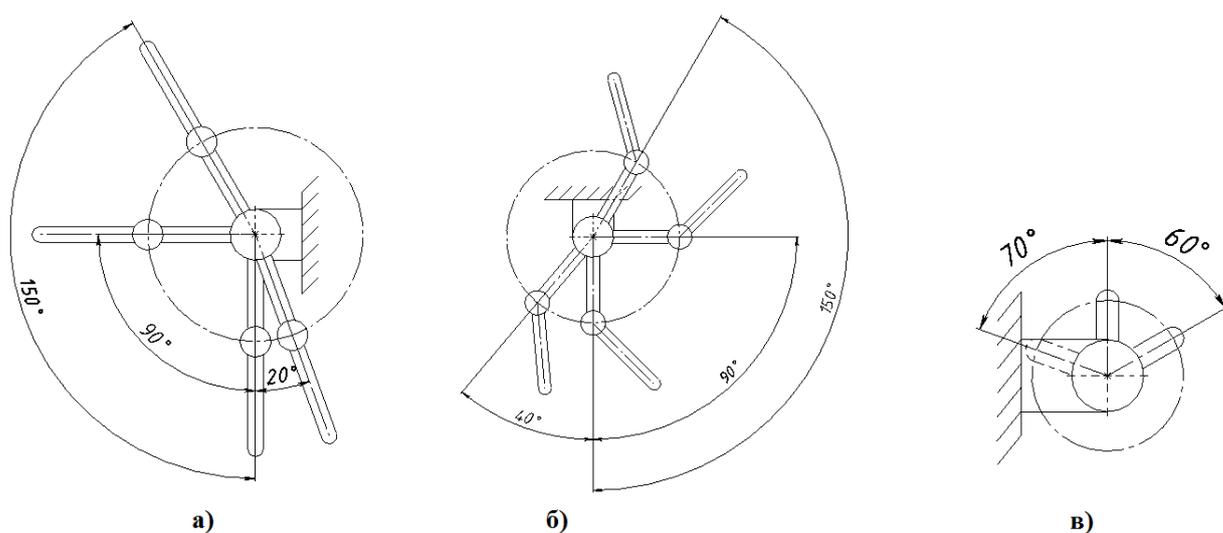


Рисунок 19 – Кинетическая схема плечевого сустава во фронтальной (а), сагитальной (б) и горизонтальной (в) плоскостях

Мышцы плеча позволяют прижимать руку к телу (аддукция), отводить ее в сторону (абдукция), а также вращать ее вовнутрь (медиально) и наружу (латерально). Комбинируя эти движения, можно совершать круговые движения.

Аддукцию до 20 градусов производят большая грудная мышца и широчайшая мышца спины; абдукцию до 170 градусов выполняют надостная и дельтовидная мышцы. Вращение наружу до 60 градусов выполняют подостная, малая круглая и задние волокна дельтовидной мышцы. Обратное вращение до 70 градусов выполняют короткие мышцы, окружающие плечевой сустав.

Отведение руки вперед до 150 градусов выполняют клювовидно-плечевая, дельтовидная и большая мышца груди. Отведение руки назад до 40 градусов выполняют задние волокна дельтовидной, широчайшая мышца спины и большая круглая. Сгибание в локтевом суставе до 140 градусов выполняет бицепс, а в качестве антагониста выступает трицепс. На рисунке 20 показана кинетическая схема локтевого сустава в сагиттальной плоскости.

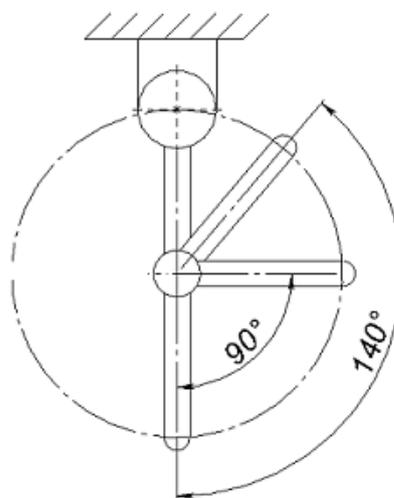


Рисунок 20 – Кинетическая схема локтевого сустава

Круговое движение – это комбинация движений, осуществляемая благодаря ключице, удерживающей головку плечевой кости в суставной впадине, и сокращению определенных групп мышц. Основными мышцами, участвующими во вращении плеча, являются: большая грудная мышца дельтовидная мышца и

широчайшая мышца спины. Для реализации движения в плечевом суставе достаточно использовать три привода, соответствующие перечисленным мышечным группам, подбор которых приведен в следующей главе.

2.3 Обоснование выбора ПМ в качестве привода для медицинской реабилитации пациентов

Для осуществления движений в любом направлении и обеспечения свободы перемещений необходим привод, который способен не только приводить конечность в движение, но и обеспечивать упругую связь. Таким приводом являются пневматические мышцы, использование которых будет рассмотрено на примере антропоморфной схеме активного экзоскелета верхних конечностей. Внешний вид ПМ представлен на рисунке 21, он напоминает гибкий прорезиненный рукав с металлическими заделками на концах, предназначенными для присоединения ПМ к нагрузке и подвода давления. В основу работы ПМ заложено свойство эластичной мембраны изменять свою форму или размеры под действием приложенного к ней избыточного давления рабочего тела (жидкости или газа). В ПМ используется мембрана цилиндрической формы с твердым дном и крышкой: при создании во внутренней полости мембраны избыточного давления ее диаметр увеличивается, а длина уменьшается. Таким образом, избыточное давление внутри ПМ преобразуется в усилие сокращения [13].



Рисунок 21 – Внешний вид пневматической мышцы

Рассмотрим основные преимущества данного типа привода в экзоскелетах для медицинской реабилитации пациентов.

1. Динамическое поведение ПМ аналогично поведению человеческой мышцы. Обладая большой пусковой силой при сжатии, ПМ не требует дополнительной подачи энергии. В отличие от человеческого аналога, однажды поднятый вес может удерживаться в любом положении неограниченное время.

2. ПМ реализует мягкую связь в плечевом суставе, которая не сковывает движения как другие типы механических приводов и обеспечивает свободу перемещений на всей амплитуде движения. За счет малого веса обеспечивается мобильность и доступность использования.

3. Интеграция с многочисленными датчиками дает возможность измерения основных функциональных характеристик, таких как жесткость, прикладываемое усилие, сжатие, скорость и т.д. Это предоставляет возможность регулировать плавность хода, обеспечивая полную безопасность для пациента.

4. ПМ отличаются точностью позиционирования и высоким частотным диапазоном регулирования (от 5 Гц).

5. Дополнительным преимуществом ПМ является простота поиска и замены дефектной мышцы, поскольку локализация поврежденной ПМ всегда будет известна. При этом ПМ значительно дешевле остальных типов приводов

2.4 Подбор параметров ПМ и определение их точек крепления

Если в полости цилиндрической мембраны создается избыточное давление, то внутренний радиус мембраны R увеличивается и в узлах ромбовидной ячейки возникают окружные F_A и осевые F_B силы, вызывающие удлинение диагонали A с одновременным укорачиванием диагонали B (рисунок 22а), при этом эластомер внутри ромбовидной оплетки оказывает некоторое усилие упругой деформации F_d .

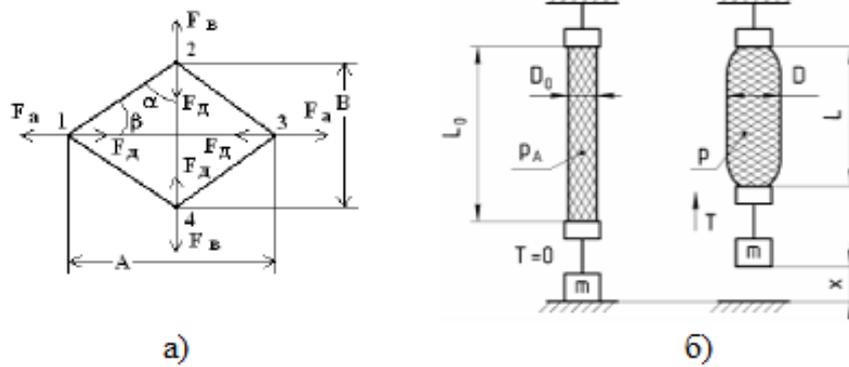


Рисунок 22 – а) силы в узлах ромбовидной ячейки; б) принцип работы ПМ.

Усилие, создаваемое пневмомускулом с диаметром D_0 , (рисунок 22б) определяется как.:

$$T = \frac{p\pi D^2}{4} \left(\frac{2}{\text{tg}^2 \alpha} - 1 \right), \quad (1)$$

где p – внешнее давление, Па;

D – внешний диаметр мышцы, мм;

α – значение угла плетения корда.

Критическое значение угла $\alpha_{кр} = 54,74$ градусов соответствует условию $T=0$ и равенству $\frac{2}{\text{tg}^2 \alpha_0} - 1 = 0$. Наибольшее усилие T_{\max} пневмомускул развивает при нулевом сокращении, что соответствует начальному значению угла плетения корда α_0 . И чем меньше исходное значение угла оплетки, тем большее усилие развивает пневмомускул [14, 15].

Результаты экспериментальных исследований показали, что начальное значение угла α для используемой оплетки из полиэстера составляет 16 градусов, а конечное – 47 градусов при относительном сокращении на 30 процентов. Таблица 2 – результаты экспериментального определения угла плетения корда

№ эксперимента	L/L_0	D/D_0	α_0	α
1	0,707	2,66	16,1	47,2
2	0,706	2,67	15,9	47,1
3	0,706	2,64	16	46,8

Рассчитаем наибольшее усилие, создаваемое пневмомускулом с внешним диаметром $D_0 = 13 \text{ мм}$ при давлении 300 кПа. Функция зависимости усилия от относительного удлинения ПМ приведена на рисунке 23.

$$T_{\max} = 300 \cdot 10^3 \cdot \frac{169 \cdot 10^{-6} \pi}{4} \left(\frac{2}{\text{tg}^2 16} - 1 \right) \approx 940 \text{ Н}$$

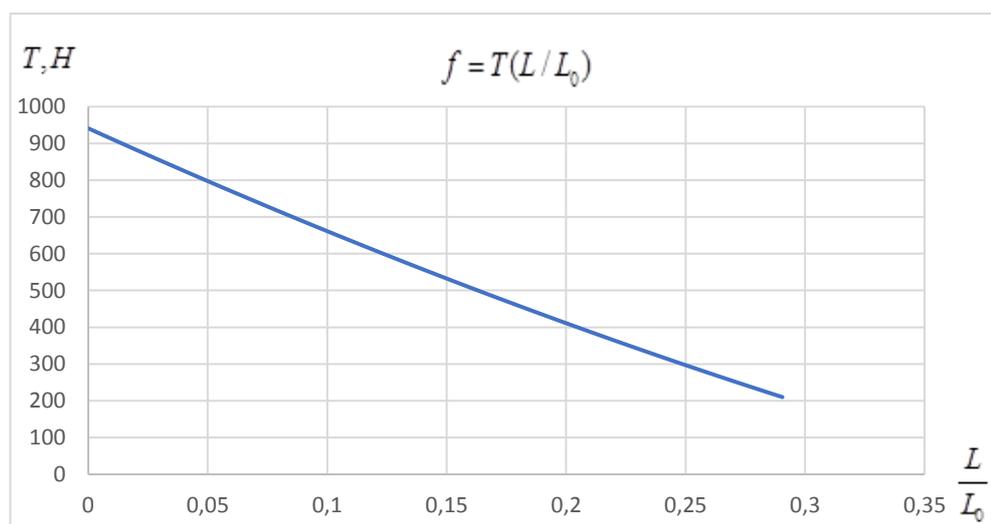


Рисунок 23 – Функция зависимости усилия от относительного удлинения ПМ

Для определения вращающего момента, который создается массой руки, необходимо измерить длины сегментов.

Таблица 3 – Измеренные длины сегментов руки

№	Сегмент	Пропорции, мм	Положение центра масс	Относительная масса
1	Плечо, a	302	0,47	0,03
2	Предплечье, b	269	0,42	0,02
3	Кисть	—	—	0,01

Рассчитаем суммарный момент сил для руки с учетом центров масс ее сегментов по формуле 2. Масса человека 80 кг

$$M = \sum_{i=1}^z l_i m_i g, \quad (2)$$

где l_i – расстояние до центра масс данного сегмента, мм;

m_i – масса данного сегмента, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

$$M_1 = \frac{80 \cdot 10 \cdot (302 \cdot 0,47 \cdot 0,03)}{1000} = 3,41 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_2 = \frac{80 \cdot 10 \cdot (302 + 269 \cdot 0,42) \cdot 0,02}{1000} = 6,64 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_3 = \frac{80 \cdot 10 \cdot (302 + 269) \cdot 0,01}{1000} = 4,57 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M = M_1 + M_2 + M_3 = 14,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Выполним расчет для аналога двуглавой мышцы плеча. Упрощенная модель локтевого сустава в сагиттальной плоскости приведена на рисунке 24. Длина мышцы ограничивается размерами каркаса и точками крепления. Расстояние до ближайшей к оси точки крепления определяется исходя из необходимой амплитуды движения и предельного сокращения мышцы, которое составляет не более 30%.

Чем дальше от оси расположена точка крепления, тем больший динамический диапазон для поднимаемого груза, однако расстояние до точки крепления ограничивается предельным относительным сокращением мышцы, что уменьшает амплитуду движения. В целях реабилитации необходимо обеспечить наибольшую амплитуду движения, поэтому для расчета привода, сгибающего локоть за основу взята амплитуда в 180 градусов.

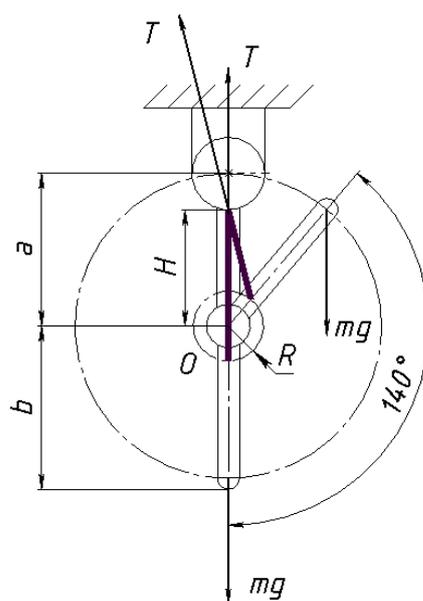


Рисунок 24 – Упрощенная модель локтевого сустава в сагиттальной плоскости

Соотношение определяющее расстояние R , мм до точки крепления мышцы плеча при амплитуде движения в 180 градусов приведено в формуле 3

$$(R+H) \cdot K = H - R, \quad (3)$$

где H – длина от оси вращения до точки крепления ПМ плеча, мм

K – величина относительного сокращения

$$R = \frac{0,3}{1,7} \cdot H = \frac{0,3}{1,7} \cdot 230 \approx 40 \text{ мм}$$

Выполним моделирование работы мышцы при подъеме груза массой 4 кг с амплитудой 180 градусов. Момент силы тяжести M_F , действующий на груз на всей амплитуде движения определяется по формуле 4. Пиковое усилие мышца развивает при сгибании локтя на 60 – 80 градусов и составляет 63 процента от наибольшего. Функция зависимости усилия от величины угла сгиба в локтевом суставе при подъеме груза массой 4 кг приведена на рисунке 25

$$M_F = (M_2 + M_3 + mgb) \cdot \sin \alpha, \quad (4)$$

где m – масса груза, кг;

b – длина предплечья, мм;

α – величина угла отклонения.

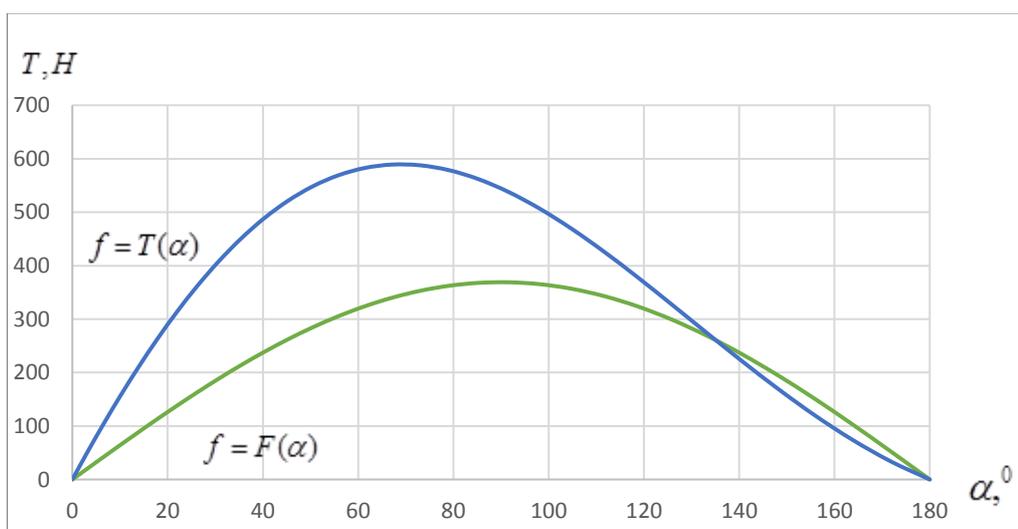


Рисунок 25 – Функция зависимости усилия от величины угла сгиба в локтевом суставе при подъеме груза массой 4 кг для ПМ диаметром 13 мм.

По графику видно, что при подъеме груза массой 4 кг из вертикального положения ПМ диаметром 13 мм обеспечивает динамический диапазон от 0 до 120 градусов, и от 30 до 150 при подъеме из горизонтального положения, что соответствует максимальной амплитуде сгибания локтя.

Выполним расчет для аналога дельтовидной мышцы плеча. Поскольку при подъеме плеча участвуют мышцы, поднимающие лопатку, длина дельтовидной окажется меньше длины заменяемого аналога. Определить длину мышцы для подъема плеча можно по формуле 5 из упрощенной модели плечевого сустава, представленной на рисунке 26.

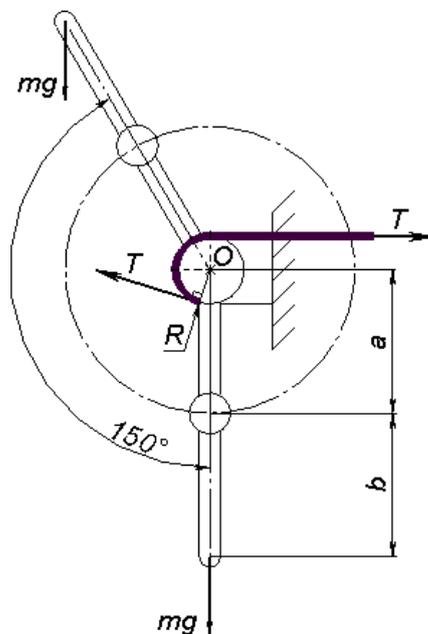


Рисунок 26 – Упрощенная модель плечевого сустава во фронтальной плоскости

$$L = \alpha \frac{\pi R}{180K}, \quad (5)$$

где R – радиус обхвата плеча, мм;
 K – величина относительного сокращения;
 α – угол абдукции.

$$L = 150 \cdot \frac{\pi \cdot 60}{180 \cdot 0,7} = 520 \text{ мм.}$$

Учитывая, что ширина плеч взрослого человека составляет примерно 23 процента от его роста, то при росте в 1800 мм ширина плеч будет равна 400 мм. Это соотношение зависит от соматотипа и индивидуальных особенностей данного конкретного человека. Тогда с учетом расстояния от оси вращения плечевого сустава до точки крепления мышцы, которое составляет 180 мм, вторая точка крепления мышцы будет располагаться на расстоянии $R = 180 + 400 - 520 = 60$ мм от второго плеча.

Выполним моделирование работы мышцы при подъеме груза массой 3 кг с амплитудой 150 градусов. Функция зависимости усилия от величины угла абдукции плеча при подъеме груза массой 3 кг для ПМ диаметром 16 мм приведена на рисунке 27. Пиковое усилие мышца развивает в начале подъема. Момент силы тяжести M_F , действующий на груз на всей амплитуде движения определяется по формуле 6.

$$M_F = (M + mg(a + b)) \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

где a – длина плеча, мм;
 b – длина предплечья, мм;
 α – величина угла отклонения.

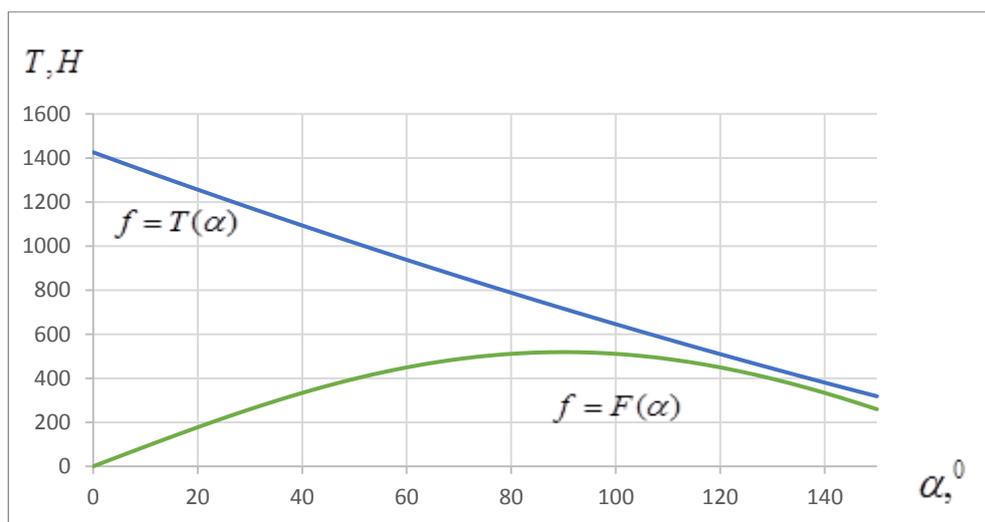


Рисунок 27 – Функция зависимости усилия от величины угла абдукции плеча при подъеме груза массой 3 кг для ПМ диаметром 16 мм

Рассчитаем наибольшее усилие, создаваемое пневмомускулом с внешним диаметром $D_0 = 16 \text{ мм}$ при давлении 300 кПа:

$$T_{\max} = 300 \cdot 10^3 \cdot \frac{256 \cdot 10^{-6} \pi}{4} \left(\frac{2}{\text{tg}^2 16} - 1 \right) \approx 1420 \text{ Н}$$

Выполним расчет для аналога большой грудной мышцы. При максимальном отведении плеча назад, которое составляет 40 градусов, удлинение мышцы составит $\Delta L = \frac{2\pi}{9} \cdot 60 = 40 \text{ мм}$, а длина самой мышцы $L = \frac{40}{0,3} = 135 \text{ мм}$.

Выполним расчет для аналога широчайшей мышцы спины. Максимальное удлинение будет равно двум расстояниям от оси вращения плеча до точки крепления мышцы $\Delta L = 2 \cdot 60 = 120 \text{ мм}$, а длина самой мышцы $L = \frac{120}{0,3} = 400 \text{ мм}$, тогда вторая точка крепления будет располагаться на расстоянии $R = 400 - 60 = 340 \text{ мм}$ от плеча.

Поскольку большая грудная мышца и широчайшая мышца спины не противодействуют силе тяжести, их диаметр подбирается в 1,5 – 2 раза меньше диаметра дельтовидной мышцы.

Рассчитанные параметры для каждой группы мышц занесены в таблицу 4

Таблица 4 – Рассчитанные параметры для каждой группы мышц

Название мышцы	Длина, мм	Количество	Диаметр
Аналог дельтовидной мышцы	520	1	16
Аналог большой грудной мышцы	135	4	8
Аналог широчайшей мышцы спины	400	1	13
Аналог двуглавой мышцы плеча	230	2	13

Расположение точек крепления ПМ на теле человека представлено на рисунке 28.

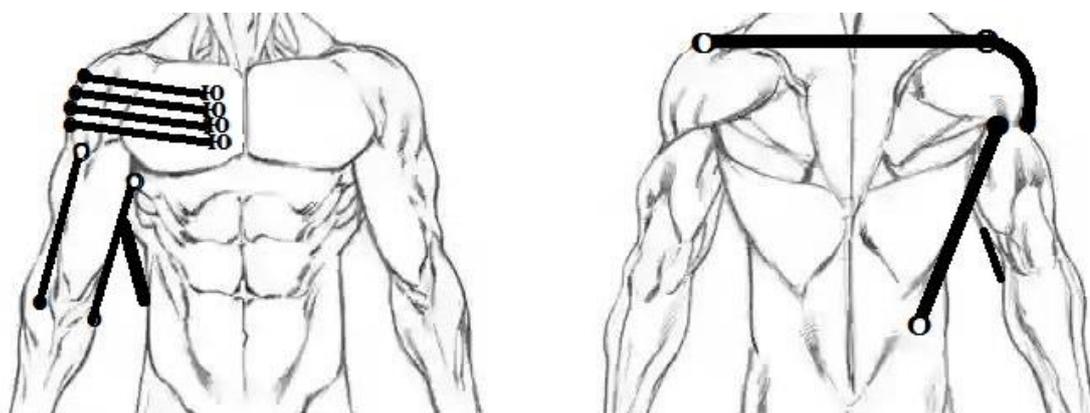


Рисунок 28 – Расположение точек крепления ПМ на теле человека

3 Проектирование каркаса экзоскелета плечевого пояса

3.1 Выбор материала конструкции с учётом условий эксплуатации

Пневматическая мышца изготавливается на базе трубчатого эластомера с ромбовидной оплеткой из недеформируемой нити. В качестве исходного материала для нити используется полиэтилентерефталат (PET, который обладает достаточной прочностью и является наиболее доступным и дешевым в производстве. В качестве альтернативы можно использовать модифицированные полиэферы (пентекс, вентран), арамиды (кевлар, технора, тварон), модифицированный полиэтилен (дайнима, спектра) и карбон. Вентран имеет высокий модуль упругости и практически нулевое остаточное удлинение, кевлар и технора в пять раз прочнее PET. Тварон обладает большей прочностью на разрыв, чем кевлар, но стоит на 20% дороже. Наименьшей степенью растяжения обладает карбон [16].

К эластомеру предъявляются особые требования, он должен выдерживать как минимум трехкратное относительное удлинение, не оказывая при этом значительного сопротивления растяжению. Для данной цели подходят латекс и силикон, однако латекс создает большее сопротивление растяжению, поэтому силикон является более предпочтительным материалом.

Элементы каркаса экзоскелета проектируются на компьютере и изготавливаются методом селективного лазерного спекания (SLS) на 3D-принтере - практически безотходной технологии, при которой неспеченный порошок можно использовать многократно для последующей печати. В отличие от FDM, SLS позволяет осуществлять 3D-печать без каких-либо опорных конструкций, что важно для моделей со сложной геометрией - они находятся во взвешенном состоянии в порошке и не требуют поддержки. Это также позволяет печатать по всему объему рабочей камеры, вмещающей любое количество деталей. Поскольку детали изготавливаются по индивидуальным размерам, изготовление пресс-форм нецелесообразно.

Поскольку конструкция предназначена для выдерживания веса и контакта с телом человека, корпус и материалы компонентов должны быть прочными, химически чистыми и достаточно легкими для работы с ними. Для этих целей подходит широкий спектр пластмасс, включая PLA, PC, PETG и ABS. Однако один материал заслуживает особого внимания, поскольку обладает очень интересным свойством: тонкостенные изделия из этого материала упругие и прочные, а толстостенные - жесткие. В то же время он превосходит другие пластики по тактильным ощущениям. Этот материал представляет собой полиамидный пластик, нейлон 12 (Sinterit PA12 Smooth).

Нейлон представляет собой полимер, который состоит из искусственных высокомолекулярных соединений, включающих амидную группу. Полиамиды известны своей долговечностью. Они устойчивы ко многим внешним воздействиям, жесткие и вязкие. Большинство из них являются термопластами с частично кристаллической структурой. Нейлон, основное сырье для SLS-печати, уже несколько десятилетий известен своими высокопрочными свойствами, а SLS-принтеры позволяют изготавливать из него изделия без затрат на полный цикл традиционного производства, что намного быстрее и дешевле [17].

Полиамидные пластмассы используются для изготовления корпусных деталей различных инструментов и машин, работающих при высоких нагрузках и вибрациях, мебельных роликов, деталей, втулок, строительных дюбелей и т.д. Различные типы материалов, изготовленных из этого полимера, схожи по своим свойствам. Их объединяют два основных качества - прочность и долговечность. Из полиамидного пластика изготавливают корпусные детали различных инструментов и машин, работающих при высоких нагрузках и вибрациях, мебельные ролики, детали, втулки, строительные дюбеля и многое другое. Виды разнообразных материалов из этого полимера по своим характеристикам схожи между собой. Их объединяют два основных качества – это прочность и долговечность .

Двумя наиболее важными полиамидами являются гексаметилен адипамид (нейлон 6,6) и поликапролактан (нейлон 6). Эти материалы обладают осо-

быми механическими свойствами: высокой прочностью на разрыв, высокой гибкостью, хорошей эластичностью и высокой ударной прочностью. Они легко окрашиваются и обладают хорошей износостойкостью благодаря низкому коэффициенту трения (самосмазыванию). Оба полиамида имеют высокие температуры плавления и стеклования и обладают хорошими механическими свойствами при высоких температурах. Основным ограничением материала является сильная чувствительность филамента к влаге. Например, прочность на разрыв влажных полиамидов может быть на 50% ниже, чем у сухих полиамидов. По сравнению с этими материалами, нейлон 12 менее гигроскопичен из-за большого количества метиленовых групп в основе полимера. Нейлон 12 имеет более низкую температуру плавления и меньшую прочность, но обеспечивает лучшую влагостойкость, стабильность размеров, меньший вес и более простой процесс печати [17].

Основные характеристики нейлона 12 представлены в таблице 5:

Таблица 5 – сравнение технических характеристик нейлона 6,6 и нейлона 12

Технические характеристики	Нейлон 6,6	Нейлон 12
Модуль упругости, МПа	1700	1100
Ударная вязкость при 23 ⁰ С, кДж / м ²	12	7
Температура плавления, °С	260	178
Температура допустимой деформации, °С	225	115
Влагопоглощение (при 23 ⁰ С и отн. влажности 50%), %	2,5	0,7
Плотность, г / см ³	1,14	1,01

3.2 Разработка конструкции каркаса

Особенности используемого материала позволяют изготовить из него любые элементы каркаса. Благодаря низкому коэффициенту трения, нейлон 12 подходит для производства шарниров. Высокая прочность позволяет изготавливать опорные штанги каркаса, а тонкие ободы, обхватывающие руку, отличаются прочностью и гибкостью, что уменьшает дискомфорт при использовании.

В проектировании каркаса необходимо, чтобы ось вращения шарнира совпадала с осью вращения локтя, а части каркаса не ограничивали свободу движений в локтевом и запястном суставах. Далее обеспечивается требуемая эргономичность. Опорные элементы частей каркаса должны располагаться вблизи точек крепления мышц в области сухожилий, размеры обхвата которых остаются постоянными при сокращении мышц.

Рабочая модель каркаса проектируется из четырех составных частей, которые позволяют быстро надевать и снимать экзоскелет. Изготовление на SLS 3D принтере позволяет изготавливать части каркаса в сборе, без применения подложек и креплений, что облегчает процесс сборки готового изделия и повышает его прочность. Возможно также изготовление разборных частей каркаса из отдельных элементов, а также замена пластиковых обручей нейлоновой лентой, однако это снизит прочность каркаса и лишит его жесткости.

Для повышения удобства использования и увеличения возможного времени непрерывного использования, обручи в местах контакта с телом человека покрываются пористым материалом, обеспечивающим более плотное прилегание каркаса и вентиляцию.

Поскольку экзоскелет применяется не только в медицинских учреждениях, но и для домашнего использования, каркас изготавливается на заказ по индивидуальным размерам пользователя для обеспечения максимальной эргономичности и удобства ношения. Это позволяет человеку вести привычный образ жизни в период реабилитации и способствует его более активному выздоровлению.

Процесс SLS 3D печати отличается дешевизной и возможностью изготавливать детали любой сложности, что позволяет без труда заменять поврежденные элементы каркаса. Пациенты, для которых экзоскелет прописан для постоянного ношения могут периодически заменять каркас экзоскелета, как обычную оправу для очков.

3.3.1 Проектирование нижней части каркаса

Нижняя часть каркаса несет основную опорную функцию. Длина несущих реек предплечья равняется измеренным 280 мм и 230 мм. В поперечном сечении рейка представляет собой прямоугольник 8x20, она имеет изогнутую форму и сужается от локтя к запястью в соответствии с анатомическими особенностями предплечья. А рейка плеча имеет более широкую часть в области локтя и соединяется с предплечьем с помощью шарнира. Вторая пара реек проектируется с зеркальным отражением. После данного шага получается 2 пары штанг с подшипниками посередине, которые изображены на рисунке 29.

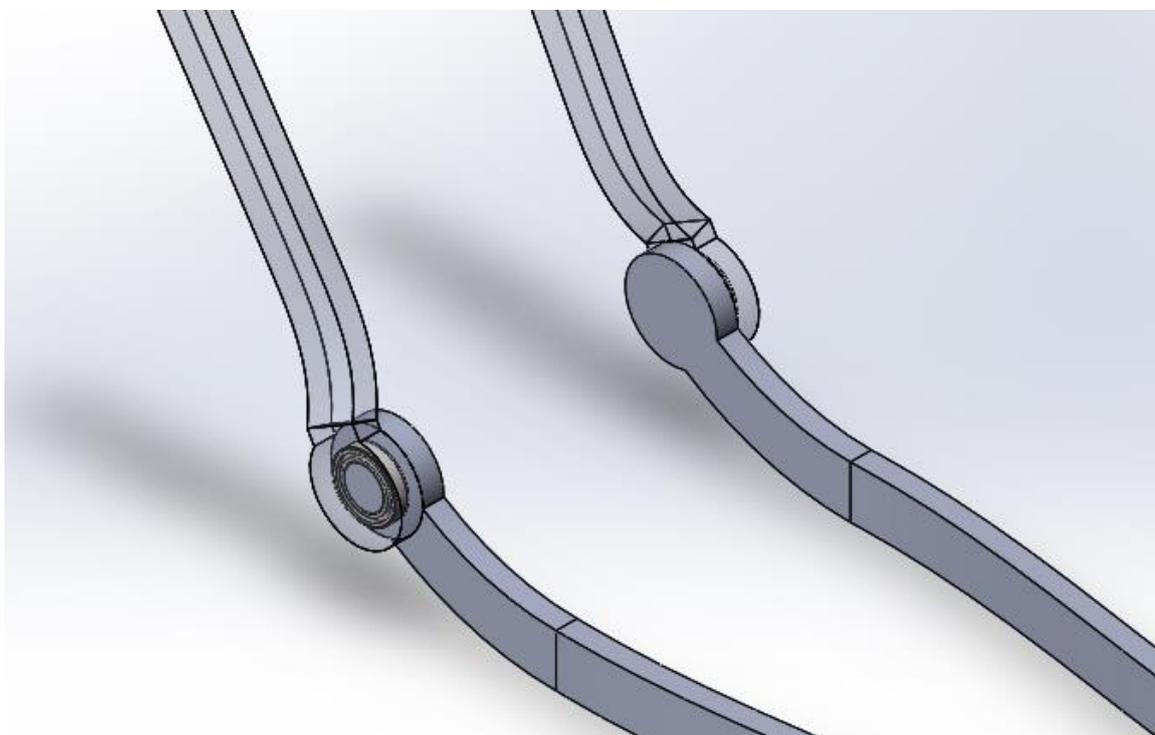


Рисунок 29 – Опорные рейки нижней части каркаса

Размеры обручей равняются измеренным обхватам с примерным запасом в 20-25мм. Запас необходим, поскольку при движении мышцы напрягаются и увеличиваются, а для вращения лучезапястного сустава необходимо выделить место. Обручи проектируются из полос шириной 20 мм и 25 мм. Размеры обруча на запястье – 2x20x144 мм, на предплечье – 2x20x175 мм, на плече у локтя – 2x25x180 мм, на плече у дельтовидной мышцы – 2x25x180 мм.

Полоса для запястья является единственной, которая крепится снаружи и обхватывает самый мобильный лучезапястный сустав. Остальные полосы располагаются с внутренней части реек. Таким образом получается нижняя половина экзоскелета с достаточной жесткостью. Нижняя часть каркаса изображена на рисунке 30.



Рисунок 30 – Нижняя часть каркаса

3.3.2 Проектирование верхней части каркаса

Верхняя часть каркаса изображена на рисунке 5. Длина и изгибы штанг верхней части предплечья повторяют его нижнюю часть. Верхняя откидная часть плеча – это зеркальное отражение нижней части между ободами.

Для изготовления верхней части предплечья с учетом толщины обруча, лучше использовать штанги квадратного сечения 10x10 мм. Чтобы обеспечить

свободное вращение руки в лучезапястном суставе с внутреннего ребра штанги снимается фаска 2x45. Поперечные обода верхней части предплечья изготавливаются из тех же полос, что и нижние обода предплечья.

Корпус верхней части представляет собой перфорированную панель из полиамидного пластика толщиной 0,5 мм, которая усиливается по краям пластиковыми ободами. Корпус увеличивает площадь контакта с предплечьем и уменьшает давление на руку. Отверстия в корпусе используются в качестве вентиляции и отвода избыточного тепла из-за плотного контакта пластины с кожей. Верхняя часть каркаса показана на рисунке 31.

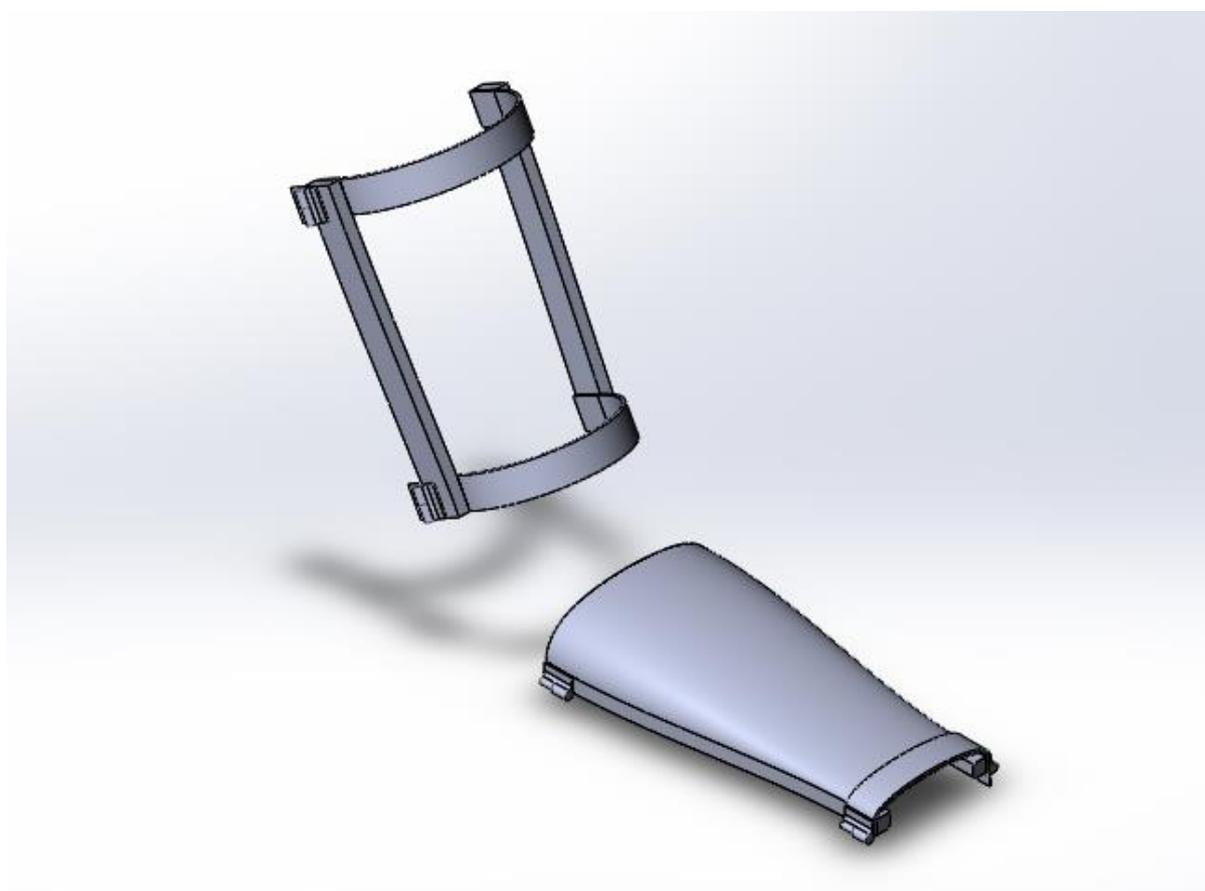


Рисунок 31 – Верхняя часть каркаса

В итоге разработки каркаса наручного экзоскелета спроектирована 3D модель, которая повторяет анатомическую форму руки человека и обеспечивает необходимую подвижность как в локтевом, так и в лучезапястном суставе. 3D модель каркаса изображена на рисунке 32.

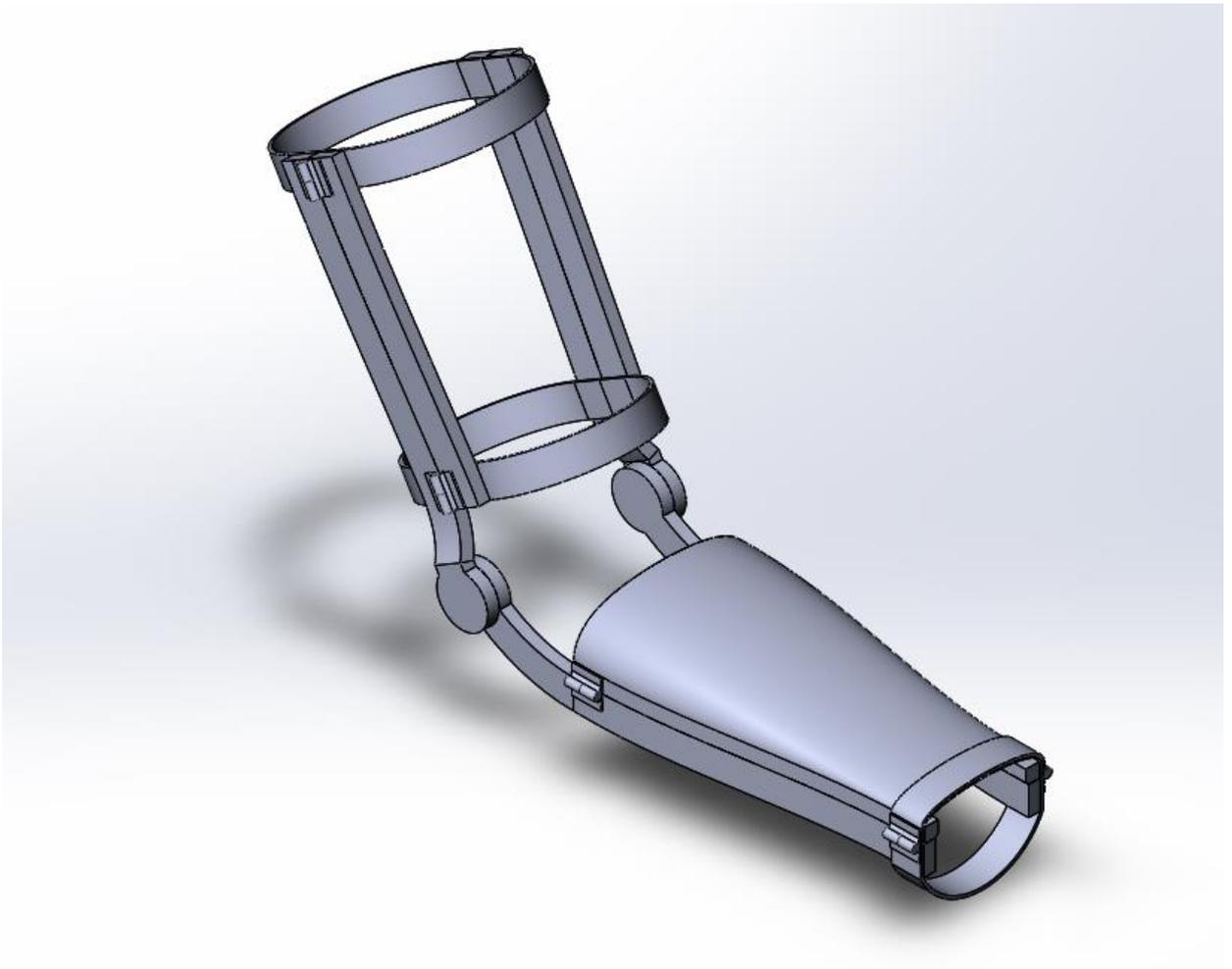


Рисунок 32 – 3D модель каркаса

3.4 Способы крепления груза и деталей конструкции между собой

Мышцы плеча позволяют осуществлять движение в 3-х взаимно-перпендикулярных плоскостях. Для реализации полного спектра движений и обеспечения мягкой связи в плечевом суставе, экзоскелет был доработан плечевой частью для закрепления соответствующих групп ПМ. По итогу моделирования общая масса каркаса с учетом крепежных элементов составляет не более 1,5 кг. Вид сбоку показан на рисунке 33, а вид спереди – на рисунке 34.

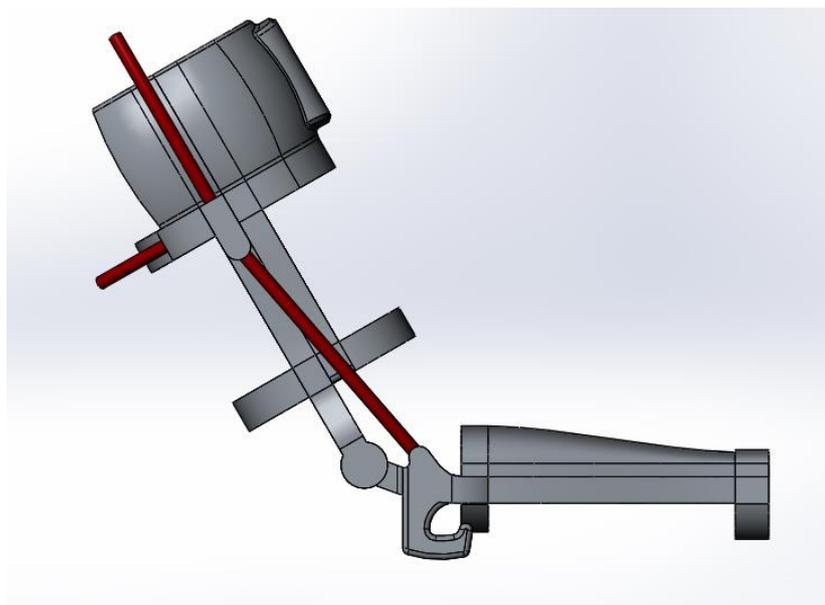


Рисунок 33 – Каркас экзоскелета, Вид сбоку.

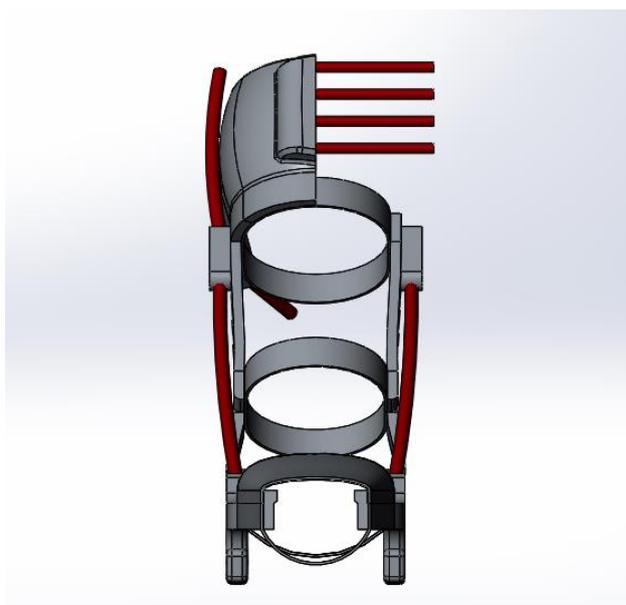


Рисунок 34 – Каркас экзоскелета. Вид спереди.

Крючки возле шарнира, выполненные из того же материала, что и корпус позволяют переносить дополнительный груз. Масса груза будет приложена к меньшему плечу, благодаря чему вращающий момент окажется в 7 раз меньше, чем при подъеме кистью. Масса груза при этом может достигать 20 кг, а нагрузка на шарнирное соединение останется прежней. Для обеспечения вращения в локтевом суставе используется радиальный однорядный подшипник, с внутренним

диаметром 15 мм (ГОСТ 8338-75). Подшипник плотно фиксируется внутри шарнира и обеспечивает его целостность, причем одна часть шарнира касается только внутреннего кольца подшипника, а другая – внешнего, для этого предусмотрены специальные пазы. Пустое пространство внутри шарнира заполняется смазкой. Установка подшипника показана на рисунке 25

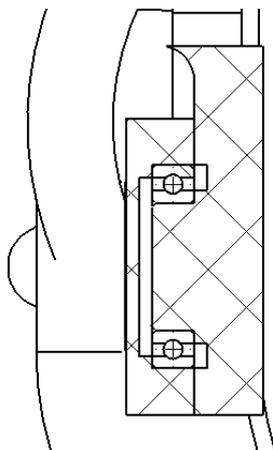


Рисунок 35 – Установка подшипника

Искусственные мышцы обеспечивают мягкую связь в плечевом суставе и повторяют функционал и расположение естественных мышц человека. Использование жилета и пояса позволяют закрепить пневмомышцы на теле человека в точках, соответствующим биологическим. Искусственные мышцы закрепляются в каркасе экзоскелета с помощью штуцеров. Силиконовая трубка плотно фиксируется на штуцере, который устанавливается в отверстие на крепежной части каркаса так, чтобы трубка плотно прижималась к стенкам отверстия. Крепление ПМ мышцы показано на рисунке 36.

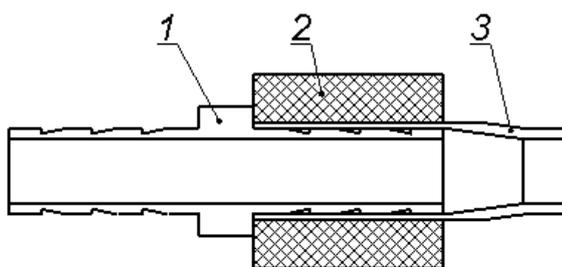


Рисунок 36 – Крепление ПМ: 1 – штуцер; 2 – крепежная часть каркаса; 3 - ПМ

Особая форма шуцера-елочки предотвращает соскальзывание искусственной мышцы в процессе сокращения. Противоположный конец трубки глушится винтом с круглой шляпкой, который ввинчивается в каркас и фиксируется гайкой.

Для крепления верхней плечевой части используется петельное соединение. Две петли с внутренней стороны руки позволяют верхней части откидываться. Одна петля, которая располагается четко посередине штанг с противоположной стороны со штыревым фиксатором, используется как замок. Петля со штыревым фиксатором изображена на рисунке 37. При этом сохраняется возможность снятия верхней части путем смещения ее относительно нижней по направлению к плечевому суставу. Вместо петли так же можно использовать защелку «лягушка», которая позволит более плотно прижать верхнюю часть к нижней.

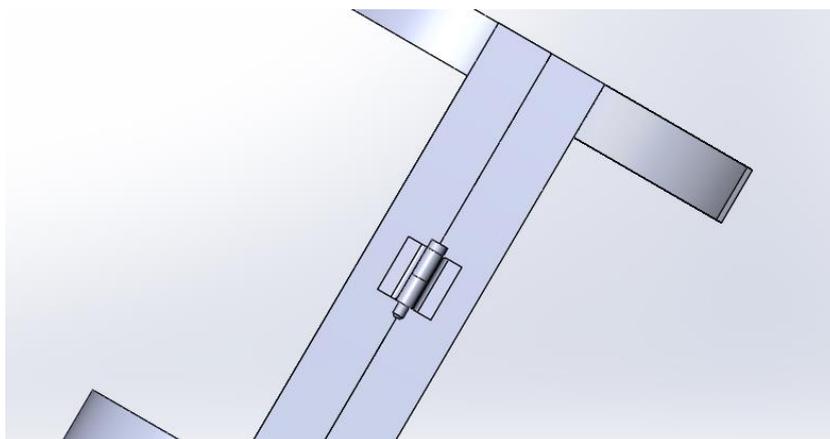


Рисунок 37 – Петля со штыревым фиксатором

Схема крепления верхней части предплечья к нижней ввиду сложной формы несколько отличается от плечевой. Для этого используются четыре петли, штыревые части которых фиксируются на верхней части и методом сдвига от кисти к локтю устанавливаются в соответствующие пазы петель на нижней части предплечья. Установка верхней части предплечья изображена на рисунке 38.

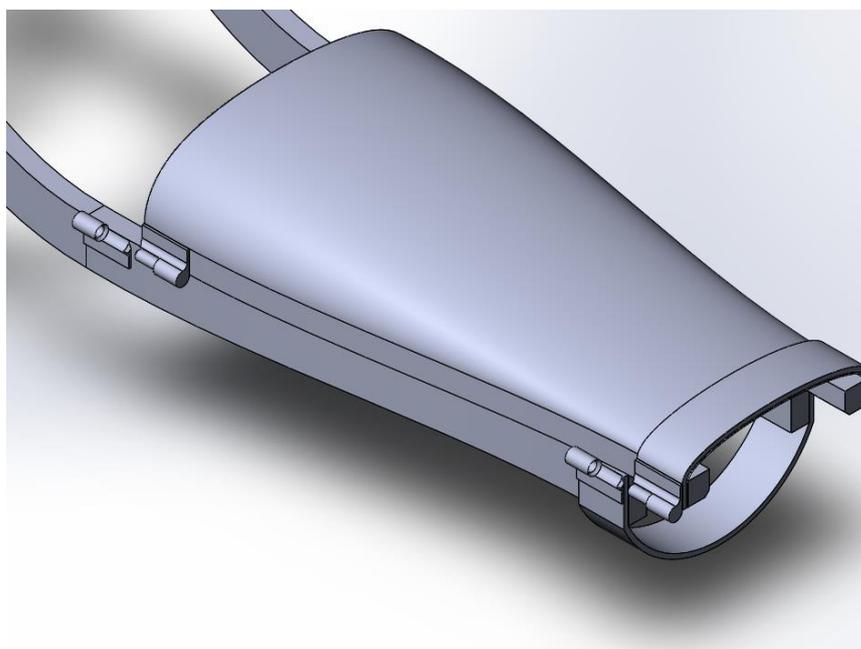


Рисунок 38 – Установка верхней части предплечья

3.5 Прочностной расчет для шарнирного соединения и оплетки ПМ

Ось шарнирного соединения является наиболее уязвимым местом в конструкции экзоскелета, поскольку к ней прикладывается поперечная нагрузка, многократно превышающая вес приложенного груза. В качестве материала выбран полиамидный пластик нейлон 12. Прочностной расчет выполнялся в добавлении Solidworks Simulation при подъеме внешнего груза массой 8 кг. Максимальная нагрузка на ось каждого из шарниров по ранее произведенным расчетам составила 400 Н. Результат произведенного моделирования показал, что ось шарнира, диаметром 15 мм выдерживает приложенную нагрузку и обеспечивает пятнадцатикратный запас прочности. Распределение статического узлового напряжения показано на рисунке 39.

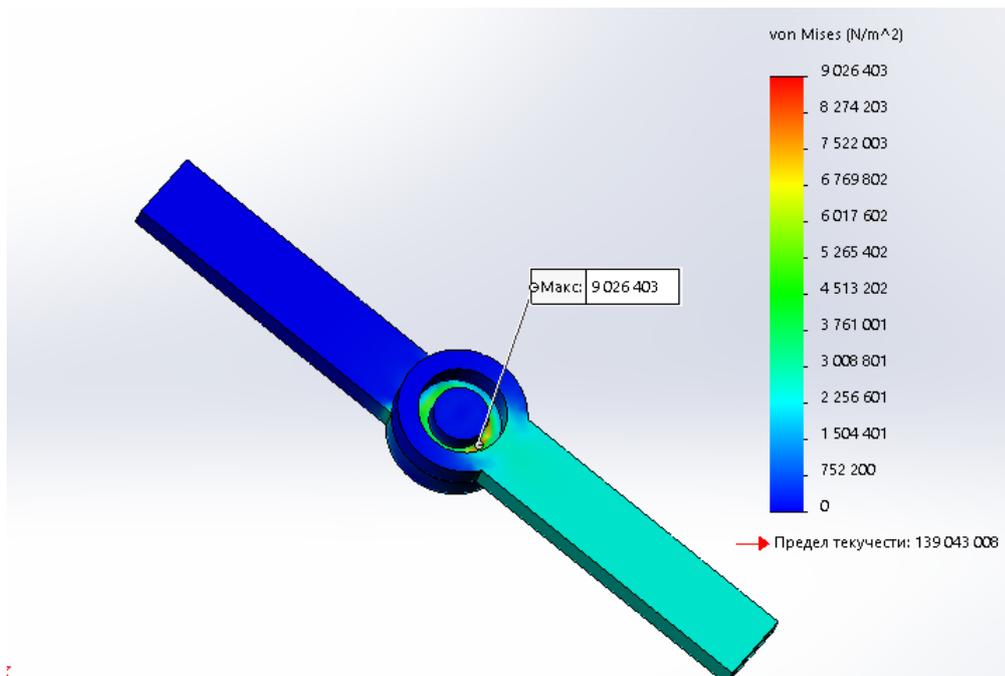


Рисунок 39 – Распределение статического узлового напряжения

Оплетка искусственной мышцы состоит из ромбовидных ячеек, образованных перекрещиванием двух пучков, состоящих из трех нитей, диаметр каждой из которых равен $d = 0,25$ мм. Определение количества ромбовидных ячеек представлено на рисунке 40.



Рисунок 40 – Определение количества ячеек в оплетке

Общее количество волокон N определяется как:

$$N = 4kn, \quad (7)$$

где k – количество ромбовидных ячеек на ширине оплетки;

n – количество нитей в одном пучке.

Максимальная сила F давление на торец ПМ определяется как:

$$F = p_0 \pi D^2, \quad (8)$$

где p_0 – внутреннее давление на стенки ПМ, Па;

D – наибольший диаметр ПМ.

Минимальная прочность полиэстера (PET) на разрыв составляет $P = 1300$ МПа. Произведем расчет максимальной нагрузки по формуле 7.

$$T_{\max} = \pi(nkd^2P - p_0D^2), \quad (9)$$

$$T_{\max} = \pi(3 \cdot 6 \cdot 0,25^2 \cdot 1300 - 0,5 \cdot 47^2) = 3900 \text{ Н}$$

Результат расчетов показывает, что ПМ с наименьшим диаметром оплетки выдерживает максимально возможную нагрузку экзоскелета в 600 Н и обеспечивает при этом шестикратный запас прочности. Таким образом полиэстера (PET) справляется с требуемыми нагрузками и его выбор данного материала является оптимальным.

4 Описание системы управления пневматическим приводом

Человеческая рука, состоящая из кисти и плечевого сустава, содержит в общей сложности 64 мышцы и 28 костей, а также многочисленные рецепторы для восприятия температуры, положения, прикосновения и боли. Благодаря особому строению суставов, человеческое тело может развивать удивительный диапазон силы и движения практически во всех направлениях. Человек может захватывать предметы определенным образом и использовать свои руки и плечи для их высокоточного позиционирования. Использование технологии пьезоэлектрических пропорциональных клапанов в сочетании с датчиками давления и силовой электроникой позволяет точно измерять прилагаемое усилие и жесткость мышц. Для выполнения движений, максимально приближенных по кинематике, скорости, силе и утонченности к движениям мышц человека, необходима сложная регулировка распределения давления в системе. Координация всех исполнительных механизмов, участвующих в движении руки, может быть достигнута только с помощью самых современных мехатронных систем и программного обеспечения [18]. Движения, которые выполняются человеком подсознательно или даже рефлекторно, по-прежнему требуют больших усилий при использовании компьютерного контроля и регулирования.

4.1 Выбор способа подключения и реализация управления ПМ

Пневматические мышцы являются типом привода, работающим при малом давлении. Для поддержания постоянного уровня давления, не превышающего рабочее, в системе используется газовый накопитель объемом до одного литра с редуктором на 300 МПа. При падении давления ниже рабочего срабатывает датчик, замыкающий цепь питания компрессора, который нагнетает максимальное давление в газовый накопитель. Структурная схема показана на рисунке 41.

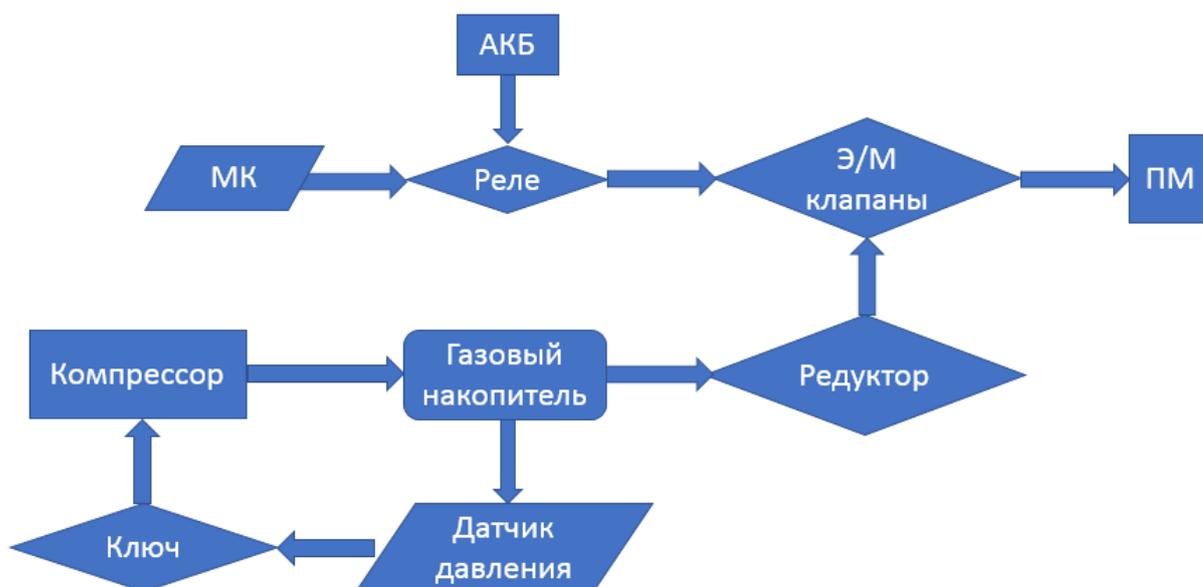


Рисунок 41 – структурная схема электропневматической системы управления

Использование компактного и мощного компрессора позволяет сделать устройство автономным, что дает возможность эксплуатировать экзоскелет людям с нарушениями подвижности верхних конечностей в качестве мобильного средства для реабилитации. Для изготовления экспериментального образца по своим характеристикам подходит автомобильный компрессор Swat SWT-106 с напряжением питания 12 В и рабочим давлением до 550 МПа. Данный компрессор изображен на рисунке 42.



Рисунок 42 – автомобильный компрессор Swat SWT-106

В конструкции используется три привода для вращения плечевого сустава и один для сгибания руки в локтевом суставе. Наиболее простым способом реализации является установка на каждый привод двух электромагнитных клапанов, осуществляющих нагнетание и сброс давления по сигналу пользователя.

Управление пневматическими мышцами осуществляется пропорциональным пневмораспределителем посредством подачи на него электросигнала от контроллера.

Управление открытием клапанов позволяет перераспределять давление в системе, что приводит к изменению направления равнодействующей силы и реализует движение руки по сигналу пользователя. В простейшем варианте сигнал приходит на микроконтроллер с двух крестообразных кнопок. Клапан открывается при подаче напряжения 12В от аккумуляторной сборки, а микроконтроллер даёт сигнал для замыкания цепи с кнопки управления. Всего имеется восемь клапанов, а кнопка управления одновременно открывает некоторые из них.

Согласовать выходное питание микроконтроллера с низкоомной нагрузкой позволяет электромагнитное реле, которое подключается к каждому из восьми выходов микроконтроллера, соответствующих числу задействованных клапанов.

При вращении руки в плечевом суставе задействованы три привода, соответствующие дельтовидной мышце – 1, большой грудной мышце 2 – и широчайше мышцы спины – 3. Сгибание руки в локтевом суставе осуществляет бицепс – 4. Для перераспределения давления в системе и приведения руки в движение, открывается клапан, нагнетающий давление в привод, отвечающий за движение в заданном направлении, при этом осуществляется пропорциональный сброс давления в мышцах антагонистах. Для плавного сброса давления лучше применять пьезо пропорциональные клапаны, но возможен вариант с использованием жиклеров, однако изменить скорость движения приводов в таком варианте остается фиксированной.

Способ реализации вращения плеча с четырех кнопок крестовины (цифрами обозначены указанные ранее группы мышц):

- Л) абдукция плеча: 1 – нагнетание давления, 2 и 3 – сброс;
- П) аддукция плеча: 2 и 3 – нагнетание давления, 1 – сброс;
- В) медиальное вращение: 2 – нагнетание давления, 3 – сброс;
- Н) латеральное вращение: 3 – нагнетание давления, 2 – сброс.

Обозначения: Л – лево, В – верх, П – право, Н – низ

Отдельно используется крестовина для сгибания в локтевом суставе и изменения давления в мышцах плеча:

- Л) Повышение давления в системе: 1, 2, 3 – нагнетание;
- П) Понижение давление в системе 1, 2, 3 – сброс;
- В) Сгибание локтя: 4 – нагнетание давления;
- Н) Разгибание локтя: 4 – сброс.

4.2 Расчёт времени работы в режиме автономного использования

Одним из преимуществ пневмомыщ является возможность их автономной работы. Для ее обеспечения необходимо предусмотреть источник питания, который будет поддерживать самостоятельную деятельность ПМ. В качестве источника питания предлагается сделать аккумуляторную сборку на 5000 мАч с напряжением 12 В. На рисунке 43 представлен пример из трех АКБ бренда LiitoKala с максимальным током 50 А.



Рисунок 43 – Аккумуляторная сборка бренда LiitoKala 12 В

Максимальный ток потребления компрессора Swat SWT-106 составляет

$$I_{\max} = 14,5 \text{ A с производительностью } V = 10^{-3} \frac{\text{M}^3}{\text{c}}$$

При подключении аккумуляторной сборки емкостью $C = 5000 \text{ мА} \cdot \text{ч}$ время работы t составит:

$$t = \frac{C}{I_{\max}} = \frac{5 \cdot 3600}{14,5} = 1240 \text{ c}.$$

Рассчитаем объем воздуха, перекачиваемого компрессором при нормальных условиях Q_{HV} и рабочий объем Q_P при избыточном давлении равном $P_{ИЗБ} = 300 \text{ МПа}$:

$$Q_{HV} = V \cdot t = 10^{-3} \cdot 1240 = 1,24 \text{ м}^3 (\text{н.у.});$$

$$Q_P = \frac{P_A \cdot V \cdot t}{P_{ИЗБ} + P_A} = \frac{10^{-3} \cdot 1240}{4} = 0,31 \text{ м}^3.$$

Объем потребления воздуха при полном цикле сокращения мышц рассчитывается по формуле 10:

$$Q_{\text{ОБЩ}} = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^z (D_i^2 L_i - D_{0i}^2 L_{0i}) n_i, \quad (10)$$

где D – диаметр ПМ после сокращения, мм;

L – длина ПМ после сокращения, мм;

n – количество ПМ одного типа.

$$Q_{\text{ОБЩ}} = \frac{\pi}{4} (26,5^2 \cdot 520 + 21,5^2 \cdot 230 \cdot 2 + 13^2 \cdot 135 \cdot 4 + 21,5^2 \cdot 400) = 9,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

Использование газового накопителя объемом $V = 10^{-3} \text{ м}^3$ при давлении

$$P = 6,5 \text{ атм} \approx 650 \text{ МПа}, \text{ можно сделать } K = \frac{P_A + P_{ИЗБ}}{P_A + P_K} \cdot \frac{V}{Q_{\text{ОБЩ}}} = \frac{6,5 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 9,8 \cdot 10^{-5}} \approx 16$$

полных циклов сокращений, после которых последует кратковременное включение компрессора для нагнетания давления до максимального уровня. Полный заряд аккумулятора позволит совершить $N = \frac{Q_P}{Q_{общ}} = \frac{0,31}{9,8 \cdot 10^{-5}} \approx 3100$ сгибаний руки в локтевом и столько же вращений в плечевом суставе.

4.3 Результаты разработки экзоскелета плечевого пояса

По итогу работы выполнен расчет основных параметров пневматических мышц для использования в экзоскелете. Подобраны материалы и спроектирован легкий и удобный каркас по индивидуальным размерам пользователя, общая масса которого с учетом массы приводов составляет не более 1,5 кг. Описан возможный вариант перераспределения давления посредством пропорционального управления, обеспечивающий стабильную скорость и плавность хода «мягких» бескаркасных ПМ. А также разработан макет экзоскелета локтевого сустава, приведенный на рисунке 44.

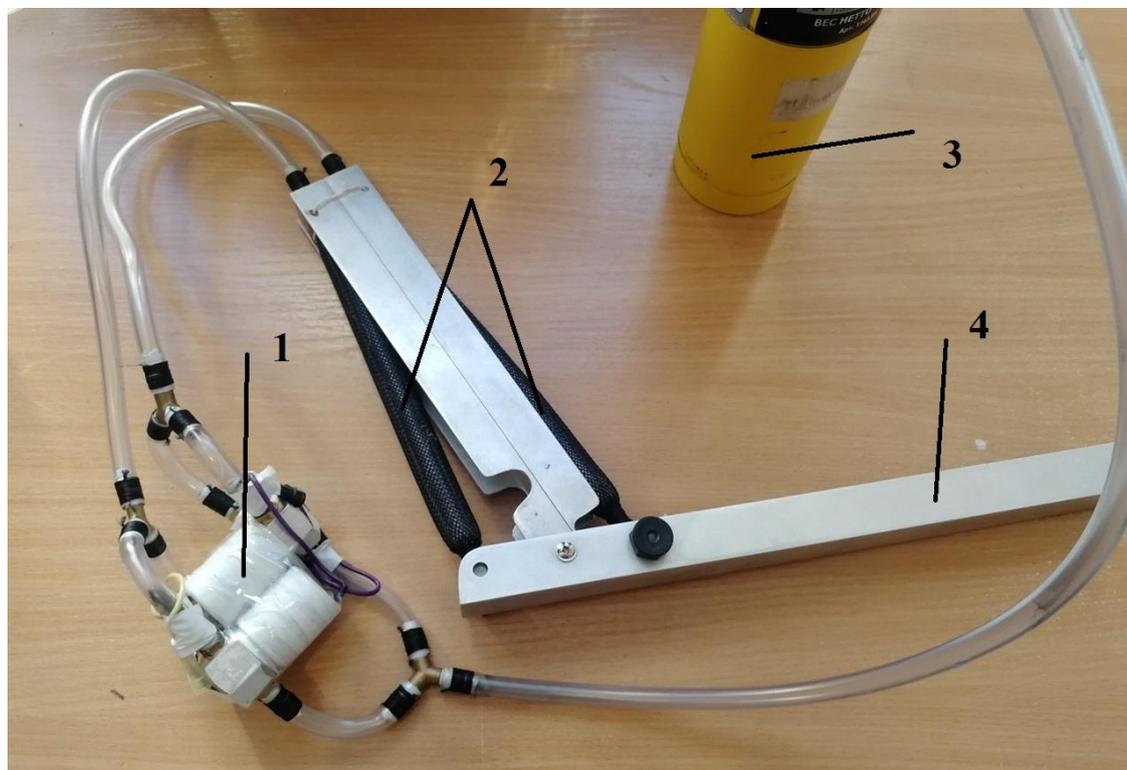


Рисунок 44 – Макет разрабатываемого устройства: 1 – клапанный блок, 2 – ПМ, 3 – газовый накопитель; 4 – аккумуляторный отсек.

На разработанном макете локтевого сустава из алюминиевого профиля показан принцип работы системы управления ПМ. В роли привода выступают две пневматические мышцы диаметром 8 мм, обозначенные цифрой 2. Баллон объемом 1 л служит в качестве накопителя и поддерживает рабочее давление около 300 кПа в системе. Сигналом для срабатывания привода является замыкание цепи питания на клапаны сброса, собранные в едином клапанном блоке, обозначенным цифрой 1. В роли аккумуляторного отсека выступает каркас экзоскелета, внутри которого размещена аккумуляторная сборка напряжением 12 В и емкостью 5000 мАч. Она служит для питания компрессора и подачи напряжения для открытия клапанов, головки которых являются клеммами для подключения компрессора.

Открытие клапана происходит при замыкании его контактного проводника на головку противоположного, при этом воздух с газового накопителя поступает в ПМ и приводит к ее сокращению. При одновременном сокращении двух мышц, каркас находится в устойчивом положении, которое обеспечивает статическое удержание груза. Когда в одном из ПМ сбрасывается давление, каркас отклоняется в сторону сокращенной мышцы, а максимальная амплитуда движения достигается при ее полном сокращении. Таким образом обеспечивается амплитуда движений в диапазоне от 0 до 130 градусов, которая ограничивается стопорными элементами каркаса во избежание травм пользователя. Пиковое усилие при подъеме груза, который развивает данный макет составляет не более 3 кг при угле сгибания около 70 градусов.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Данная выпускная квалификационная работа заключается в разработке проекта по организации промышленного производства медицинских экзоскелетов плечевого пояса.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности НИ, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Оценить коммерческий потенциал и перспективность разработки НИ;
2. Осуществить планирование этапов выполнения исследования;
3. Рассчитать бюджет затрат на исследования;
4. Произвести оценку научно-технического уровня исследования и оценку рисков.

5.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальными потребителями производимого продукта являются:

- Медицинские учреждения
- Реабилитационные центры
- Частные физические лица

По оценкам фонда "Модернизация, инновации и развитие" (ЗПИФ МИР), потребность страны только в медицинских экзоскелетах составляет не менее 320 000 единиц – но реальная спрос ниже из-за невысокой покупательной способно-

сти населения и отсутствия государственных мер поддержки приобретения такого медицинского оборудования для людей с ограниченными возможностями. Даже если предположить, что только 10% всех нуждающихся приобретут экзоскелеты, то это уже составит 32 000 единиц.

5.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентоспособных технологических решений с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет оценить сравнительную эффективность научных разработок и определить направления их дальнейшего совершенствования.

В мире существуют десятки производителей экзоскелетов, в том числе несколько российских компаний. Конкуренцию в отрасли составляют [19]:

1. Экзоскелет нижних конечностей Fortis, разработанный компанией Lockheed Martin USA в 2014 году для промышленного применения. Экзоскелет Fortis используют сотрудники судостроительной компании Lockheed Martin Shipbuilding.

2. Echo Works, разработанный компанией Ekso Bionics (США) в 2015 году.

3. Автономный экзоскелет нижних конечностей, разработанный компанией Daewoo (Корея), предназначен для применения в судостроении и машиностроении. Он работает только с парамагнетиками, поскольку в качестве рабочего органа для поднятия груза используется электромагнит.

4. Российский экзоскелет «ЭкзоАтлет» был разработан для нужд МЧС России, особенно для работы спасателей и пожарных. Вооруженные силы также были заинтересованы в этом устройстве в качестве военной экипировки. Из-за отсутствия исполнительных механизмов и источников питания время работы пассивного экзоскелета ограничено только выносливостью человека-оператора.

5. Экзоскелет «К-2» – это устройство позволяет человеку передвигаться по местности с травмированной нижней конечностью, включая даже переломы, за счет фиксации ее дополнительным бандажом или ремнем поверх травмы. К-2

также обеспечивает дополнительную защиту нижней конечности и позвоночника от механических повреждений.

Как видно из списка, конкурентоспособные конструкции нацелены на функциональность нижних конечностей и в основном используются в промышленности. Разрабатываемые модели не только улучшат физические возможности пользователя, но и помогут в реабилитации людей с травмами спинного мозга, рассеянным склерозом, инсультом и ДЦП.

Предлагаемая разработка экзоскелета плечевого пояса реализует совершенно новый подход в экзорехабилитации. Использование пневматических, максимально приближенных к естественным мышцам человека, в качестве привода, позволяет реализовать мягкую связь в плечевом суставе, обеспечив тем самым свободу движений пользователя.

Конкурентные технические решения анализируются с помощью оценочной карты. В таблице 5.1 перечислены оценочные критерии, используемые для сравнения конкурирующих вариантов технологий.

Таблица 5.1 – Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		БЕ	Би	БВ	КЕ	Ки	КВ
1. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
2. Энергоэкономичность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
3. Надежность	0,15	5	4	4	0,75	0,6	0,6
4. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,15	4	3	3	0,6	0,45	0,45
5. Простота эксплуатации	0,15	4	4	5	0,6	0,6	0,75
Экономические критерии оценки эффективности							
6. Цена	0,05	4	4	3	0,2	0,2	0,15
7. Конкурентоспособность	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
8. Послепродажное обслуживание	0,1	3	3	4	0,3	0,3	0,4
9. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	3	1	0,4	0,3	0,1
Итого	1	38	32	30	4,25	3,55	3,45

где B_E —предлагаемая разработка;
 B_I — вариант 1;
 B_B — вариант 2.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (5.1)$$

где K – конкурентоспособность вида;
 B_i – вес критерия (в долях единицы);
 B_i – балл i -го показателя.

По данным оценочной карты можно увидеть, что наиболее привлекательным является предлагаемая разработка.

5.3 SWOT-анализ

SWOT – анализ позволяет оценить факторы и явления, способствующие или препятствующие продвижению проекта на рынок.

На первом этапе SWOT анализа в таблице 5.2 описаны сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы реализации НИ.

Таблица 5.2 – Матрица SWOT анализа

<p><i>Сильные стороны проекта</i> С1. Гарантированный спрос на экзоскелеты, спрос в перспективе будет увеличиваться С2. Наличие опытного руководителя и команды разработчиков С3. Опыт и технологическая готовность</p>	<p><i>Слабые стороны проекта</i> Сл1. Дефицит собственного капитала для самостоятельного завершения разработок Сл2. Необходимость в продолжительном экспериментальном этапе</p>
<p><i>Возможности</i> В1. Участие в государственных программах поддержки В2. Увеличение сфер практического применения результатов разработок</p>	<p><i>Угрозы</i> У1. Мировой политический и экономический кризис У2. Возможны сбои в поставках комплектующих из-за рубежа У3. Нестабильность национальной валюты У4 Снижение реальных доходов населения, сокращение платежеспособного спроса</p>

Второй этап анализа заключается в определении сильных и слабых сторон проекта по отношению к внешней среде. Интерактивная матрица проектов представлена в таблице 5.3

Таблица 5.3 - Интерактивная матрица сильных и слабых сторон и возможностей

		Сильные стороны			Слабые стороны	
		С1	С2	С3	Сл1	Сл2
Возможности проекта	В1	+	0	0	-	-
	В2	+	+	+	-	-

Это соответствие или несоответствие должно помочь определить степень необходимости стратегических изменений. Каждый фактор отмечен знаком "+" (что указывает на сильное соответствие между сильными сторонами и возможностями) или "-" (что указывает на слабое соответствие); если есть сомнения, то ставится "0".

Анализ таблицы взаимодействия представлен в виде записи тесно связанных сильных сторон и возможностей или слабых сторон и возможностей.

- В1С1;
- В1В2С1;
- В2С1С2С3.

Наибольшую угрозу для проекта представляет нехватка финансовых ресурсов и возможный срыв поставок компонентов, необходимых для развития проекта, что может оказать негативное влияние на экономическую эффективность проекта, а также сроки реализации.

Что касается слабых сторон проекта, важно решить вопрос финансирования на оптимальных условиях.

На третьем этапе была подготовлена окончательная матрица SWOT-анализа, как показано в таблице 5.4

Таблица 5.4 - Итоговая матрица SWOT-анализа

Обозначения: С – сильные стороны; Сл – слабые стороны; В – возможности; У – угрозы/	С1. Гарантированный спрос на экзоскелеты, спрос в перспективе будет увеличиваться С2. Наличие опытного руководителя и команды разработчиков С3. Опыт и технологическая готовность	Сл1. Дефицит собственного капитала для самостоятельного завершения разработок Сл2. Необходимость в продолжительном экспериментальном этапе
В1. Участие в государственных программах поддержки В2. Увеличение сфер практического применения результатов разработок	Большая емкость рынка и его возможное расширение способствуют развитию проекта и целесообразности его реализации	Необходимо формирование стратегии финансирования, направленной на оптимальное сочетание собственных, заемных и бюджетных финансовых ресурсов.
У1. Мировой политический и экономический кризис У2. Возможны сбои в поставках комплектующих из-за рубежа У3. Нестабильность национальной валюты У4 Снижение реальных доходов населения, сокращение платежеспособного спроса	Снижение платежеспособного спроса стимулирует продолжение научных разработок, направленных на оптимизацию/снижение себестоимости разрабатываемого продукта.	Самой большой угрозой для проекта являются дефицит финансовых ресурсов и возможные сбои поставок комплектующих для разработки проекта, что может негативно повлиять на экономическую эффективность проекта, на сроки его реализации

5.4 Планирование работ по научно-техническому исследованию

5.4.1 Структура работ в рамках научного исследования

Распределение исполнителей по видам работ приведено в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

№	Работы	Исполнитель
0	Выдача задания, согласование ТУ	Руководитель
1	Разработка конструкции объекта	Инженер
2	Разработка плановых чертежей	Инженер.
3	Изготовление опытного образца	Руководитель, инженер
4	Разработка маршрутной технологии изготовления	Инженер
5	Проектирование мастер-модели	Инженер
6	Испытания опытного образца	Руководитель, инженер
7	Внесение изменений в проект мастер-модели	Руководитель, инженер
8	Изготовление мастер-модели	Инженер
9	Передача сведений о мастер-модели	Инженер
10	Разработка детальных технологических процессов	Инженер
11	Размещение заказов на изготовление	Руководитель

5.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость научных исследований оценивается в человеко-днях и носит вероятностный характер, который зависит от многих факторов, которые трудно учесть. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож\ i}$ используется следующая формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (5.2)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -й работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -й работы, чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -й работы, чел.-дн.;

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_{pi} , учитывающая параллельность выполнения работ по нескольким исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i}, \quad (5.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Продолжительность работ представлена в таблице 6.6.

Таблица 5.6 – Продолжительность работ

№	Работы	Продолжительность, дней
0	Выдача задания, согласование ТУ	3
1	Разработка конструкции объекта	20
2	Разработка плановых чертежей	5
3	Изготовление опытного образца	30
4	Разработка маршрутной технологии изготовления	15
5	Проектирование мастер-модели	12
6	Испытания опытного образца	7
7	Внесение изменений в проект мастер-модели	3
8	Изготовление мастер-модели	10
9	Передача сведений о мастер-модели	1
10	Разработка детальных технологических процессов	20
11	Размещение заказов на изготовление	3

5.4.3 Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным представлением проведения научных работ является построение ленточного графика в форме диаграммы Ганта.

Для удобства построение графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (5.4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})}, \quad (5.5)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Расчет коэффициента календарности:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - (T_{вых} + T_{пр})} = \frac{365}{365 - 118} = 1,48$$

Таблица 5.7 – Временные показатели проведения научного исследования

№	Работы	Исполнитель	Продолжительность, рабочих дней	Продолжительность, календарных дней
0	Выдача задания, согласование ТУ	Руководитель	3	4
1	Разработка конструкции объекта	Инженер	20	30
2	Разработка плановых чертежей	Инженер.	5	7
3	Изготовление опытного образца	Руководитель, инженер	30	44
4	Разработка маршрутной технологии изготовления	Инженер	15	22
5	Проектирование мастер-модели	Инженер	12	18
6	Испытания опытного образца	Руководитель, инженер	7	10
7	Внесение изменений в проект мастер-модели	Руководитель, инженер	3	4
8	Изготовление мастер-модели	Инженер	10	15
9	Передача сведений о мастер-модели	Инженер	1	1
10	Разработка детальных технологических процессов	Инженер	20	30
11	Размещение заказов на изготовление	Руководитель	3	4

В таблице 5.8 был разработан календарный план-график проекта. Для иллюстрации календарного плана была использована диаграмма Ганта, указывающая на целесообразность проведения данного исследования.

Таблица 5.8 - Календарный план-график

№	Работы	Исполнитель	Продолжительность, рабочих дней	Продолжительность, календарных дней	июнь			июль			август			сентябрь		
					1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	Выдача задания, согласование ТУ	Руководитель	3	4	■											
1	Разработка конструкции объекта	Инженер	20	30	■	■	■	■								
2	Разработка плановых чертежей	Инженер.	5	7				■								
3	Изготовление опытного образца	Руководитель, инженер	30	44				■	■	■	■	■				
4	Разработка маршрутной технологии изготовления	Инженер	15	22				■	■							
5	Проектирование мастер-модели	Инженер	12	18								■	■			
6	Испытания опытного образца	Руководитель, инженер	7	10								■	■			
7	Внесение изменений в проект мастер-модели	Руководитель, инженер	3	4										■		
8	Изготовление мастер-модели	Инженер	10	15										■	■	
9	Передача сведений о мастер-модели	Инженер	1	1											■	
10	Разработка детальных технологических процессов	Инженер	20	30										■	■	■
11	Размещение заказов на изготовление	Руководитель	3	4												■

5.5 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

1 – Материальные затраты; 2 – Затраты на спец. Оборудование; 3 – Основная и дополнительная ЗП; 4 – Социальные отчисления; 5 – Прямые затраты; 6 – Накладные расходы.

5.5.1 Расчет материальных затрат НТИ

При планировании бюджета на НИОКР важно обеспечить полное и точное отражение всех видов затрат, связанных с реализацией исследования.

Расчет материальных затрат осуществляется по формуле 5.6:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхи}, \quad (5.6)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхи}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 5.9 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество		Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (ЗМ), руб.	
		Руководитель	Инженер		Руководитель	Инженер
Тетрадь для записей	шт.	1	1	65	65	65
Ручка	шт.	1	1	25	25	25
Нейлон 12 (Sinterit PA12 Smooth)	Кг	0	1,5	5133	0	7700
Электроэнергия	кВт·ч	0	300	3,5	0	1050
Итого					90	8840

Общие материальные затраты составили $90+8840=8930$ руб.

5.5.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

Данная статья включает все расходы, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительного оборудования, стендов, устройств и механизмов), которое необходимо для выполнения работ по определенной теме. Стоимость специального оборудования определяется в соответствии с действующим прейскурантом. При покупке оборудования стоимость его доставки и установки рассчитывается в размере 10% от его цены. Расчет затрат по этой статье приведен в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Расчет бюджета затрат на приобретение оборудования для научных работ

Наименование	Единица измерения	Количество		Цена за ед., тыс. руб.	Затраты на материалы, (Зм), тыс. руб.	
		Руководитель	Инженер		Исп. 1	Исп. 2
Персональный компьютер	шт.	1	1	65	65	65
Программное обеспечение (SolidWork)	шт.	1	1	51	51	51
SLS 3D принтер	шт.	0	1	179,9	0	179,9
Компрессор Swat SWT-106	шт.	0	1	3	0	3
Газовый баллон 1 л	шт.	0	3	1,5	0	4,5
Аккумулятор	шт.	0	2	3,5	0	7
МФУ	шт.	0	1	20	0	20
Итого:					116	330,4

Стоимость затрат на приобретение оборудования составит $116,0+330,4=446,4$ тыс. руб.

5.5.3 Основная заработная плата исполнителя темы

В настоящую статью включены базовые оклады сотрудников, задействованных в проекте. Затраты на оплату труда зависят от трудоемкости выполняемой работы и существующей системы оплаты труда и тарифных ставок. В базовую зарплату включается ежемесячная премия, выплачиваемая из фонда заработной платы в размере 30% от заработной платы менеджера и 20% от заработной платы инженера. Данные о заработной плате сотрудников приведены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Расчет основной заработной платы

Наименование	Количество работников, чел.	Оклад, руб./мес.
Руководитель	1	70000
Инженер	1	50000

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно участвующих в реализации проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату и рассчитывается по формуле:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (5.7)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12–20 % от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (5.8)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле 6.9:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (5.9)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5 – дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6 – дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 5.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней – выходные дни – праздничные дни	118	118
Потери рабочего времени – отпуск – невыходы по болезни	48 0	28 10
Действительный годовой фонд рабочего времени	199	209

Месячный должностной оклад работника (руководителя):

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_{\text{д}}) \cdot k_p, \quad (5.10)$$

где Z_{mc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

k_{np} – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30 процентов от Z_{tc});

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчет основной заработной платы представлен в таблице 6.13

Таблица 5.13 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Разряд	Оклад, тыс.руб./ мес.	Премия, тыс.руб.	Доплаты и надбавки, тыс.руб.	Районный коэф- фициент, 30%	ИТОГО
Руководитель	Старший преподаватель	70	21	18,2	32,8	142,0
Инженер	Инженер	50	10	12	21,6	93,6
Итого						235,6

Месячный фонд оплаты труда составляет 235,6 тыс.руб. За период реализации проекта $235,6 \cdot 4 \text{ мес.} = 942,2 \text{ тыс.руб.}$

5.5.4 Расчет дополнительной заработной платы

Дополнительная заработная плата учитывает величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы рассчитывается по формуле:

$$Z_{дон} = k_{дон} \cdot Z_{осн}, \quad (5.11)$$

где $k_{дон}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, принятый на стадии проектирования за 0,15.

Дополнительная заработная плата $235,6 \cdot 0,15 = 35,3 \text{ тыс.руб.}$ в месяц, за период реализации проекта $35,3 \cdot 4 = 141,3 \text{ тыс.руб.}$

5.5.5 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из формулы 5.12:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (5.12)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, тыс.руб.		Дополнительная заработная плата, тыс. руб.	
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Фонд заработной платы	142,0	93,6	21,3	14,0
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302			
Итого				
Руководитель	49,3			
Инженер	32,5			

Сумма отчислений в социальные фонды $32,5+49,3=81,8$ тыс. руб. в месяц, за период реализации проекта $81,8 \cdot 4=327,2$ тыс.руб.

5.5.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов. Их величина определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (Z_{\text{статей}}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (5.13)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Накладные расходы составят:

$$(8,930+446,4+942,2+141,3+327,2) \cdot 16\%=298,6 \text{ тыс. руб.}$$

5.5.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета проекта приведено в таблице 5.15.

Таблица 5.15 –Расчет бюджета проекта

Наименование статьи	Сумм, тыс.руб.		
	вариант 1	вариант 2	вариант 3
1. Материальные затраты НТИ	8,9	9,8	8,9
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	446,4	491,0	446,4
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	942,2	942,2	1 036,4
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	141,3	141,3	155,4
5. Отчисления во внебюджетные фонды	327,2	327,2	359,9
6. Затраты на научные и производственные командировки	0,0	0,0	0,0
7. Контрагентские расходы	0,0	0,0	0,0
8. Накладные расходы	298,6	305,9	321,1
9. Бюджет затрат НТИ	2 164,6	2 217,4	2 328,2

5.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности основано на расчете сводного индекса эффективности научных исследований. Для его нахождения необходимо определить два средневзвешенных показателя: финансовую эффективность и эффективность использования ресурсов.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования определяется как:

$$I_{фин\ p}^{исп\ i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (5.14)$$

где $I_{фин\ p}^{исп\ i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

$$I_{фин\ p}^{исп\ 1} = \frac{2164,6}{2328,2} = 0,93;$$

$$I_{фин\ p}^{исп\ 2} = \frac{2217,4}{2328,0} = 0,95;$$

$$I_{фин\ p}^{исп\ 3} = 1$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i, \quad (5.15)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Таблица 5.16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		
		вариант 1	вариант 2	вариант 3
1. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	5	4	4
2. Энергоэкономичность	0,1	5	4	3
3. Надежность	0,15	5	4	4
4. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,15	4	3	3
5. Простота эксплуатации	0,15	4	4	5
6. Цена	0,05	4	4	3
7. Конкурентоспособность	0,1	4	3	3
8. Послепродажное обслуживание	0,1	3	3	4
9. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	3	1
Итого	1	4,25	3,55	3,45

$$I_{p-исн1} = 4,25;$$

$$I_{p-исн2} = 3,55;$$

$$I_{p-исн3} = 3,45.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исн1}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исн1} = \frac{I_{p-исн1}}{I_{фин p}} = \frac{4,25}{0,93} = 4,57;$$

$$I_{исп2} = \frac{I_{р-исп2}}{I_{финр}} = \frac{3,55}{0,95} = 3,74;$$

$$I_{исп3} = \frac{I_{р-исп3}}{I_{финр}} = \frac{3,45}{1} = 3,45.$$

Сравнение общих показателей вариантов развития позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать из предложенных вариантов наиболее целесообразный.

Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп2}}{I_{исп1}}. \quad (5.16)$$

Таблица 5.17 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	вариант 1	вариант 2	вариант 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,93	0,95	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,25	3,55	3,45
3	Интегральный показатель эффективности	4,57	3,74	3,45
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,82	0,75

Сравнив значения интегральных показателей эффективности, можно сделать вывод, что реализация технологии в первом исполнении является более эффективным вариантом решения задачи, поставленной в данной работе с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

6 Социальная ответственность

Введение

Данная выпускная квалификационная работа заключается легкого и удобного экзоскелета плечевого пояса для повседневного использования людьми с ограниченными возможностями верхних конечностей в период реабилитации после перенесенных заболеваний.

Для разработки экзоскелета необходимо помещение площадью не менее 15 квадратных метров, оснащенное паяльной станцией, SLS 3D принтером и персональным компьютером, для осуществления процесса проектирования, изготовления и печати.

Пневматические мышцы работают при малых давлениях от автомобильного компрессора, подключаемого через газовый накопитель, который работает от аккумуляторной сборки на 12 В. Управление приводами осуществляется через микроконтроллер, который подает сигналы на электромагнитные клапаны, перераспределяющие давление в системе по сигналу пользователя.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Производственные помещения с наличием вредных или опасных производственных факторов, незначительно превышающих установленные нормы, относятся к 3.1 классу условий труда (вредные условия труда 1 степени). Измененное функциональное состояние организма работника восстанавливается, как правило, при более длительном, чем до начала следующего рабочего дня (смены), прекращении воздействия данных факторов, и увеличивается риск повреждения здоровья. Для обеспечения безопасности труда в данных условиях требуются средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:

Согласно ст. 91 ТК РФ нормальная продолжительность рабочего времени – это 40 часов в неделю. Согласно ст. 219 ТК РФ работники, которые трудятся во вредных условиях, должны работать максимум 36 часов в неделю, получать надбавку к окладу и дополнительный отпуск не менее недели, им можно воспользоваться каждый год. Такие работники имеют право на льготную пенсию.

При планировании рабочего места должно быть обеспечено наилучшее размещение предметов труда, которое позволяет не допускать общего дискомфорта, уменьшать утомляемость работника, повышать его продуктивность труда. На основании ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ рабочее место для выполнения работ сидя организуют при легкой работе, не требующей свободного передвижения работающего и при работе средней тяжести, обусловленной особенностями технологического процесса. Основное время уделяется работе по проектированию и сборке каркаса, которая относится к работе средней тяжести и выполняется преимущественно сидя. Процесс 3D печати полностью автоматизирован и требует присутствия работника только при подготовке изделия к печати и при его извлечении.

Площадь рабочего места должна быть такой, чтобы работник не делал лишних движений. Согласно требованиям, ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ выполнение трудовых операций "часто" и "очень часто" должно быть обеспечено в пределах зоны легкой досягаемости и оптимальной зоны моторного поля.

В соответствии с ГОСТ 12.2.032-78. «Система стандартов безопасности труда». Рабочее место при выполнении работ сидя» рабочий стол может быть любой конструкции, отвечающей современным требованиям эргономики и позволяющей удобно разместить на рабочей поверхности оборудование с учетом его количества, размеров и характера выполняемой работы. Рабочий стул, должен обеспечивать функции регулировки по высоте и углу наклона спинки.

6.2 Производственная безопасность

Перечень возможных опасных и вредных факторов, возникающих в процессе производства представлен в таблице 6.

Таблица 6 - Возможные опасные и вредные производственные факторы на рабочем месте в малом производственном помещении

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека	ТИ Р М-075-2003 Межотраслевая типовая инструкция по охране труда для работников, занятых пайкой и лужением изделий паяльником.
Производственные факторы, связанные с повышенным образованием электростатических зарядов	ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования.
Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий	ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
Сосуды, работающие под давлением	ИТНЭ-93 Инструкция по техническому надзору и эксплуатации сосудов, работающих под давлением, на которые не распространяются Правила Госгортехнадзора
Импульсное лазерное излучение	ГОСТ 31581-2012 Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий (Переиздание)
Неподвижные режущие, колющие, обдирающие, разрывающие части твердых объектов	ГОСТ 12.4.011-89 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация
Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения	СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение.
Повышенный уровень шума	ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности
Повышенный уровень вибрации	ГОСТ 31192.1-2004 (ИСО 5349-1:2001) Вибрация. Измерение локальной вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 1. Общие требования
Вредные вещества	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»
Микроклимат	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»
Физические и нервно-психические перегрузки.	СП 2.2.3670-20 «Санитарноэпидемиологические требования к условиям труда»;

6.2.1 Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека

Компоненты SLS 3D принтера могут нагреваться до 200°C, а температура в рабочей зоне составляет 171°C, поэтому процесс 3D-печати жестко регламентирует необходимое время остывания машины и выращенных в ней деталей для конкретной модели принтера. При это внутренние части напечатанного объекта могут оставаться горячими еще несколько суток.

Существует возможность получить ожог при прикосновении к горячим частям паяльника, попадании на кожи брызг припоя, температура плавления которого составляет (180-190)°C а также в результате прикосновения к разогретым радиоэлементам. Минимизация данного фактора проводится в соответствии с ТИ Р М075-2003 «Межотраслевая типовая инструкция по охране труда для работников, занятых пайкой и лужением изделий паяльником».

Во избежание получения ожоговых травм в производственном помещении применяются следующие меры:

- проводится инструктаж на знание мер безопасности при выполнении работ;
- используются средства индивидуальной защиты
- работнику запрещается пользоваться инструментом, приспособлениями и оборудованием, безопасному обращению с которым он не обучен;
- мелкие детали и элементы при пайке закрепляются в специальных приспособлениях или тисках.

6.2.2 Производственные факторы, связанные с повышенным образованием электростатических зарядов

Согласно ГОСТ 12.4.124-83 в рабочей зоне должны быть предусмотрены следующие меры для защиты от статического электричества:

- пол и мебель на рабочем месте выполняются из слабоэлектризующихся и неэлектризующихся материалов;
- все корпуса оборудования заземлены;
- паяльные работы выполняются заземлённым паяльником;
- в качестве дополнительной меры защиты могут применяться испарительные увлажняющие устройства для повышения влажности воздуха рабочей зоны.

6.2.3 Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий

Согласно Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок персонал относится к I группе по электробезопасности, которая распространяется и на неэлектротехнический персонал. Поражение электрическим током может происходить вследствие:

- контакта с токоведущими частями, находящимися под напряжением, вследствие ошибочного включения установки;
- контакта с металлическими конструктивными частями электрооборудования, находящимися под напряжением в результате повреждения изоляции;
- прикосновения к токоведущим частям, находящимся под напряжением в результате повреждения изоляции;
- шагового напряжения в результате протекания тока по поверхности стола, пола.

Согласно ПУЭ, помещение можно отнести к классу без повышенной опасности, если предусмотрено защитное заземление на рабочих местах, все розетки питающей сети заземлены, корпусные материалы и пол сделаны из токонепроводящих материалов, при этом влажности воздуха не более 75 % и температура не выше 35°C.

6.2.4 Сосуды, работающие под давлением

Для подключения пневматического привода используется газовый накопитель объемом 1л при давлении не более 0,6 МПа. Во избежание разрыва баллона вследствие повреждения или нарушений правил эксплуатации необходимо соблюдать требования ИТНЭ-93, согласно которым эксплуатация запрещается:

- если давление и температура стенки сосуда поднимается выше разрешенных;
- при обнаружении в элементах сосуда, определяющих его прочность, трещин, выпучин, пропусков или потения в сварных швах, течи во фланцевых, резьбовых соединениях и при разрыве прокладок;
- при неисправности манометра и невозможности определить давление по другим приборам;
- при неисправности приборов КИПиА, предохранительных или блокировочных устройств.

Надзор за техническим состоянием сосудов и аппаратов в период эксплуатации должен осуществляться путем периодического наружного осмотра не реже одного раза в год. Наружная поверхность сосудов должна быть защищена от коррозии. Крепеж должен быть защищен антикоррозионной смазкой, удовлетворяющей условиям эксплуатации.

6.2.5 Импульсное лазерное излучение

Внутри SLS-машины расположен лазер высшего 4-го класса опасности, действие которого способно причинить сильное повреждение человеческому глазу, а также значительное повреждение коже человека короткими импульсами (менее 0,25 с) лазерного излучения. Во избежание травм, вызванных лазерным излучением необходимо соблюдать требования безопасности ГОСТ 31581-2012, согласно которым:

- необходимо принимать меры предосторожности, исключая непосредственное визуальное наблюдение лазерного пучка;
- проводится инструктаж на знание мер безопасности;
- применяются предупреждающие вывески;
- к работе не допускаются лица младше 18 лет;
- персонал при работе должен обеспечиваться средствами индивидуальной защиты, в т.ч. специальными защитными очками или щитками со светофильтрами;
- лазерные изделия, находящиеся в эксплуатации, должны подвергаться регулярной профилактической проверке;
- к обслуживанию лазера допускаются только сертифицированные сотрудники.

6.2.6 Неподвижные режущие, колющие, обдирающие, разрывающие части твердых объектов

Процесс пайки может привести к травме, в следствии неаккуратного обращения с платой, на которой находятся острые части.

Во избежание травм от неподвижных режущих, колющих, обдирающих, разрывающих частей твердых объектов согласно ГОСТ 12.4.011-89 предусмотрены СИЗ в виде перчаток и защитных очков.

Во избежание получения травм в производственном помещении:

- проводится инструктаж на знание мер безопасности;
- к работе не допускаются лица младше 18 лет;
- используются средства индивидуальной защиты;
- применяются защитные ограждения и предупреждающие вывески.

6.2.7 Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения

Недостаточная освещенность рабочей зоны может быть обусловлена особенностями устройства производственных помещений (недостаток источников естественного света), а также недостаточным количеством источников искусственного света.

Плохое освещение негативно воздействует на зрение, протекание биологических ритмов внутри организма, приводит к быстрому утомлению, снижению работоспособности, вызывает дискомфорт, является причиной головной боли и бессонницы. Все вышеприведенные факторы могут стать причинами несчастных случаев.

Обычно на производстве пользуются двумя видами освещения — естественным и искусственным.

При разработке экзоскелета, недостаток освещения особенно ощутим при работе с ПК и во время непосредственной сборки системы, во время которой преобладающим процессом является процесс пайки элементов.

Согласно СП 52.13330.2016 освещенность на рабочей поверхности должна составлять (300-500) лк, на поверхности экрана – не выше 300 лк и не создавать бликов. Работа с паяльным оборудованием относится к зрительным работам при пайке материалов толщиной 0.5 – 1.5 мм, что определяет разряд зрительной работы ШБ. Рекомендуемые показатели освещения при пайке представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Рекомендуемые показатели освещения при пайке

Освещенность, лк		Показатель ослепленности	Коэффициент пульсации, %, не более
Комбинированное освещение	Общее освещение		
1250	400	40	(5 – 10)

В случае недостатка освещения можно использовать дополнительных источников искусственного света либо заменить существующие.

6.2.8 Повышенный уровень шума

Во время разработки экзоскелета основными источниками шума является работа пневматического привода, компрессора и ПК.

Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает его утомляемость, а при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности, способен привести к росту ошибок и увеличению продолжительности выполнения задания. Допустимые шумовые характеристики рабочих мест регламентируются согласно ГОСТ 12.1.003-2014. Выполняемые работы относятся к конструированию, проектированию и программированию, уровень звука при которых не должен превышать 50 дБА,

Уровень шума исправного современного компьютера и пневматического привода находится в пределах от 35 до 50 дБА. Шум, создаваемый компрессором, составляет 60 ДБ, что превышает допустимую норму. Рабочее место не удовлетворяет нормативным требованиям. В качестве мер защиты от шума можно применить отделку готового устройства звукоизоляционными материалами, а также использовать средства индивидуальной защиты на время работы оборудования.

6.2.9 Повышенный уровень вибрации

Допустимый уровень вибрации называют такой уровень, который не вызывает у человека значительного беспокойства и изменений состояния систем, чувствительных к вибрационному воздействию.

При воздействии на человека интенсивных внешних инфразвуковых колебаний происходит возникновение резонансных явлений во внутренних органах, способных вызвать травмы, разрыв артерий, летальный исход.

При разработке устройства применяется компрессор и вытяжные системы, которые вызывают общую вибрацию на рабочем месте, находящуюся в пределах нормы.

6.2.10 Вредные вещества

При работе с паяльной станцией в атмосферу выделяется большое количество вредных веществ, прежде всего свинца, как основного компонента припоя, а также химические вещества, содержащиеся в паяльной кислоте.

Свинец и его соединения, находящиеся в воздухе в виде аэрозоля, относятся к первому классу опасности. Предельно допустимая концентрация свинца в воздухе согласно СанПиНу 1.2.3685-21 составляет 0,05 мг/м³. Для уменьшения концентрации вредных веществ в воздухе необходимо использовать вытяжные установки, обеспечивающей движение воздуха в месте пайки не менее 0,5 м/с. Работы по очистке вентиляционных установок, проводят не реже 1 раза в месяц.

Оптические компоненты объектива, лазерного окна и оптического расширителя SLS принтера состоят из токсичного селенида цинка, а их антибликовое покрытие содержит фторид тория (и классифицируется, таким образом, как открытый источник радиоактивного излучения). Все элементы, а также все контактировавшие с ними предметы (например, перчатки, щетки и так далее) должны быть запечатаны в картонную коробку, запаянную в пластиковый мешок, и отправлены в утилизирующую компанию. ПДК фторида тория 0,05 мг/м³. ОБУВ селенида цинка 2 мг/м³

6.2.11 Отклонение показателей микроклимата

Показатели микроклимата должны обеспечивать сохранение теплового баланса человека с окружающей средой и поддержание оптимального или допустимого теплового состояния организма, что позволяет обеспечивать высокий уровень работоспособности.

Согласно СанПиН 1.2.3685-21 установлены следующие нормы: температура воздуха: 20 – 22°C, температура поверхностей: 19 – 23°C, Относительная влажность воздуха: 60 – 40 %, скорость движения воздуха: 0,2 м/с.

Отклонение показателей микроклимата может быть вызвано конструктивными особенностями производственного помещения, функционированием производственного оборудования, климатическими условиями окружающей среды.

Для соблюдения требований по скорости воздушного потока и влажности необходимо применять увлажнители воздуха либо установить кондиционер, для поддержания параметров на оптимальном уровне. В летнее время при превышении температурных норм рекомендуется выполнять проветривание помещения каждый час. В зимнее время года необходимо использовать систему отопления, чтобы обеспечить равномерный и постоянный нагрев воздуха.

6.2.12 Физические и нервно-психические перегрузки

Продолжительная работа с ПК монотонна, процесс пайки требует высокой концентрации и вызывает напряжение. Длительная работа в сидячем положении негативно сказывается на состоянии здоровья человека.

Первые симптомы наступления психофизического утомления: усталость, сонливость, потеря концентрации, головная боль, звон в ушах. При первых симптомах нервного перенапряжения необходимо сделать длительный перерыв со сменой деятельности, а в процессе работы рационально чередовать периоды труда и отдыха.

6.3 Экологическая безопасность

Работы, проводимые при разработке экзоскелета не несут за собой значительного загрязнения окружающей среды, что исключает необходимость в применении средств защиты селитебной зоны.

Загрязнение гидросферы вызывают сточные воды и отходы жизнедеятельности человека. Сточные воды, как правило, проходят специальную многоступенчатую очистку на очистных сооружениях в соответствии с ГОСТ 5.1800-73, поэтому дополнительные меры по очистке не требуются.

Загрязнение атмосферы может возникать во время процесса пайки и лужения оловянно-свинцовыми или оловянно-свинцово-кадмиевыми припоями возможно выделение токсичных веществ, согласно ГОСТ 12.1.007-76 относящихся к веществам 1-го класса опасности: свинца и оксида кадмия. Также в случае нагревания элементов 3D принтера свыше 400°C, (например, во время пожара) компоненты машины источают едкий и крайне токсичный дым (в составе которого присутствуют ZnOx, Se, SeOx, ZnH и H₂Se). Для защиты от вышеприведенных веществ можно использовать вытяжные устройства, уменьшающие концентрацию вредных веществ в рабочей зоне, а также специальные фильтры, уменьшающие их выбросы в атмосферу.

Загрязнение литосферы может происходить в результате нарушения правил утилизации вышедших из строя аккумуляторов – II класс опасности, элементов искусственного освещения (ртутные и люминесцентные лампы); а также оптических компонентов объектива, лазерного окна, оптического расширителя SLS принтера и всех контактирующих с ними предметов – I класс опасности. Процедура утилизации должна соответствовать ГОСТ Р 53692-2009. В результате данные материалы будут без вреда для окружающей среды уничтожены либо переработаны для повторного использования.

6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее типичной ЧС является возникновения пожара вследствие короткого замыкания. Оно может быть связано с повреждением проводки, а также старением, повреждением или неисправностью аккумулятора. Другой причиной самовозгорания может стать перегрев, вызванный эксплуатацией неподходящего зарядного устройства, длительным пребыванием электроприбора под солнцем, а

также нарушением правил заряда при отсутствии или неисправности встроенной защиты аккумуляторных батарей от перезаряда.

Используемые в SLS 3D принтере фирменные полимерные порошки являются горючими и при соединении с воздухом могут создавать взрывоопасную атмосферу. Также немалую опасность представляет чистый кислород, который скапливается в помещении с работающим принтером из-за генерации азота (азот необходим для заполнения камеры построения во время выращивания объектов). В связи со всем вышеперечисленным в помещении для 3D-печати необходимо принять определенные меры безопасности. А именно: устранить все возможные источники воспламенения, повысить влажность (это необходимо для нейтрализации электростатических зарядов), использовать для обслуживания SLS-машины только взрывозащищенные промышленные пылесосы класса не ниже В1, постоянно удалять оседающую пыль, а также избегать подъема полимерного порошка в воздух.

При возникновении пожара необходимо незамедлительно обратиться в службу спасения. Затем оповестить персонал о возникновении пожара нажатием на кнопку сигнализации. При опасности поражения электротоком, помещение необходимо обесточить. После чего можно приступать к тушению пожара.

На основании Федерального закона от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 30.04.2021) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" возгорание литий-ионных аккумуляторов относится к классу пожара D2. Устройства для личного пользования оснащенные энергонакопителями с малым содержанием лития, допускается гасить пенным, порошковым или углекислотным огнетушителем.

Вывод по разделу

В данном разделе были изучены нормативные документы и стандарты, касающиеся правовых вопросов обеспечения безопасности.

Выполнение работ по проектированию конструированию и сборке относится к легкому классу 1б, поскольку выполняются преимущественно сидя и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением в соответствии с СанПиНом 1.2.3685-21.

Категория помещения по электробезопасности, согласно ПУЭ, соответствует первому классу – «помещения без повышенной опасности». Согласно Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок персонал относится к I группе по электробезопасности. По взрывопожарной и пожарной опасности помещение относится к категории Г согласно СП 12.13130.2009. Исходя из критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду разрабатываемое устройство, относится к IV категории.

Значение всех производственных факторов на изучаемом рабочем месте соответствует нормам, за исключением уровня шума на в производственном помещении, который незначительно превышает установленные нормы. Для минимизации влияния данного фактора можно использовать звукоизолирующие материалы и СИЗ.

Заключение

В течение всей истории человечество стремится превзойти свои возможности. В отличие от других существ, мы бросаем вызов биологии и совершенствуем свои тела быстрее, чем эволюция. Хотя у человеческого тела много слабостей, мы успешно дополняем и восполняем функции с помощью высокотехнологичных инструментов. Есть механизмы, способные увеличить срок жизни не только отдельных органов, но и тела человека целиком – увеличить силу в несколько раз или подарить радость движения почти парализованному человеку. Одним из примеров является медицинский экзоскелет на пневматических мышцах, спроектированный в результате данной ВКР.

Пневматические мышцы остаются по прежнему недооцененным типом привода, который с успехом можно внедрить в сферу медицинской реабилитации. Наилучшая биомеханическая совместимость, малый вес, а также безопасность и дешевизна данного привода позволяет человеку с травмами спинного мозга, последствиями инсульта и ДЦП вернуться к привычной жизни и ускорить процесс реабилитации. А каркас экзоскелета, выполненный по индивидуальным размерам, обеспечит максимальную эргономичность и удобство использования при повседневном ношении.

Расширение сенсорного диапазон экзоскелета плечевого пояса, например, с помощью камер или элементов тактильного восприятия, был бы возможен в будущем наряду с дальнейшими разработками в области проектирования. Реализация обратной связи является одним из перспективных направлений в проектировании медицинских экзоскелетов.

Дальнейшее развитие бионики будет способствовать внедрению данных устройств не только в медицинской сфере, но и для бытового использования, помогая человеку в выполнении обыденных дел, позволяя работать с грузами, быстрее бегать, передвигаться и вставать при проблемах с опорно-двигательным аппаратом. Использование инновационных технологий позволяет не только улучшить условия жизни, но и сделать нас более совершенными, подарив радость движения почти парализованному человеку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Экзоскелет – новые возможности абилитации и реабилитации (аналитический обзор) / А.А. Воробьев, А.В. Петрухин, О.А. Засыпкина, П.С. Кривоножкина // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. – 2015. – №2(53). – С. 51-62.
2. Терминология и классификация экзоскелетов / А.А. Воробьев, Ф.А. Андриющенко, О.А. Засыпкина, И.О. Соловьева, П.С. Кривоножкина, А.М. Поздняков // Вестник ВолгГМУ. – 2015. – №3(55). – С. 71-77.
3. Всемирный доклад об инвалидности. - Мальта: 2011 . – 27 с.
4. HAL for medical use [Электронный ресурс] // Cyberdyne URL: https://www.cyberdyne.jp/english/products/LowerLimb_medical.html (дата обращения: 03.06.2022).
5. Rex provides robotic assistance for rehabilitation, exercise and walking [Электронный ресурс] // Rex Bionics URL: <https://www.rexbionics.com/rex-for-clinical-use/> (дата обращения: 03.06.2022).
6. ReWalk Personal 6.0 Exoskeleton [Электронный ресурс] // ReWalk URL: <https://rewalk.com/rewalk-personal-3/> (дата обращения: 03.06.2022).
7. Titan Arm exoskeleton empowers heavy lifters and disabled alike [Электронный ресурс] // NBC news URL: <https://www.nbcnews.com/technology/titan-arm-exoskeleton-empowers-heavy-lifters-disabled-alike-8c11547016> (дата обращения: 03.06.2022).
8. Armeo power [Электронный ресурс] // Hocoma URL: <https://www.hocoma.com/us/solutions/armeo-power/> (дата обращения: 03.06.2022).
9. MATE-XT Exoskeleton [Электронный ресурс] // MATE URL: <https://mate.com.au.com> (дата обращения: 03.06.2022).
10. Muscle Suit [Электронный ресурс] // Exoskeleton Report URL: <https://exoskeletonreport.com/product/muscle-suit/> (дата обращения: 03.06.2022).

11. Экзоскелет CAME-TV CAME-KONG [Электронный ресурс] // Kremlin Store URL: <https://kremlinstore.ru/product/came-kong-support-for-various-gimbals/> (дата обращения: 03.06.2022).
12. Proludic aims at improving employee safety by investing in an exoskeleton [Электронный ресурс] // Proludic URL: <https://www.proludic.co.uk/proludic-aims-improving-employee-safety-investing-exoskeleton> (дата обращения: 03.06.2022).
13. Хессе С. Пневмомускул за работой. 150 примеров применения пневматического мускула: пер. с англ. / С. Хессе. – Киев: Фесто, 2004. – 140 с.
14. Шароватов В.Т. Математическая модель силового бесштокового пневмоцилиндра одностороннего действия оболочкового типа / В.Т. Шароватов, П.А. Лошицкий // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – №2. – С. 30-36.
15. Пильгунов В.Н. Пневмомускул: физика, характеристики, применение / В.Н. Пильгунов, К.Д. Ефремова // Гидравлика. – 2017. – №1(3). – С. 102-126.
16. В. Н. Шихирин [и др.] Эластичные механизмы и конструкции. - Иркутск: Изд-во Иркутского гос. технического ун-та, 2006. – 287 с.
17. 3D-печать полиамидом // Top 3D Shop URL: <https://top3dshop.ru/blog/nylon-pa-review-and-manual.html> (дата обращения: 03.06.2022).
18. Ле Дык Тхинь. Промышленные роботы с новыми типами пневмоприводов и вакуумными устройствами: дис. канд. тех. наук. 05.02.05 / Ле Дык Тхинь. – СПб., 2003. – 121 с.
19. Практическое применение экзоскелетов в промышленности и строительстве // ПО Стройтехника URL: <http://www.str-t.ru/reports/19/> (дата обращения: 03.06.2022).
20. Представлен доступный экзоскелет Phoenix от компании suitX // Gizmonews URL: <https://www.gizmonews.ru/2016/02/03/suitx-phoenix/> (дата обращения: 03.06.2022).

21. Экзоскелеты полегчали и подешевели [Электронный ресурс] // Эксперт URL: <https://expert.ru/expert/2020/01/ekzoskeletyi-polegchali-i-podesheveli/> (дата обращения: 03.06.2022).
22. Разработка инновационного проекта [Электронный ресурс] // StudFile URL: <https://studfile.net/preview/4646092/page:6/> (дата обращения: 03.06.2022).
23. Крутик А.Б. Коммерциализация как путь реализации инновационных разработок / А.Б. Крутик, Л.В. Ильина // Вестник ЮУрГУ. Серия: Экономика и менеджмент – 2013. – №1. – С. 51-55.
24. Анохина Ю.А. Формирование подходов к анализу эффективности инвестиционно-инновационных проектов промышленных бизнес-систем / Ю.А. Анохина, Е.А. Ворошин // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. – 2019. – №1. – С. 85-92.
25. Лошицкий П.А. Перспективы применения силовых оболочковых элементов в манипуляционных системах / П.А. Лошицкий, Е.Е. Шеховцова // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – №4(5). – С. 68-72.
26. Челпанов И.Б. Пневмодвигатели на основе армированных упругих оболочек / И.Б. Челпанов, Ле Дык Тхинь // Вакуумная техника и технология. – 2002. – № 4. – С. 205-210.
27. Назаров Ф.М. Проектирование и расчет трехкоординатной качающейся платформы с пневматическим приводом / Ф.М. Назаров, В.И. Форенталь, М.В. Форенталь // Изв. Самарского науч. центра РАН. – 2015. – №1(5). – С. 851-858.
28. Sarosi J. New function approximation for the force generated by fluidic muscle / J. Sarosi, Z. Fabulya // Annals of the Faculty Engineering Hunedoara - Intern. J. of Engineering. – 2012. – Vol. 10, №. 2. – P. 105-110.
29. Iancu A. Experimental studies regarding the behavior of a mechanical system with pneumatic muscle driven by compressed air / A. Iancu, V. Filip // The Scientific Bulletin of Valahia Univ. Materials and Mechanics. – 2011. – №. 6. – P. 160-167.

