

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа: Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки: Мехатроника и робототехника
Отделение: Отделение автоматизации и робототехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка автоматизированной системы обезвешивания на гибком подвесе
УДК 004.896:621.873:621.864

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ91	Бугаков А.И.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас А.А.	к.т.н., доцент		

Со-руководитель (по разделу «Концепция стартап-проекта»)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШИП	Шамина О.Б.	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ШБИП	Федоренко О.Ю.	д-р мед. наук, профессор		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение автоматизации и робототехники	Мальшенко А.М.	д.т.н., профессор		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	способен представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знаний основных положений, законов и методов естественных наук и математики
ОПК(У)-2	владеет в полной мере основным физико-математическим аппаратом, необходимым для описания и исследования разрабатываемых систем и устройств
ОПК(У)-3	владеет современными информационными технологиями, готовностью применять современные и специализированные средства автоматизированного проектирования и машинной графики при проектировании систем и их отдельных модулей, знать и соблюдать основные требования информационной безопасности
ОПК(У)-4	готов собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по тематике исследования, использовать достижения отечественной и зарубежной науки, техники и технологии в своей профессиональной деятельности
ОПК(У)-5	способен использовать методы современной экономической теории при оценке эффективности разрабатываемых и исследуемых систем и устройств, а также результатов своей профессиональной деятельности
ОПК(У)-6	готов использовать на практике приобретенные умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, выполняемых малыми группами исполнителей
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	способен составлять математические модели мехатронных и робототехнических систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули, с применением методов формальной логики, методов конечных автоматов, сетей Петри, методов искусственного интеллекта, нечеткой логики, генетических алгоритмов, искусственных нейронных и нейро-нечетких сетей
ПК(У)-2	способен использовать имеющиеся программные пакеты и, при необходимости, разрабатывать новое программное обеспечение, необходимое для обработки информации и управления в мехатронных

	и робототехнических системах, а также для их проектирования
ПК(У)-3	способен разрабатывать экспериментальные макеты управляющих, информационных и исполнительных модулей мехатронных и робототехнических систем и проводить их исследование с применением современных информационных технологий
ПК(У)-4	способен осуществлять анализ научно-технической информации, обобщать отечественный и зарубежный опыт в области мехатроники и робототехники, средств автоматизации и управления, проводить патентный поиск
ПК(У)-5	способен разрабатывать методики проведения экспериментов и проводить эксперименты на действующих макетах и образцах мехатронных и робототехнических систем и их подсистем, обрабатывать результаты с применением современных информационных технологий и технических средств
ПК(У)-6	готов к составлению аналитических обзоров и научно-технических отчетов по результатам выполненной работы, в подготовке публикаций по результатам исследований и разработок
ПК(У)-7	способен внедрять на практике результаты исследований и разработок, выполненных индивидуально и в составе группы исполнителей, обеспечивать защиту прав на объекты интеллектуальной собственности
ПК(У)-8	готов к руководству и участию в подготовке технико-экономического обоснования проектов создания мехатронных и робототехнических систем, их подсистем и отдельных модулей
ПК(У)-9	способен к подготовке технического задания на проектирование мехатронных и робототехнических систем их подсистем и отдельных устройств с использованием стандартных исполнительных и управляющих устройств, средств автоматики, измерительной и вычислительной техники, а также новых устройств и подсистем
ПК(У)-10	способен участвовать в разработке конструкторской и проектной документации мехатронных и робототехнических систем в соответствии с имеющимися стандартами и техническими условиями
ПК(У)-11	готов разрабатывать методику проведения экспериментальных исследований и испытаний мехатронной или робототехнической системы, способностью участвовать в проведении таких испытаний и обработке их результатов
Дополнительно сформированная университетом профессиональная компетенция	
ДПК(У)-12	готов к решению задач научно-педагогической деятельности в области профессионального образования, планированию и проведению учебных занятий и разработке учебно-методических пособий и указаний

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа: Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки: Мехатроника и робототехника
Уровень образования: Магистратура
Отделение: Отделение автоматизации и робототехники
Период выполнения: весенний семестр 2021 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

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

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	02.06.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
21.03.2021	Аналитическая часть	20
05.04.2021	Практическая часть	30
26.04.2021	Концепция стартап-проекта	25
11.05.2021	Социальная ответственность	10
22.05.2021	Приложение на иностранном языке	15

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас А.А.	к.т.н., доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение автоматизации и робототехники	Мальшенко А. М.	д.т.н., профессор		

<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>Этапы работы над ВКР: анализ предметной области, рассмотрение направления применения мехатроники и робототехники в медицине, в частности в реабилитации; описание и классификация роботизированных комплексов в медицинской реабилитации; формирование функций и потребительских качеств системы, возможных областей применения.</p> <p>Изучение методов построения 3Д моделей конструкций; разработка 3Д модели конструкции системы обезвешивания; расчет параметров системы и подбор оборудования для разработки тестового стенда – прототипа системы.</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация в Microsoft Office PowerPoint</p>

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Концепция стартап-проекта</p>	<p>Шамина О.Б., Доцент ШИП, к.т.н.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Федоренко О.Ю., Профессор ООД ШБИП, д-р мед. наук</p>
<p>Раздел, выполненный на английском языке</p>	<p>Пичугова И.Л., Старший преподаватель ОИЯ ШБИП</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>1.1 Робототехника и мехатроника в медицине (1.1 Robotics and mechatronics in medicine)</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>1.03.2021</p>
--	------------------

Задание выдал руководитель:

<p>Должность</p>	<p>ФИО</p>	<p>Ученая степень, звание</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>Доцент ОАР ИШИТР</p>	<p>Филипас А.А.</p>	<p>к.т.н., доцент</p>		

Задание принял к исполнению студент:

<p>Группа</p>	<p>ФИО</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>8ЕМ91</p>	<p>Бугаков Артём Иванович</p>		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ЕМ91	Бугаков Артём Иванович

Школа	ИШИТР	Направление	Мехатроника и робототехника
Уровень образования	Магистратура		

Перечень вопросов, подлежащих разработке:
<i>Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР (функциональное назначение, основные потребительские качества)</i>
<i>Способы защиты интеллектуальной собственности</i>
<i>Объем и емкость рынка</i>
<i>Современное состояние и перспективы отрасли, к которой принадлежит представленный в ВКР продукт</i>
<i>Себестоимость продукта</i>
<i>Конкурентные преимущества создаваемого продукта</i>
<i>Сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными и мировыми аналогами</i>
<i>Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта</i>
<i>Бизнес-модель проекта</i>
<i>Производственный план</i>
<i>План продаж</i>
Перечень графического материала:
<i>При необходимости представить эскизные графические материалы (например, бизнес-модель)</i>

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

Задание выдал консультант по разделу «Концепция стартап-проекта»:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШИП	Шамина О.Б.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ91	Бугаков А.И.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ЕМ91	Бугаков Артём Иванович

Школа	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	Отделение (НОЦ)	Отделение автоматизации и робототехники (ОАР)
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.06 «Мехатроника и робототехника»

Тема ВКР:

Разработка автоматизированной системы обезвешивания на гибком подвесе

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Назначение:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Обеспечить пациенту мобильность в рамках помещения; - Сопровождать в процессе выполнения комплекса реабилитационных упражнений; - Совместить несколько систем реабилитации в одном помещении, например, брусья и беговую дорожку и т.д. - Повысить эффективность персонала, предотвратить травмы спины сотрудников; <p>Рабочая зона составляет до 25м², вес компенсации до 100кг. Система подразумевает установку в палате, либо в спец. спортивном зале реабилитационного центра, который соответствует всем нормам и требованиям по вентиляции, освещению и отоплению.</p>
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> - Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021) - ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования - ГОСТ 12.1.003-2014. ССБТ. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности - ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация - ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность - ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009 Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора - СНиП 23-05-95* с СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение - ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. «Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля»
--	---

	<ul style="list-style-type: none"> – СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – СНиП 23-03-2003. Защита от шума. – СН 2.2.4/ 2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы – СанПиН 2.2.4-548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» – ГОСТ Р 53692-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов – ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: - отклонение показателей микроклимата; - недостаточная освещенность рабочей зоны; - повышенный уровень шума на рабочем месте; - психофизиологические факторы (монотонность труда, нервно-психические перегрузки, перенапряжение зрительных анализаторов); - повышенный уровень электромагнитных излучений; Опасные факторы: - поражение электрическим током; - короткое замыкание; - статическое электричество.
3. Экологическая безопасность:	- Выброс диоксида серы, оксида углерода и шестивалентного хрома - Воздействие на литосферу при утилизации составных элементов системы (провода, микроконтроллеры, двигатели, датчики)
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– Наиболее вероятная ЧС – пожар в помещении. – Вероятная ЧС – землетрясение и как результат выход из строя системы позиционирования.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2021
---	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ШБИП	Федоренко О.Ю.	Доктор медицинских наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ91	Бугаков А. И.		

Реферат

Магистерская выпускная квалификационная работа содержит 127 страниц текста, 26 таблиц, 47 рисунков, список использованных источников из 31 наименования и 1 приложение.

Ключевые слова: робототехника и мехатроника, тросовый робот, система с гибкими связями, обезвешивание, компенсация веса, технические средства реабилитации, медицинская роботизированная система, система перемещения и компенсации веса пациента, 3D моделирование, ДПТ, червячный редуктор.

Объектом исследования является автоматизированная система обезвешивания на гибком подвесе.

Цель работы – разработка стенда для компенсации веса человека.

В процессе исследования был произведен литературный обзор по предметной области исследования: роботизированные системы реабилитации, тросовые манипуляторы, 3D моделирование.

В результате исследования была: разработана конструкция стенда для перемещения и компенсации веса пациента, в том числе конструкторская документация и 3D модель, разработана математическая модель в упрощенном виде, рассчитана мощность привода и выполнен подбор оборудования, произведены расчет и выбор всех составных элементов стенда (трос, барабан, редуктор, энкодер, драйвер, БП и т.д.).

Область применения: различные виды реабилитации, обеспечение бытовой мобильности, помощь младшему мед. персоналу при проведении медицинских и гигиенических процедур для малоподвижных пациентов. Разработанный образец системы будет применяться в качестве лабораторного стенда для студентов ТПУ направления «мехатроника и робототехника».

В рамках развития проекта планируется произвести следующие работы: уточнить математическую модель, разработать систему позиционирования схвата, оптимизировать систему управления и реализовать её в виде программного кода для микроконтроллера.

Обозначения и сокращения

ОДА – опорно-двигательный аппарат;

ЛФК – лечебная физическая культура;

ТСР – технические средства реабилитации;

САПР – система автоматизированного проектирования;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ПК – персональный компьютер;

МК – микроконтроллер;

БП – блок питания;

АСУ – автоматизированная система управления;

ДПТ – двигатель постоянного тока;

ГОСТ – государственный стандарт;

СанПиН – санитарные правила и нормы;

ФЗ – федеральный закон;

ЧС – чрезвычайная ситуация.

Оглавление

Введение.....	15
1 Анализ предметной области	16
1.1 Робототехника и мехатроника в медицине	16
1.2 Классификация медицинских роботов.....	19
1.3 Механизмы и методы обезвешивания.....	20
1.4 Классификация систем обезвешивания.....	22
1.5 Обзор и классификация приводов систем обезвешивания	24
1.6 Реабилитация при патологиях опорно-двигательного аппарата	29
2 Определение требований, предъявляемых к конструкции	30
2.1 Воспроизведение заданных кинематических законов.....	31
2.2 Быстродействие механизмов и системы управления.	31
2.3 Назначение разработки и основные функции	33
2.4 Обзор существующих решений в области исследований	34
3 Разработка конструкции приводного модуля стенда.....	38
3.1 Общий вид и концепция	38
3.2 Электродвигатель постоянного тока	38
3.3 Червячный редуктор.....	39
3.4 Энкодер.....	40
3.5 Блок направляющих роликов	40
3.6 Крепежная платформа.....	41
3.7 3D модель барабана для намотки троса	41
3.8 3D модель сборки приводного модуля стенда	42
4 Разработка математической модели	43
4.1 Система с двумя гибкими звеньями	43
4.2 Система с тремя гибкими звеньями.....	46
4.3 Система с четырьмя гибкими звеньями	48
4.4 Момент на электроприводе	51
4.5 Рабочая зона системы.....	52
5 Расчёт параметров и подбор оборудования.....	55
5.1 Расчёт длин тросов	56
5.2 Расчёт сил	57
5.3 Выбор лебедочных механизмов.....	59
5.3.1 Определение параметров и выбор троса (каната).....	62

5.3.2	Определение параметров барабана.....	62
5.4	Расчёт мощности двигателя.....	64
5.5	Расчёт передаточного числа редуктора.....	65
5.6	Выбор электропривода.....	66
6	Концепция стартап-проекта.....	67
6.1	Наименование	67
6.2	Описание продукта как результат НИР	67
6.3	Интеллектуальная собственность	70
6.4	Объем и емкость рынка.....	71
6.4.1	Производители.....	71
6.4.2	Структура и сегментация рынка	71
6.4.3	Структура и сегментация мирового рынка.....	72
6.4.4	Текущее состояние отрасли производства	74
6.4.5	Объем и ёмкость рынка	75
6.5	Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли	75
6.6	Планируемая стоимость продукта	76
6.6.1	Материальные затраты.....	78
6.6.2	Затраты на оборудование.....	78
6.6.3	Контрагентные расходы.....	79
6.6.4	Заработная плата работников.....	80
6.7	Конкурентные преимущества создаваемого продукта, сравнение технико-экономических характеристик с отечественными и мировыми аналогами	82
6.8	Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта	85
6.9	Бизнес-модель проекта. Производственный план. План продаж.....	87
6.10	Стратегия продвижения продукта на рынок	89
7	Социальная ответственность	91
7.1	Введение	91
7.2	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	92
7.2.1	Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства	92
7.2.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.....	92
7.3	Производственная безопасность.....	94

7.3.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.	94
7.3.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.	102
7.4 Экологическая безопасность	105
7.4.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	105
7.4.2 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования	106
7.4.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.....	106
7.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	107
7.5.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в процессе исследований и эксплуатации	107
7.5.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.....	108
7.6 Заключение по разделу социальная ответственность.....	109
Заключение	110
Список публикаций.....	111
Список использованных источников	112
Приложение А (обязательное)	116

Введение

В настоящее время системы параллельной структуры с гибкими звеньями часто применяются в промышленности для перемещения различных грузов в пространстве, например, при строительстве крупногабаритных конструкций, погрузо-разгрузочных работах, 3D-печати в строительстве, видеосъёмке на больших открытых пространствах. Это обусловлено рядом преимуществ перед последовательными и параллельными системами (манипуляторами) с жесткими связями. К таким преимуществам относятся: масштабируемость, простота конструкции, большая рабочая область, высокий коэффициент полезной нагрузки, а также низкие инерционные свойства, что позволяет облегчить работу и управление на высоких скоростях.

Ключевое преимущество подобного манипулятора – возможность динамически менять вектор прилагаемой к объекту силы, тем самым компенсируя полностью или часть его массы, что может быть полезно для уменьшения веса объекта при его движении или для воссоздания условий невесомости, например, для проведения испытаний космических трансформируемых крупногабаритных конструкций. В данной работе в качестве приоритетного направления выбрана задача частичной компенсации веса тела человека в рамках реабилитационных мероприятий.

Помимо вышеописанных применений манипулятор подобной структуры может быть применен в научно-исследовательских целях: исследование эффективности различных методов реабилитации, испытания робототехнических комплексов (мобильные роботы, андроиды, экзоскелеты), в спорте высоких достижений, в сфере развлечений (расширение возможностей виртуальной реальности).

В данной работе описаны основные принципы разрабатываемого манипулятора параллельной структуры с гибкими звеньями для решения задач компенсации веса тела.

1 Анализ предметной области

1.1 Робототехника и мехатроника в медицине

В последние годы мехатронные и роботизированные системы всё чаще применяются в медицине и в частности в медицинской реабилитации.

Роботизированной системой называется комплекс электромеханических, электрогидравлических, электронных элементов и средств вычислительной техники, которые непрерывно обмениваются информацией и энергией. При этом вся система управляется единой системой автоматического управления (САУ) с элементами интеллектуального управления.

Робототехника в медицине непрерывно развивается, что обусловлено научно-техническим прогрессом и на фоне возрастающего интереса к технике и электронике возникновением прогрессивных идей в области здравоохранения. Роботизированные системы получают широкое распространение, благодаря ряду преимуществ, в сравнении обычными автоматизированными системами:

- высокая эффективность точных и сложных движений, достигаемая в результате применения современных методов управления;
- повышенная надежность;
- улучшенные массогабаритные и динамические характеристики как результат упрощения кинематических цепей;
- повышенные эргономические показатели;
- низкая стоимость, за счёт высокой степени унификации и стандартизации всех составных элементов;
- модульность, которая позволяет комплектовать систему под конкретные задачи.

В последние годы во многих странах активно ведутся разработки мехатронных устройств медицинского назначения. Медицинская мехатроника находит основное направление развития в разработке автоматизированных систем для медицинской реабилитации, клинических применений и выполнения сопроводительных операций.

Мехатронные системы медицинского назначения также называют медицинскими робототехническими системами (МРС), либо медицинскими роботами. МРС можно поделить на следующие категории:

- обслуживающие. Мобильные роботы, роботы-поводыри для слабовидящих людей, роботы-сиделки и т.п.;
- реабилитационные. Манипуляторы и протезы;
- клинические. Роботы-манипуляторы для диагностики и хирургических операций [1].

Основные направления развития робототехники в медицине представлены на рисунке 1.

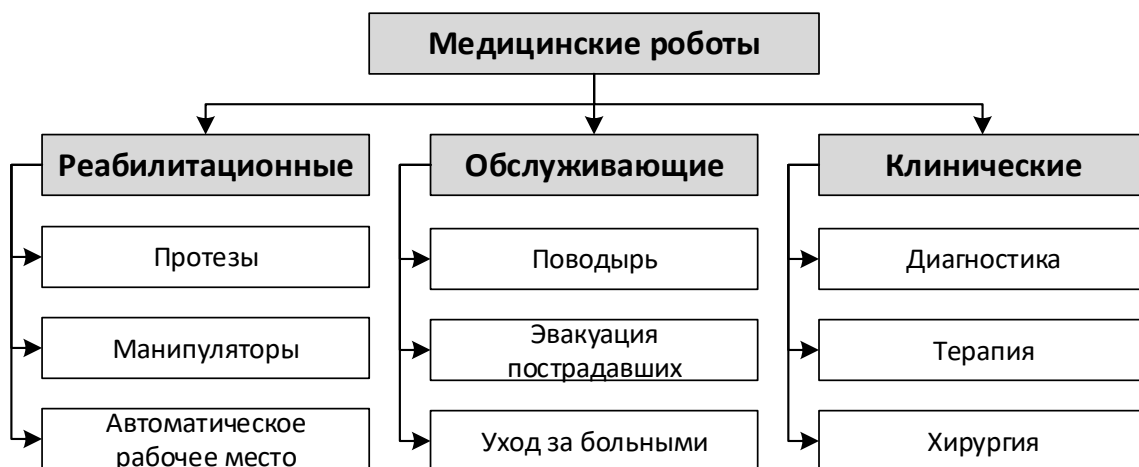


Рисунок 1 – Направления робототехники в медицине

Мехатроника и робототехника представляют из себя совокупность идей и концепций, методов и средств для разработки механизированных комплексов определенного назначения с возможностью информационного или интеллектуального управления [2]. Мехатроника и робототехника являются системными направлениями, которые формируют любую автоматизацию объектов человеческой жизнедеятельности.

Мехатроника объединяет в одно целое механику, информационные технологии и электротехнику. В результате такого объединения возникает синергический эффект. Междисциплинарный характер мехатроники позволяет добиться синергетического эффекта на пересечении всех составляющих дисциплин, как это показано на рисунке 2.

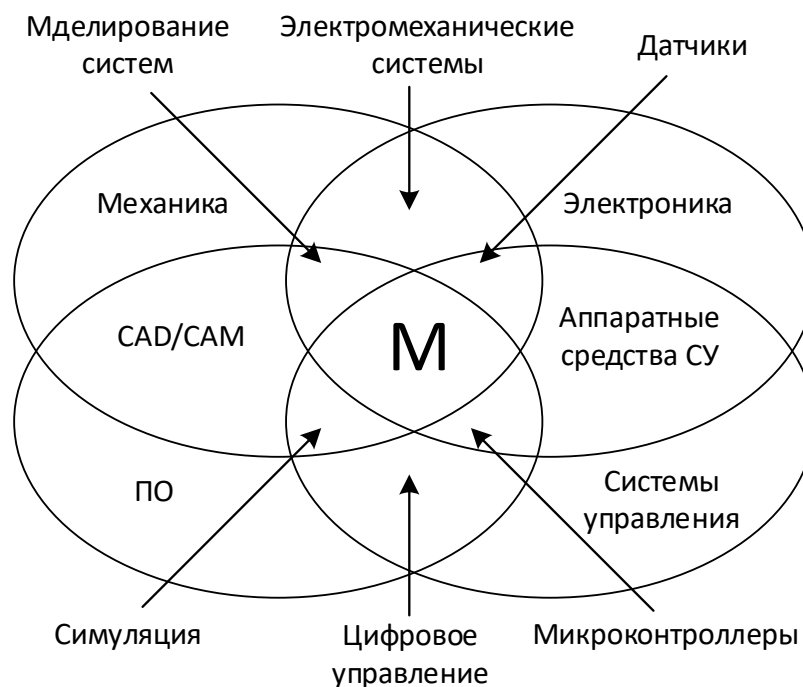


Рисунок 2 – Диаграмма междисциплинарной структуры мехатроники

Обычно мехатронику воспринимают с робототехникой как неразрывное целое. Правильнее же их разделять на самостоятельные дисциплины, объединенные лишь общим предметом исследования – робототехническими системами, а также общими методами исследования и проектирования [3].

В наши дни медицина – одно из главных векторов для развития и внедрения робототехники. Робототехника получила большой потенциал к развитию в медицинских применениях благодаря высокой точности, широким функциональным возможностям робототехнических систем и обеспечиваемому ими высокой эффективности лечения, а также снижением риска причинения вреда здоровью человека. Но несмотря на все достижения мехатроники и робототехники в медицине, представители здравоохранения в целом плохо осведомлены о них. Исследователи и производители решений в области робототехники не всегда имеют представления о реальных проблемах и потребностях медицины [4].

1.2 Классификация медицинских роботов

Существует огромное множество разнообразных медицинских роботов, удовлетворяющих потребности специализированных медицинских направлений. На основе этих направлений и характере решаемых ими задач, можно сформировать следующую классификацию медицинских роботов:

1. Робот манипулятор-врач – робот-хирург, позволяет автоматически точно и быстро управлять медицинским инструментом, благодаря чему его применяют для сложных хирургических операций. Они позволяют повысить эффективность и снизить нагрузку на врача.

2. Робот манекен – симулятор, повторяющий анатомическое строение и функциональную структуру, и реакции человека. Такие симуляторы необходимы для проведения обучения медицинского персонала.

3. Реабилитационный робот – робот или роботизированный манипулятор, предназначенные выполнения комплекса упражнений для ускорения восстановления во время реабилитации пациентов с заболеваниями различного характера.

4. Экзоскелеты и роботизированные протезы – сложные электронно-механические устройства, выполняющие функции потерявшей работоспособность части тела, управляемые от нервных окончаний, обладающих функциями искусственного интеллекта.

5. Роботы помощники – роботы, выступающие в качестве альтернативы медицинского персонала, способные выполнять обязанности низкой и средней сложности, которые могут быть точно алгоритмизированы.

6. Медицинские нанороботы - роботы настолько маленького размера, что они способны исполнять медицинские задачи прямо внутри человеческого организма.

1.3 Механизмы и методы обезвешивания

В англоязычной литературе значительно больше упоминаний о подобных системах и в них зачастую используется термин компенсация веса, а в русскоязычной литературе встречается термин обезвешивание. Система обладает функцией обезвешивания если у нее есть звенья, которые вне зависимости от их вертикального перемещения, имеют статически устойчивые положения, т.е. создаётся эффект отсутствия силы тяжести. Далее будут равнозначно использоваться термины компенсация веса и обезвешивание.

Обезвешивание бывает активное и пассивное. При пассивном обезвешивании в системе не используются приводы для создания силы компенсации веса. Системы обезвешивания можно разделить на группы в зависимости от механизма действия:

1. Вводящие дополнительные массы.
2. Использующие гибкие звенья.
3. Использующие трение в шарнирных соединениях.

Системы вводящие дополнительные массы – это системы с пассивной балансировкой [12]. В них сила тяжести, действующая на звено, проходит через точку его закрепления, например, через шарнирное соединение со стойкой. Достоинством такого метода является простая конструкция. Недостаток таких систем заключается в эффекте присоединения масс из-за чего увеличиваются инерционные свойства системы, понижает энергоэффективность и быстродействие.

Системы с гибкими звеньями наиболее перспективны среди остальных, т.к. имеют высокую надежность и энергоэффективность, могут быть применены для обезвешивания элементов сложной структуры. К недостаткам относятся сложность конструкции такой системы.

В системах с трением в соединениях обезвешивание достигается за счет того, что силы тяжести компенсируются возникающими в соединениях и приводах силами трения. Такие ни имеют низкую энергоэффективность

надежность, к тому же в процессе эксплуатации фрикционные свойства элементов меняются, приводя к потере свойства обезвешивания [14].

Активные системы достигают эффекта обезвешивания не за счёт изменения структуры системы, а за счёт применения силы привода. В таких системах энергоэффективность не является главной целью. Такие системы не создают эффекта присоединенных масс и могут изменять динамически силу обезвешивания в процессе работы системы на основе показаний датчиков и условий внешней среды.

Такие системы используются на производственных конвейерных линиях, в качестве манипуляторов, в исследовательских целях при испытании космических конструкций, различных роботов и экзоскелетов, а также в медицинской реабилитации, где есть потребность в перемещении и компенсации части веса пациента в движении и в процессе выполнения упражнений.

В англоязычной литературе при описании медицинских систем обезвешивания, используются следующие термины:

1. Technology-assisted gait training (TAGT) – Технологичная тренировка походки, подразумевающая использование автоматических аппаратов;
2. Robot-assisted gait training (RAGT) – Тренировка походки, подразумевающая использование роботов;
3. Body weight inloading (BWU) – Разгрузка веса тела (обезвешивание);
4. Body weight support (BWS) systems – Система поддержки или компенсации веса тела (обезвешивания);
5. Body weight supported training (BWST) – Тренировка (походки) с использованием системы поддержки веса тела;
6. Body weight supported treadmill training (BWSTT) – Тренировка (походки) с использованием системы поддержки веса тела на беговой дорожке;
7. Conventional overground training (COT) – Традиционная наземная тренировка (походки), обычно противопоставляется тренировке на беговой дорожке.

1.4 Классификация систем обезвешивания

На основе выполненного обзора литературы и существующих медицинских систем обезвешивания приведены их классификация, а в качестве основных критериев классификации выделяются конструктивные особенности, степени свободы, тип привода, тип системы управления, назначение системы.

В зависимости от того сколько степеней свободы необходимо для реализации необходимых движений и функций конечного устройства, также можно классифицировать системы. Например, для стационарной системы обезвешивания, применяемой при реабилитации с беговой дорожкой – всего 1 степень свободы. Компенсация веса производится в одной точке – месте крепления схвата. А для систем компенсации веса, предназначенных для кинезотерапии суставов и конечностей, требуется до шести степеней свободы.

В зависимости от типа используемого привода системы делятся на:

- использующие электрический привод;
- использующие гидравлический привод;
- использующие пневматический привод;
- использующие совмещённый привод.

Двигатели внутреннего сгорания в медицинских системах не применимы. Преимущества и недостатки приведенных типов приводов общеизвестны, а значит должны рассматриваться в каждом конкретном случае, учитывая предъявляемые требования.

Назначение системы – это критерий, определяющий дальнейшие параметры системы, её конструкцию и систему управления. В зависимости от назначения, конструкция системы, а также технические характеристики и реализуемые функции будут существенно различаться. К производственным системам зачастую предъявляют требования по обеспечению необходимой грузоподъемности, а медицинские роботы должны с высокой точностью обеспечивать набор строго заданных движений, а также поддерживать

устойчивость и сопровождать в движении пациента с нарушениями опорно-двигательного аппарата.

В зависимости от типа системы управления системы делятся на:

- программное управление в соответствии с алгоритмом;
- ручное управление;
- программное адаптивное управление;

Предложенная классификация систем обезвешивания (компенсации веса) не является полностью завершённой и должна дополняться по мере развития области и элементной базы мехатронных систем, потребностей и возможностей человека и общества. Схема классификации представлена на рисунке 3.

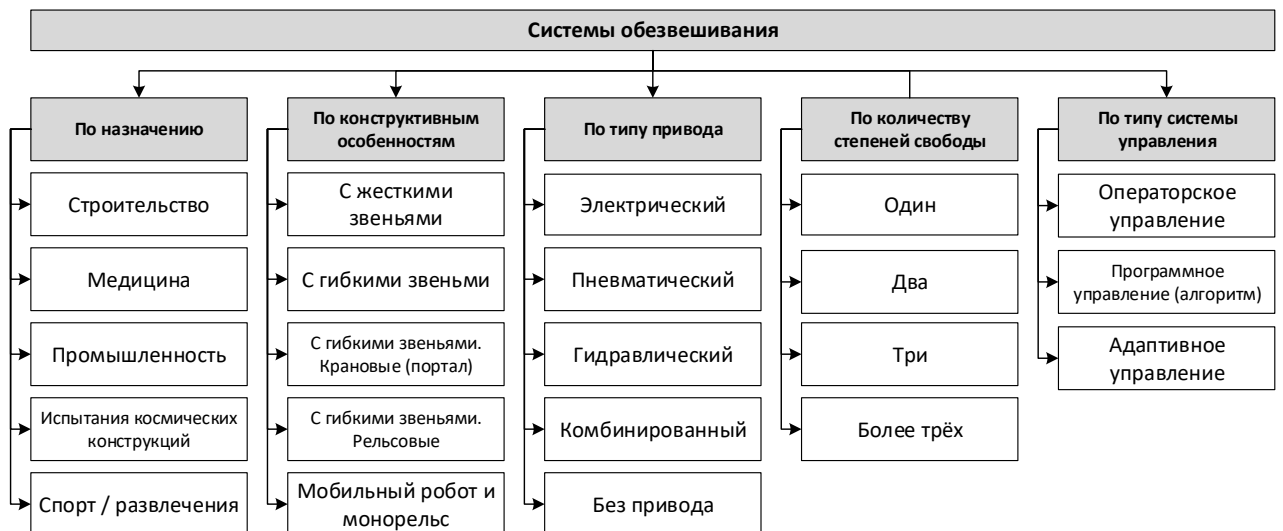


Рисунок 3 – Классификация систем обезвешивания

1.5 Обзор и классификация приводов систем обезвешивания

По принципу управления можно выделить: нерегулируемые, регулируемые по положению, регулируемые по положению и скорости, многокоординатное управление, интеллектуальное управление. Тип регулятора используемый в системе приводов также может быть различным. Так для пневмо- и гидроцилиндров используют релейное управление, при котором цилиндр отработывает крайние положения с требуемой скоростью.

Неуправляемые приводы используются как второстепенные в устройствах вибрационного или колебательного действия, в них требуемый закон движения может быть обеспечен механической конструкцией привода. Такие устройства не распространены в устройствах биомеханической реабилитации.

В многокоординатных приводах одновременно контролируется сразу несколько параметров движения привода. Среди отслеживаемых параметров: положение, скорость, крутящий момент, потребляемый ток, развиваемый момент или усилие.

В приводах с интеллектуальными регуляторами реализованы принципы нечеткой логики, нейросетевое управление и т.д.

Классификация по типу управления представлена на рисунке 4.

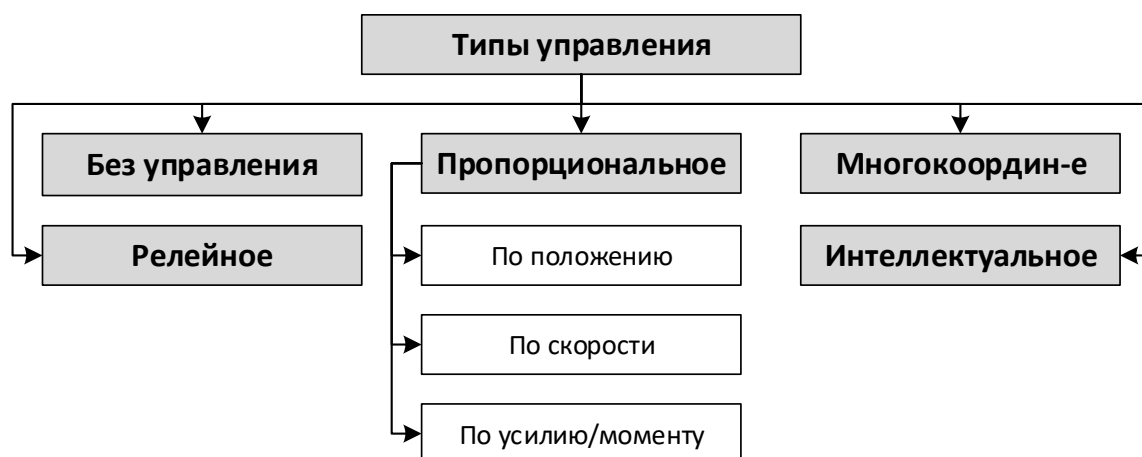


Рисунок 4 – Типы управления

В системах обезвешивания могут применяться приводы с разными видом движения: приводы поступательного, вращательного, вибрационного а также другого вида движения. Вращательное движения применяется в тренажерах для реабилитации верхних конечностей, в экзоскелетах, а вибрационное движение применяется для повышения эффективности реабилитационного процесса. Поступательное движение используется в рычажных механизмах для систем реабилитации конечностей, а также в экзоскелетах. Существует также ряд устройств реабилитации с более сложным характером перемещения выходных звеньев приводов. Типы движений приводов представлены на рисунке 5.

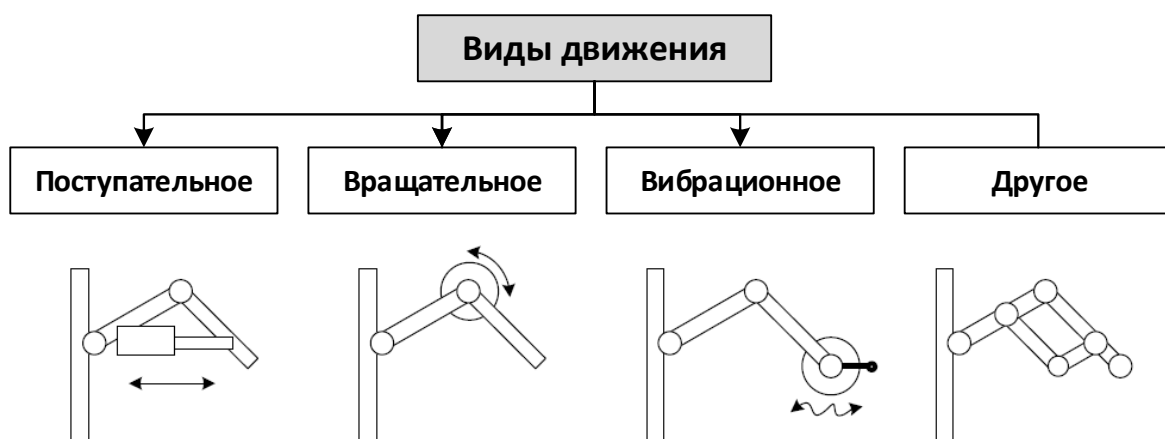


Рисунок 5 – Вид движения

Для механической передачи энергии применяют различные редукторы. В реабилитационных системах, чаще всего используют самотормозящиеся тихоходные передачи, такие как – передача винт-гайка или червячный редуктор. Передачи с гибкими связями, кулачковые и рычажные передачи слабо распространены из-за их сложности их применения [5].

В тренажерах и экзоскелетах применяют тихоходные волновые редукторы и быстроходные ременные передачи. Для снижения оборотов двигателя применяют редукторы с зубчатой или планетарной передачей. Цепные передачи используются редко. Классификация по типу передачи представлена на рисунке 6.

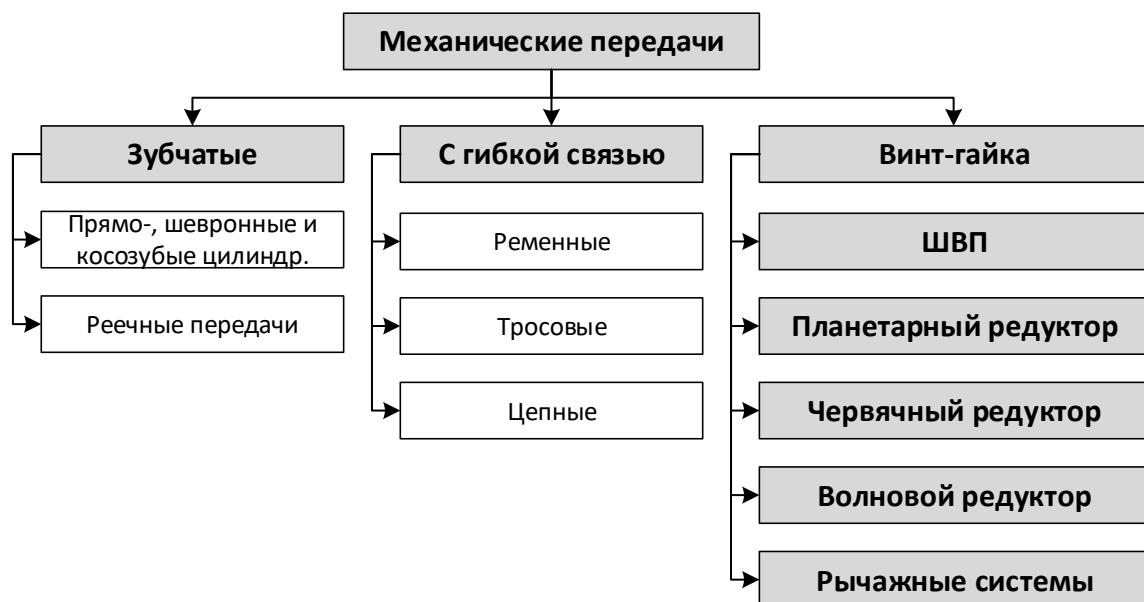


Рисунок 6 – Типы механической передачи

В системах обезвешивания могут применяться электромеханические, гидравлические и пневматические приводы. Наиболее распространены – электроприводы, так как обладают простотой эксплуатации, высокой степенью управляемости и эффективности. Гидравлические и пневматические приводы менее распространены и используются в чаще экзоскелетах, предназначенных для высоких нагрузок. Классификация по типу привода приведена на рисунке 7.

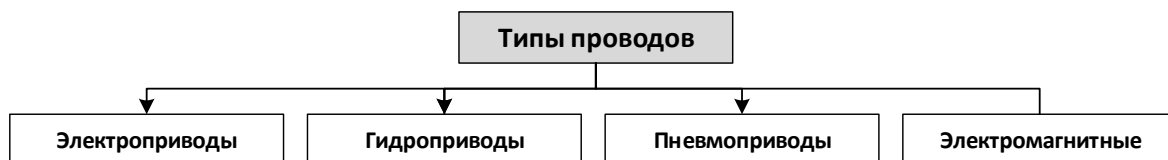


Рисунок 7 – Типы привода

Наиболее часто используемый тип привода в роботизированных системах реабилитации – электропривод, поэтому имеет смысл рассмотреть более подробно классификацию электропривода по типу применяемого электродвигателя, представленную на рисунке 8.

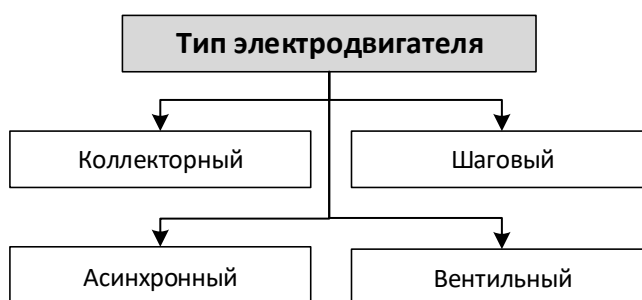


Рисунок 8 – Классификация по типу электродвигателя

Самый часто используемый тип двигателя в роботизированных комплексах – щеточный двигатель постоянного тока (ДПТ). А в мобильных роботах чаще используют вентильные электродвигатели. Также часто применяются шаговые двигатели, в основном для высокоточных линейных приводов. Но они имеют относительно низкий коэффициент полезного действия.

Для реализации вращательного движения применяются привод уникального конструктивного исполнения, а также готовые мотор-редукторы, например, как мотор-редуктор представленный на рисунке 8.



Рисунок 8 – Серводвигатель с волновым редуктором СНА-20А-30

Вентильный электродвигатель имеет ряд преимуществ над коллекторными ДПТ, но есть готовые решения на базе коллекторных и шаговых двигателей. Такие решения обычно обладают низкой мощностью, но и значительно меньшей стоимостью. На рисунке 9 представлены сервоприводы вращательного движения.

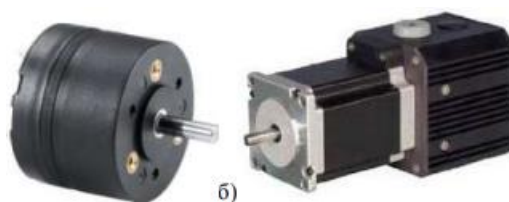


Рисунок 9 – Сервоприводы вращательного движения

Для реализации поступательного движения используются винтовые передачи и реечные зубчатые рейки. Известны решения на базе шаговых двигателей и шарико-винтовых передач, как показано на рисунке 10.



Рисунок 10 – Линейный шаговый сервопривод

Такие приводы отличаются высоким быстродействием и возможностью обеспечить высокий момент. Но также они обладают относительно низким КПД, а шаговые двигатели обладают резонансным эффектом.

Более энергоэффективным и надёжным является использование в конструкции реабилитационных комплексов, сервоприводов на базе синхронных (вентильных) двигателей. Но они являются более дорогостоящими.

Для обеспечения высоких оборотов привода применяются реечные передачи. Но готовые решения с таким типом передачи встречаются крайне редко и имеют специфическое назначение.

1.6 Реабилитация при патологиях опорно-двигательного аппарата

Патологии и травмы опорно-двигательного аппарата (ОДА) приводят к ограничению возможности перемещения, самообслуживания и обеспечения бытовых потребностей. Несвоевременное начало реабилитационных мероприятий или использование их не в полной мере, может являться причиной формирования инвалидности.

В постиммобилизационный период реабилитации, решаются следующие задачи: уменьшение болевого синдрома, увеличение подвижности и эластичности тканей, амплитуды движения в суставах. На данном этапе происходит нормализация мышечного тонуса, осанки и тренировка вестибулярного аппарата. В программу комплексной реабилитации на данном этапе входит механотерапия – применение механических, или работающих на основе электропривода или пневмопривода аппаратов с целью облегчения движений и увеличения подвижности в суставах, так и для увеличения нагрузки на определенные мышечные группы с целью их укрепления.

Предлагаемый программно-аппаратный комплекс компенсирует часть массы тела человека (5-95%), позволяя снять нагрузку с позвоночника и нижних конечностей пациентов, в значительной степени повышая эффективность реабилитационных мероприятий и обеспечивая мобильность малоподвижным пациентам.

Комплекс может быть применен при всех заболеваниях с двигательными нарушениями, например, нарушениях ходьбы вследствие инсульта, травмах головного и спинного мозга, при рассеянном склерозе, при спинальных травмах, демиелинизирующих заболеваниях и паркинсонизме [6].

2 Определение требований, предъявляемых к конструкции

С учётом последних трендов в развитии робототехнических систем медицинского и восстановительно-реабилитационного назначения, можно сделать вывод что производители таких систем стремятся улучшить массогабаритные показатели своих систем, увеличить время наработки и повысить энергоэффективность, а также увеличить силовые характеристики и реализовать уникальные функциональные возможности.

К основным требованиям к конструкции и принципу действия медицинского реабилитационного комплекса можно отнести следующие:

- обеспечение обезвешивания в движении;
- функция поднятия из положения лёжа и сидя;
- управляемое перемещение пациента;
- сопровождение в движении по лестнице;
- размещение крепежного костюма на теле человека;
- предотвращение падений и заваливаний на одну из сторон;
- выравнивание траектории движения;
- обеспечение требуемого количества степеней свободы;
- обеспечение высокого быстродействия.
- повышенные эргономические свойства костюма.

2.1 Воспроизведение заданных кинематических законов.

Во время работы системы обезвешивания пациент совершает перемещение, при этом специальные датчики, определяют линейное ускорение и текущее положение пациента, а система управления передает соответствующую команду на исполнительные элементы – приводные модули, которые выполняют подстройку положения схвата под текущее положение пациента с сохранением вектора силы обезвешивания.

По сигналам от сенсоров реализуется обратная связь, то есть отслеживается что движение исполнительного органа системы – схвата соответствует скорости, ускорению перемещения пациента. Таким образом, законы движения элементов системы обезвешивания должны позволять максимально точно воспроизвести траекторию движения пациента в любой точке рабочей зоны.

Системы сильно конструктивно различаются в зависимости от от того, сколько степеней свободы необходимо задействовать в реализации требуемого движения. Так, например, для стационарных систем обезвешивания, может требоваться только 1 степень свободы при использовании системы для тренировки на беговой дорожке.

В системе обезвешивания с использованием мобильного робота и монорельса обеспечивается две степени свободы, а в разрабатываемой системе обезвешивания для обеспечения свободы перемещения и обеспечения бытовой мобильности необходимо обеспечить 3 степени свободы [14].

2.2 Быстродействие механизмов и системы управления.

Кроме синхронизации законов движения перед разработчиком системы обезвешивания стоит задача временного соответствия, вызванного наличием времени реакции механических и электрических компонентов системы. Время переходных процессов нужно минимизировать с целью достижения удобства пользования. К примеру, несвоевременное движение схвата системы может привести к тому, что пациент потеряет равновесие и упадет [14].

Очевидно, что обезвешивание пациента с большим весом требует соответствующего источника энергии, что конечно приводит к увеличению габаритов и собственной массы всей конструкции.

В результате комплексного анализа существующих конструкций подобных устройств определены требования, предъявляемые к разрабатываемой конструкции системы обезвешивания.

Создание роботизированных устройств, систем и комплексов медицинского назначения должны быть направлены на повышение времени непрерывной работы и энергоэффективности, увеличение силовых характеристик, применение последних достижений в области материаловедения, автоматизированных систем и систем управления, а также микроэлектроники.

В результате проведенного анализа современных конструкций систем компенсации веса, выявления их достоинств и недостатков, требований и тенденций, сформулированы и представлены предложения по реализации новых технических решений в области создания современных робототехнических конструкций такого назначения:

1. Снижение массы и габаритов, повышение надёжности конструкции, повышение точности движений и быстродействия системы, улучшение эргономики и дизайна за счет использования современных материалов и технологий.

2. Обеспечение полной автономности пациента; снижение энергопотребления и повышение полезной мощности за счет модернизации приводного модуля и конструктивных характеристик, рекуперации энергии.

3. Совершенствование системы управления устройством, которое должно управляться не с пульта, а повторяя и преобразуя движения самого человека, наличие комплекса программного обеспечения, предусматривающего выполнение различных типовых сценариев.

2.3 Назначение разработки и основные функции

Назначение:

1. Обезвешивание в процессе выполнения реабилитационных упражнений;
2. Совместить несколько методик реабилитации в одном помещении;
3. Повысить эффективность медицинского персонала;
4. Начать реабилитационные процедуры раньше, чем традиционные методы и повысить их эффективность.
5. Обеспечить бытовую мобильность в рамках помещения;

Основные функции:

1. Обезвешивание в движении;
2. Предотвращение заваливание на одну из сторон в движении;
3. Выравнивание траектории движения;
4. Подъём пациента из положения лёжа/сидя;
5. Предотвращение падений;
6. Управляемое перемещение пациента.

Возможные области применения:

1. Амбулаторная / домашняя реабилитация;
2. Уход за инвалидами;
3. Научно-исследовательские цели;
4. Испытания космических конструкций, экзоскелетов, роботов;
5. Спорт (динамическое изменение веса спортсмена);
6. Развлечения (расширение возможностей виртуальной реальности, виртуальные стены, имитация полёта, имитация взрывной волны и т.д.).

2.4 Обзор существующих решений в области исследований

На данный момент системы обезвешивания параллельной структуры с гибкими звеньями еще не нашли применения в реабилитационной медицине на территории Российской Федерации и странах СНГ, несмотря на то, что за границей подобные системы активно разрабатываются, ведутся научные исследования и создаются коммерческие продукты серийного производства и уже есть примеры успешного внедрения таких систем в реальных медицинских учреждениях. Единственный пример подобной систем, применяемый на территории РФ – однозвенный манипулятор Bioness Vector производства Нидерланды, продаётся дистрибьюторами медицинской техники в России.

В результате изучения рынка существующих решений, выявлено всего четыре существующие реабилитационные системы компенсации веса. Две из них построены на основе параллельного манипулятора с четырьмя гибкими звеньями, это Float и Ryzen. Две другие построены на основе манипулятора с одним гибким звеном, это ZeroG и Vector Bioness. Ниже кратко описана каждая из упомянутых систем [13].

Float – система обезвешивания, с четырьмя тросами, управляемые приводами, через подвижные ролики. Ролики двигаются вдоль потолочных рельс. Данная система представлена на рисунке 11.

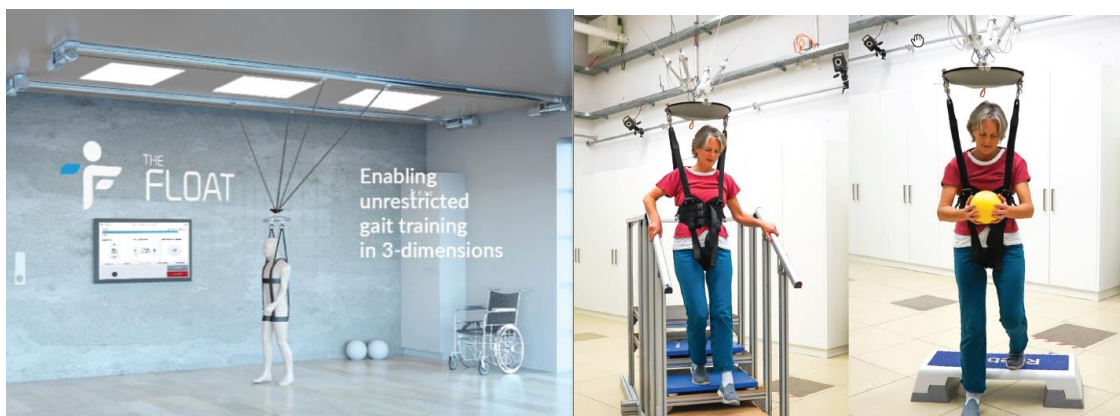


Рисунок 11 – Четырехтросовая система компенсации веса – FLOAT

Ryzen – реабилитационная система обезвешивания аналогичная системе Float по принципу действия, но с другой конструкцией. Данная система представлена на рисунке 12.



Рисунок 12 – Четырехросовая система компенсации веса – Ryzen

ZeroG – система обезвешивания для реабилитации на основе однозвенного манипулятора и потолочного монорельса. Данная система представлена на рисунке 13.



Рисунок 13 – Однотросовая система компенсации веса – ZeroG

Vector Bioness – система обезвешивания для реабилитации с мобильным роботом и монорельсом. Vector Bioness поставляется на рынок РФ и эксплуатируется в московском реабилитационном центре. Данная система представлена на рисунке 14.



Рисунок 14 – Однотросовая система компенсации веса – Vector Bioness

Известны результаты исследований, проводимых в отношении систем компенсации веса тела. В рамках данных исследований были смоделированы четыре системы компенсации веса, с разными кинематическими схемами, представленными на рисунке 15. И проведены исследования с целью сравнить потребления электроэнергии в зависимости от типа используемой конструкции, чтобы выявить наиболее эффективную конструкцию [7].

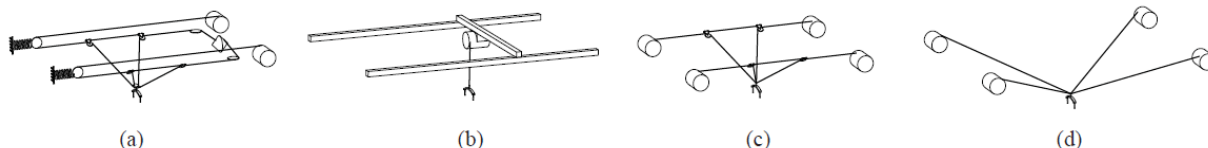


Рисунок 15 – Конструкции систем компенсации веса

На рисунке изображены:

(a) – конструкция системы RYSEN;

(b) – крановая конструкция, применяемая в системах Vector Bioness и ZeroG, представляющая из себя манипулятор с тремя степенями свободы. За исключением того, что в Vector Bioness и ZeroG степень свободы манипулятора ограничены до 2, т.к. движение производится вдоль рельса;

(c) – система FLOAT;

(d) – конструкция предлагаемого манипулятора.

По результатам данных исследований сделаны выводы, что наиболее эффективным с точки зрения энергоэффективности является конструкция системы по пиковой мощности – RYZEN, по мощности необходимой на

вертикальные и горизонтальные перемещения – крановая конструкция. Данные зависимости представлены в таблице 1 и на рисунке 16.

Таблица 1 – Необходимые мощности приводов различных конструкций

Тип конструкции	P_{\max} , Вт	$P_{\text{гориз}}$, Вт	$P_{\text{верт}}$, Вт
RYZEN	368	403	606
Крановая конструкция	385	135	480
FLOAT	708	1223	2247
Предлагаемая система	1405	2601	5203

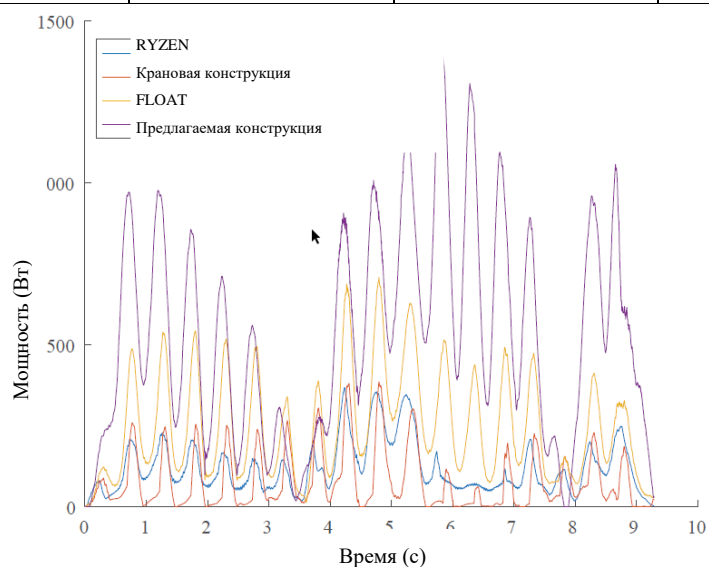


Рисунок 16 – Зависимость мощности от времени для четырех систем.

По приведенным результатам видно, что предлагаемая конструкция является наименее эффективной с точки зрения энергоэффективности, но благодаря простоте конструкции она становится конкурентоспособной с другими типами конструкций т.к. обладает следующими преимуществами:

1. Простота разработки аппаратного обеспечения (4 лебедочных механизма без необходимости монтажа потолочных рельс и т.д.);
2. Простота разработки программного обеспечения построения системы управления и синтеза алгоритмов, благодаря простой мат. модели;
3. Высокая скорость изготовления и введения в эксплуатацию;
4. Низкая стоимость по сравнению с другими системами;
5. Повышенная надёжность, т.к. в системе используется меньше механических элементов.

3 Разработка конструкции приводного модуля стенда

3.1 Общий вид и концепция

Конструктивно манипулятор состоит из четырёх электроприводов, закрепленных в верхних угловых точках помещения. Каждый электропривод имеет барабан, на который наматывается трос, свободный конец которого сцеплен с концом трёх других тросов и с подвесом (механизм крепления тросов к костюму пациента).

Электропривод вращает барабан, наматывая трос, тем самым изменяя его длину, что позволяет изменять положение подвеса в пространстве.

Общий вид разрабатываемого манипулятора параллельной структуры с гибкими звеньями представлен на рисунке 17.

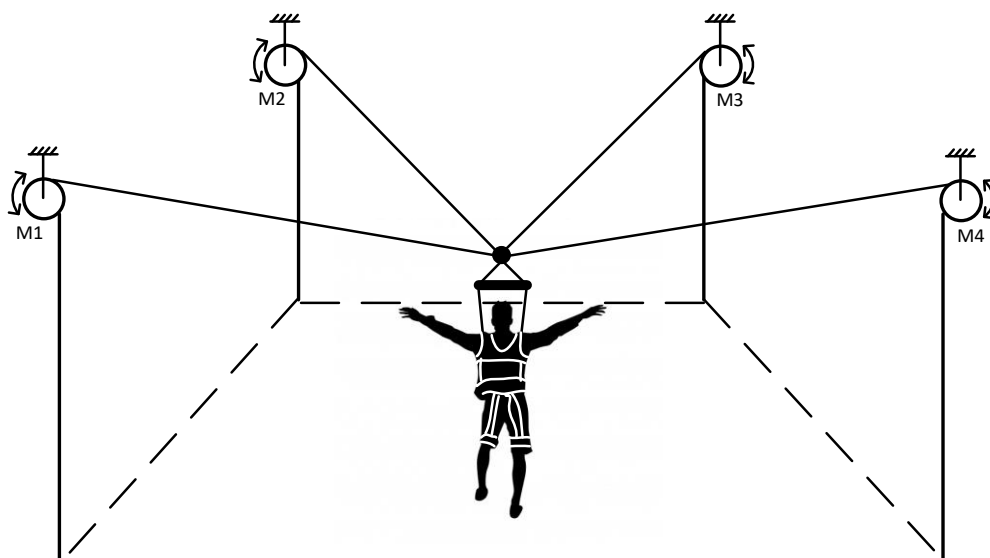


Рисунок 17 – Общий вид манипулятора

3.2 Электродвигатель постоянного тока

Основным элементов приводного модуля является электродвигатель, который приводит в движение барабан, наматывающий трос – таким образом перемещая рабочий орган. В качестве электродвигателя выбран коллекторный ДПТ. Для электродвигателя создана 3D модель, представленная на рисунке 18.

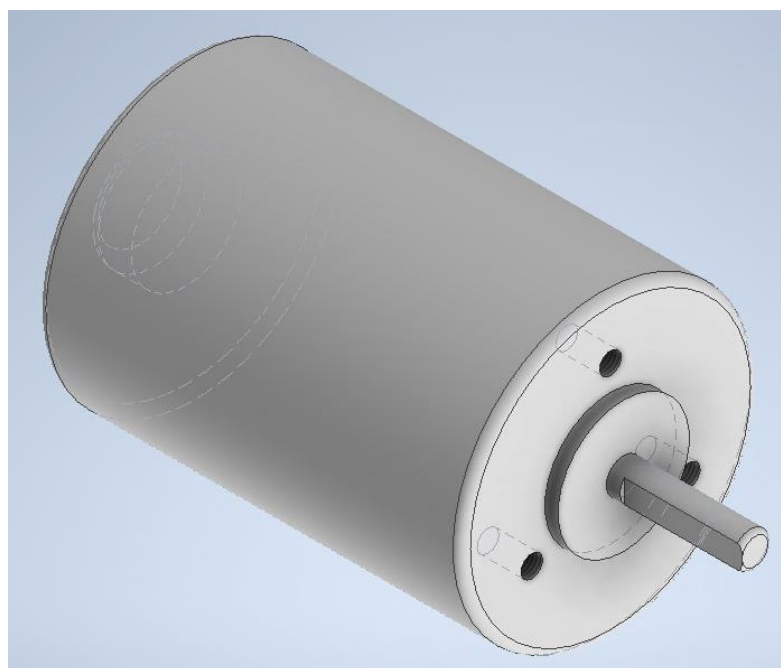


Рисунок 18 – 3D-модель электродвигателя

3.3 Червячный редуктор

Редуктор — механизм, предназначенный для передачи вращения от быстроходного электродвигателя тихоходному канатоведущему органу - барабану. Редукторы позволяют снизить частоту вращения быстроходного ДПТ. Для реализации разрабатываемой конфигурации станда используется червячный редуктор, представленный на рисунке 19.

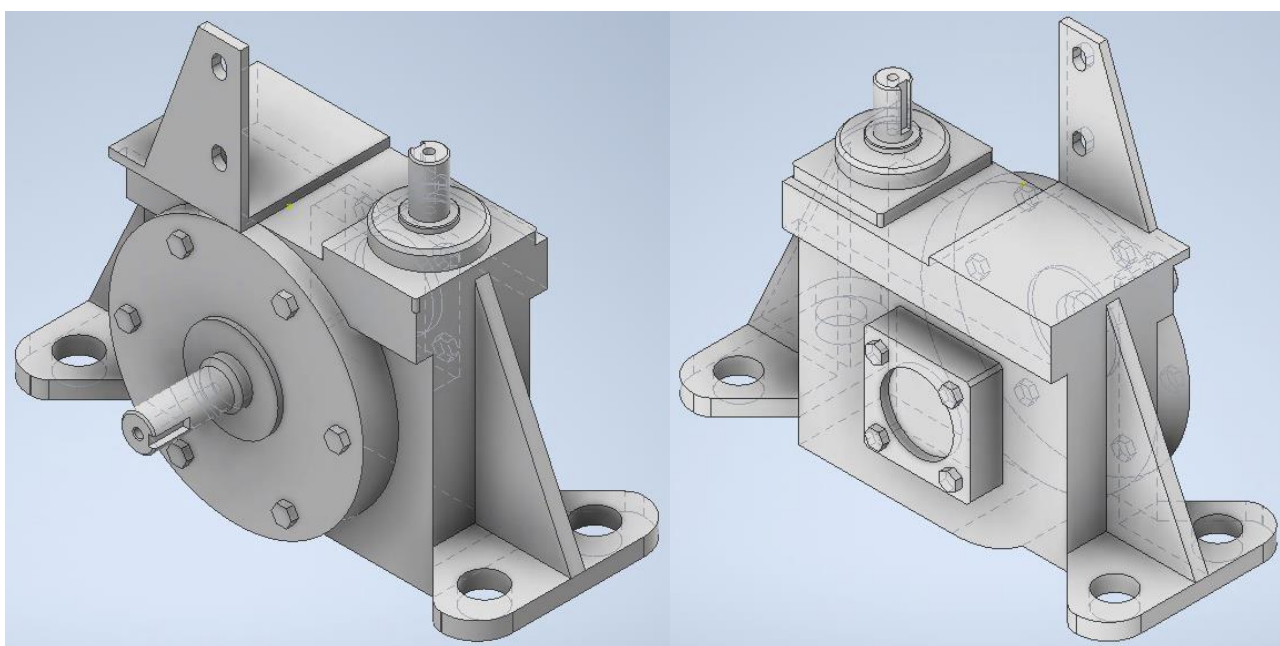


Рисунок 19 – 3D-модель червячного редуктора

3.4 Энкодер

Энкодер – датчик для определения скорости вращения вала двигателя. В разрабатываемом стенде используется абсолютный энкодер. 3D модель энкодера, представлена на рисунке 20.

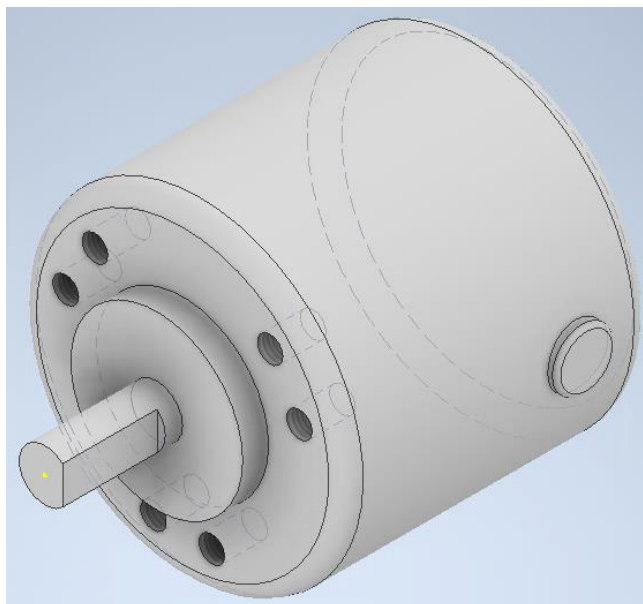


Рисунок 20 – 3D-модель энкодера

3.5 Блок направляющих роликов

Направляющие ролики используются для придания тросу желаемого направления для укладки на барабан. Разработанная 3D модель направляющих роликов представлена на рисунке 21.

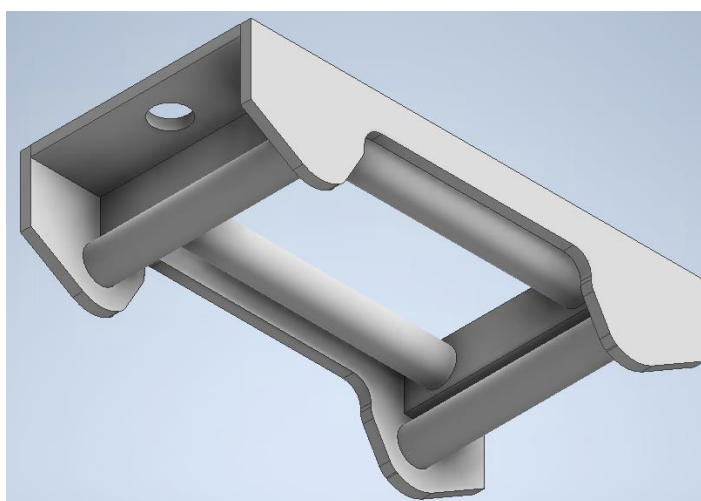


Рисунок 21 – 3D-модель блока направляющих роликов

3.6 Крепежная платформа

Крепежная платформа предназначена для сборки и закрепления всех элементов приводного узла, а также для крепления приводного модуля к стене. Крепежная платформа состоит из нескольких крепежных элементов, 3D модели которых представлены на рисунке 22.

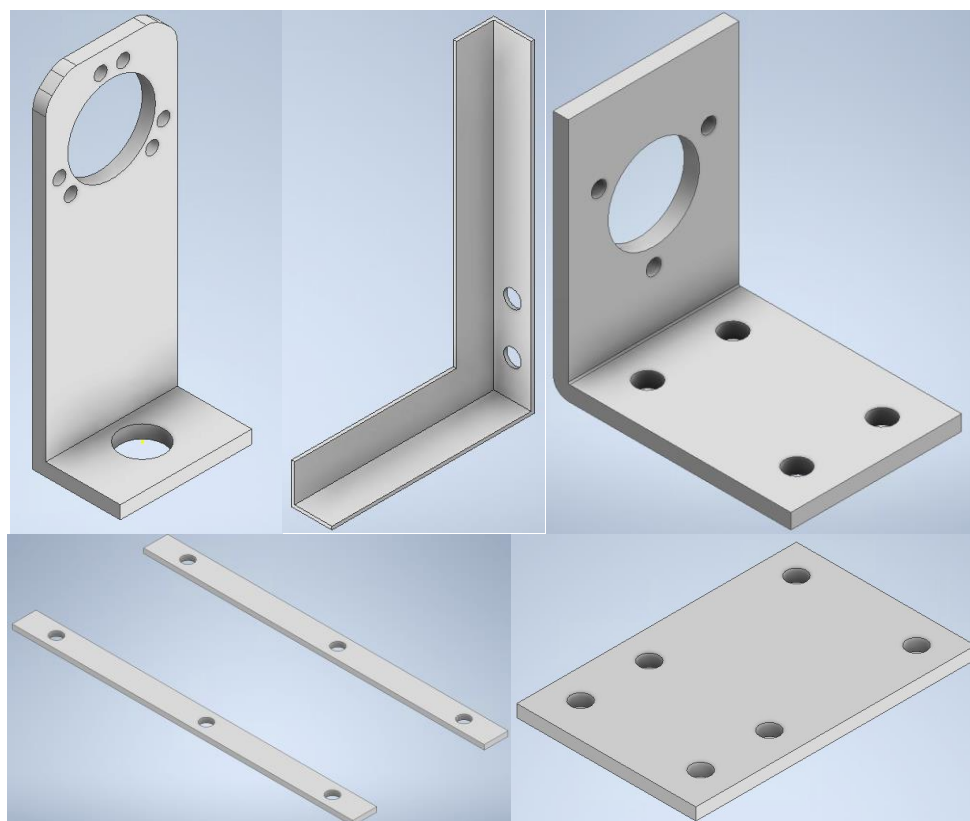


Рисунок 22 – 3D-модель элементов крепежной платформы

3.7 3D модель барабана для намотки троса

Барабан необходим для намотки троса, а также для закрепления энкодера. 3D модель барабана представлена на рисунке 23.

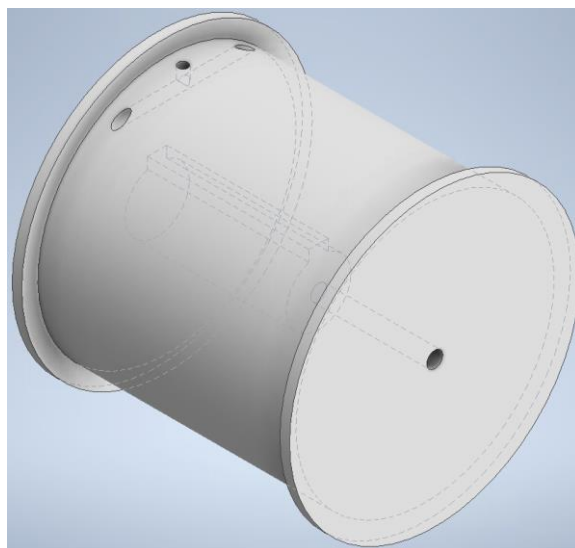


Рисунок 23 – 3D-модель сборки приводного модуля стенда

3.8 3D модель сборки приводного модуля стенда

3D модель сборки всех элементов приводного модуля стенда представлена на рисунке 24. Чертежи всех элементов сборки представлены в приложении В к пояснительной записке.

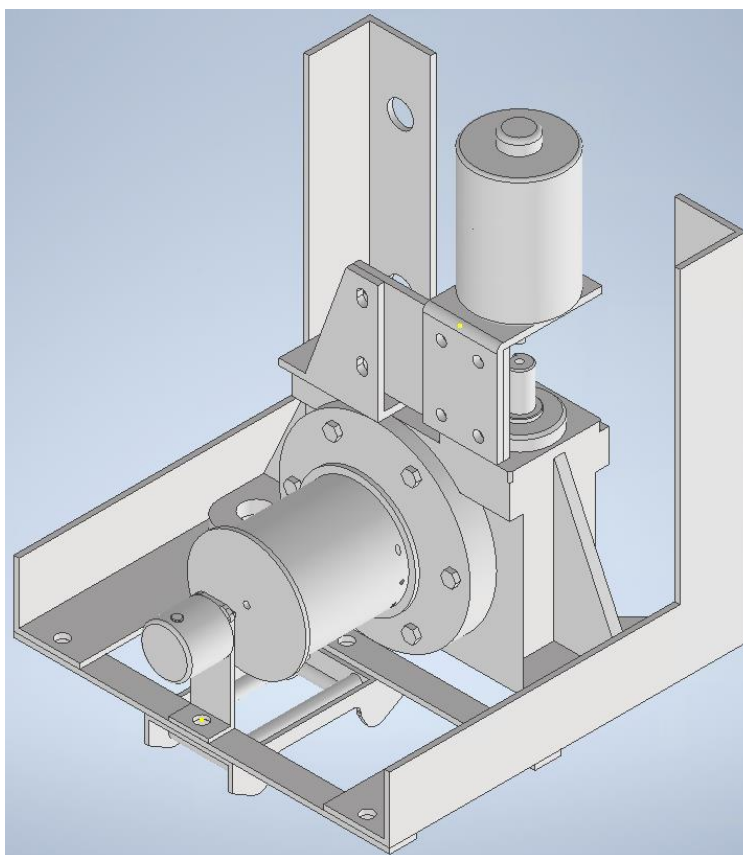


Рисунок 24 – 3D-модель сборки приводного модуля стенда

4 Разработка математической модели

4.1 Система с двумя гибкими звеньями

Для начала рассмотрим кинематическую схему системы с двумя степенями свободы. В такой системе тело закреплено в одной точке тросами к двум приводным механизмам, расположенным в крайних верхних точках рабочей зоны. В данной системе длина троса равна радиусу окружности с центром в точке привода. Кинематическая схема с двумя степенями свободы представлена на рисунке 25.

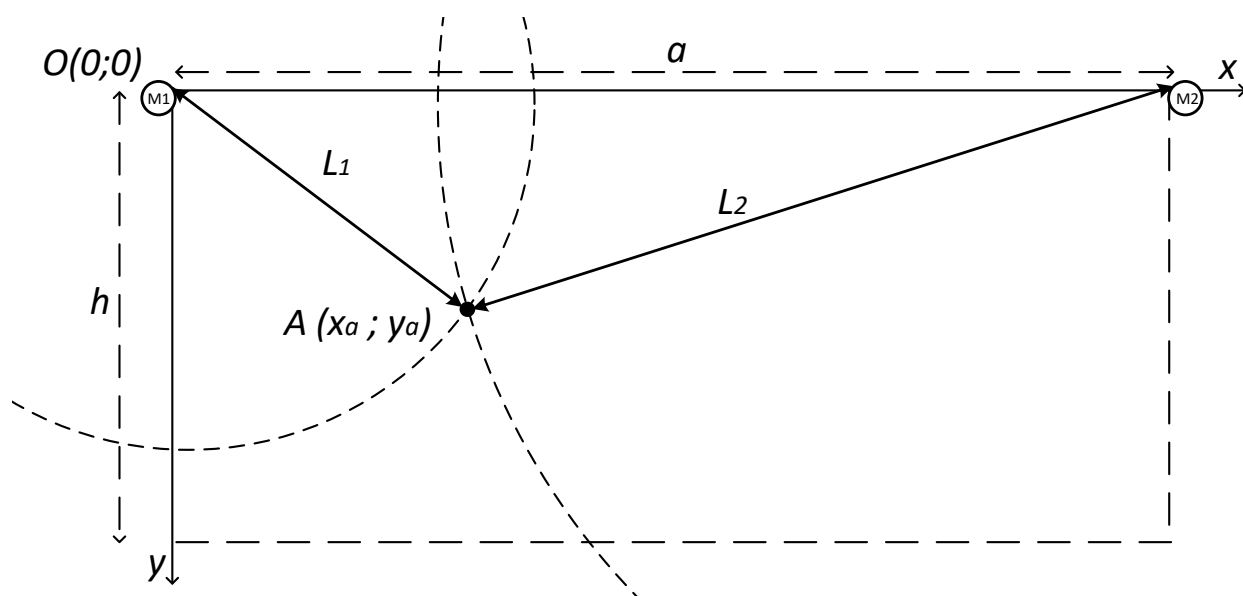


Рисунок 25 – Система с двумя степенями свободы

Решение обратной задачи кинематики будет заключаться в определении длины тросов по известному положению объекта (груза) в рабочей зоне:

$$\begin{cases} x_a^2 + y_a^2 = L_1^2 \\ (x_a - a)^2 + y_a^2 = L_2^2 \end{cases}$$

Решим систему уравнений относительно L_1 и L_2

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{x_a^2 + y_a^2} \\ L_2 = \sqrt{(x_a - a)^2 + y_a^2} \end{cases}$$

, где x_a, y_a – координаты объекта в текущий момент времени;

L_1, L_2 – длина тросов;

a – расстояние между приводными механизмами (ширина рабочей зоны).

Решение прямой задачи кинематики заключается в определении положения объекта по известным длинам тросов:

$$\begin{cases} x_a = \frac{1}{a} * (a^2 + L_1^2 - L_2^2) \\ y_a = \sqrt{L_1^2 - \frac{1}{a^2} * (a^2 + L_1^2 - L_2^2)^2} \end{cases}$$

На рисунке 26 представлены графики изменения длин тросов и координат объекта во времени при горизонтальном прямолинейном перемещении объекта.

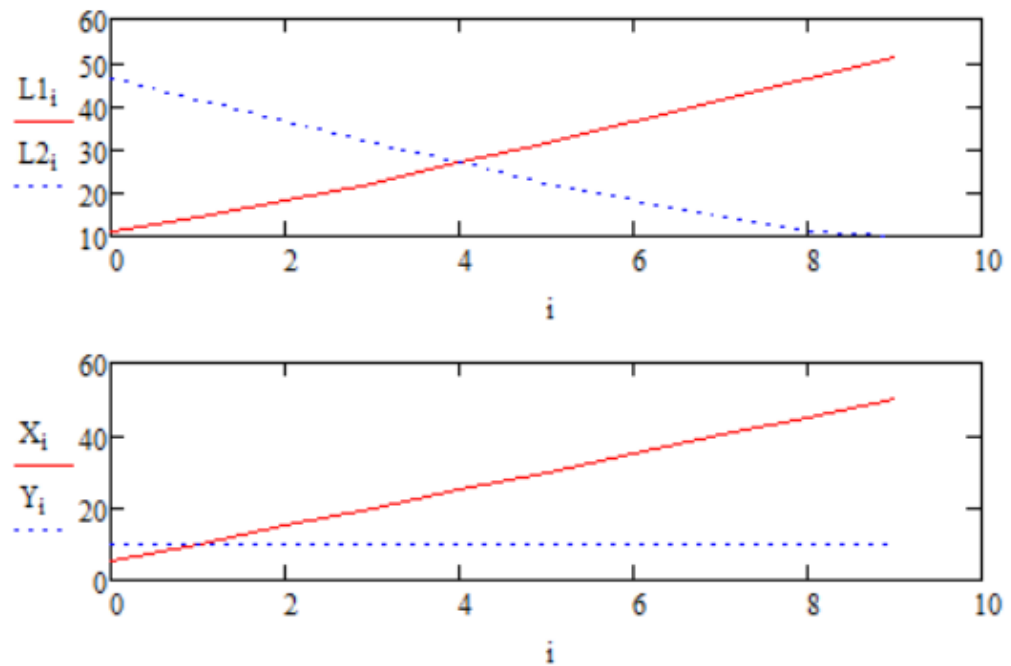


Рисунок 26 – Изменение длин тросов при перемещении объекта

Далее вычислим силы натяжения тросов (гибких звеньев), которые необходимо обеспечить для обезвешивания тела в текущем положении. Схема с указанием сил представлена на рисунке 26.

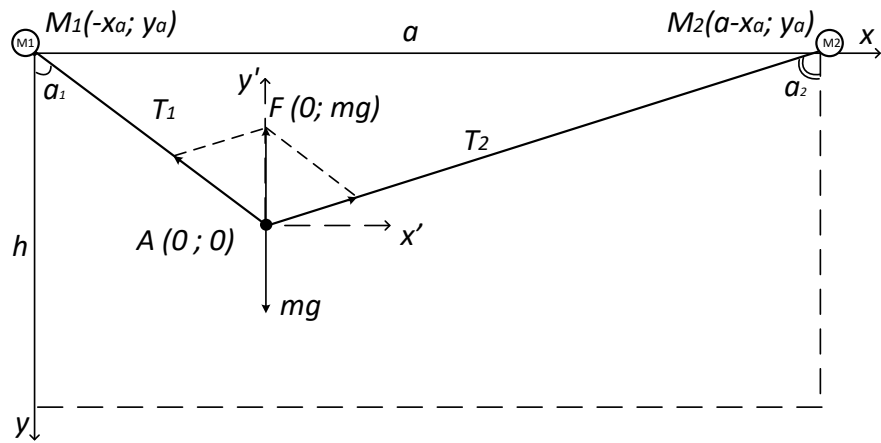


Рисунок 26 – Разложение силы тяжести

На рисунке 26:

\bar{F} – вектор силы, компенсирующей вес тела;

$\{\bar{T}_1, \bar{T}_2\}$ – система векторов сил натяжения тросов;

h – высота рабочей зоны, a – ширина рабочей зоны

Необходимо разложить вектор \bar{F} по базису $\{\bar{T}_1, \bar{T}_2\}$, т.е. найти такие коэффициенты x, y при которых линейная комбинация базисных векторов $\{\bar{T}_1, \bar{T}_2\}$ равна вектору \bar{F}

$$\bar{F} = x\bar{T}_1 + y\bar{T}_2,$$

где x, y – координаты вектора \bar{F} в базисе $\{\bar{T}_1, \bar{T}_2\}$.

Запишем выражение (1) в векторной форме:

$$(0; mg) = x * (-x_a; y_a) + y * (a - x_a; y_a)$$

Что бы умножить вектор на число, необходимо каждую координату вектора умножить на число:

$$(0; mg) = (-x * x_a; x * y_a) + (y * (a - x_a); y * y_a)$$

Просуммируем вектора в правой части уравнения, для этого просуммируем соответствующие координаты

$$(0; mg) = (y * (a - x_a) - x * x_a; x * y_a + y * y_a)$$

Если два вектора равны, то равны и их соответствующие координаты, а значит можно получить следующую систему выражений:

$$\begin{cases} x * (-x_a) + y * (a - x_a) = 0 \\ x * (y_a) + y * (y_a) = mg \end{cases}$$

Решим систему уравнений относительно x и y :

$$x = \frac{(a - x_a)mg}{ay_a - x_a y_a - x_a}$$

$$y = \frac{-x_a mg}{ay_a - x_a y_a - x_a}$$

Тогда искомое разложение:

$$\bar{F} = \left(\frac{(a - x_a)mg}{ay_a - x_a y_a - x_a} \right) \bar{T}_1 + \left(\frac{-x_a mg}{ay_a - x_a y_a - x_a} \right) \bar{T}_2,$$

$$\bar{F} = k_1 \bar{T}_1 + k_2 \bar{T}_2$$

Из полученных выражений получим силы F_1 и F_2 натяжения тросов:

$$F_i = k_i T_i,$$

где T_i – длина троса, k_i – коэффициент разложения

4.2 Система с тремя гибкими звеньями

Перейдём к рассмотрению кинематической схемы системы с тремя степенями свободы. В такой системе тело закреплено в одной точке тросами к трём приводным механизмам, расположенным в крайних верхних точках рабочей зоны. В данной системе длина троса равна радиусу сферы с центром в точке расположения привода.

Данная структура рассматривается в качестве промежуточной, позволяющей перейти от системы с двумя к системе с четырьмя приводными узлами. Поэтому рассмотрим частный случай – систему в которой проекция рабочей зоны на плоскость XU представляет из себя прямоугольный

треугольник. В данной системе длины тросов равны радиусу окружности с центром в точке привода, как это показано на рисунке 27.

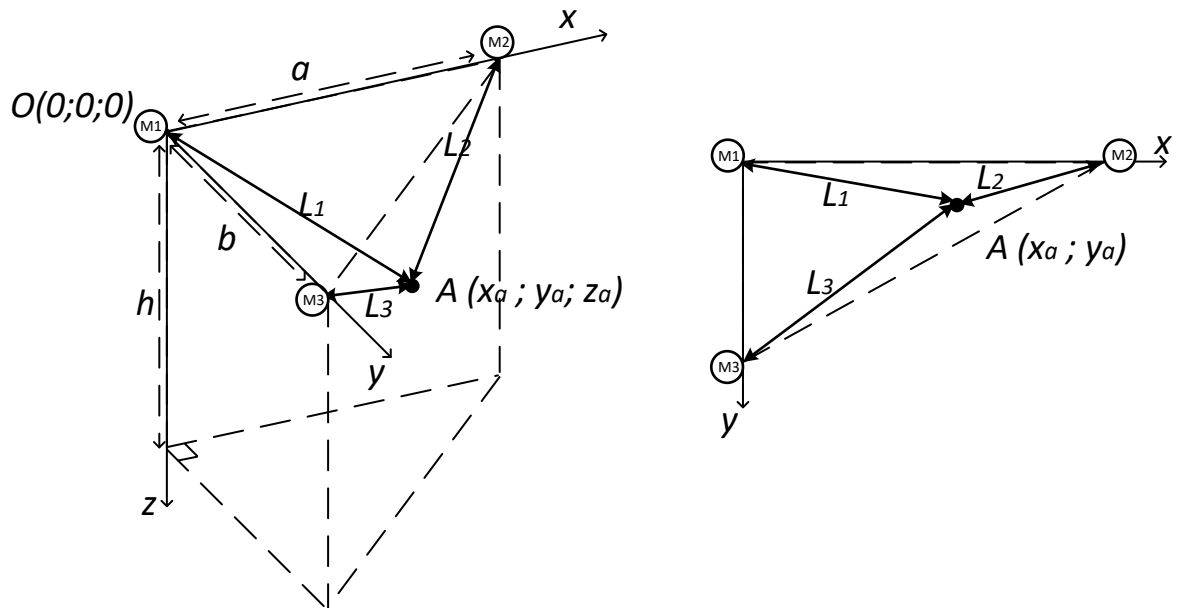


Рисунок 27 – Система из трех звеньев

В данной системе обратная задача кинематики заключается в определении длины тросов по известному положению объекта (груза) в рабочей зоне:

$$\begin{cases} x_a^2 + y_a^2 + z_a^2 = L_1^2 \\ (x_a - a)^2 + y_a^2 + z_a^2 = L_2^2 \\ x_a^2 + (y_a - b)^2 + z_a^2 = L_3^2 \end{cases}$$

Решим систему уравнений относительно L_1 , L_2 и L_3

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2} \\ L_2 = \sqrt{(x_a - a)^2 + y_a^2 + z_a^2} \\ L_3 = \sqrt{x_a^2 + (y_a - b)^2 + z_a^2} \end{cases}$$

, где x_a, y_a, z_a – координаты объекта в текущий момент времени;

L_1, L_2, L_3 – длина тросов;

a – расстояние между приводами M1 и M2 (длина рабочей зоны);

b – расстояние между приводами M1 и M3 (ширина рабочей зоны).

Решение прямой задачи кинематики, которая заключается в определении положения объекта по известным длинам тросов, не составит труда, так как

требует выражения координат через длины тросов в системе из трех уравнений и трех неизвестных.

На рисунке 28 представлены графики изменения длин тросов и координат объекта во времени при прямолинейном перемещении объекта.

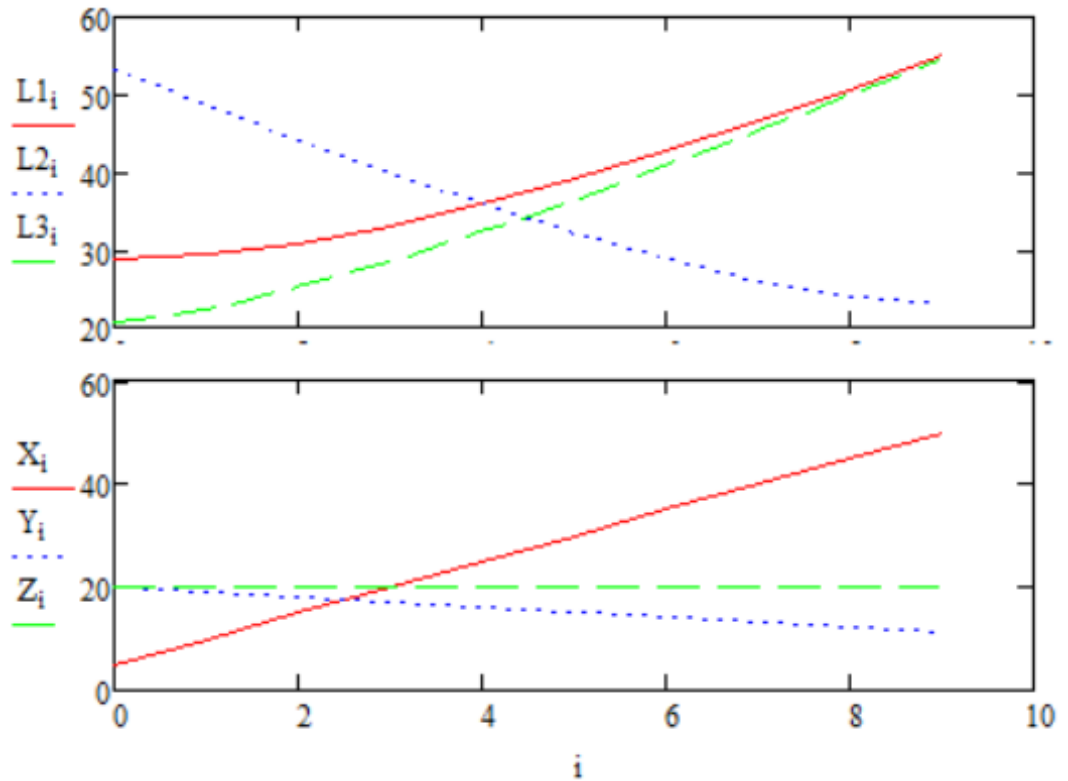


Рисунок 28 – Изменение длин тросов при перемещении объекта

Далее вычислим силы натяжения тросов (гибких звеньев). Для этого просто разложим результирующий вектор вектор \vec{F} на три базисных вектора $\{\vec{T}_1, \vec{T}_2, \vec{T}_3\}$, т.е. найти такие коэффициенты x, y, z при которых линейная комбинация базисных векторов $\{\vec{T}_1, \vec{T}_2, \vec{T}_3\}$ равна вектору \vec{F}

$$\vec{F} = x\vec{T}_1 + y\vec{T}_2 + z\vec{T}_3,$$

где x, y, z – координаты вектора \vec{F} в базисе $\{\vec{T}_1, \vec{T}_2, \vec{T}_3\}$.

4.3 Система с четырьмя гибкими звеньями

В кинематической схеме, приведенной на рисунке 28, длины тросов равны радиусу сферы с центром в точке размещения привода. На данном этапе допускаем, что используются нерастяжимые тросы.

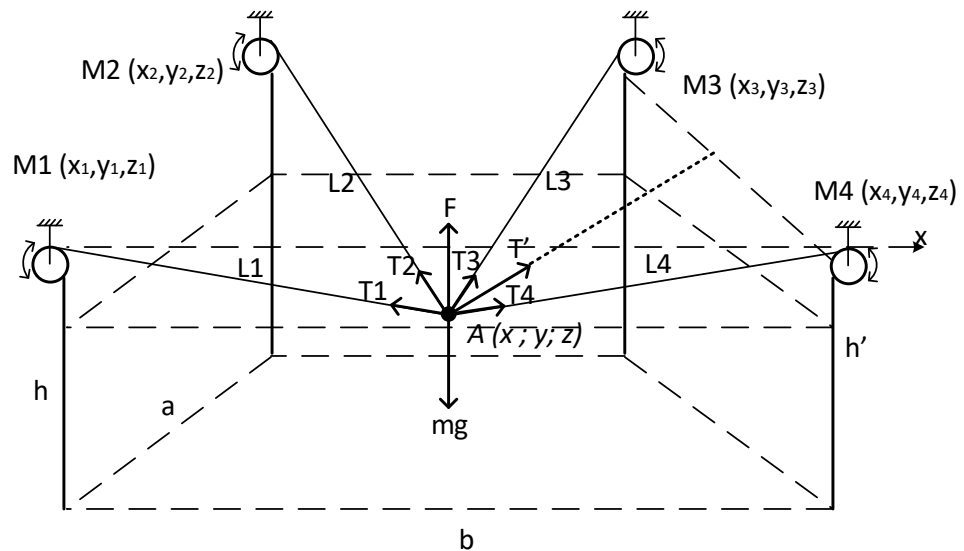


Рисунок 29 – Кинематическая схема четырехзвенной системы

На рисунке 29:

x, y, z – координаты подвеса в текущий момент времени;

L_1, L_2, L_3, L_4 – длина тросов;

a – расстояние между приводами M_1 и M_2 ;

b – расстояние между приводами M_1 и M_3 .

Задача управления манипулятором на данном этапе проектирования сводится к решению задачи перемещения подвеса в пространстве и обеспечении силы, компенсирующей вес тела [8].

Первая задача представляет из себя обратную задачу кинематики, т.е. по известному положению подвеса в рабочей зоне, необходимо определить длины тросов:

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ L_2 = \sqrt{(x - a)^2 + y^2 + z^2} \\ L_3 = \sqrt{x^2 + (y - b)^2 + z^2} \\ L_4 = \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2 + z^2} \end{cases}$$

На рисунке 30 представлены графики изменения длин тросов и координат объекта во времени при прямолинейном перемещении объекта.

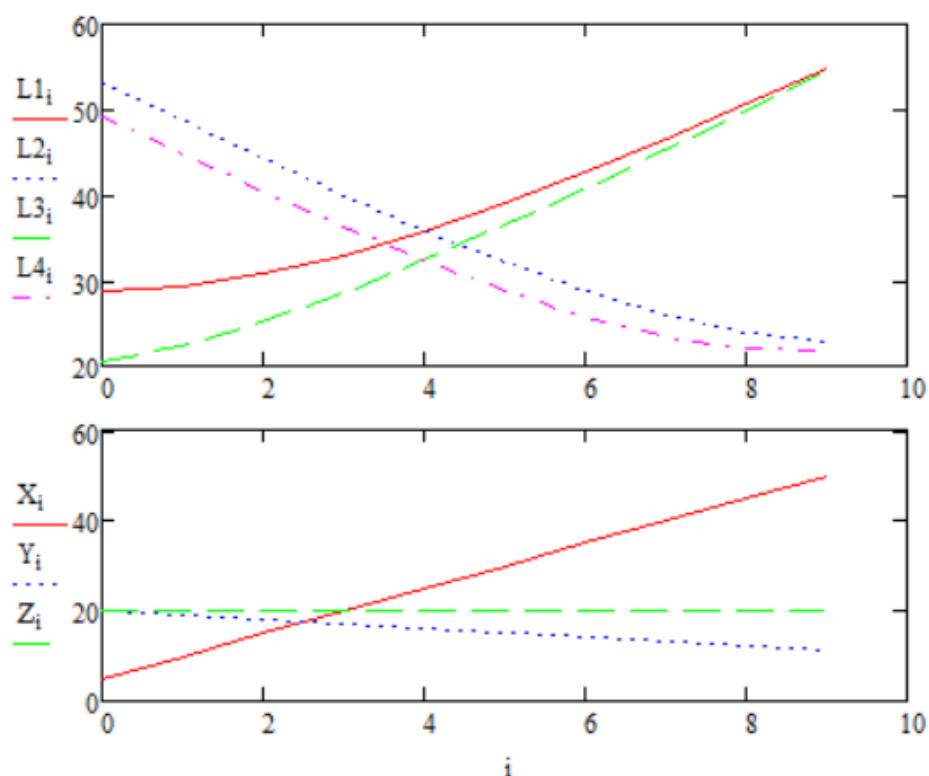


Рисунок 30 – Изменение длин тросов при перемещении объекта

Вторая задача – регулирование вектора компенсирующей силы может быть решена изменением усилия на каждом из четырех тросов путём независимого регулирования момента на соответствующем приводе. При возможности размещения датчика веса на подвесе, можно реализовать независимый контур регулирования, работающий параллельно с контуром регулирования положения подвеса.

Для реализации обезвешивания силы натяжения тросов должны не только компенсировать вектор силы тяжести, но и компенсировать вектор движения обезвешиваемого объекта. Распишем выражение разложения вектора компенсирующей силы на вектора натяжения тросов через проекции сил по осям координат. Получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \bar{T}_{1x} + \bar{T}_{2x} + \bar{T}_{3x} + \bar{T}_{4x} = ma_x \\ \bar{T}_{1y} + \bar{T}_{2y} + \bar{T}_{3y} + \bar{T}_{4y} = ma_y \\ \bar{T}_{1z} + \bar{T}_{2z} + \bar{T}_{3z} + \bar{T}_{4z} = m(a_z - g) \end{cases}$$

Но на данном этапе проработки математической модели вектор движения обезвешиваемого объекта не учитывается, поэтому примем $a_x = a_y = a_z = 0$, тогда система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \bar{T}_{1x} + \bar{T}_{2x} + \bar{T}_{3x} + \bar{T}_{4x} = 0 \\ \bar{T}_{1y} + \bar{T}_{2y} + \bar{T}_{3y} + \bar{T}_{4y} = 0 \\ \bar{T}_{1z} + \bar{T}_{2z} + \bar{T}_{3z} + \bar{T}_{4z} = -mg \end{cases}$$

Выразив значения проекций сил через углы отклонения тросов от оси вектора силы обезвешивания, получим следующую систему уравнений, описывающую прямую динамику четырехзвенной системы обезвешивания.

$$\begin{cases} \bar{T}_1 \cdot \frac{x_1 - x}{L1} + \bar{T}_2 \cdot \frac{x_2 - x}{L2} + \bar{T}_3 \cdot \frac{x_3 - x}{L3} + \bar{T}_4 \cdot \frac{x_4 - x}{L4} = 0 \\ \bar{T}_1 \cdot \frac{y_1 - y}{L1} + \bar{T}_2 \cdot \frac{y_2 - y}{L2} + \bar{T}_3 \cdot \frac{y_3 - y}{L3} + \bar{T}_4 \cdot \frac{y_4 - y}{L4} = 0 \\ \bar{T}_1 \cdot \frac{z_1 - z}{L1} + \bar{T}_2 \cdot \frac{z_2 - z}{L2} + \bar{T}_3 \cdot \frac{z_3 - z}{L3} + \bar{T}_4 \cdot \frac{z_4 - z}{L4} = -mg \end{cases}$$

Полученная система уравнений, является нестационарной, поскольку число неизвестных больше числа уравнений. Для решения этой системы уравнений предлагается мнимый трос и соответствующий ему мнимый вектор, который будет обеспечивать силу натяжения мнимого троса равную, силам натяжения любых двух других тросов. Затем вектор силы натяжения мнимого троса должен быть разложен на образующие его вектора.

Выполнив подобное разложение получим стационарную систему уравнений из 3 уравнений и 3 неизвестных, решение которой не составит труда.

4.4 Момент на электроприводе

Следующим этапом необходимо выполнить переход от рассчитанных сил натяжения к моментам, которые необходимо обеспечивать электроприводам. Момент на электроприводе складывается из момента вращения для компенсации силы натяжения тросов, из момента вращения для изменения дли троса, а также из момента сопротивления.

$$M_i = F_i \cdot r + J \cdot \dot{\omega}_i + M_{\text{соп}},$$

$$J = \frac{1}{2} Mr^2,$$

где r – радиус барабана, J – момент инерции, M – масса барабана и троса

Зависимость скорости вращения барабана ω_i и изменения длины троса ΔL_i отражена в следующих выражениях:

$$\Delta L_i = \frac{2\pi r}{360} \cdot \omega_i, \quad \omega_i = \frac{180}{\pi r} \cdot \Delta L_i$$

С учётом скорости вращения барабана, получим необходимое управляющее воздействие для обезвешивания объекта. Выражение момента электропривода примет следующий вид:

$$M_i = F_i \cdot r + Mr \frac{90}{\pi} \dot{\Delta L}_i + M_{\text{соп}}$$

В результате воздействия веса объекта, тросы испытывают эффект растяжения, который может быть определен по закону Гука. Удлинение троса вызванное растяжением ΔL определяется следующим выражением:

$$\Delta L_i = \frac{-F_i \cdot L_i}{ES}$$

Полученные выражения позволят синтезировать математическую модель и систему управления для системы обезвешивания с гибкими связями.

4.5 Рабочая зона системы

Наиболее простой способ ввода мнимого привода предполагает расположение привода в середине отрезка, образованного двумя другими приводами. Но в таком случае рабочая область системы будет ограничена мнимой рабочей областью в виде треугольника с вершиной в точке расположения мнимого привода, как показано на рисунке 29. Такой результат может быть удовлетворительным, если на уровне системы управления

выполнять смену ориентации математической модели, т.е. при выходе объекта обезвешивания на границу мнимой рабочей зоны, производить перемещение мнимого привода на другую сторону рабочей зоны.

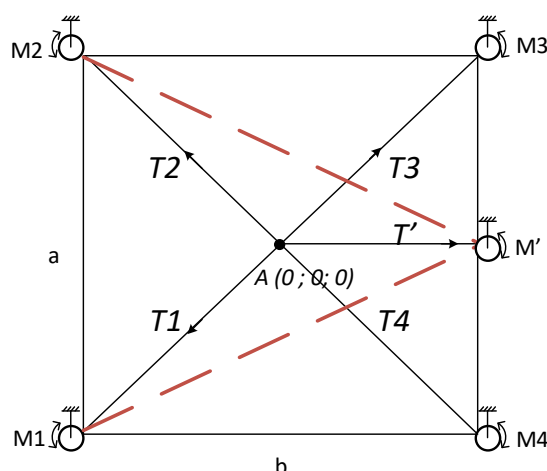


Рисунок 29 – Рабочая зона при введении мнимой лебедки

Более рациональный способ введения мнимого привода – размещение его под прямым углом к отрезку, образованному двумя «заменяемыми» приводами. В таком случае координаты мнимого привода неизменны и позволяет упростить систему управления.

Более того, мнимый привод может вообще не вводиться, если разделить рабочую зону по диагонали на 2 участка – в каждом из которой функцию обезвешивания выполняют только 3 привода, как показано на рисунке 30. В таком случае математическая модель упрощается до модели трехзвенной системы, но в таком случае нагрузка на активные приводы увеличивается.

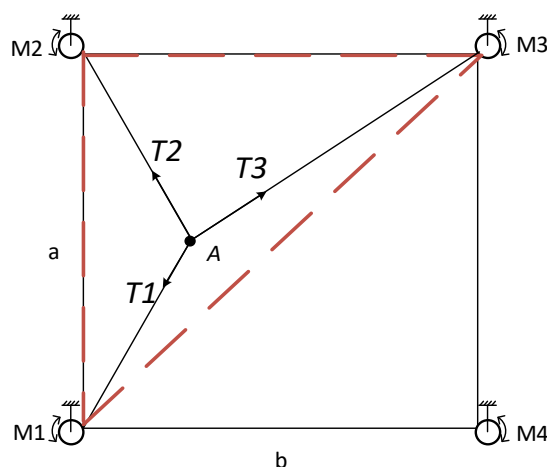


Рисунок 30 – Рабочая зона при разбиении рабочей зоны на 2 участка

Снизить нагрузку в рабочей области может помочь уменьшение мнимой рабочей области за счёт разбиения рабочей области на 4 участка. В таком случае модель останется трехтросовой, как это показано на рисунке 31.

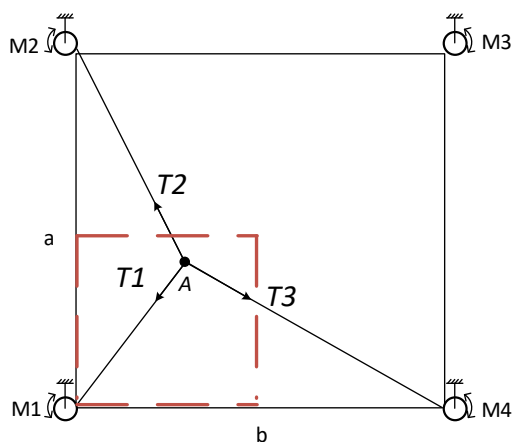


Рисунок 31 – Рабочая зона при разбиении рабочей зоны на 3 участка

Наибольшей энергоэффективности можно добиться, если проекция рабочей зоны системы на горизонтальную плоскость является квадратом [9], а чем меньше высота помещения, тем большие силы натяжения необходимо обеспечивать на тросах. Введем коэффициент усиления, равный отношению силы тяжести к силе обезвешивания. Зависимость коэффициента усиления от расстояния между схватом и плоскостью, образованной приводами при высоте помещения равной трём метрам, представлена на рисунке 32.

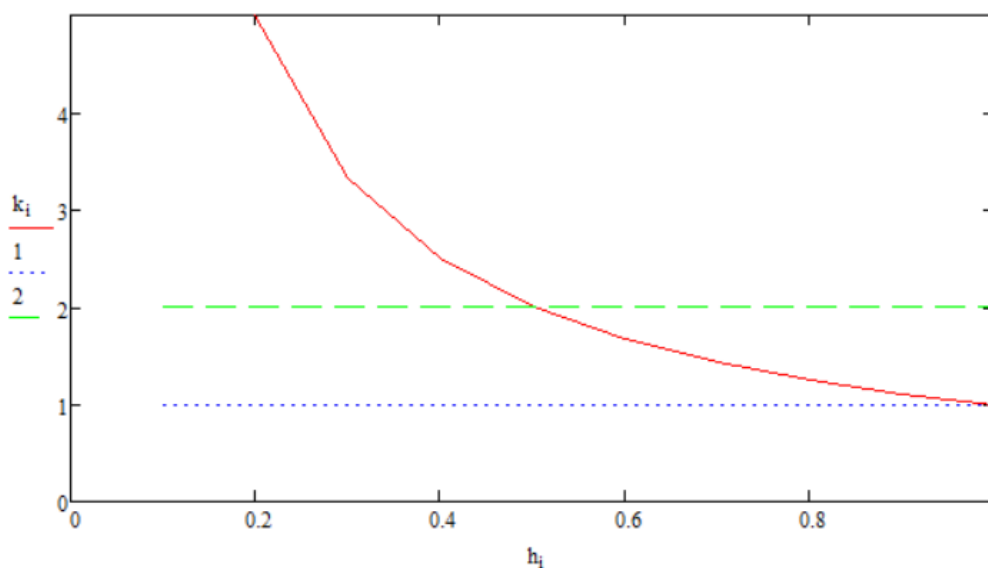


Рисунок 32 – Зависимость коэффициента усиления от высоты схвата

Из представленной зависимости видно, что при расположении схвата на расстоянии 20 см от плоскости приводов, возникает пятикратное увеличение

необходимой силы обезвешивания, а при расстоянии пол метра, возникает двукратное увеличение. При расстоянии 1 метр сила обезвешивания равна силе тяжести.

5 Расчёт параметров и подбор оборудования

Приведем пример технического задания на разработку манипулятора и выделим основные требования, предъявляемые к системе:

Разработать систему обезвешивания для пациентов реабилитационного центра на основе четырехзвенного манипулятора. Система должна обеспечивать компенсацию до 50ти килограмм от веса пациента. Предполагается, что система будет установлена в палате с представленными в таблице 2 характеристиками помещения.

Таблица 2 – Основные параметры

Параметр	Значение
Высота потолка (крепления привода)	3 м
Длина стен (расстояние между приводами)	4 м
Площадь помещения (квадрат 4x4)	16 м ²
Величина обезвешивания	50 кг
Рост пациента	1,8 м

Провести необходимые расчёты для конфигурации манипулятора с двумя, тремя и четырьмя звеньями. Основные задачи на данном этапе проектирования:

- Рассчитать длины тросов, для позиционирования схвата;
- Рассчитать силы натяжения тросов для компенсации веса;
- Рассчитать допустимое разрывное усилие;
- Конструктивные размеры и тип барабана приводного механизма;
- Мощность электродвигателя;
- Передаточное число редуктора.

Учитывая, что система предназначена для пациента ростом 1,8м и предполагая, что хват системы крепится к костюму на расстоянии 20 см над головой пациента, рабочая зона хвата будет находится в горизонтальной плоскости на высоте 2 метра от пола.

5.1 Расчёт длин тросов

Для начала рассмотрим кинематическую схему системы. В такой системе тело закреплено в одной точке тросами к четырем приводным механизмам, расположенным в крайних верхних точках рабочей зоны. В данной системе длина троса равна радиусу окружности с центром в точке привода. Кинематическая схема манипулятора представлена на рисунке 33.

Учитывая исходные данные, длина $a = 4\text{м}$ и высота $h = 3\text{м}$.

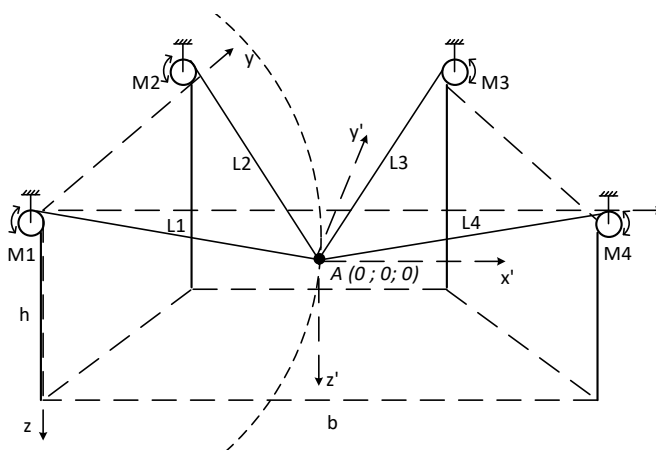


Рисунок 33 – Кинематическая схема манипулятора (длины тросов)

Обратная задача кинематики. По известному положению объекта в рабочей зоне, определить длины тросов:

$$\begin{cases} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 = L_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 = L_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 = L_3^2 \\ x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 = L_4^2 \end{cases}$$

Решим систему уравнений относительно L_1 и L_2

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \\ L_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2} \\ L_3 = \sqrt{x_3^2 + y_3^2 + z_3^2} \\ L_4 = \sqrt{x_4^2 + y_4^2 + z_4^2} \end{cases}$$

,где x_i, y_i, z_i – координаты приводов, относительно объекта в текущий момент времени;

L_1, L_2, L_3, L_4 – длина тросов;

5.2 Расчёт сил

Далее рассчитаем силы натяжения тросов (гибких звеньев), которые необходимо обеспечить для компенсации веса тела в текущем положении.

Т.к. высота пациента равна 1.8м, а высота крепежного механизма равна 0.2м, принимаем, что рабочая плоскость схвата манипулятора расположена на высоте 2м. Кинематическая схема представлена на рисунке 34.

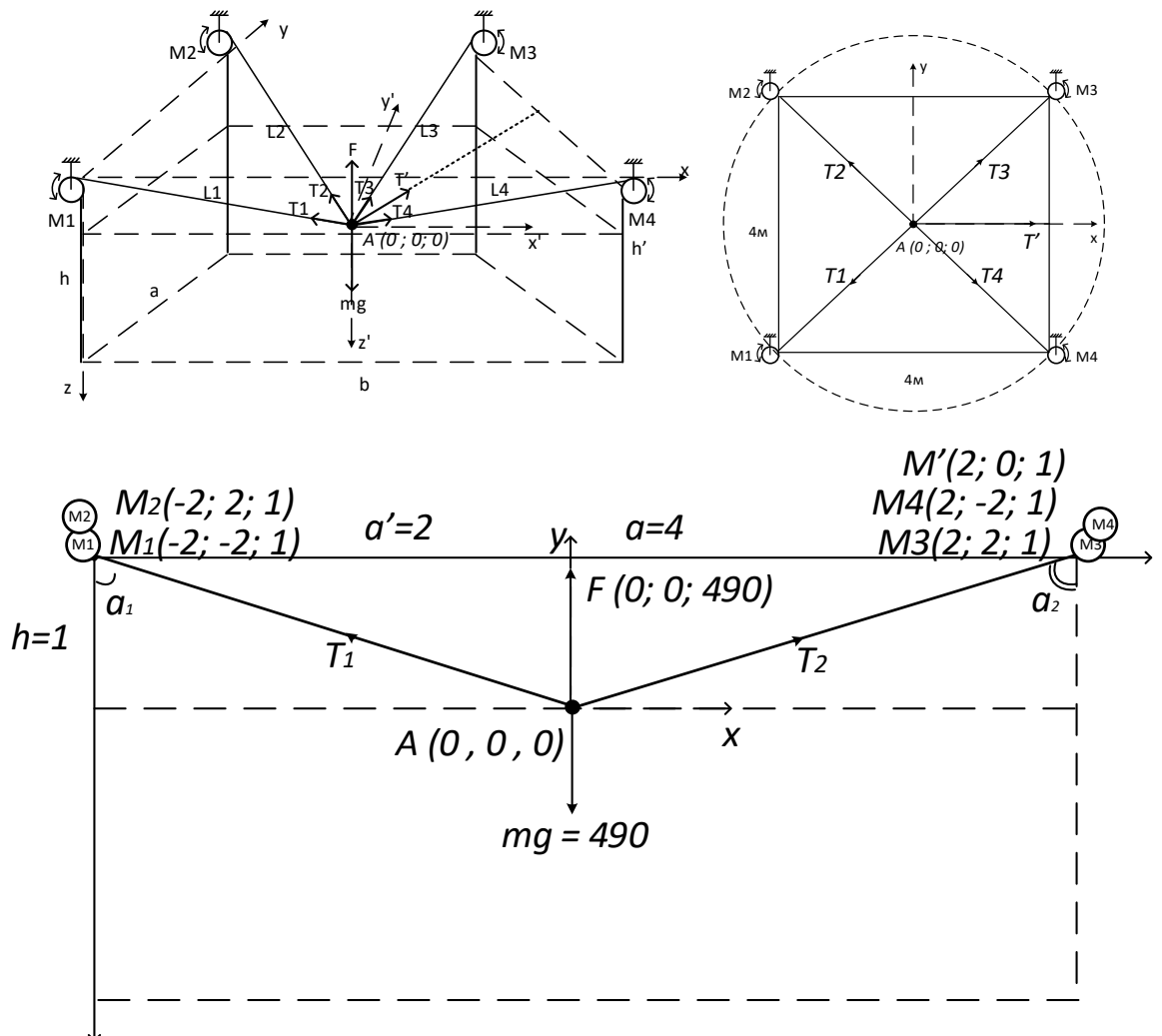


Рисунок 34 – Кинематическая схема манипулятора

\bar{F} – вектор силы, компенсирующей вес тела;

$\{\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{T}_3, \bar{T}_4\}$ – система векторов сил натяжения тросов;

h – высота помещения;

h' – высота рабочей плоскости;

a – ширина рабочей зоны.

Для того, что бы разложить вектор \bar{F} на четыре сонаправленных с тросами вектора, необходимо ввести мнимый вектор T' , лежащий в плоскости образованной векторами \bar{T}_3, \bar{T}_4 и сначала разложить вектор \bar{F} по базису $\{\bar{T}_1, \bar{T}_2, T'\}$, а затем разложить мнимый вектор T' по двум векторам \bar{T}_3, \bar{T}_4 .

Необходимо разложить вектор \bar{F} по базису $\{\bar{T}_1, \bar{T}_2, T'\}$, т.е. найти такие коэффициенты a, b, c при которых линейная комбинация базисных векторов $\{\bar{T}_1, \bar{T}_2, T'\}$, равна вектору \bar{F} .

$$\bar{F} = a\bar{T}_1 + b\bar{T}_2 + cT', \quad (1)$$

Запишем выражение (1) в векторной форме:

$$(0; 0; 490) = a * (-2; -2; 1) + b * (-2; 2; 1) + c * (2; 0; 1)$$

Что бы умножить вектор на число, необходимо каждую координату вектора умножить на число:

$$(0; 0; 490) = (-2a; -2a; a) + (-2b; 2b; b) + (2c; 0; c)$$

Просуммируем вектора в правой части уравнения, для этого просуммируем соответствующие координаты:

$$(0; 0; 490) = (-2a - 2b + 2c; -2a + 2b + 0; a + b + c)$$

Если два вектора равны, то равны и их соответствующие координаты, а значит можно получить следующую систему выражений:

$$\begin{cases} -2a - 2b + 2c = 0 \\ -2a + 2b = 0 \\ a + b + c = 490 \end{cases}$$

Решим систему уравнений:

$$a = 122,5; b = 122,5; c = 245$$

Не трудно догадаться, что при разложении вектора T' с коэффициентом 245 на вектора \bar{T}_3, \bar{T}_4 , получим коэффициент: 122.5.

Тогда искомое разложение:

$$\bar{F} = 122.5 * \bar{T}_1 + 122.5 * \bar{T}_2 + 122.5 * \bar{T}_3 + 122.5 * \bar{T}_4,$$

Из полученных выражений можно получить силы натяжения тросов F_1, F_2, F_3, F_4 .

В центре рабочей области, нагрузка на всех тросах равномерна и равна 122.5Н. При смещении схвата манипулятора к одному из приводов, сила натяжения на нём будет приближаться к 490Н (компенсирующей силе), на остальных приводах к нулю. Из данных расчётов можно сделать вывод, что приводной лебедочный механизм должен обеспечивать силу натяжения не менее 490Н.

5.3 Выбор лебедочных механизмов

В качестве приводного элемента манипулятора используется однобарабанная грузоподъемная реверсивная лебедка с электродвигательным приводом и червячным редуктором [10]. Кинематическая схема лебедки в общем случае представлена на рисунке 35.

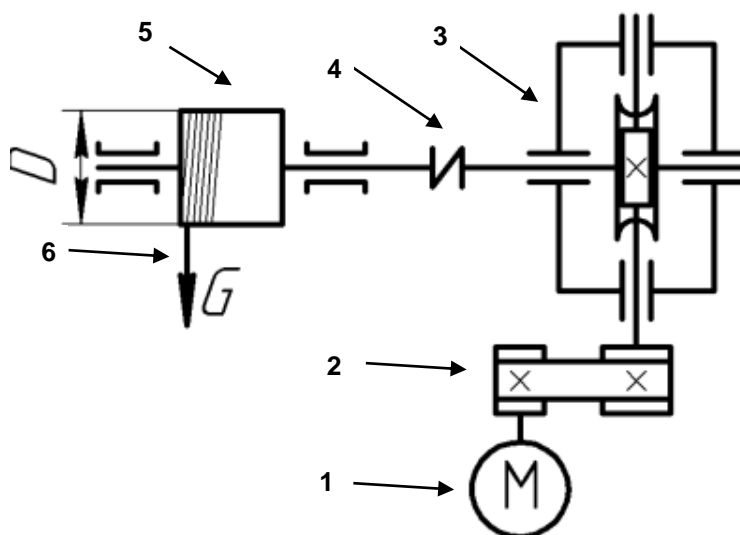


Рисунок 35 – Кинематическая схема лебедки

На рисунке 28:

1. Электродвигатель;
2. Ременная передача;
3. Червячный редуктор;
4. Зубчатая муфта;
5. Барабан;
6. Трос для крепления хвата;
7. Выносная подшипниковая опора.

Лебедки обычно применяются в различных грузоподъемных машинах, таких как строительный подъемник, башенный или стреловой кран и т.д. При расчёте лебедки для применения в таких машинах, актуальной задачей является определение схемы полиспаста и его кратности, которая определяется по формуле: $u = \frac{k_B}{a}$, где k_B – число ветвей каната, на которых подвешено грузозахватное устройство; a – число ветвей каната, наматываемых на барабан.

Основные схемы канатных механизмов представлены на рисунке 36.

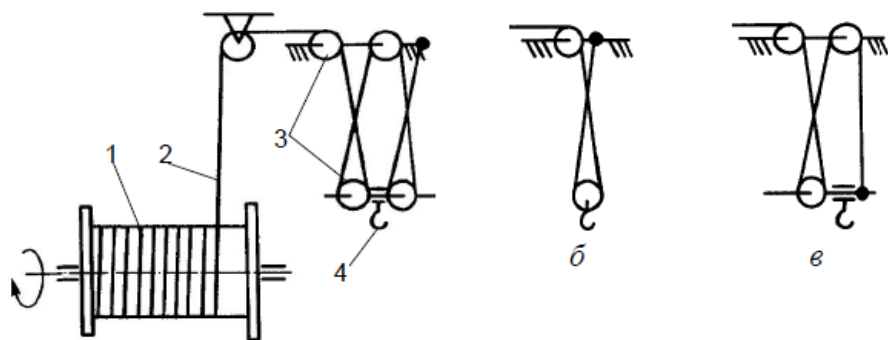


Рисунок 36 – Схемы канатных механизмов:

1 – барабан; 2 – канат; 3 – система блоков (полиспаст); 4 – схват;

Так как в манипуляторе отсутствует система блоков, этот пункт можно пропустить, приняв кратность полиспаста $u = 1$ и КПД системы $\eta = 0,98$.

5.3.1 Определение параметров и выбор троса (каната)

Канат для лебедки подбирается по допускаемому разрывному усилию, которое может быть вычислено по формуле:

$$S_p > k_3 * S_k,$$

где S_p – допускаемое разрывное усилие в канате, Н;

k_3 – коэффициент запаса прочности каната на разрыв (от 3 до 9). Зависит от режима работы механизма и определяется в ИСО 4301/1;

S_k – максимальное рабочее усилие в канате, Н.

Максимальное рабочее усилие в канате, навиваемом на барабан при подъеме груза, определяется следующим образом:

$$S_k = \frac{(m*q)g}{a*u*\eta} = \frac{540}{0,98} = 551,$$

где m – масса поднимаемого груза, кг;

q – масса схвата, кг;

g – уск.св.падения, м/с²

Необходимый диаметр каната и все его данные можно определить по рассчитанному разрывному усилию каната по ГОСТ 2688–80.

По рассчитанному допускаемому разрывному усилию в канате выбран стальной канат двойной свивки диаметром 3мм типа ЛК-Р по ГОСТ 2688–80.

5.3.2 Определение параметров барабана

Барабаны лебедок грузоподъемных машин выполняются сварными или литыми [11]. Их поверхность может быть гладкой для укладки каната в несколько слоев или с канавками (нарезной) для укладки каната в один слой, как показано на рисунке 37.

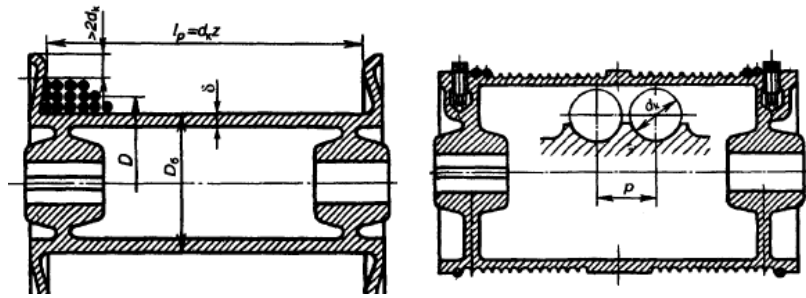


Рисунок 37 – Типы барабанов (гладкий слева, с канавками справа)

Число слоев укладки каната на барабан ориентировочно определено в таблице 3.

Таблица 3 – Число слоев укладки каната на барабан лебедки

Длина каната, наматываемого на барабан (L), м	Число слоев укладки (m)
до 50	1
50...125	2
125...200	3

Очевидно, что в разрабатываемой системе длина каната не будет превышать 50м, а значит достаточно одного слоя укладки троса. Длина каната, наматываемого на барабан, равна максимальной расстоянию между двумя противоположными точками рабочей области манипулятора.

$$L = 6,4 \text{ м}$$

Минимальный диаметр барабана определяется

$$D_6 > h_1 * d = 11,2 * 5,6 = 62,72; D_6 = 80 \text{ мм}$$

где h_1 – коэффициент выбора диаметра, Н (по ГОСТ ИСО 4301/1);
 d – диаметр каната.

Количество рабочих витков в одном слое навивки определяется по формуле:

$$Z_p = \frac{1000 * L}{\pi * m * (m * d + D_6) * \varphi} = \frac{6400}{3,14 * 1 * (1 * 5,6 + 80) * 1} = 24$$

где φ – коэффициент неплотности навивки каната (для нарезных $\varphi=1$).

Общее число витков – Z , определяется по формуле

$$Z = Z_p + Z_3 + Z_k = 24 + 2 + 4 = 30$$

где Z_p – число запасных витков;

Z_k – число витков каната находящихся под зажимным устройством.

Определяем основные конструктивные размеры барабана. Длина барабана с нарезкой вычисляется по формуле:

$$L_6 = Z * t = 30 * 7 = 210, \text{ мм}$$

Шаг нарезки – t , определяется по формуле $t = d + (2...3) = 7, \text{ мм}$.

Конструктивно соотношение между длиной барабана и его диаметром должно находиться в пределах $0.5 < \frac{L_6}{D_6} < 3.0$

$$0.5 < \frac{210}{80} = 2.6 < 3.0$$

5.4 Расчёт мощности двигателя

Необходимую мощность двигателя можно определить по максимальному рабочему усилию в канате S_k , скорости навивки каната на барабан v_k и к.п.д. $\eta = 0,98$. Скорость навивки каната на барабан определяется по формуле:

$$v_k = v_{гр} * u = 1 \text{ мс}$$

где $v_{гр} = 1$ – заданная скорость подъема груза, м/с

Необходимую мощность двигателя можно найти по формуле

$$N_{дв} = \frac{S_k * v_k}{1000 * \eta} = \frac{545}{980} = 0.55 \text{ кВт} = 550 \text{ Вт}$$

5.5 Расчёт передаточного числа редуктора

Передаточное число редуктора определяется следующим выражением

$$i_p = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{б}}} = \frac{3000}{223,2} = 13,4,$$

где $n_{\text{дв}}$ – частота вращения вала электродвигателя, мин⁻¹;

$n_{\text{б}}$ – частота вращения барабана, мин⁻¹.

Частота вращения барабана определяется по среднему диаметру навивки каната.

$$n_{\text{б}} = \frac{1000 \cdot 60 \cdot v_k}{\pi \cdot [D_{\text{б}} + m \cdot d \cdot (2 \cdot m - 1)]} = \frac{60000}{3,14 \cdot [80 + 1 \cdot 5,6]} = 223,2, \text{ об/мин}$$

Подбор редуктора осуществляем по требуемому передаточному числу, частоте вращения вала электродвигателя n , режиму работы и мощности на быстроходном валу редуктора. При выборе редукторов для механизмов подъема значение мощности на быстроходном валу редуктора определяется:

$$N_p \geq k \cdot N_{\text{дв}} = 1,1 \cdot 0,55 = 0,605, \text{ кВт}$$

где $N_{\text{дв}}$ – номинальное значение мощности выбранного двигателя;

k – коэффициент нагрузки, значения k в зависимости от режима работы составляют: $k=1,5$ (легкий); $k=1,3$ (средний); $k=1,1$ (тяжелый). Группа режима работы механизма определяется по ГОСТ ИСО 4301/1.

5.6 Выбор электропривода

На основе выполненных расчётов был подобран мотор – редуктор червячного типа серии VF44, представленный на рисунке 38, технические характеристики которого, представлены в таблице 4. Мотор-редуктор VF44-44-MS-80/0,55/1500 производится на базе одноступенчатого червячного редуктора и трехфазного двигателя мощностью 0,55 кВт.

Таблица 4 – Число слоев укладки каната на барабан лебедки

Мощность, кВт	Частота вращения выходного вала, об/мин	Крутящий момент, Нм	Передат. число	Номинальная радиальная нагрузка, Н	Коэффициент безопасности
0.55	281	16	10	1210	1.4



Рисунок 38 – Мотор-редуктора VF44-44-MS-80/0,55/1500

6 Концепция стартап-проекта

6.1 Наименование

Идея проекта заключается в разработке и создании роботизированного комплекса – манипулятора для перемещения и компенсации веса пациента при проведении медицинской реабилитации.

Цель проекта – разработка концепции стартап – проекта для оценки коммерческого потенциала продукта и определение основных шагов для вывода продукта на российский рынок технических реабилитационных средств (РТС).

Так как проект находится на раннем этапе развития – разработки прототипа для уточнения модели и оптимизации системы управления, название стартап – проекта сформировано в общем виде: «Разработка автоматизированной системы обезвешивания на гибком подвесе». На данном этапе продукт не нуждается в коммерческом названии.

6.2 Описание продукта как результат НИР

Система предназначена для проведения реабилитационных мероприятий и обеспечения бытовой мобильности пациентам с ограниченными локомоторными возможностями. Она может быть применена при всех заболеваниях с двигательными нарушениями, например, нарушениях ходьбы вследствие инсульта, травмах головного и спинного мозга, при рассеянном склерозе, при спинальных травмах, демиелинизирующих заболеваниях и паркинсонизме [15].

Комплекс компенсирует полностью или часть массы тела человека в движении, позволяя снять нагрузку с позвоночника и нижних конечностей пациентов, поэтому он может быть включен в комплекс реабилитационных мероприятий в рамках механотерапии. Механотерапия - комплекс упражнений с применением механических, или работающих на основе электропривода аппаратов с целью облегчения движений и увеличения подвижности в суставах.

Комплекс предназначен для использования в палатах размещения пациентов и в специализированных спортивных залах медицинских учреждений восстановительного профиля, реабилитационных центров, кабинетов ЛФК. Комплекс представлен на рисунке 39.

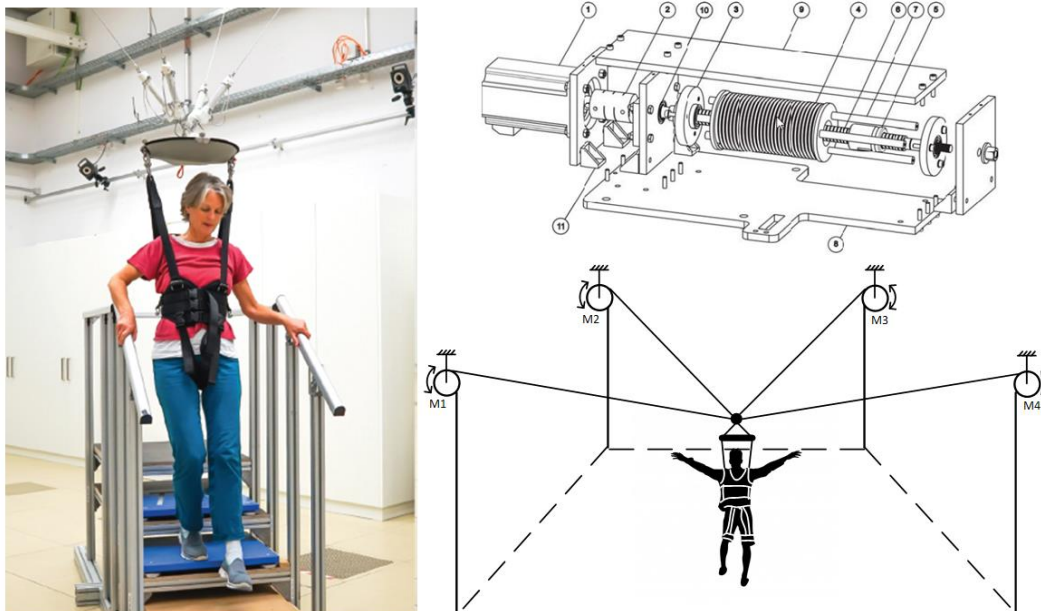


Рисунок 39 – Комплекс для перемещения и разгрузки веса тела пациента.

Манипулятор подходит для применения в следующих типах реабилитации:

1. Неврологическая реабилитация (ДЦП, ЧМТ, инсульт, заболевания нервной системы)
2. Травматологической реабилитации (спинальная травма, состояние после длительной иммобилизации обширных травм нижних конечностей).
3. Ортопедической реабилитации (состояние после реплантации или исправления деформаций нижних конечностей).

Назначение комплекса:

1. Обеспечить пациенту мобильность в рамках помещения.
2. Сопровождать в процессе выполнения комплекса реабилитационных упражнений.
3. Совместить несколько систем реабилитации в одном помещении, например, брусья и беговую дорожку и т.д.

4. Сократить персонал реабилитационных медицинских организаций, предотвратить травмы спины сотрудников.

5. Позволить начать реабилитационные мероприятия в более ранние сроки, чем традиционные методы, тем самым ускорить её и повысить эффективность.

Функциональные возможности:

1. Компенсация веса пациента в движении.
2. Перемещение пациента.
2. Предотвращение падений.
3. Подъём пациента из положения лёжа/сидя.
4. Предотвращение заваливания на одну из сторон.

Альтернативные области применения:

1. Амбулаторная / домашняя реабилитация.
2. Уход за престарелыми и инвалидами.
3. Научно-исследовательские цели (реабилитация, испытания роботов, экзоскелетов, космических аппаратов).
4. Спорт высоких достижений (динамическое изменение веса снаряда или веса атлета в прыжках в высоту, длину и т.д.).
5. Развлечения (расширение возможностей виртуальной реальности, виртуальные стены, имитация полёта, имитация взрывной волны и т.д.).

Потребительские качества:

1. Самостоятельность и свобода перемещений.
2. Преодоление страха падения.
3. Вовлеченность в процесс восстановления.

6.3 Интеллектуальная собственность

В рамках мероприятий по защите интеллектуальной собственности планируется зарегистрировать прикладное программное обеспечение системы управления комплекса в качестве программы для ЭВМ, а также получить патент на полезную модель и промышленный образец.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ не предусмотрено законом как обязательное, но оно обеспечивает правообладателю ряд преимуществ:

1. Авторские и смежные права на программное обеспечение обеспечиваются в полном объеме.
2. Не возникает проблем с определением и идентификацией авторства.
3. Существует легитимная возможность привлечения нарушителя к ответственности.

Промышленный образец – это так называемый индустриальный или промышленный дизайн.

Полезная модель – устройство, реализующее уже известное всем изобретение по-новому с технической точки зрения. Патент на полезную модель обеспечивает защиту сроком на 10 лет. При этом полезная модель имеет абсолютно тот же уровень защиты, как и полноценное изобретение, при меньших требованиях к изобретательскому уровню и новизне. В РФ изобретение – это решение в той или иной области, которое относится к способу или продукту.

На данный момент выполнен патентный поиск и выполняется подготовка материалов для подачи заявки на получение патента (описание, формулы, чертежи, реферат).

6.4 Объем и емкость рынка

6.4.1 Производители

На рынке реабилитационной индустрии работает около 270 компаний, из них 71 протезно-ортопедических предприятий находится в ведении Минтруда, остальные — частные. Протезно-ортопедические компании Минтруда имеют совокупную выручку 8 млрд. рублей и среднюю рентабельность 7,4%. [16]

Компании можно разделить на три категории по типу товаров:

1. Ассистивные технологии, помогающие людям поддерживать на прежнем уровне или повысить функциональные возможности и автономность: слуховые аппараты, инвалидные кресла, очки, протезы, органайзеры для таблеток и средства напоминания.

2. Самое развитое направление – оборудование для медицинской реабилитации, разнообразные тренажеры, системы дополненной виртуальной реальности. К этой категории относится разрабатываемый стартап-проект.

3. Наименее востребованная категория – технологии, направленные на обеспечение доступности окружающей среды, объектов инфраструктуры, транспорта, общепита, магазинов, аптек.

6.4.2 Структура и сегментация рынка

В 2016 году Минпромторг России сформировал стратегию развития производства промышленной продукции реабилитационной направленности до 2025 года, в рамках которой был выполнен анализ структуры рынка, а его объем оценен в 29 млрд. рублей. С учётом более позднего анализа объема рынка от «Аура-тех» (43 млрд. рублей), денежные показатели были пересчитаны [15].

Структура рынка продукции реабилитационной индустрии (в денежном выражении) по функциональному назначению представлены в таблице 5 (процентное соотношение на 2015 год, денежные показатели на 2021 год.).

Таблица 5 – структура рынка по типу вспомогательных средств (ВС)

Сегмент	Часть рынка, %	Объем рынка, млрд.руб.
ВС для лиц с нарушениями мобильности	36	15,5
ВС для лиц с нарушениями зрения	26	11,2
ВС для лиц с нарушениями слуха	17	7,31
ВС для лиц с нарушениями речи	2	0,86
ВС для лиц с нарушениями ф-й выделения	13	5,59
Архитектурно-планировочные приспособления	5	2,15

В сегменте вспомогательных средств для инвалидов и лиц с нарушениями мобильности можно выделить следующие основные и наиболее крупные категории товаров, представленные в таблице 6.

Таблица 6 – категории товаров в сегменте ВС для лиц с нарушениями мобильности

Категории	Часть сегмента, %	Объем рынка, млрд. руб.
Протезы (нижних конечностей)	43,2 (40)	6,7 (6,2)
Кресла коляски (с ручным приводом)	28,3 (26)	4,4 (4)
Средства реабилитации, предназначенные для облегчения перемещения	19	2,9

6.4.3 Структура и сегментация мирового рынка

Мировой рынок реабилитационных товаров для инвалидов и маломобильных групп населения по состоянию на 2015 год оценивался в 108,5

млрд долларов. Большую часть (около 80 %) мирового рынка реабилитационных товаров составляют медицинские изделия.

Основные сегменты мирового рынка реабилитационных товаров по состоянию на 2015 год имели объемы, представленные в таблице 7.

Таблица 7 – структура мирового рынка по типу вспомогательных средств (ВС)

Сегмент	Часть рынка, %	Объем рынка, млрд.долларов.
ВС для лиц с нарушениями мобильности	37,7	40,9
ВС для лиц с нарушениями зрения	26,8	29
ВС для лиц с нарушениями слуха	12,3	13,4
ВС для лиц с нарушениями речи	1,1	1,2
Архитектурно-планировочные приспособления	22,1	24

В сегменте вспомогательных средств для инвалидов и лиц с нарушениями мобильности можно выделить основные и наиболее крупные категории товаров, представленные в таблице 8.

Таблица 8 – категории товаров в сегменте ВС для лиц с нарушениями мобильности

Категории	Часть сегмента, %	Объем рынка, млрд. руб.
Протезы	71	29
Средства для облегчения перемещения	12	5
Средства информационной реабилитации	12	5
Технологии телеприсутствия	5	2

6.4.4 Текущее состояние отрасли производства

Общий объем внутреннего производства реабилитационной продукции в России за 2015 г. достигал 11,8 млрд руб [16].

Отрасль производства товаров для инвалидов и маломобильных групп населения в РФ показывает переменную динамику, связанную с изменениями в государственной поддержке, а также финансовым кризисом, представленную на рисунке 40.

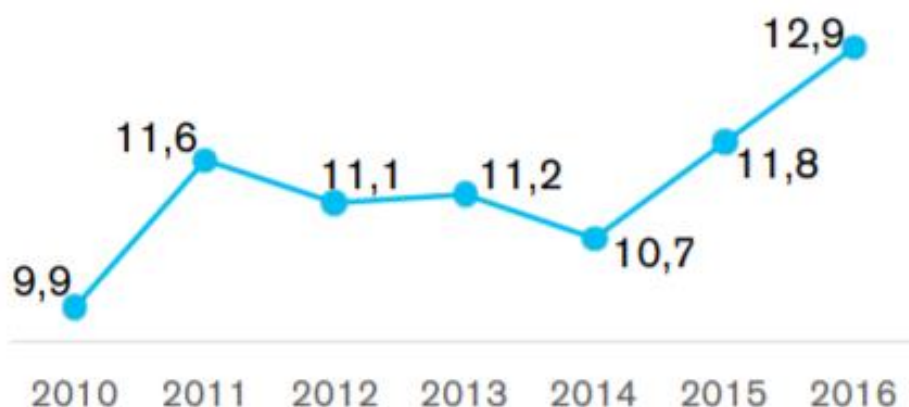


Рисунок 40 – Динамика объема внутреннего производства, млрд. руб.

Динамика объема экспорта также имеет переменный характер по тем же причинам и представлена на рисунке 41.

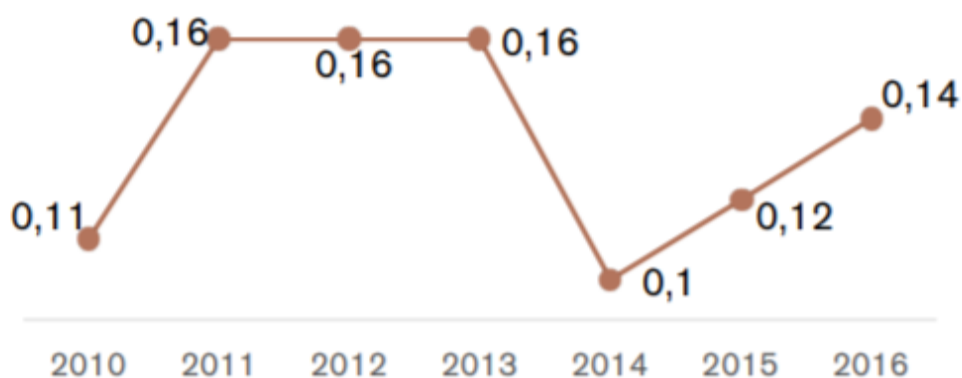


Рисунок 41 – Динамика объема экспорта, млрд. руб.

6.4.5 Объем и ёмкость рынка

В 2015 году была основана национальная ассоциация участников рынка ассистивных технологий «АУРА-Тех», которая в 2018 году провела масштабное исследование с целью оценки объема рынка реабилитационных товаров в России.

По результатам исследования, на 2018 год объем рынка реабилитационных товаров оценен в 40 млрд.руб. и спрогнозирован рост рынка до 48млрд. руб к 2025 году. А ёмкость рынка была оценена в 100 млрд. руб.

При этом доля импорта на рынке реабилитационной продукции в целом неуклонно снижается: если несколько лет назад его объем составлял более 90%, то к 2018 году, по экспертным оценкам, доля продукции российского производства колеблется около 30%, а к 2025 году ее планируется довести до 52%.

Так как по прогнозу к 2025 году объем рынка должен составить 48млрд. рублей, предполагаемый объем рынка в 2021 году составит 43 млрд. рублей.

Учитывая приведенные показатели объема и структуры рынка, можно оценить предполагаемый объем рынка доступного для разрабатываемого устройства в 1.5 – 3 млрд. рублей.

6.5 Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли

Отрасль производства реабилитационных товаров для инвалидов и маломобильных групп населения в РФ обладает большим коммерческим потенциалом, т.к. наблюдается постоянный рост объема рынка. А в связи с трендом на импортозамещение, большими темпами снижается доля импорта товаров зарубежного производства.

Государство нацелено на развитие отрасли. С 2015 года создаются ассоциации, регламенты, попытки стандартизации отрасли и принимаются меры поддержки, например с 2017 по 2019 год из бюджета выделено было 1,5 млрд руб. на поддержку компаний в основном на разработку новых технологий и

организацию производства, а с сентября 2020 года производители технических средств реабилитации (ТСР) снова могут рассчитывать на государственную поддержку, будучи включенными в соответствующий перечень Минпромторга России.

Учитывая существующий тренд на роботизацию и цифровизацию, ожидается рост спроса на роботизированные системы реабилитации с интеллектуальными функциями, с возможностью сбора телеметрических данных и предоставлением инструментов для их анализа. Для этого системы будут дополняться носимыми устройствами интернета вещей, а также интегрироваться в интернет медицинских вещей (IoMT).

6.6 Планируемая стоимость продукта

Состав и время выполнения работ с назначением ответственных исполнителей представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Состав и время выполнения работ

№	Работы	Состав работ	Время	Исполнитель
1	Сборка системы управления	Прошивка микроконтроллеров, формирование конфигурации под параметры заказа, сборка элементов печатной платы, подключение датчиков	60 мин.	Инженер-электронщик
2	Сборка 4 приводных модулей	Сборка, подключение, тестирование и упаковка модуля (редуктор, двигатель, барабан, трос, энкодер)	60 мин.	Сборщик 1
3	Сборка силовой части	Подключение проводки, сборка силового шкафа (автоматы, УЗО)	60 мин.	Сборщик 2

Определим ежемесячный и годовой объемы производства:

- время сборки одного комплекса составляет 60 минут;
- длительность рабочего дня: 8 часов (480 минут), одна смена;
- ежемесячный объем производства: 150 - 180 комплексов (в зависимости от количества рабочих дней в месяце) при штате из 3 сотрудников: 2 сборщика и 1 инженер-электронщика;
- количество рабочих дней в 2021 году: 247 дней;
- годовой объем производства на 2021 год: 1976 комплексов.

Расчет себестоимости продукта проведем, исходя из расходов на разрабатываемый продукт. Используем следующую группировку по статьям затрат:

- материальные затраты;
- затраты на оборудование;
- заработная плата;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

6.6.1 Материальные затраты

Стоимость материальных затрат необходимых для изготовления одного комплекса для помещения $4 \times 5 = 20 \text{ м}^2$ приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Стоимость материальных затрат

Наименование	Ед.изм.	Кол-во	Цена за ед., руб.	Z_m , руб.
ДПТ	шт	4	2000	8000
Редуктор	шт	4	3200	12800
Барaban	шт	4	500	2000
Энкодер	шт	4	960	3840
Драйвер ДПТ	шт	4	150	600
Микроконтроллер STM32	шт	4	240	960
БП 24В, 6.5А, 156Вт	шт	4	1550	6200
Стабилизатор напряжения	шт	4	100	400
Соединительные муфты	шт	8	100	800
Трос стальной 3мм	м	20	17.5	350
Ролики направляющие	шт	4	300	1200
Лист стальной 3мм	м^2	0.04	600	600
Профиль угловой 50мм	м	0.40	300	120
Силовой шкаф	шт	1	300	300
Провод 2 х 1.5мм	м	30	25	750
Автомат-й выключатель	шт	5	200	1000
Костюм с карабином	шт	1	2000	2000
Итого				41920

6.6.2 Затраты на оборудование

Стоимость оборудования, используемого при производстве комплекса, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений. Затраты на используемое оборудования приведены в таблице 11.

Амортизационные отчисления на оборудование, определяются по формуле:

$$A_{\text{в год}} = \frac{C}{T}, \quad (1)$$

где C – стоимость ед. оборудования, тыс. руб., T – срок эксплуатации, лет

Таблица 11 – Затраты на используемое оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во	Цена ед., тыс. руб.	Σ стоимость, тыс. руб.	Т, лет	А _{в год} тыс. руб.	А _{в месяц} тыс. руб.
1	Паяльная станция	1	10	10	5	2	0,16
2	Набор инструментов для монтажа	1	5	5	5	1	0,08
3	Станок сверлильный	1	11	11	5	2,2	3,57
4	3D принтер	1	28	28	5	5,6	0,46
Итого амортизация в месяц							4,27

6.6.3 Контрагентные расходы

Расходы необходимые для изготовления одного комплекса для помещения длиной 4м и шириной 5м, связанные с выполнением работ сторонними организациями приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Контрагентные расходы

№	Наименование услуги	Стоимость за единицу	Количество	Стоимость работ, руб.
1	Пошив костюма для фиксации пациента	1500	1	1500
2	Изготовление барабана	200	4	200
3	Изготовление печатной платы	500	1	500
Итого				2200

Для запуска производства также необходимо осуществить единовременные выплаты в размере:

- Изготовление выкройки эргономичного костюма – 25 000 руб.
- Изготовление 3D модели для печати муфт – 5 000 руб.
- Организация рабочего места (сборочного цеха) – 10 000 руб.

Общий размер единовременных выплат составляет 40 000 руб.

6.6.4 Заработная плата работников

Заработная плата работников складывается из основной и дополнительной заработной платы.

Затраты на дополнительную заработную плату исполнителей учитывают 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 ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп.}} = K_{\text{доп.}} \cdot З_{\text{осн.}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{доп.}} = 0,15$ – коэффициент дополнительной заработной платы

Страховые взносы во внебюджетные фонды отражают 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 страховых взносов во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$З_{\text{внеб.}} = K_{\text{внеб.}} \cdot (З_{\text{осн.}} + З_{\text{доп.}}), \quad (3)$$

где $K_{\text{внеб.}} = 30,2\%$ – Коэффициент страховых взносов во внебюджетные фонды

Суммарные затраты на заработную плату сборщиков приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Расчет основной заработной платы

	Сборщик 1	Сборщик 2	Инженер электронщик
Основная заработная плата (оклад), руб.	25 000	25 000	30 000
Дополнительная заработная плата, руб.	3 750	3 750	4 500
Величина страховых взносов во внебюджетные фонды (Коэфф = 30.2%)	8 682,5	8 682,5	10 419
Итого, в месяц, руб.	37 432,5	37 432,5	44 919
Итого, руб.	119 784		

Примем накладные расходы в размере 30% от ФОТ – 35 935,2 руб.

Расчетная величина себестоимости изготовления одного комплекса при ежемесячном объеме производства 150 единиц приведена в таблице 14.

Таблица 14 – Себестоимость изготовления одного комплекса

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальны затраты	41920
2. Затраты на оборудование	29
3. Затраты по заработной плате	1038
4. Контрагентные расходы	2200
Итого	45187
Итого с учётом накладных расходов в ~15% (риски)	52000

Расчетная величина себестоимости изготовления одного комплекса при ежемесячном объеме производства 50 единиц приведена в таблице 15.

Таблица 15 – Себестоимость изготовления одного комплекса

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальны затраты	41920
2. Затраты на оборудование	90
3. Затраты по заработной плате	3120
4. Контрагентные расходы	2200
Итого	47730
Итого с учётом накладных расходов в ~15% (риски)	54500

Таким образом планируемая стоимость конечного продукта будет составлять – 71 000 рублей, при закладываемой норме прибыли в 30%.

6.7 Конкурентные преимущества создаваемого продукта, сравнение технико-экономических характеристик с отечественными и мировыми аналогами

Разрабатываемая система обладает следующими конкурентными преимуществами:

- высокая скорость изготовления и введения в эксплуатацию (монтажа);
- низкая себестоимость по сравнению с другими системами;
- простота технического обслуживания и восстановления в случае выхода из строя системы;
- повышенная надёжность (высокая отказоустойчивость);
- большая площадь рабочей зоны (всё помещение);

На российском рынке представлена только одна аналогичная система российского производства и две аналогичные системы зарубежного производства.

1. Vector Bioness – система зарубежного производства с использованием мобильного робота и монорельса. Vector Bioness импортируется дистрибьютором в РФ и уже эксплуатируется в одном из реабилитационных центров Москвы. Vector Bioness представлен на рисунке 42.



Рисунок 42 – реабилитационная система Vector Bioness

2. Ruzen – система зарубежного производства с использованием двух приводных блоков и 2 направляющих рельс. Система импортируется дистрибьютором в РФ, но открытых источников нет информации о реальных применениях системы в России. Ruzen представлена на рисунке 43.



Рисунок 43 – реабилитационная система Ruzen

3. Орторент ПРМ01 – система российского производства с мобильного робота и монорельса. Орторент ПРМ01 представлена на рисунке 44.



Рисунок 44 – реабилитационная система Орторент ПРМ01

В таблице 16 представлен сравнительный анализ разрабатываемой системы с существующими аналогами по основным характеристикам.

Таблица 16 – Сравнение с аналогами

	Ryzen	Vector Bioness	Орторент ПРМ01	Разрабатываемый комплекс
Типы конструкции	4 тросовый рельсовый	Мобильный робот и монорельс	Мобильный робот и монорельс	4 тросовый безрельсовый
Площадь рабочей зоны	Площадь помещения за вычетом 15% на рельсы	Перемещение только вдоль монорельса	Перемещение только вдоль монорельса	Вся площадь помещения
Потребляемая Мощность, Вт	700	500	500	1400
IP	65	65	65	65
Стоимость, руб.	?	?	2950000	71000

Проанализировав основные параметры предлагаемых существующих на рынке реабилитационных систем с компенсацией веса, можно заключить следующее:

- к преимуществам предлагаемой разработки можно отнести высокую скорость изготовления и надёжность при эксплуатации за счёт модульности системы, отсутствия сложных в изготовлении корпуса мобильного робота, отсутствия тяжелых потолочных рельс. По этим же причинам достигается простота технического обслуживания;

- кроме того, разрабатываемая система позволяет покрыть большую площадь помещения и обеспечить полную свободу перемещения в помещении в отличии от монорельсовых систем, где перемещение выполняется только по маршруту, определенному конструкцией;

- к недостаткам предлагаемой конструкции можно отнести высокое энергопотребление по сравнению с аналогами, но уровень потребления энергии в целом не велик, что позволяет пренебречь этим параметром.

Необходимо также учитывать, что производитель «Орторент» известен потребителю и имеет большой ассортимент товаров для оснащения реабилитационных центров и залов ЛФК.

6.8 Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта

Основными целевыми сегментами рынка являются:

- медицинские учреждения с реабилитационным отделением;
- реабилитационные центры;
- кабинеты ЛФК;
- специализированные спортивные залы.

Типичная ситуация осознания потребности:

- модернизация материально - технического оснащения центра;
- потребность в расширении ассортимента оказываемых услуг реабилитационной направленности;
- PR продвижение медицинского учреждения с целью акцентировать внимание потребителя на уникальности оснащения центра, повышения статуса и инновационного потенциала;
- при разработке проекта нового реабилитационного зала.

Типичная ситуация покупки: отдел финансовых закупок, а также специалист в области материально-технического оснащения медицинского учреждения изучают возможности предлагаемого продукта, обсуждают конкретные модификации изделия и в случае готовности к покупке направляют письмо-запрос для получения прайс-листа и технической консультации. Когда все детали будут утверждены, заказчик направляет официальное письмо с намерением о покупке продукта.

Типичная ситуация потребления: установка комплекса на объекте заказчика полностью удовлетворяет его потребности, выполняя все ожидаемые функции. Установленная система закрывает соответствующий пункт стандарта оснащенности реабилитационных центров и проходит проверку контролирующим органом.

В таблице 17 представлены качественные характеристики основной потребительской аудитории.

Таблица 17 – Качественные характеристики аудитории B2B.

Производственно-экономические критерии	
Отрасль предприятия-потребителя	-Медицинские учреждения восстановительной и реабилитационной направленности; - Реабилитационные центры; - Кабинеты ЛФК.
Размер предприятия	Малый бизнес. Менее 100 человек
Критерии запроса	
Можем ли обеспечить решение специфических проблем заказчика в области закупки	Да
Формы взаимоотношений с поставщиком	Долгосрочное сотрудничество
Мотивация в сфере B2B	
Периодичность покупки	Разовая, редко
Емкость рынка	Малая группа
Бизнес-мотив	Повышение эффективности, повышение качества услуг, формирование уникального предложения,

6.9 Бизнес-модель проекта. Производственный план. План продаж.

Разрабатывая план продаж, следует рассчитать период окупаемости инвестиций. Учитывая годовой объем производства в 1800 штук и закладываемую норму прибыли в 30% определим период окупаемости проекта. Бюджет проекта представлен в таблице 18.

Таблица 18 – Бюджет проекта

Наименование статьи	Сумма, руб.
Размер стартовых капиталовложений (единовременные выплаты, накладные расходы в год, стоимость оборудования)	94 000
Постоянные расходы в месяц (ФОТ, накладные расходы, амортизационные отчисления в месяц)	160 300
Переменные издержки на единицу продукции	41 920
Цена единицы изделия	71 000
Выручка, в год	127 800 000
Прибыль до налогообложения	38 144 000
Прибыль после налогообложения	30 515 000

Тогда период окупаемости проекта

$$T = 94\,000 / 30\,515\,000 = 0,003 \text{ года} = 1 \text{ день}$$

Исходя из полученных данных определим точку безубыточности как минимальное количество комплексов, которое необходимо производить в месяц чтобы покрыть расходы.

Точка безубыточности определяется как отношение постоянных расходов на разницу цены единицы товара и переменных расходов на единицу товара.

$$\text{Точка безубыточности} = 160\,300 / (71\,000 - 41\,920) = 5.5 \text{ штук.}$$

$$\text{Точка безубыточности} = 6 * 71\,000 = 426\,000 \text{ рублей.}$$

В качестве основной модели коммерческих отношений с потребителем установлена В2В-модель.

Для понимания бизнес модели разрабатываемого продукта составлена матрица Остервальдера, представленную в таблице 10. Матрица Остервальдера отражает производственный план, план продаж, и саму бизнес модель в целом.

Таблица 19 – Матрица Остервальдера

Ключевые партнеры	Ключевые виды деятельности	Ценностные предложения	Взаимоотношения с клиентами	Потребительские сегменты
<p>Стратегическое сотрудничество с поставщиками оборудования и с Минпромторг России</p>	<p>Сборочное производство. Сборка реабилитационных комплексов для компенсации веса под параметры заказчика – готовый продукт</p>	<p>Продукт, который имеет следующие характеристики:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Уникальный функционал и пользовательский опыт. 2. Совмещение нескольких методов реабилитации в одном помещении, например, брусья, беговую дорожка, бассейн и т.д. 3. Повышает эффективность персонала и предотвращает травмы. 4. Низкая цена. 5. Простота обслуживания и ремонта. 6. Возможность расширения рабочей области с минимальными доп. затратами. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Постоянная техническая поддержка клиентов 2. Горячая телефонная линия, электронная почта для оформления заказов, помощи при выборе конфигурации комплекса. 	<p>Целевые потребительские сегменты рынка – B2B клиенты:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Медицинские учреждения с реабилитационным отделением. 2. Реабилитационные центры; 3. Кабинеты ЛФК; 4. Спец. спортивные залы.
	<p>Ключевые ресурсы</p> <p>Материальные ресурсы – материалы и оборудование для сборки комплекса.</p> <p>Интеллектуальные ресурсы – патент на полезную модель и промышленный образец, регистрация ПО для ЭВМ</p>		<p>Каналы сбыта</p> <p>Прямые продажи:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Профильные мероприятия, конференции, выставки 2. Коммерческие предложения для потенциальных клиентов. 3. Реклама на сайтах поставщиков медицинского оборудования. <p>Дополнительное продвижение:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Через поставщиков реабилитационных товаров и оборудования. 2. Публикации в специализированных изданиях. 	
<p>Структура издержек</p> <p>Фиксированные издержки:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Заработная плата работниками в месяц – 155 719,2 руб. – Аренда помещения – бесплатно на базе ТПУ. – Ежемесячные амортизационные отчисления – 4270 руб. <p>Переменные издержки в месяц:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Материальные расходы – 6 285 000 руб. – Контрагентные расходы – 330 000 руб. 			<p>Потоки поступления доходов</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Выручка от продаж – 127 800 000 руб. 2. Чистая прибыль от продаж – 30 515 000 руб. <p>Генерирование дополнительных доходов за счет:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Технического обслуживания проданных комплексов. 2. Проведения первичного обучения и т.д. 	

6.10 Стратегия продвижения продукта на рынок

Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 29 декабря 2012 г. № 1705н «О Порядке организации медицинской реабилитации» вводит «Стандарт оснащения центра медицинской реабилитации пациентов с нарушениями нервной системы и опорно-двигательного аппарата». В соответствии со стандартом оснащения предлагаемая разработка может удовлетворить следующие требования:

- Подъемник для перемещения пациента;
- Система для динамической разгрузки веса тела пациента;
- Оборудование для восстановления ходьбы.

В рамках стратегии вывода продукта на рынок предлагаются следующие шаги:

1. Участие в профильных мероприятиях, конференциях, выставках медоборудования.
2. Публикации в специализированных медицинских журналах.
3. Распространение коммерческих предложений по медицинским учреждениям и реабилитационным центрам.
4. Реклама на сайтах поставщиков медицинского оборудования.
5. Продвижение через крупных поставщиков реабилитационных товаров и оборудования.

Данные шаги в совокупности позволят оказать необходимое влияние на объем продаж, что позволит обеспечить ее проникновение на рынок.

В качестве дополнительных мер продвижения, рассматривается возможность включения в перечень производителей технических средств реабилитации Минпромторг РФ. Это позволит получить финансовую поддержку от государства.

В рамках проекта стратегии развития производства промышленной продукции реабилитационной направленности до 2025 года «Минпромторг

России» предлагает меры государственной поддержки, представленные в таблице 20.

Таблица 20 – Меры государственной поддержки производителей ТСР [17]

Тип	Наименование
Субсидирование	Субсидии российским организациям на компенсацию части затрат в рамках реализации комплексных инвестпроектов по организации производства средств реабилитации
	Субсидии российским организациям на компенсацию части затрат на проведение НИОКР в рамках организации производства средств реабилитации
	Субсидии российским некоммерческим организациям на реализацию общепромышленных проектов по развитию промышленности социально-значимых товаров
Средства программ	Программ 1, 2, 3 ГП РФ «Доступная среда», направляемые на развитие фонда национальных стандартов
	Программы и субсидии, реализуемые институтами развития
	Программы специализированных фондов, входящих в портфель Российской венчурной компании
Грантовое финансирование	Возможность получить финансовую поддержку от Фонда развития инновационного центра «Сколково»

7 Социальная ответственность

7.1 Введение

ВКР посвящена исследованию и разработке прототипа многофункционального манипулятора параллельной структуры с гибкими звеньями для задач компенсации веса. Манипулятор запускают в помещении, в котором также расположено автоматизированное рабочее место, где оператор при помощи специализированного прикладного программного обеспечения контролирует параметры режима работы манипулятора, отслеживает диагностические показатели комплекса (состояние управляющей системы, датчиков, приводов, потребленную мощность и т.д.), а также отслеживает траектории передвижения и другие показатели.

Рабочим местом оператора является отдельное помещение с компьютером, где будет работать оператор и управлять системой. В данном разделе выпускной квалификационной работы анализируются вредные и опасные факторы на рабочем месте в соответствии с действующими нормативными документами.

На данный момент проект находится на этапе проведения исследований и разработки прототипа манипулятора (испытательного стенда). Рабочим местом является аудитория №101 10 корпуса ТПУ со следующими размерами помещения: длина - 6 м, ширина - 5 м, высота - 3,5 м.

7.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

7.2.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Законодательством РФ регулируются отношения между организацией и работниками, касающиеся оплаты труда, трудового распорядка, социальных отношений, особенности регулирования труда женщин, детей, людей с ограниченными способностями и др. Продолжительность рабочего дня не должна превышать 40 часов в неделю. Для работников до 16 лет – не более 24 часов в неделю, от 16 до 18 лет – не более 35 часов, как и для инвалидов I и II группы. Для работников, работающих на местах, отнесенных к вредным условиям труда 3 и 4 степени – не более 36 часов.

Организация обязана предоставлять ежегодные отпуска продолжительностью 28 календарных дней. Для работников, занятых на работах с опасными или вредными условиями, предусматривается дополнительный отпуск [18].

Работнику в течение рабочего дня должен предоставляться перерыв не более 2 часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается. Всем работникам предоставляются выходные дни, работа в выходные дни производится только с письменного согласия работника.

7.2.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.

В данном разделе рассмотрим основные требования по эргономике рабочего места при выполнении работ сидя.

Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах (680 – 800) мм, при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм [19]. Модульными размерами рабочей поверхности стола для ПК: ширина 800, 1000, 1200 и 1400

мм, глубина 800 и 1000 мм при нерегулируемой его высоте, равна 725 мм. Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм [19].

Конструкция рабочего стула должна обеспечивать:

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах (400 – 550) мм и углам наклона вперед до 15°, и назад до 5°;
- высоту опорной поверхности спинки (300 ± 20) мм, ширину – не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости – 400 мм;
- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах $\pm 30^\circ$;
- регулировку спинки от переднего края сиденья (260 – 400) мм;
- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной – (50 – 70) мм [19].

Рабочее место пользователя ПК следует оборудовать подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20°. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии (100 – 300) мм от края, обращенного к пользователю или на специальной, 100 регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы. Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии (600 – 700) мм, но не ближе 500 мм [23].

7.3 Производственная безопасность.

7.3.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.

К вредным и опасным факторам, которые могут возникнуть при проведении исследований, относятся следующие:

Вредные факторы:

- отклонение показателей микроклимата;
- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- повышенный уровень шума на рабочем месте;
- психофизиологические факторы (монотонность труда, нервно-психические перегрузки, перенапряжение зрительных анализаторов);
- повышенный уровень электромагнитных излучений.

Опасные факторы:

- поражение электрическим током;
- короткое замыкание;
- статическое электричество.

Поскольку рабочее место оператора находится в комнате, где есть силовые шкафы, средства связи и компьютерное оборудование, в этих помещениях может присутствовать ряд опасных и вредных факторов. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представим в виде таблицы 21.

Таблица 21 – Перечень опасных и вредных факторов [21]

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96, ГОСТ 12.1.005
2. Превышение уровня шума		+	+	ГОСТ 12.1.003-83,
3.Повышенный уровень электромагнитного излучения	+	+	+	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. «Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля»
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95
5. Электробезопасность	+	+	+	ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ, ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ.

7.3.1.1 Микроклимат

Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды этих помещений, определяется совместно температурой, относительной влажностью и скоростью воздуха, а также температурой окружающих поверхностей, воздействующих на организм человека (ГОСТ 12.1.005 "Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны") [29].

Допустимые микроклиматические условия рабочей зоны с учетом избыточного тепла, времени года и степени тяжести выполненных работ указаны в СанПиН 2.2.4.548–96 (таблица 22).

Таблица 22 – Допустимые параметры микроклимата на рабочих местах

Период года	Катег. работ	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, t°С	Относит-я влажность воздуха, φ%	Скорость движения воздуха, м/с	
						Если t° < t° _{опт}	Если t° > t° _{опт}
Холодный	Ia	20,0	25,0	19,0 – 26,0	15 – 75	0,1	0,1
Теплый	Ia	21,0	28,0	20,0 – 29,0	15 – 75	0,1	0,2

При температурах воздуха 26 – 28°С скорость движения воздуха в теплый период года должна соответствовать диапазону:

- 0,1 – 0,2 м/с – при категории работ Ia;
- 0,1 – 0,3 м/с – при категории работ Ib;
- 0,2 – 0,4 м/с – при категории работ IIa;
- 0,2 – 0,5 м/с – при категории работ II и III.

7.3.1.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Недостаточное освещение влияет на зрительный аппарат, а именно формирует зрительную работоспособность человека, также влияет на эмоциональное состояние, психику, вызывает усталость нервной системы, которая возникает из-за усилий, расходуемых на опознание сигналов и контуров различных предметов.

Рабочим местом, где проводятся исследования, является компьютерная аудитория с разрядом зрительной работы А-2. Требования к освещению для таких помещений приведены в таблице 23.

Таблица 23 -Требования к освещению в соответствии со СНиП 23-05-95 [24]

Характеристика зрительной работы		Точность	
Наименьший или эквивалентный размер объекта различия, мм		0,15 - 0,30	
Разряд зрительной работы		А	
Под разряд зрительной работы		2	
Относительная продолжительность зрительной работы при направлении зрения на рабочую поверхность, %		менее 70	
Искусственное освещение	освещенность на рабочей поверхности от системы общего освещения, лк	400	
	цилиндрическая освещенность, лк	100	
	показатель дискомфорта М коэффициент пульсации освещенности Кп, %	40 – 15** 10	
Естественное освещение	КЕО e_n , % при	верхнем или комбинированном	3,5
		боковом	1,2

При работе за компьютером основное значение имеет освещение рабочего места, и кабинета в целом. Освещение рабочего места, это один из основных условий для формирования благоприятных и безопасных условий труда, влияющие на настрой сотрудника, самочувствие и эффективность деятельности.

В административно – общественных помещениях, преимущественно работы с документацией предусмотрена комбинированная система освещения. Освещенность в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 – 500 лк, а в качестве искусственных источников света применять люминесцентные лампы типа ЛБ и компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) [24].

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. В соответствии с размером аудитории (длина $A = 6$ м, ширина $B = 5$ м, высота = 3,5 м), в ней размещены 4 светильника типа РТФ/Р. В каждом светильнике установлено 4 люминесцентных лампы типа Т5.

Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 0,8$ м. Произведем расчет имеющегося освещения аудитории. Согласно СНиП 23-05-95 необходимо создать освещенность не ниже 300 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы [24]. Площадь помещения определяется по следующей формуле:

$$S = A \times B = 6 \times 5 = 30 \text{ м}^2, (1)$$

где A – длина, м; B – ширина, м.

Коэффициент отражения поверхности стен $\rho_C = 50\%$ (свежепобеленные с окнами без штор), потолка $\rho_P = 70\%$ (свежепобеленный). Коэффициент запаса с нормальным условиям среды $K_3 = 1,2$. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z = 1,1$ [24].

Как известно, светильник типа РТФ/Р имеет длину и ширину светильника равную 575 мм;

Люминесцентные лампы Т5 имеют следующие параметры:

- световой поток ФЛД = 1660 лм;
- мощность 28 Вт [24].

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем $\lambda = 1,1$, расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,15$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле [24]:

$$h = H - h_n - h_p \quad 3,5 - 0,8 - 0,15 = 2,55 \text{ м. (2)}$$

где h_n – высота светильника над полом, высота подвеса;

h_p – высота рабочей поверхности над полом.

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для светильников РТФ/Р: $H = 3,5$ м.

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле [24]:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,55 = 2,8 \approx 3 \text{ м. (3)}$$

где λ - оптимальное расположение светильников;

h - высота светильников над рабочей поверхностью.

Число рядов светильников в помещении [24]:

$$Nb = B/L = 5/3 = 1,6 \approx 2. (4)$$

где B - ширина, м; L - расстояние между соседними светильниками.

Число светильников в ряду [24]:

$$Na = A/L = 6/3 = 2, (5)$$

где A -длина, м.

Общее число светильников [24]:

$$N = Na \cdot Nb = 2 \cdot 2 = 4, (6)$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле [24]:

$$l = L/3 = 3/3 = 1, (7)$$

Размещаем светильники в два ряда. На рисунке 46 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

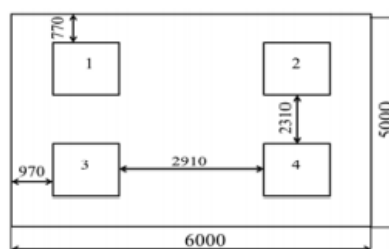


Рисунок 46 - План размещения светильников

Индекс помещения определяется по формуле [24]:

$$i = A \cdot B / h \cdot (A+B) = 6 \cdot 5 / 2,55 \cdot (6+5) = 1,06, (8)$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа РТФ/Р с люминесцентными лампами при $\rho_{\text{П}} = 70 \%$, $\rho_{\text{С}} = 50\%$ и индексе помещения $i = 1,06$ равен $\eta = 0,6$ [24].

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{н}} = E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z / N \cdot \eta = 300 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 1,4 \cdot 1,1 / 16 \cdot 0,6 = 1444 \text{ лм. (9)}$$

Делаем проверку выполнения условия [24]:

$$-10\% \leq (\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}) / \Phi_{\text{лд}} \cdot 100\% \leq 20\%; (10)$$

$$(\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}) / \Phi_{\text{лд}} \cdot 100\% = 1660 - 1444 / 1660 \cdot 100\% = 13\%.$$

Таким образом: $-10\% \leq 13\% \leq 20\%$, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона, то есть система освещения в рабочей аудитории соответствует нормам СНиП 23-05-95.

7.3.1.3 Повышенный уровень электромагнитных излучений

На данном этапе работ опасность представляет персональный компьютер с монитором. Нормы напряженности электромагнитного поля приведены в таблице 24.

Таблица 24 - Нормы напряженности поля [25].

Наименования параметров		Допустимые значения
Напряженность электрического поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 Гц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 Гц – 400 кГц	25 нТл
Поверхностный электростатический потенциал		500

Источником электромагнитного излучения в рабочем помещении является система управления – одноплатный компьютер с Wi-Fi и Bluetooth модулем. Примерами излучения являются радиоволны, инфракрасные, ультрафиолетовые лучи, свет [26]. Предельно допустимые нормы (ПДУ) воздействия ЭМИ РЧ на человека приведены в таблице 25.

Таблица 25 - ПДУ энергетических экспозиций 30 кГц - 300 ГГц [26]

Параметры	ЭЭ _{ПДУ} в диапазонах частот, МГц				
	0,03 – 3	3 – 30	30 – 50	50 – 300	300 – 300000
ЭЭ _Е , (В/м) ·ч	20000	7000	800	800	-
ЭЭ _Е , (А/м) ·ч	200	-	0,72	-	-
ЭЭ _Е , (мкВт/см) ·ч	-	-	-	-	200

7.3.1.4 Перенапряжение зрительных анализаторов

При работе за ПК визуальные параметры мониторов оказывают большую нагрузку на зрительные анализаторы, а именно на мышцы глаз. После длительной нагрузки необходим период восстановления и отдыха. Если полного восстановления возможностей зрительного аппарата не происходит, то в детском и юношеском возрасте зрительная усталость приводит к нарушениям в аккомодационном механизме глаза, а в дальнейшем – к близорукости.

7.3.1.5 Повышенный уровень шума на рабочем месте

Источником шума является компьютерная, печатная, телефонная техника, а также система вентиляции или прочие шумы. Нормативным эквивалентным уровнем звука на рабочих местах, является 80 дБА.

Для уменьшения воздействий шума используют следующие методы:

- экранирование рабочих мест (установка перегородок);
- установка оборудования, производящего минимальный шум.

Для снижения уровня шума, производимого персональными компьютерами, рекомендуется регулярно проводить их техническое

обслуживание: чистка от пыли, замена смазывающих веществ; также применять звукопоглощающие материалы [27].

7.3.1.6 Электробезопасность

Электробезопасность – это система организационных и технических мер и средств, которые защищают людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества [22].

Опасность поражения электрическим током есть всегда при использовании электрического оборудования. Для того чтобы исключить электрическое поражение нужно исключить причины, к которым относят:

- появление напряжения из-за повреждения изоляции;
- прикосновения к незащищенным участкам манипулятора;
- возникновение напряжения на опорной поверхности или земле;

7.3.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.

7.3.2.1 Мероприятия по поддержанию микроклимата

При температурах воздуха 25°C и выше максимальные величины относительной влажности воздуха не должны выходить за пределы:

- 70% – при температуре воздуха 25° С;
- 65% – при температуре воздуха 26° С;
- 60% – при температуре воздуха 27° С;
- 55% – при температуре воздуха 28° С.

При температурах воздуха от 26 °С до 28 °С скорость движения воздуха в теплый период года должна соответствовать диапазону:

- 0,1 – 0,2 м/с – при категории работ Ia;

Работа оператора относится к категории Ia, поскольку работа связана с минимальными физическими нагрузками. Для поддержания микроклимата в

помещении необходимо произвести монтаж приточно-вытяжной вентиляции, с подогревом поступающего воздуха в холодный период года [29].

7.3.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны

В данном разделе необходимо рассмотреть, какие меры необходимо предпринять, чтобы уменьшить вред, причиняемый отсутствием или недостатком естественного освещения.

При недостатке на рабочем месте естественного освещения и оценке естественного освещения классом 3.1 рекомендованы следующие мероприятия:

- сделать ремонт для создания более светлого помещения и изменить после этого параметры КЕО;
- обеспечить снос зеленых насаждений в случае, если нехватка естественного освещения связана с ними;
- проанализировать, насколько окна загрязнены, ликвидировать загрязнения и измерить показатели КЕО;
- обеспечить лучшие условия при помощи искусственного освещения;
- обеспечить перерывы в работе.

7.3.2.3 Повышенный уровень электромагнитных излучений

Необходимо заземление металлических электропроводных элементов оборудования, установка нейтрализаторов статического электричества (индукционных, высоковольтных, жидких и др.), увеличения поверхностей и объемной проводимости диэлектриков, что приводит к уменьшению генерации электростатических зарядов или их отвод с наэлектризованного материала.

Для защиты людей от воздействия электромагнитных полей промышленной частоты предусматриваются санитарно-защитные зоны. Необходимо обеспечить удаление линии электропередач не менее чем на 250-300 метров от границы населенного пункта при проектировании воздушных линий электропередачи напряжением 750-1110 кВ.

В качестве средств индивидуальной защиты от электромагнитных полей промышленной частоты служат индивидуальные экранирующие комплекты.

7.3.2.4 Перенапряжение зрительных анализаторов

Чтобы уменьшить перенапряжения зрительных анализаторов, необходимо придерживаться правил работы за компьютером:

- обеспечить себе равномерное и достаточное освещение в помещении.
- расположить монитор на 15-20 см ниже горизонтальной линии взора.
- расположить монитор на расстоянии от глаз на 50 - 70 см.
- при работе колени должны быть согнуты под углом около 90 градусов.
- угол между сиденьем и креслом должен быть 95-100 градусов.

Периодически необходимо расслаблять аккомодационные мышцы, настраивая глаз на дальнюю точку лучшего видения. Во время рабочего дня за компьютером следует каждые 20 минут делать 20 секундные перерывы и смотреть вдаль на расстоянии 6 метров.

7.3.2.5 Мероприятия по снижению уровней воздействия шума

Главными источниками шума в сборочных цехах являются работающие станки и механизмы, ручные механизированные инструменты, электрические машины, компрессоры, кузнечно-прессовое, подъемно-транспортное, вспомогательное оборудование (вентиляционные установки, кондиционеры).

Мероприятия по уменьшению воздействия вибраций и шумов на организм человека:

- снижение (ослабление) шума в самих источниках – в электрических машинах, станках, механизмах и других устройствах;
- использование звукоизолирующего кожуха, который может закрывать отдельную часть конструкции, издающей шум;
- применение акустических экранов;
- применение звукопоглощающих облицовок для отделки помещений;
- применение средств индивидуальной защиты.

В зависимости от характеристики шума и вида используемых средств достигают уменьшения уровня интенсивности звука на 5...45 дБ [28].

7.3.2.6 Электробезопасность

Лабораторию, где проводятся исследования, в соответствии с классификацией помещений по опасности поражения электрическим током можно отнести к 1 группе «Помещение без повышенной опасности».

Необходимо проведение следующих мероприятий:

- запретить использование неисправных приборов;
- необходимо наличие изоляции на всех токоведущих проводниках;
- проводя работы с включенными приборами соблюдать ТБ;
- приборы нужно подключать только в стандартные разъемы;
- применение заземления, зануления или УЗО.

7.4 Экологическая безопасность

Экологическая безопасность представляет собой состояние защищенности биосферы и человеческого общества, а на государственном уровне – государства от угроз, возникающих в результате антропогенных и природных воздействий на ОС. Также данное понятие включает в себя систему регулирования и управления, которая позволяет прогнозировать, не допускать и ликвидировать развитие чрезвычайных ситуаций [30].

7.4.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Технологические процессы всегда сопровождаются образованием различного вида отходов, после чего те поступают в окружающую среду. Объектом исследования является технических комплекс – манипулятор. Фактором, влияющим на окружающую среду, в настоящий момент можно выделить воздействие электромагнитных излучений. Но уровень воздействия меньше, чем, например, у стационарного ПК, потому что в системе управления манипулятора расположен только один одноплатный компьютер, и четыре

приводных модуля низкой мощности, поэтому можно говорить о том, что комплекс не оказывает значительного влияния на окружающую среду, пользователя и оператора, т.к. система управления и приводы находятся на расстоянии.

7.4.2 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования

Процесс утилизации составных элементов манипулятора будет аналогичен процессу утилизации компьютерной техники. Изначально необходимо составить акт списания. Затем техника будет разобрана на составные компоненты. После происходит переработка. Она производится для того, чтобы полученные в ходе нее черные металлы и цветные металлы снова стали сырьем, как и пластик, прошедший перед этим сортировку по видам и по цветам. Утилизация вычислительной техники уникальна тем, что в её составе находится много драгоценных металлов. Поэтому по закону утилизацией оргтехники должна осуществляться компанией, имеющей сертификат Пробирной Палаты [30].

7.4.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Утилизация электронного оборудования нужна, чтобы уберечь окружающую среду от загрязнений. Только таким образом можно избавиться от постоянно растущих свалок техники. А она может содержать такие материалы, как металлические детали и пластик, которые трудно поддаются процессу разложения. Некоторые элементы техники, в частности аккумуляторы, содержат опасные химические соединения. Необходимо помнить, что утилизация оборудования – это обязательная процедура [30].

7.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) представляет собой состояние, при котором в результате возникновения источника чрезвычайной ситуации на объекте, определенной территории (акватории) нарушаются нормальные условия жизнедеятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, народному хозяйству и окружающей природной среде. Одна из классификаций ЧС приведена в таблице 26.

Таблица 26 - Классификация ЧС

Источник	Объект (реципиент)		
	Природный	Социальный	Техногенный
Природный	Природные	Природно-социальные	Природно-техногенные
Техногенный	Техноприродные	Техносоциальные	Техногенные
Социальный	Социоприродные	Социальные	Социотехногенные

7.5.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в процессе исследований и эксплуатации

В процессе исследований можно исключить природные ЧС, так как исследования проводятся в лабораторных условиях, то есть в помещении. Возможные аварии могут быть не только связаны со скачком напряжения, например, но и с ошибкой при проектировании. Тогда ЧС будет социотехногенной, потому что причиной ЧС будет человек, а пострадает помещение, оборудование и т.д.

В процессе эксплуатации стенда-манипулятора могут возникать аварии, которые приведут к воспламенению. Это может нанести вред как зданию, где находится оборудование и имущество, так и человеку, который будет находиться в этом здании. Поэтому данный фактор можно отнести и к техносоциальным, и к техногенным ЧС.

7.5.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Снижение частоты событий, инициирующих ЧС, необходимо предпринять следующие действия:

бороться с терроризмом и преступностью;
проводить профилактические работы по возникновению аварий (техническое обслуживание, планово-предупредительные ремонты, диагностика оборудования);

- осуществлять предупреждение опасных природных явлений;
- разбивать территории на районы.
- обеспечить эффективность систем безопасности;
- обеспечить физическую устойчивость сооружений и зданий;
- уменьшить уровень уязвимостей объектов к воздействию негативных факторов опасных явлений природного и техногенного рода;
- обеспечить снижение уровня нагрузок и защищенности объектов;
- обеспечить защиту от экстремальных социальных явлений путем проведения инструктажей для персонала;
- создать инженерную защиту от опасных явлений.

Нужно соблюдать противопожарные правила, нормы при установке электропроводов, оборудования, освещения и т.д. Также необходимо правильно эксплуатировать оборудование, проводить противопожарный инструктаж, обучать людей правилам пожарной безопасности, обеспечить наличие плана эвакуации и инструкций [31].

Для тушения пожаров в помещении необходимо установить углекислотный огнетушитель типа ОУ-5. Покидать помещение необходимо согласно плану эвакуации, на рисунке 47.

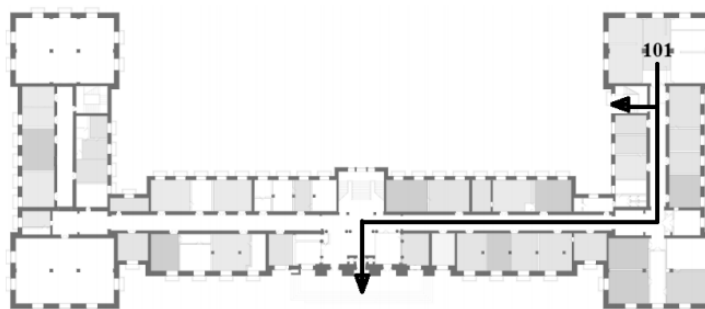


Рисунок 47 - План эвакуации при пожаре и других ЧС

7.6 Заключение по разделу социальная ответственность

В ходе выполнения раздела были выявлены и проанализированы вредные и опасные факторы. Для них были установлены средства, которые помогают защитить человека, который находится в данном помещении, от выявленных вредных и опасных факторов.

Аналізу были подвергнуто влияние работы на рабочем месте на окружающую среду. Установлено, что после работы остаются отходы при выходе из строя одноплатного компьютера и контроллеров, а также при пайке, которые при неправильной утилизации будут влиять на литосферу и атмосферу Земли. Выявлено, что отходы утилизируются согласно ГОСТ.

Кроме того, исследовались правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности и организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

В итоге, установлено, что рабочее место соответствует ГОСТ по защищённости от вредных и опасных факторов, при работе соблюдаются правила по утилизации полученных отходов. Кроме того, рабочее место соответствует правовым нормам и имеет соответствующую компоновку рабочей зоны.

Заключение

В рамках работы над магистерской диссертацией сформулирована концепция и общие требования к разработке и использованию системы обезвешивания с гибкими звеньями. Предложены области применения системы такого типа.

Разработана кинематическая схема манипулятора и её математическая модель, что позволит в дальнейшем реализовать систему управления и разработать опытный макет манипулятора для подтверждения работоспособности предлагаемой конструкции.

Разработана конструкция приводного модуля, в том числе 3D модель и конструкторская документация.

Приведен расчёт основных конструктивных элементов манипулятора и подбор оборудования.

В рамках работы над магистерской диссертацией разработана концепция стартап-проекта, в которой оценен коммерческий потенциал разработки, выполнена оценка емкости рынка, подсчитана себестоимость изделия, а также сформирована бизнес-модель и план продвижения продукта на рынок.

По результатам выполненных работ разработан испытательный стенд – прототип системы, на базе которого может быть реализован лабораторный стенд для проведения учебных занятий. Кроме того, разработанный стенд позволит проводить исследования, дорабатывать и улучшать разработанную конструкцию, а также разработать и испытывать различные методы управления.

Список публикаций

1. Бугаков А.И. Разработка многофункционального манипулятора параллельной структуры с гибкими звеньями для компенсации веса // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 17–20 февраля 2020 г.) / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – С. 206-207;

Список использованных источников

1. Apte S., Plooij M., Vallery H. Influence of body weight unloading on human gait characteristics: a systematic review // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation – 2008. – №15. – p. 53.
2. Карманова А.В., Филипас А.А. Исследование модели трехточечного крана гибкой подвески // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий: сб. тр. конф., г. Северск, 2016. – С. 68-68а. г. Северск, 21-25 марта 2016 г. – Северск: Изд-во ФГАОУ ВПО НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 68-68а.
3. Валукевич Ю.А., Алепко А.В., Яковенко Д.М., Дубовсков В.В. Анализ влияния конструктивных параметров манипулятора с параллельной структурой на точность позиционирования схвата // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11-4. – С. 687.
4. Plooij M., Sterke B., Keller U., Komi S. Design of RYZEN: an Intrinsically Safe and Low-Power 3D Overground Body Weight Support // IEEE Robotics and automation letters – 2018.
5. Кириллов Ф.Ф., Щипунов А.Н., Гончаров Н.В. Расчёт параметров лебедки // методические указания для практических занятий /Кириллов Ф.Ф. ; ТГАСУ – Томск, 2008. – 15 с.
6. ГОСТ Р 51260-2017. Тренажеры реабилитационные. Общие технические требования.
7. ГОСТ 27701-88. Редукторы червячные цилиндрические. Основные параметры.
8. Бугаков А.И. Разработка многофункционального манипулятора параллельной структуры с гибкими звеньями для компенсации веса // Молодежь и современные информационные технологии: сб. тр. конф., г. Томск, 17–20 февраля 2020 г. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. –С. 206-207.

9. Применение мехатронных систем в медицинской технике [Электронный ресурс]: Юго-Западный Государственный Университет URL: <https://swsu.ru/structura/up/ftd/tmim/med-teh/> (дата обращения: 30.05.2021). – Режим доступа: свободный.

10. Овсяницкая Л.Ю., Юрасова Е.В., Мехатроника и робототехника как инновационное звено в развитии инженерного и медицинского образования // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – № 3. – С. 115-123.

11. Низовибатько, О.Б. Медицинские симулятивные центры – перспектива практического здравоохранения // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – № 1. – С. 311–312.

12. Wongratanaphisan, Theeraphong, Matthew O. Cole, Influence of body weight unloading on human gait characteristics: a systematic review // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation – 2008. – №15. – p. 53.

13. Wongratanaphisan, Theeraphong, Matthew O. Cole, // Analysis of a gravity compensated four-bar linkage mechanism with linear spring suspension // Journal of Mechanical Design – 2008. – №130-1.

14. Lin, Po-Yang, Win-Bin Shieh, Dar-Zen Chen, // Design of perfectly statically balanced one-DOF planar linkages with revolute joints // Journal of Mechanical Design – 2009. – №131-5.

15. Инструкция для производителей ТСР: как попасть в перечень Минпромторга России и получить господдержку? [Электронный ресурс]: Meditex. Коммерциализация медицинских технологий URL: https://www.meditex.ru/news_all/InstruktsiyadlyaproizvoditeleyTSRkakpopastvperечhenMinpromtorgaRossiiipoluchitgospodderzhku/ (дата обращения: 20.04.2021). – Режим доступа: свободный.

16. Объём рынка оборудования для реабилитации [Электронный ресурс]: Olmecka URL: <https://olmecka.ru/news/obyom-ryinka-oborudovaniya-dlya-reabilitaczii> (дата обращения: 21.04.2021). – Режим доступа: свободный.

17. Стратегия развития производства промышленной продукции реабилитационной направленности до 2025 года [Электронный ресурс]: Гарант.ру URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71719020/> (дата обращения: 21.04.2021). – Режим доступа: свободный.

18. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021)

19. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования

20. ГОСТ 12.1.003-2014. ССБТ. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности

21. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация

22. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность

23. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009 Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDТ). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора

24. СНиП 23-05-95* с СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение

25. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. «Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля»

26. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

27. СНиП 23-03-2003. Защита от шума.

28. СН 2.2.4/ 2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы

29. СанПиН 2.2.4-548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»

30. ГОСТ Р 53692-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами.

Этапы технологического цикла отходов

31. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ).

Пожарная безопасность. Общие требования

Приложение А

(обязательное)

Раздел 1 Robotic systems in rehabilitation medicine

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ91	Бугаков Артём Иванович		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас А.А.	к.т.н., доцент		

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ ШБИП	Пичугова И.Л.	Старший преподаватель		

1 Domain analysis

1.1 Robotics and mechatronics in medicine

In recent years, mechatronic and robotic systems have become increasingly widespread in medical technology.

Medical equipment is technical means used in medicine for the diagnosis and treatment of diseases, their prevention, as well as for rehabilitation and sanitary and hygienic measures.

A mechatronic system is a single complex of electromechanical, electrohydraulic, electronic elements and computer facilities, between which there is a constant exchange of energy and information under the control of an automatic control system, in some cases with intelligent functions.

Medical mechatronics is constantly developing, due to scientific and technological progress and against the background of the growing interest in technology and electronics, the emergence of progressive ideas in the field of health care.

Mechatronic systems have the following advantages in comparison with traditional means of automation of medical operations:

- low cost of systems, due to a high degree of unification and standardization of all elements and interfaces;
- high efficiency in precise and complex movements, achieved as a result of the use of modern control methods;
- high reliability and noise immunity;
- small size and increased ergonomic performance;
- improved weight, size and dynamic characteristics of machines due to the simplification of kinematic chains;
- modularity of complex mechatronic systems, which allows completing the system for specific customer tasks.

In recent years, many countries have been actively developing mechatronic devices for medical purposes. Medical mechatronics finds the main direction of

development in the development of automated systems for the rehabilitation of disabled people, performing service operations and for clinical applications.

Mechatronic medical systems are also referred to as medical robotic systems (MRS). MPCs can be divided into three main categories:

- rehabilitation MRS. Various prostheses and manipulators;
- serving MRS. Mobile robots, guide robots for blind and visually impaired people, robotic nurses, etc.;
- clinical MRS. Diagnostic mechatronic systems, surgical and therapeutic robots, usually robotic manipulators [2].

The main directions of development of mechatronics in medicine are shown in Figure 1.

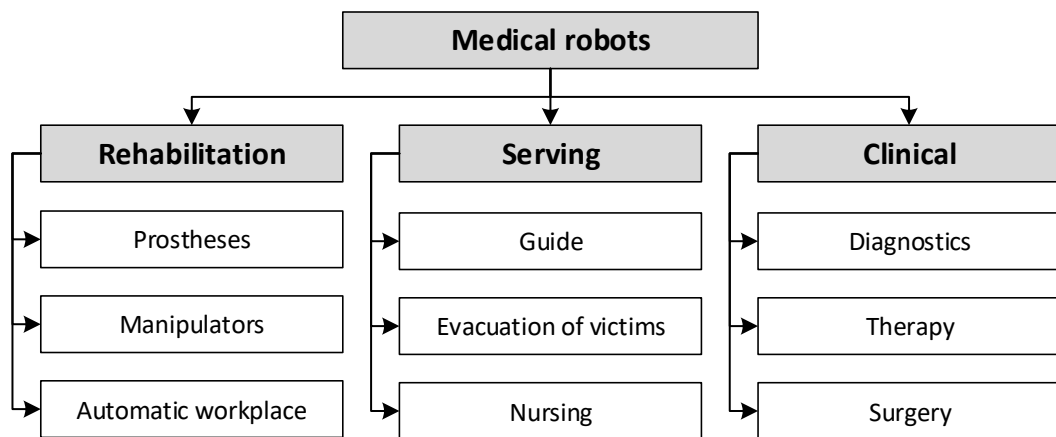


Figure 1 – The main directions of development of medical mechatronics

Mechatronics and robotics are a variety of concepts, methods and tools for the development of information-driven and programmable mechanized complexes with a set of specific functions [3]. These scientific disciplines of a systemic nature underlie any automation of human life objects.

Usually mechatronics is perceived as an inseparable whole with robotics, but it is more correct to divide them into independent disciplines that are united by a subdomain in the form of robotic systems and their components that apply general principles, research methods, and design [4].

Mechatronics combines mechanics, information technology and electrical engineering. Because of this combination, a synergistic effect arises. The

interdisciplinary nature of mechatronics allows for a synergistic effect at the intersection of all constituent disciplines, as it is shown in Figure 2.

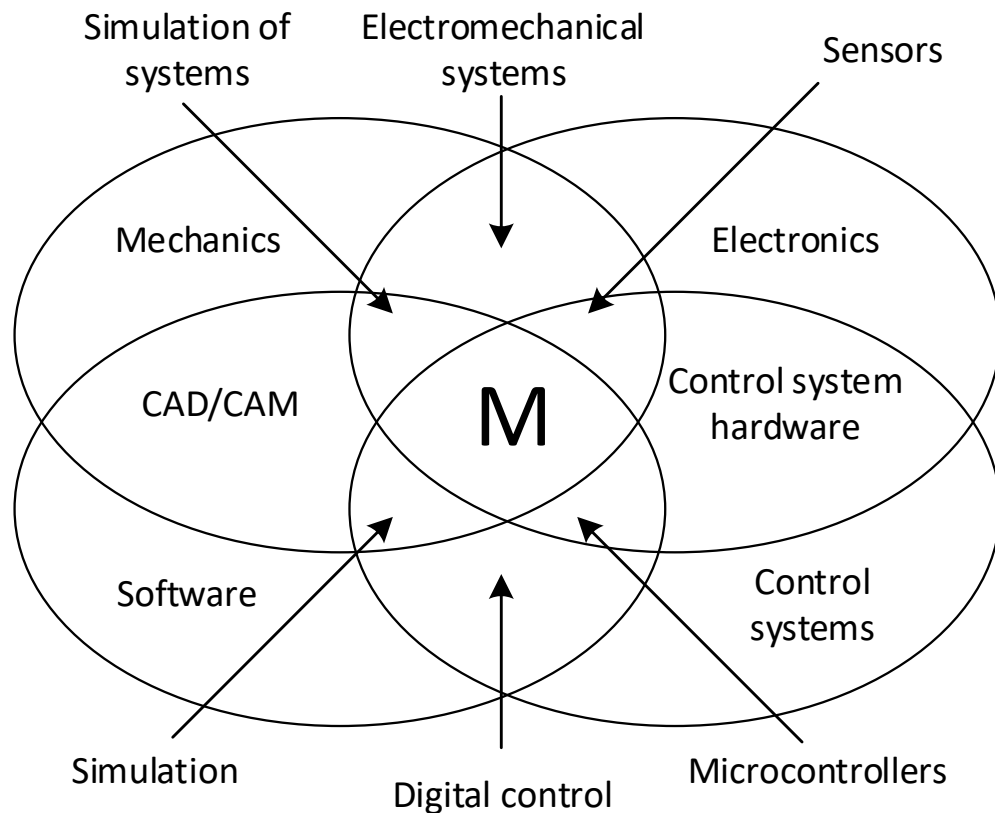


Figure 2 – Diagram of the interdisciplinary structure of mechatronics

Today, robotics has a huge impact on the development of medicine, and medicine is becoming a key area for the introduction of robots and artificial intelligence. The development of robotics in medicine is associated with high precision, increasing the effectiveness of treatment and reducing the risk of harm to health. But despite advances in robotics, healthcare professionals are usually unfamiliar with them, and researchers in the field of robotics do not understand the real problems and needs of medicine. [3].

1.2 Classification of medical robots

There are huge varieties of medical robots that meet the needs of specialized medical fields. Based on these areas and the nature of the tasks they solve, the following classification of medical robots can be formed:

1. Robot manipulator-doctor – robotic electro-mechanical surgical systems used for complex surgical operations. These systems are not autonomous and need to

be monitored and controlled by a human doctor. This remote control provides the physician with precision, extra power, reduces physician fatigue and reduces the risk of infection for both patient and physician.

2. Robot mannequin – a simulator that repeats the anatomical structure and functional structure, and human reactions. Such simulators are essential for training medical personnel.

3. Rehabilitation robot – a robot or robotic arm designed to perform a set of exercises to accelerate recovery during the rehabilitation of patients with various diseases.

4. Exoskeletons and robotic prostheses are complex electronic-mechanical devices that perform the functions of a part of the body that has lost its working capacity, controlled by nerve endings that have the functions of artificial intelligence.

5. Assistant robots – robots that act as an alternative to medical personnel, capable of performing duties of low and medium complexity, which can be accurately algorithmic.

6. Medical nanorobots are robots so small that they can perform medical tasks right inside the human body.

1.3 Mechanisms and methods of weight compensation

In the English-language literature, there are much more references to such systems and they often use the term gravity compensation. In the Russian-language literature, the term weight compensation has become more widespread in comparison with the term weight loss. Gravitational compensation is understood as the presence of links in the mechanism, which have statically stable positions that do not depend on their vertical movement. When observing the movement of the thin links, it seems that they are not affected by the gravitational field. If systems and devices have links with this property, then they are said to use gravitational compensation. In the following, the terms weight compensation and dehydration will be used interchangeably.

For mechanisms that have the property of de-weighing and do not use the operation of drives for this, the term passive weight compensation is used. Weigh

compensation mechanisms can be divided into three main groups according to the type of action:

1. Using additional masses to change the position of the centers of mass of certain links.
2. Using elastic links to compensate for gravity.
3. Using friction in pivot joints and drives to compensate for the force of gravity.

Systems that introduce additional mass are systems with passive balancing [12]. In them, the force of gravity acting on the link passed through the point of its attachment, for example, through the hinge joint with the rack. The advantage of this method is a simple design. The disadvantage of such systems is the effect of mass addition, which increases the inertial properties of the system, reduces energy efficiency and performance.

Systems with flexible links are the most promising among the others, because they have high reliability and energy efficiency, and can be used to de-weight elements of a complex structure. The disadvantages include the complexity of the design of such a system.

In systems with friction in the joints, de-suspension is achieved due to the fact that gravity is compensated by the friction forces arising in the joints and drives. Such systems have low energy efficiency and reliability, and in addition, the friction properties of the elements change during operation, leading to the loss of the dewatering property [14].

Active systems achieve the dewatering effect not by changing the structure of the system, but by applying the drive force. In such systems, energy efficiency is not the main goal. Such systems do not create the effect of attached masses and can dynamically change the dewatering force during the operation of the system based on sensor readings and environmental conditions.

Such systems are used on production conveyor lines, as manipulators, for research purposes when testing space structures, various robots and exoskeletons, as

well as in medical rehabilitation, where there is a need to move and compensate for part of the patient's weight in motion and during exercise.

In the English-language literature, when describing medical weight-loss systems, the following terms are used:

1. Technology-assisted gait training (TAGT) – Technological gait training, involving the use of automatic devices.
2. Robot-assisted gait training (RAGT) – Gait training involving the use of robots.
3. Body weight inloading (BWU) – Unloading body weight.
4. Body weight support (BWS) systems – System of support or compensation of body weight (weight compensation).
5. Body weight supported training (BWST) – Gait training using a body weight support system.
6. Body weight supported treadmill training (BWSTT) – Gait training using the body weight support system on the treadmill.
7. Conventional overground training (COT) – Traditional overground gait training is usually contrasted with treadmill training.

1.4 Classification of weight compensation systems

Based on the overview of the literature and existing medical weight-loss systems, a classification of such systems is proposed.

The main criteria for the classification are:

- purpose of the system;
- design features;
- type of applied drive;
- the number of degrees of freedom;
- control system.

The purpose of the system is a criterion that determines the further parameters of the system, its design and control system. Depending on the purpose, the design of the system, as well as the technical characteristics and functions implemented will differ significantly. Production systems are often required to provide the necessary load capacity, and medical robots must provide a set of strictly defined movements with high accuracy, as well as maintain stability and accompany a patient with musculoskeletal disorders in movement.

Classification by the type of drive system used is different, like any mechatronic system. These are systems with electric, hydraulic, pneumatic or combined drive. Internal combustion engines are not applicable in medical systems. The advantages and disadvantages of these types of drives are well known, and therefore should be considered in each specific case, taking into account the requirements.

The classification by the number of degrees of freedom can vary greatly, depending on how many degrees of freedom are needed to implement a given nature of motion and functions of the final device. For example, for a stationary weight-loss system used in rehabilitation with a treadmill, there is only 1 degree of freedom. Weight compensation is carried out at one point – the place where the gripper is attached. In addition, weight compensation systems designed for mechanotherapy of multiple joints may require two to six degrees of freedom. Moreover, compensation systems in the form of an anthropomorphic exoskeleton can have more than 13 degrees of freedom

and the same number of independent drives and change the number of degrees of freedom in the process.

Classification by the type of control system can be represented by the following categories:

- control by operator;
- programmed control in accordance with the algorithm;
- software adaptive control.

The proposed classification of weight compensation systems is not fully complete and should be supplemented with the development of the field and the element base of mechatronic systems, the needs and capabilities of humans and society. The classification scheme is shown in Figure 3.

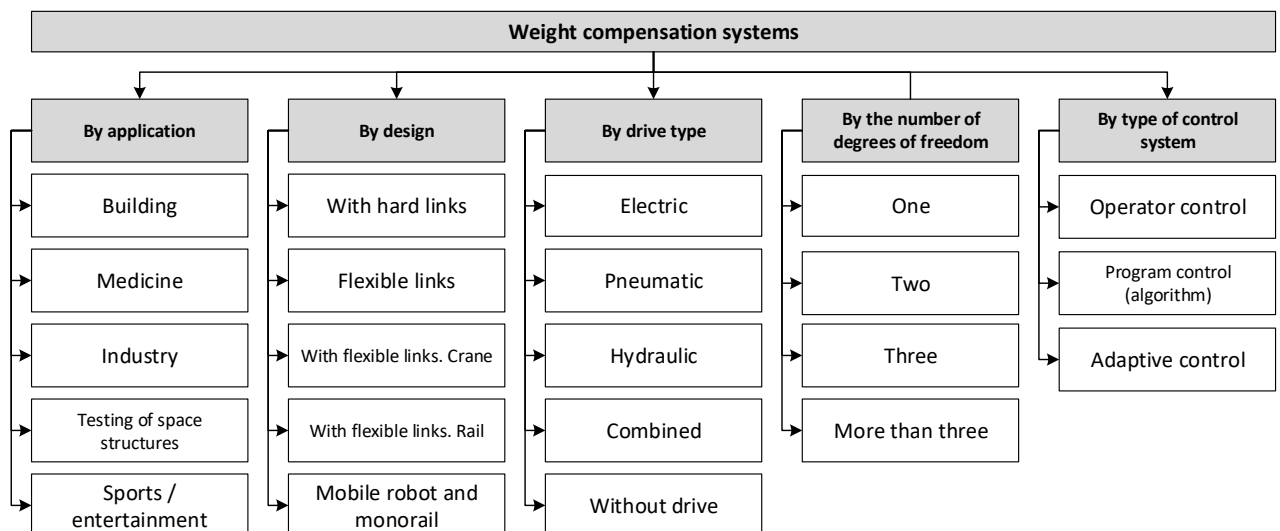


Figure 3 – Classification of weight compensation systems

1.5 Overview and classification of drives for weigh compensation systems

According to the type of movement, the drives used in weigh compensation systems can be divided into translational drives, rotary drives, vibration drives and other types of movement. The translational motion is used in the linkages of limb rehabilitation devices (Kinetec Spectra DC) and in the design of exoskeletons (HULC military exoskeleton). Rotary motion drives are used in upper limb rehabilitation devices (JAS apparatus), in exoskeletons (Honda exoskeleton), and in various simulators. Vibration movers are used to intensify the rehabilitation process. There is also a number of rehabilitation devices with a more complex nature of the movement

of the output links of the drives. The types of actuator movements are shown in Figure 4.

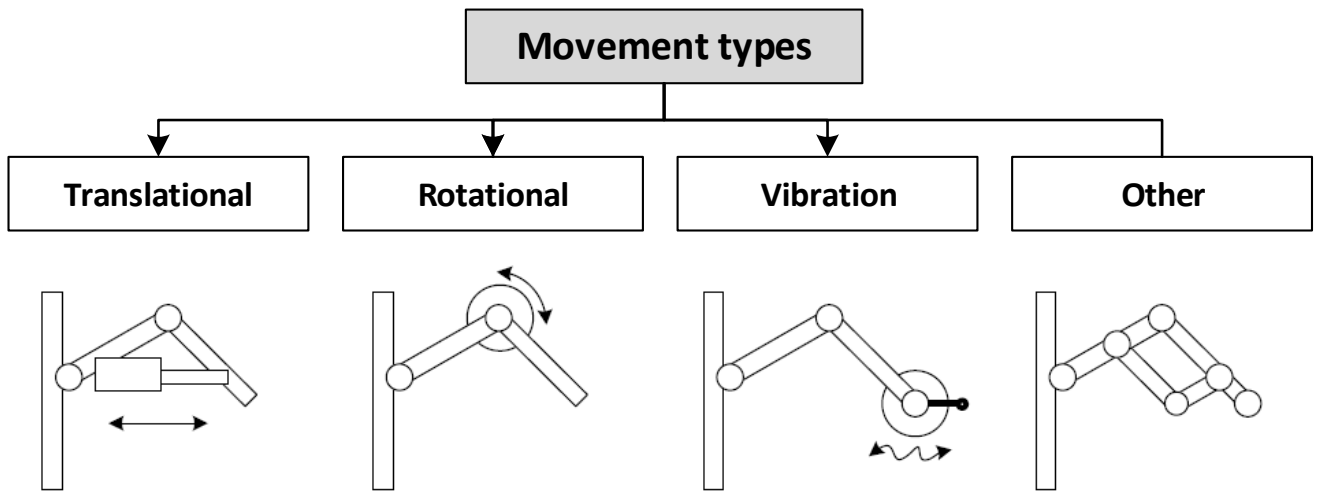


Figure 4 – Classification by type of movement

Electromechanical, hydraulic and pneumatic drives can be used in weighing systems. The most widespread are electric drives, due to the simplicity of energy supply, control accuracy and high efficiency. Hydraulic and pneumatic drives are used in the design of exoskeletons with increased load requirements. The classification by drive type is shown in Figure 5.

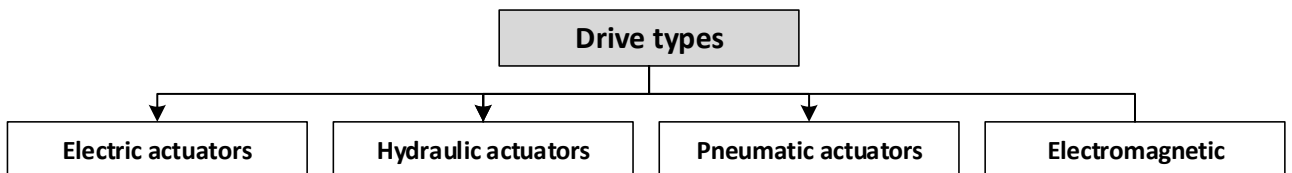


Figure 5 – Classification by drive type

Reducers are used as devices that convert drive energy into mechanical energy of devices [5]. For rehabilitation devices after injuries and neurological diseases, self-braking low-speed gears are most often used, for example, a screw-nut gear or a worm gear. Transmissions with flexible connections (belt, cable, various lever and cam systems) are used less commonly.

Both high-speed rack and pinion gears and low-speed wave gearboxes are used in simulators and exoskeletons. To reduce the speed of electric motors, gear and

planetary gears are also often used. Among the most rarely used gears are chain gears. The types of mechanical transmissions are shown in Figure 6.

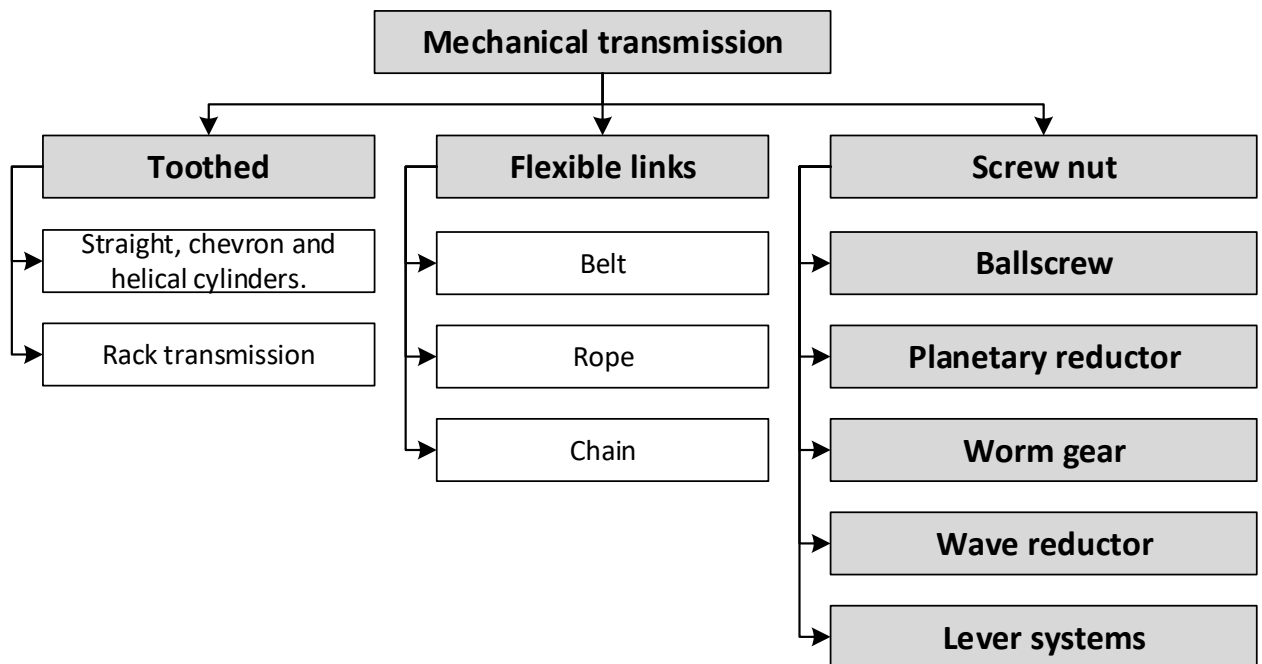


Figure 6 – Classification by type of mechanical transmission

By the principle of control, one can distinguish: non-adjustable, adjustable by position, adjustable by position and speed, multi-axis control, intelligent control. The type of regulator used in the drive system can also vary. So for pneumatic and hydraulic cylinders, relay control is used, in which the cylinder fulfills the extreme positions at the required speed.

Uncontrolled drives are used as secondary ones in devices of vibration or oscillatory action; here, the required law of motion can be provided by the mechanical design of the drive. Such devices are not common in biomechanical rehabilitation devices.

In multi-axis drives, several parameters of the drive movement are monitored simultaneously. The monitored parameters include position, speed, torque, current draw, torque or force being developed.

In drives with intelligent controllers, the principles of fuzzy logic, neural network control, etc. are implemented.

The classification by the type of management is shown in Figure 7.

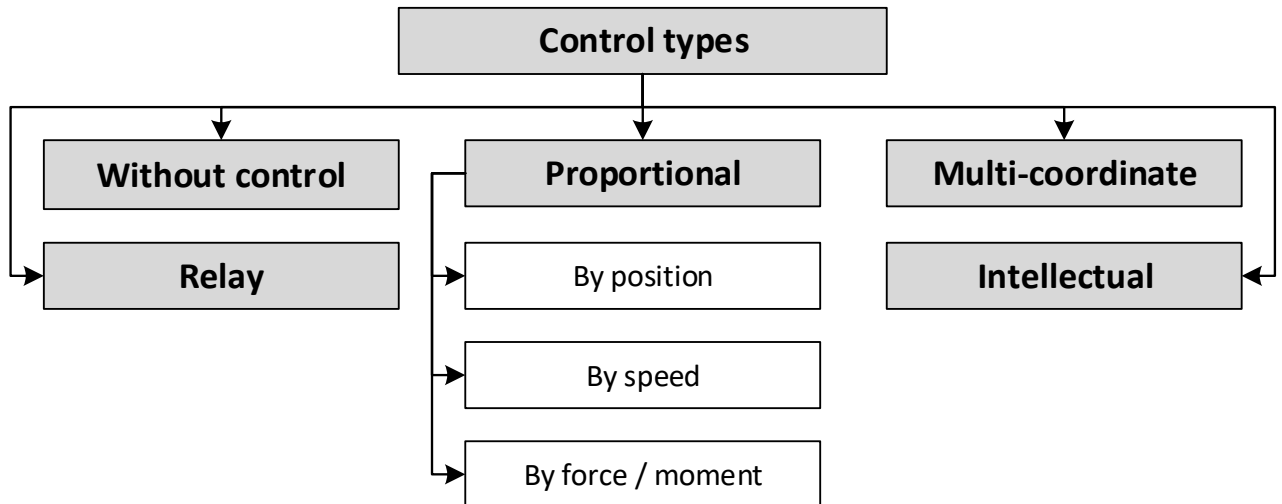


Figure 7 – Classification by type of management

The most commonly used type of drive in robotic rehabilitation systems is an electric drive, so it makes sense to consider in more detail the classification of an electric drive by the type of electric motor used (see Figure 8).

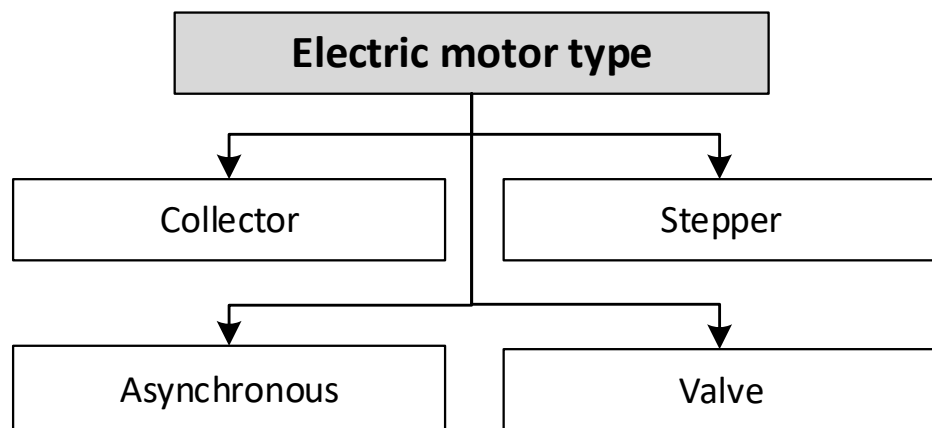


Figure 8 – Classification by type of electric motor

1.6 Rehabilitation for pathologies of the musculoskeletal system

Pathologies and injuries of the musculoskeletal system (MSA) lead to limitation of the ability to move, self-service and provide for everyday needs. Untimely start of rehabilitation measures or their use in full may be the reason for the formation of disability.

In the post-immobilization period of rehabilitation, the following tasks are solved: reducing pain, increasing mobility and elasticity of tissues, amplitude of motion in the joints. At this stage, muscle tone, posture are normalized and the vestibular apparatus is trained. The comprehensive rehabilitation program at this stage includes mechanotherapy – the use of mechanical, or electric or pneumatic-driven devices in order to facilitate movements and increase mobility in the joints, and to increase the load on certain muscle groups in order to strengthen them.

The proposed hardware and software complex compensates for a part of the human body weight (5 – 100%), allowing relieving the load from the spine and lower extremities of patients, significantly increasing the effectiveness of rehabilitation measures and providing mobility to sedentary patients.

The complex can be used for all diseases with movement disorders, for example, walking disorders due to stroke, brain and spinal cord injuries, multiple sclerosis, spinal injuries, demyelinating diseases and parkinsonism.