

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

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.04.06 Мехатроника и робототехника
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Управление мобильным роботом повышенной проходимости
УДК 007.52-026.26:004.896

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8EM02	Поберезкин Никита		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. Каф. – руководитель ОАР на правах кафедры	Филипас Александр Александрович	К.Т.Н., доцент		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Беляев Александр Сергеевич			

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Концепция стартап-проекта»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШИП	Антонова Ирина Сергеевна	К.Э.Н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ШБИП	Федоренко Ольга Юрьевна	д.м.н, профессор		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. Каф. – руководитель ОАР на правах кафедры	Филипас Александр Александрович	К.Т.Н., доцент		

Томск – 2022 г.

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 организовать 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)-6	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики
ОПК(У)-2	Владение в полной мере основным физико-математическим аппаратом, необходимым для описания и исследования разрабатываемых систем и устройств
ОПК(У)-3	Владение 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	Готовность 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	Способность использовать методы современной экономической теории при оценке эффективности разрабатываемых и исследуемых систем и устройств, а также результатов своей профессиональной деятельности
ОПК(У)-6	Готовность пользоваться основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способность 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

Код компетенции	Наименование компетенции
ПК(У)-2	Способность 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	Способность разрабатывать экспериментальные макеты управляющих, информационных и исполнительных модулей мехатронных и робототехнических систем и проводить их исследование с применением современных информационных технологий
ПК(У)-4	Способность 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	Способность 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	Готовность к составлению аналитических обзоров и научно-технических отчетов по результатам выполненной работы, в подготовке публикаций по результатам исследований и разработок
ПК(У)-7	Способность внедрять на практике результаты исследований и разработок, выполненных индивидуально и в составе группы исполнителей, обеспечивать защиту прав на объекты интеллектуальной собственности
ПК(У)-8	Готовность к руководству и участию в подготовке технико-экономического обоснования проектов создания мехатронных и робототехнических систем, их подсистем и отдельных модулей
ПК(У)-9	Способность 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	Способность участвовать в разработке конструкторской и проектной документации мехатронных и робототехнических систем в соответствии с имеющимися стандартами и техническими условиями
ПК(У)-11	Готовность разрабатывать методику проведения экспериментальных исследований и испытаний мехатронной или робототехнической системы, способностью участвовать в проведении таких испытаний и обработке их результатов
ПК(У)-12	Готовность 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» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники

Направление подготовки – 15.04.06 Мехатроника и робототехника

Уровень образования – Магистратура

Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

Период выполнения – Весенний семестр 2021 /2022 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:	06.06.2022
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
27.05.2022 г.	<i>Основная часть ВКР</i>	60
30.05.2022 г.	<i>Раздел «Социальная ответственность»</i>	20
30.05.2022 г.	<i>Раздел «Концепция стартап-проекта»</i>	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. Каф. – руководитель ОАР на правах кафедры	Филипас Александр Александрович	К.Т.Н.		16.02.2022

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Беляев Александр Сергеевич			16.02.2022

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. Каф. – руководитель ОАР на правах кафедры	Филипас Александр Александрович	К.Т.Н.		16.02.2022

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

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.04.06 Мехатроника и робототехника
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8EM02	Поберезкину Никите

Тема работы:

Роботизированный бар модульного типа	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	27.04.2022 №117-28/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	06.06.2022
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объект исследования – мобильная робототехническая платформа</p> <p>Разрабатываемый объект должен автономно передвигаться по пересечённой местности, производить работу с измерительным инструментом, а также детектировать аварийные ситуации на предприятиях.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (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).</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Представление алгоритма управления робототехническими системами по эквивалентному вектору силы системы 2) Разработка математической модели робототехнической системы 3) Разработка и изготовление мобильной робототехнической платформы 4) Апробация результатов моделирования на физическом стенде
<p>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Структурные схемы управления 2) Блок-схемы алгоритма управления мобильной платформой

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Концепция стартап-проекта	Антонова Ирина Сергеевна, доцент ШИП, к.э.н.
Социальная ответственность	Федоренко Ольга Юрьевна, профессор ООД ШБИП, д.м.н.
Раздел, выполненный на иностранном языке	Пичугова Инна Леонидовна, старший преподаватель ОИЯ ШБИП

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Управление мобильным роботом повышенной проходимости

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	16.02.2022
---	------------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. Каф. – руководитель ОАР на правах кафедры	Филипас Александр Александрович	к.т.н.		16.02.2022
Ассистент ОАР ИШИТР	Беляев Александр Сергеевич			16.02.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8EM02	Поберезкин Никита		16.02.2022

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА»

Студенту:

Группа	ФИО
8EM02	Поберезкин Никита

Школа	ИШИТР	Направление	15.04.06 Мехатроника и робототехника
Уровень образования	магистрант		

Перечень вопросов, подлежащих разработке:

<i>Описание продукта как результата НИР</i>	Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР (функциональное назначение, основные потребительские качества)
<i>Интеллектуальная собственность</i>	Способы защиты интеллектуальной собственности
<i>Объем и емкость рынка</i>	Оценивается TAM, SAM и SOM
<i>Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли</i>	Современное состояние и перспективы отрасли, к которой принадлежит представленный в ВКР продукт
<i>Планируемая стоимость продукта</i>	Себестоимость продукта
<i>Конкурентные преимущества создаваемого продукта</i>	Конкурентные преимущества создаваемого продукта, сравнение технико-экономических характеристик с отечественными и мировыми аналогами. Провести патентный поиск
<i>Целевые сегменты потребителей</i>	Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта
<i>Бизнес-модели проекта.</i>	Разработать бизнес-модель SPACE и по Остервальду
<i>Производственный план и план продаж</i>	Построить прогноз продаж, сформировать денежный поток от реализации продукта
<i>Оценка эффективности инвестиций</i>	Оценить показатели NPV, PI, DPP, IRR
<i>Стратегия продвижения продукта на рынок</i>	Определить каналы продвижения продукта
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» (со-руководитель ВКР):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШИП	Антонова Ирина Сергеевна	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8EM02	Поберезкин Никита		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа		ФИО	
8ЕМ02		Поберезкин Никита	
Школа	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	Отделение (НОЦ)	Отделение автоматизации и робототехники
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	15.04.06 Мехатроника и робототехника

Тема ВКР:

Управление мобильным роботом повышенной проходимости
--

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Введение

- Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.
- Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения

Объект исследования: мобильная робототехническая платформа шагающего типа для диагностики утечек и аварийных ситуаций на предприятиях.
Область применения: нефтедобывающие, нефтеперерабатывающие, химические, ядерные производства, вместе с этим, атомные, гидро и теплоэлектростанции.
Рабочая зона: физическая испытательная лаборатория с вытяжкой. Технологический процесс включает в себя следующие виды работ: работа с электрооборудованием, работа с конструкторской документацией, работа с инструментами. Площадь отапливаемого помещения 50 м², освещение смешанное, наличие ПК, оборудование, рабочих столов операторов.
Размеры помещения: 7*7 м
Количество и наименование оборудования рабочей зоны: ПК (5 шт.), 3-D принтеры (3 шт.), паяльники (3 шт.), набор инструментов (2 шт.)
Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляемые в рабочей зоне: проектирование и разработка шагающего робота, разработка программного обеспечения, изготовление макета шагающего робота

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:

- специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;
- организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Трудовой кодекс Российской Федерации от 13.12.2001 г. N 197-ФЗ (ТК РФ);
 СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания;
 ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя;
 ГОСТ 12.2.033.-78. Рабочее место при выполнении работ стоя;
 ГОСТ 21889-76 Система "Человек-машина". Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования;
 ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. Перечень опасных и вредных факторов;
 ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
 СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-

	<p>95; ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов; ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление; ГОСТ Р 12.1.019-2017 ССБТ Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты; ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 27 ноября 2020 года №835н «Об утверждении Правил по охране труда при работе с инструментом и приспособлениями». МР 2.2.9.2311-07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности». ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования. ГОСТ 17.4.3.04-85 Охрана природы (ССОП). Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения. ГОСТ 17.1.3.07-82 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков.</p>
<p>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов - Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Опасные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий. 2. Движущиеся (в том числе разлетающиеся) твердые, жидкие или газообразные объекты, наносящие удар по телу работающего 3. Неподвижные режущие, колющие, обдирающие, разрывающие части твердых объектов, воздействующие на работающего при соприкосновении с ним <p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения; 2. Отсутствие или недостаток необходимого естественного освещения; 3. Повышенный уровень шума; 4. Монотонность труда, вызывающее монотонию. <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: использование защитных костюмов, беруши, наушники, перчатки, защитные ограждения</p> <p>Расчет: расчет системы искусственного освещения</p>

<p>3. Экологическая безопасность <u>при разработке проектного решения</u></p>	<p>Воздействие на селитебную зону: не выявлено Воздействие на литосферу: сброс твердых отходов производства механических и полупроводниковых комплектующих Воздействие на гидросферу: утечка жидких компонентов (например, смазочные материалы). Воздействие на атмосферу: не выявлено</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях <u>при разработке проектного решения</u></p>	<p>Возможные ЧС: Природные катастрофы (наводнения, ураган и т.д.); Геологические воздействия (землетрясения, оползни, обвалы, провалы территории и т.д.); Техногенные аварии (обрушение здания, пожар) Наиболее типичная ЧС: пожар по причине короткого замыкания</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Профессор ООД ШБИП</p>	<p>Федоренко Ольга Юрьевна</p>	<p>Д.М.Н.</p>		

Задание принял к исполнению

студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>8ЕМ02</p>	<p>Поберезкин Никита</p>		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 125 страниц, 37 рисунков, 17 таблиц, 39 используемых источников и приложения на 22 листах.

Ключевые слова: управление, мобильный робот, повышенная проходимость, разработка робота, робот на предприятиях.

Объектом исследования является мобильная робототехническая платформа. Разрабатываемый объект должен автономно передвигаться по пересечённой местности, производить работу с измерительным инструментом, а также детектировать аварийные ситуации на предприятиях.

Цель работы: управление мобильной робототехнической платформой повышенной проходимости.

В процессе работы, был предложен алгоритм управления электромеханическими системами по эквивалентному вектору тяги системы. Были предложены этапы проведения исследований с постепенным увеличением сложности исследуемых систем.

Вместе с этим, проводилась разработка мобильной платформы, во время которой проводилось исследование прочностных характеристик движителя под разными углами действия силы, в результате этого, была скорректирована форма движителя и его сечения. Результатом проектирования стал изготовленный прототип.

В ходе выполнения работы была разработана система управления роботом. Результатом разработки является алгоритм управления роботом гексаподом с дуговыми движителями.

В будущем планируется применение представленного алгоритма управления на изготовленном прототипе робота, вместе с этим, планируется проведение исследований режимов передвижения робота.

Содержание

Введение.....	15
1 Представление алгоритма управления робототехническими системами при помощи эквивалентного вектора тяги	16
1.1 Описание алгоритма	16
1.2 Этапы проведения исследований	20
1.3 Получение векторов для систем.....	22
1.3.1 Получение вектора силы системы, на примере объекта в аэротрубе под наклоном	22
1.3.2 Получение вектора силы системы, на примере объекта в аэротрубе под наклоном	27
2 Разработка мобильной робототехнической платформы шагающего типа.....	29
2.1 Выбор двигателя шагающей конструкции	29
2.2 Топология системы.....	35
2.3 Поиск параметров двигателя.....	37
2.4 Описание структуры робототехнической платформы.....	42
2.5 Выбор элементной базы разрабатываемого робота	44
2.5.1 Выбор двигателя для системы.....	44
2.5.2 Выбор силовой управляющей части.....	48
2.5.3 Выбор управляющего контроллера	50
2.5.4 Выбор измерительных устройств системы.....	52
2.6 Формирование функциональной и принципиальной схем с выбранными устройствами	53

2.7	Изготовление стенда мобильной робототехнической платформы...	55
3	Разработка алгоритма работы робототехнической платформы	56
3.1	Система управления мехатронным модулем	56
3.2	Получение кинематической модели дугового движителя.....	58
3.3	Алгоритм управления мобильной шагающей платформой.....	62
4	Концепция стартап-проекта	65
4.1	Описание продукта как результата НИР	65
4.2	Интеллектуальная собственность	66
4.3	Объем и емкость рынка	66
4.4	Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли.....	68
4.5	Планируемая стоимость продукта	71
4.6	Конкурентные преимущества создаваемого продукта, сравнение технико-экономических характеристик с отечественными и мировыми аналогами.....	75
4.7	Целевые сегменты потребителей	79
4.8	Бизнес-модели проекта. Производственный план и план продаж.....	79
4.9	Стратегия продвижения продукта на рынок.....	82
5	Социальная ответственность.....	84
5.1	Введение.....	84
5.2	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	85
5.3	Производственная безопасность	86

5.4	Экологическая безопасность	93
5.5	Безопасность в ЧС.....	93
5.6	Выводы по разделу	95
	Заключение	97
	Список публикаций.....	98
	Список литературы	99
	Приложение А (обязательное) Техническое задание на разработку	103
	Приложение Б (обязательное) Принципиальная схема нижнего уровня.....	107
	Приложение В (справочное) Раздел диплома на английском языке	110

2 Разработка мобильной робототехнической платформы шагающего типа

Исходя из технического задания на разработку робота был составлен ряд задач на разработку:

- Передвигаться со скоростью не менее 1,7 м/с;
- Преодолевать препятствия на ходу высотой не менее 8 см;
- Автономная работа не менее 1 часа;
- Измерение тока и скорости вращения приводов;
- Измерение температуры, детектирование утечки газа и задымления.

2.1 Выбор движителя шагающей конструкции

Перед разработкой необходимо определиться с типом движителя шагающей платформы. Шагающие движители можно подразделить на несколько основных классов:

- Рычажный;
- Телескопический;
- Циклический.

Рычажные движители делятся на однорычажные и пантографные. За счёт подвижных элементов однорычажные движители могут изменять свою конфигурацию. Количество степеней свободы зависит от количества данных элементов и обычно на одну больше. Сегменты соединяются между собой посредством привода, ведущий сегмент имеет два привода. Пантографный движитель имеет возможность управлять опорной частью конечности. Данный тип движителя применим в нескольких вариантах. В первом варианте применения робот при подъеме на конечности в больших пределах изменяет

свою высоту, при этом опорная часть конечности будет оставаться на одном месте. Второй вариант применения подразумевает применение привода для управления опорным сегментом, при этом привод может располагаться в корпусе робота, а не на сочленении, как это было у рычажных движителей. Данный вариант позволяет значительно снизить силу тяжести, которая действует на конечность при подъеме, что приводит к повышению устойчивости.

Телескопический движитель представляет из себя поршень с пружинным, пневматическим или гидравлическим приводом. Обычно поршень устанавливается на оси вращения без дополнительных элементов. В рычажных движителях движение происходило за счёт изменения высоты подъёма конечности, вместо этого, в телескопических движителях происходит изменение уровня выдвижения цилиндра поршня. Помимо этого, при применении данного типа движителей, движение вперёд зависит от угла поворота привода, на котором закреплён поршень и плоскость вращения которого перпендикулярна направлению движения и пересекает поверхность. Для передвижения боком и поворота требуется ещё один привод, который будет изменять угол наклона к поверхности в плоскости, перпендикулярной первой. Ещё одним отличием телескопического движителя от рычажного является дуга вращения, которая находится в перпендикулярной плоскости к плоскости движения.

Циклический движитель представляет из себя один сегмент какой-либо формы, закрепленный валу привода, который вращается в перпендикулярной плоскости относительно плоскости движения. Для работы данного типа движителя необходимо наличие одного привода, когда в других минимальным количеством приводов является два, для вращения в двух плоскостях. Циклический движитель обладает повышенной скоростью при передвижении на пересечённых участках поверхности, в связи с тем, что имеет всего один

привод и одно сочленение, однако он уступает в проходимости перед рычажными и телескопическими движителями.

На данном этапе можно сформировать таблицу с преимуществами и недостатками каждого класса движителей. Сравнение движителей представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ классов движителей

Наименование	Рычажные	Телескопические	Циклические
Мин. количество приводов	2	2	1
Мин. количество сочленений	2	2	1
Скорость движения роботов	Низкая	Средняя	Высокая
Устойчивость при движении	Высокая	Низкая	Высокая
Проходимость роботов	Высокая	Высокая	Средняя
Сложность изготовления	Средняя	Высокая	Низкая

Поскольку разрабатываемому роботу необходимо передвигаться со скоростью не менее 1,7 м/с и преодолевать препятствия не менее 8 см, был выбран циклический тип движителя.

В свою очередь, циклический движитель имеет несколько представлений, они представленных на рисунке 8. Необходимо определиться с наиболее подходящим для поставленных задач.



Рисунок 8 – “Компас”, “Четырёх-стержневой” и “Полукруглый” варианты движителей

Движитель формата “Компас” представляет из себя прямую опору, сделанную из пластичного материала и закрепленную верхней частью к приводу. При движении данный тип движителя соприкасается с поверхностью в одной точке и описывает траекторию, представленную на рисунке 9. Из-за чего, при движении робота на таких движителях возникают колебания корпуса, которые снижают стабильность передвижения. Вместе с этим, во время цикла соприкосновения с поверхностью данного движителя сохраняется плечо приложения силы, что ведет к увеличению энергопотребления двигателя. Основным преимуществом движителя “Компас” является простота изготовления.

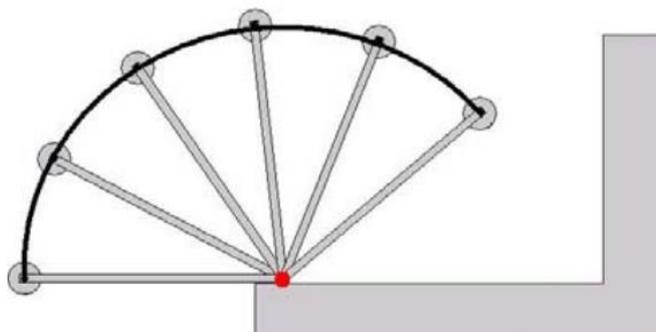


Рисунок 9 – Движитель “Компас” во время подъема по лестнице. Черная линия – траектория бедра, красная точка – точка контакта с поверхностью

“Четырёх-стержневой” движитель представляет из себя 2 пластины из жесткого материала и 2 пластины из пластичного материала, закрепленные между собой по форме, напоминающей конечности четырехлапых животных. Данный тип движителя при движении имеет 2-е точки опоры на поверхность и траекторию, показанную на рисунке 10. В таком варианте исполнения циклический движитель потребляет меньше энергии при работе, а также, при подъеме на препятствия, обладает уменьшенной колебательностью. При движении по прямой данный движитель вызывает колебания схожие с движителем “Компас”, однако его пластичные свойства выше.

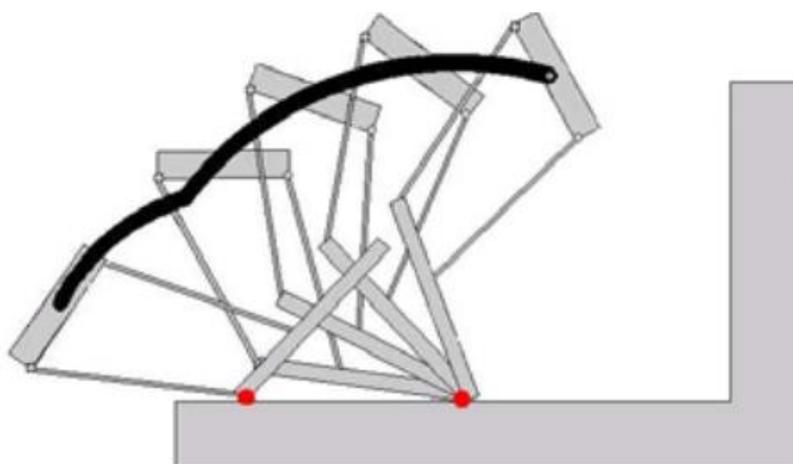


Рисунок 10 – “Четырёх-стержневой” движитель в покадровой анимации.
Черная линия – траектория бедра. Две точки – это (последовательные) точки
контакта ног

Дуговой движитель – это усредненный вариант между предложенными ранее. По своей сути данный движитель является дугой из пластичного материала, закрепленной на оси вращения с одного конца. Движитель также относят к гибридным, в связи с тем, что при движении он совершает одноосевое вращение каждого из элементов, в некоторых источниках [8] называют шагающим с «колёсным» принципом шагания. На рисунке 11 приведена траектория, которую описывает движитель при перемещении по поверхности. Пользуясь рисунком, можно сказать, что данный движитель будет иметь

меньшее потребление мощности и меньшие колебания корпуса по ходу движения по прямым и пересеченным участкам поверхности. Уменьшение колебаний при передвижении позволяет увеличить устойчивость, что является несомненным преимуществом для шагающих конструкций.

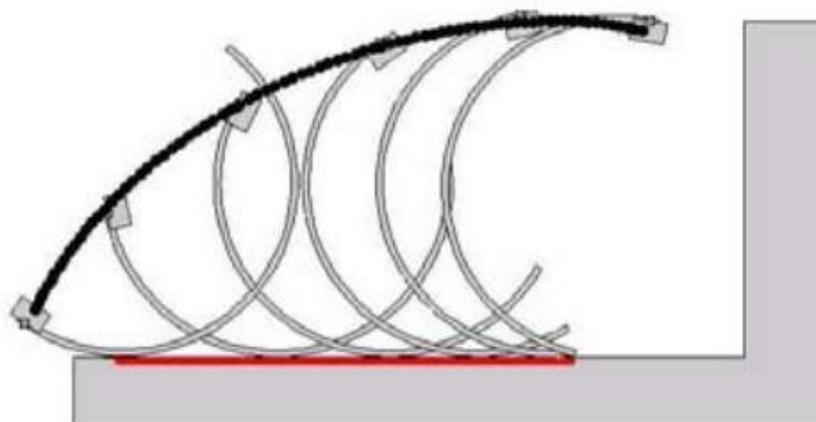


Рисунок 11 – Дуговой движитель в покадровой анимации. Черная линия – траектория вала двигателя. Красная линия – точки контакта ног

Учитывая описанное выше можно сформировать таблицу (Таблица 2), в которой будут отражены достоинства и недостатки каждого типа циклических движителей.

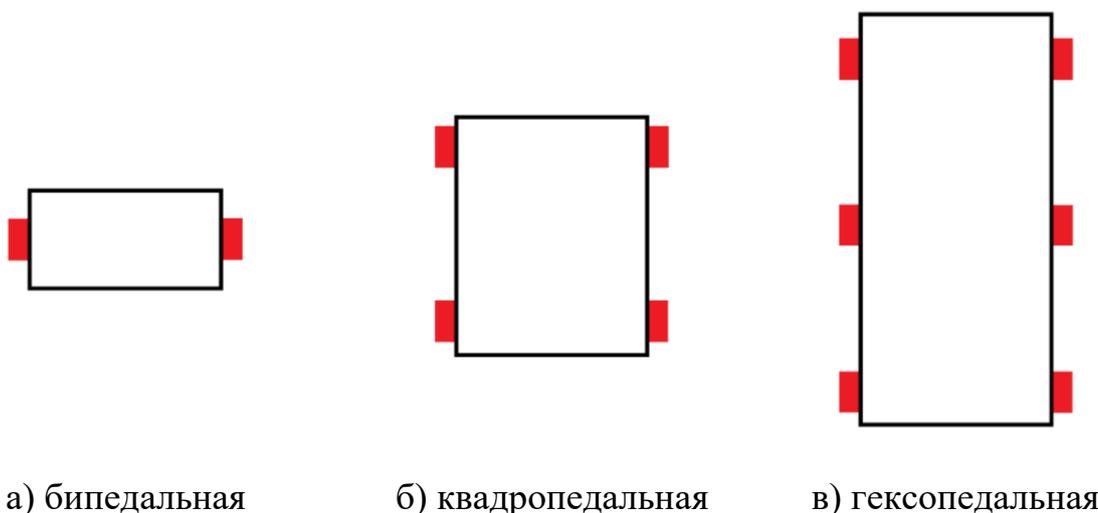
Таблица 2 – Сравнительный анализ циклических движителей

Наименование	Компас	Четырех-стержневой	Дуговой
Проходимость	Высокая	Высокая	Высокая
Скорость движения	Высокая	Высокая	Высокая
Энергозатраты	Высокие	Средние	Низкие
Колебания при движении	Значительные	Средние	Незначительные
Изготовление	Легкое	Тяжелое	Среднее

Учитывая данные, представленные в таблице выше, для разрабатываемого робота был выбран циклический дуговой движитель.

2.2 Топология системы

Выбор корпуса стоит осуществлять из соображений устойчивости робота при движении, которая напрямую зависит от количества шагающих элементов в конструкции. Топологии корпусов бывают разные, одними из самых распространённых являются бипедальная (рисунок 12 а), квадропедальная (рисунок 12 б) и гексапедальная (рисунок 12 в).



а) бипедальная

б) квадропедальная

в) гексопедальная

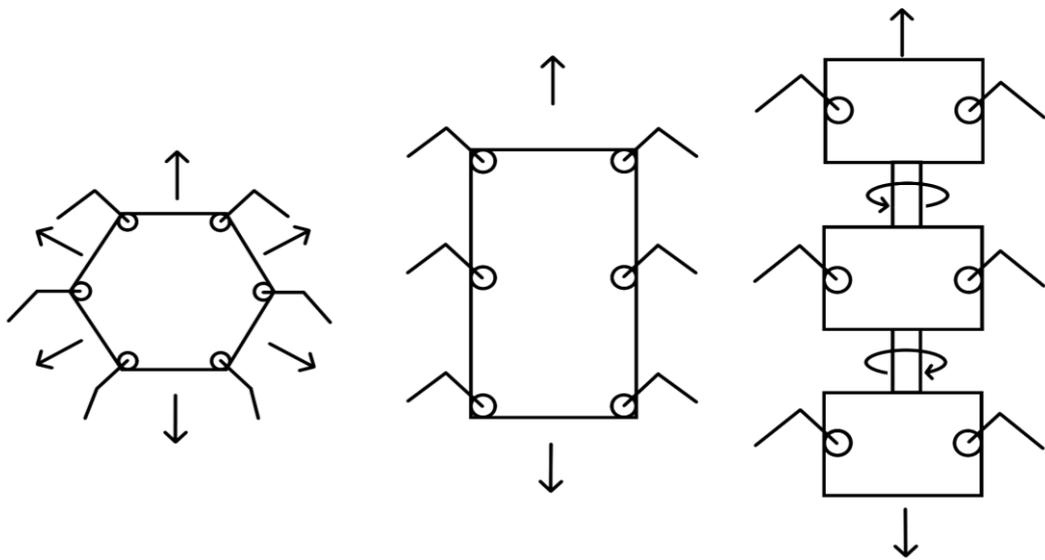
Рисунок 12 – Формы топологий

Из представленных топологий, самой устойчивой будет являться гексапедальная, поскольку в любой момент времени при передвижении у неё будут три точки опоры на поверхность, по которой происходит передвижение. В связи с этим, для разрабатываемой робототехнической платформы была выбрана именно такая топология.

Топология робототехнической платформы должна также учитывать геометрию корпуса. Поскольку ранее было решено использовать гексапедальный тип конструкции, то геометрии для бипедов и квадропедов

рассматриваться не будут. По геометрическим параметрам конструкции можно разделить на следующие виды [9]:

- Осесимметричный корпус (рисунок 13 а). Обычно это гексагональные или округлые формы;
- Продолговатый корпус (рисунок 13 б). Чаще всего это прямоугольные формы;
- Шарнирный корпус (рисунок 13 в). Корпус с подвижными частями тела.



а) осесимметричный

б) продолговатый

в) шарнирный

Рисунок 13 – Схемы корпусов

Основным преимуществом осесимметричного корпуса является отсутствие конструктивной ориентационной направленности. Выше был выбран дуговой циклический шагающий движитель, применение данного типа корпуса не представляется возможным. Основным преимуществом продолговатого корпуса является большая конструктивная приспособленность к движению вдоль оси симметрии, то есть движению прямо. Эта способность достигается за счёт выраженной направленности данного корпуса. Шарнирный корпус позволяет роботам достигать большей адаптивности при движении, он

представляет из себя продолговатую конструкцию, состоящую из шарнирно закрепленных частей. Недостатком конструкции является большое количество соединений, что ведет к увеличению энергопотребления и уменьшению надёжности конструкции. Исходя из всего вышеперечисленного можно сделать вывод, в данном случае наилучшим вариантом будет продолговатый корпус.

В итоге, общая топология системы представляет из себя корпус прямоугольной формы, с размерами указанными в техническом задании и шесть одноосевых циклических шагающих движителей, закреплённых по три на каждой стороне. Данная топология будет иметь возможность передвигаться разными способами, такими как:

- трипод, когда все ноги гексапода разбиваются на две группы, образующие триногу, имеющую три точки опоры в плоскости движения;
 - бипедальный, движение осуществляется за счёт поочередно перемещающихся двух ног, при этом остальные находятся в положении соприкосновения с поверхностью;
 - квадропедальный, движение осуществляется за счёт поочередно перемещающихся четырёх ног, при этом остальные находятся в положении соприкосновения с поверхностью;
 - гексопедальный, все ноги гексапода движутся одновременно.
- Данный способ может быть применим для выполнения динамических прыжков, и пересечения определённого рода препятствий.

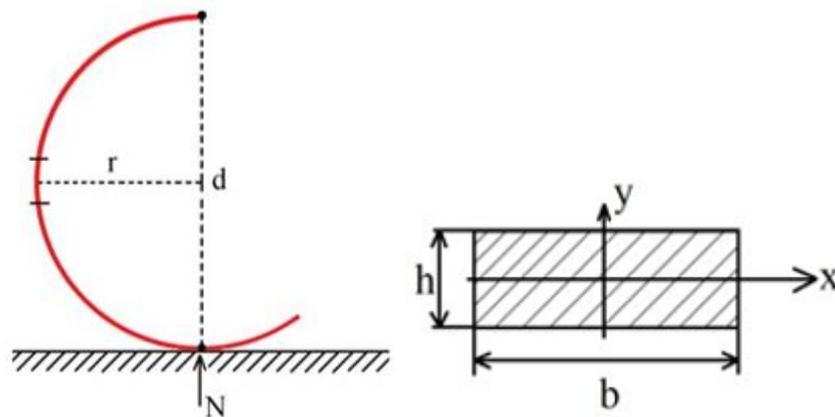
2.3 Поиск параметров движителя

Определившись с топологией робота и движителями, необходимо определить диаметр движителя, его толщину и ширину сечения.

Диаметр движителя необходимо выбирать исходя из условий проходимости. В техническом задании задан минимальный размер

препятствия, которое нужно преодолевать, и он равняется 80 мм. Было решено выбрать диаметр движителя равным 50 % от минимально допустимой высоты препятствия, что составляет 120 мм. Такой диаметр движителя позволит роботу преодолевать препятствия от 80 мм до 120 мм и передвигаться с высокой скоростью.

Зная диаметр движителя можно решить из какого материала можно будет изготовить движители и найти ширину и толщину поперечного сечения движителя. На рисунке 14а представлено схематичное изображение движителя, его сечение показано на рисунке 14б.



а) схематичное изображение б) поперечное сечение

Рисунок 14 – Изображение движителя

Во время движения на движитель действует изгибающая сила, которая порождает изгибающий момент. Найти подходящий материал для изготовления движителя и его ширину, и толщину можно с помощью условия прочности [10]:

$$\sigma_{\text{макс}} = \frac{M_{\text{макс}}}{W_x} \leq [\sigma], \quad (12)$$

где $\sigma_{\text{макс}}$ – максимальное нормальное напряжение, МПа;

$M_{\text{макс}} = N \cdot r$ – максимальный изгибающий момент, Н·м [14];

$N = F_{\text{тяж}} = m \cdot g$ – сила реакции опоры, Н [14];

r – плечо действия силы, м;

$$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6} - \text{осевой момент сопротивления сечения, м}^3 \text{ [10].}$$

Пусть ширина и толщина движителя будут 20 мм и 4 мм соответственно. Тогда, зная максимальную массу робота, можно получить следующие параметры, по выражению (12):

$$M_{\text{макс}} = 4,39 \text{ Нм};$$

$$W_x = 5,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3;$$

$$\sigma_{\text{макс}} = 82,32 \text{ МПа.}$$

Максимальная нагрузка, которую сможет выдержать движитель с данным сечением 82 МПа. Из источника [11] известно, что для PLA пластика, одного из самых распространённых пластиков для 3D-печати, условие прочности на изгиб составляет 94,2 МПа, что может говорить о соблюдении условия (12). Вместе с этим, предел прочности для других видов пластиков PETG и ABS составляет 76 МПа и 65 МПа соответственно. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что наиболее подходящим материалом, при применении в изготовлении аддитивных технологий, будет PLA пластик, а также толщина движителя должна быть не менее 4 мм по всему движителю. Для проверки аналитических вычислений было проведено исследование выбранных параметров движителя в среде моделирования Autodesk Fusion 360. Исследования проводились в режиме статических нагрузок. На рисунке 15 представлено моделирование напряжения на изгиб движителя с поперечным сечением, указанным выше, на который действует сила равная 80 Н.

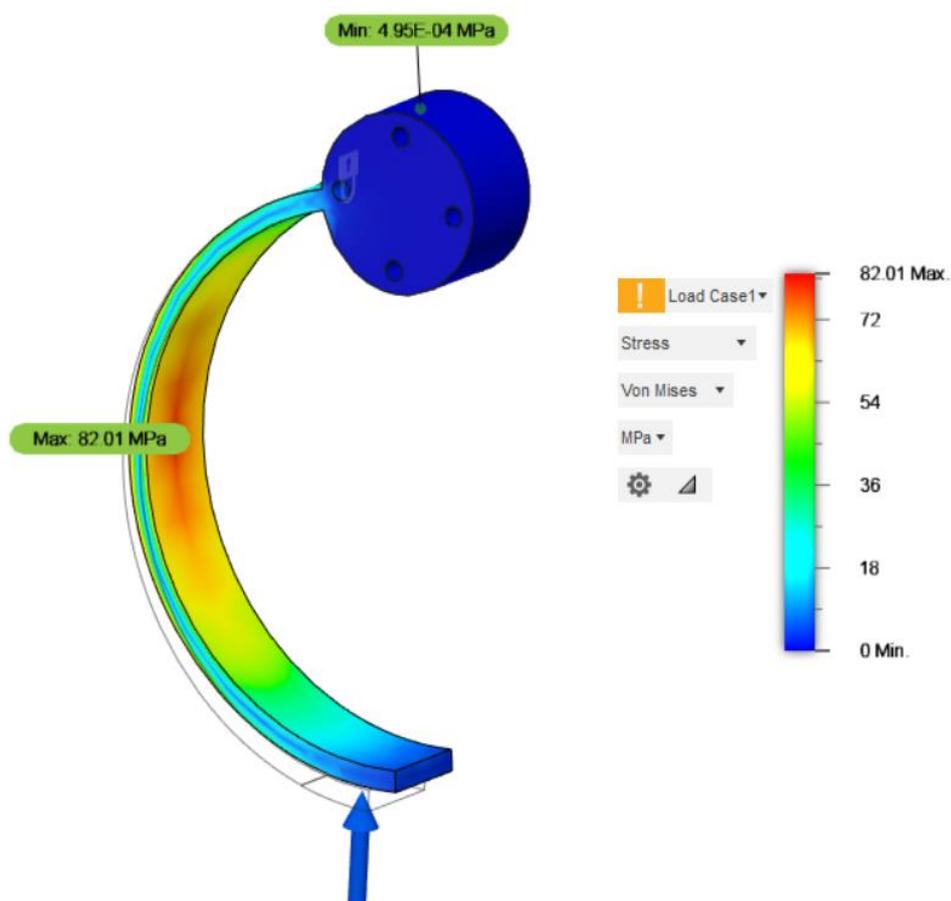
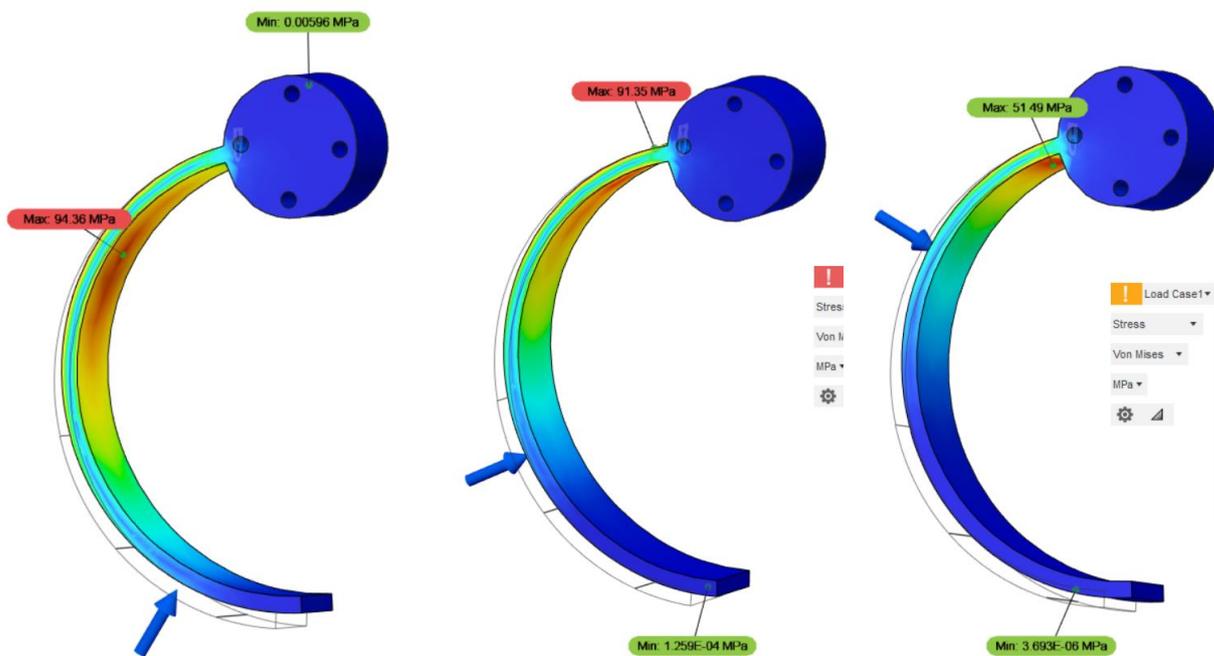


Рисунок 15 – Моделирование нагрузки в среде Autodesk Fusion

Рисунок выше подтверждает правильность аналитических расчётов, максимальное напряжение в данном случае составляет 82,01 МПа. Однако, при движении на движители будут действовать силы под разными углами, на рисунке 16 представлены движители с действием на них сил под разными углами. Из данного рисунка можно заметить, что при изменении угла действия силы на 30 градусов относительно вертикальной оси (рисунок 16 а) максимальное напряжение выросло до значения 94,36 МПа, что превышает предельно допустимое значение для материала, выбранного выше.



а) 30 градусов

б) 60 градусов

в) 100 градусов

Рисунок 16 – Исследование движителя на нагрузки под разными углами

Данную проблему можно решить, увеличив толщину движителя в месте излома, пользуясь неравенством (12) была найдена толщина равная 6 мм. На рисунке 17 представлен движитель с увеличенной толщиной в месте излома до 6 мм. Из рисунка можно заметить, что увеличение толщины привело к снижению значения напряжения до 60,5 МПа, что удовлетворяет требованиям условия прочности.

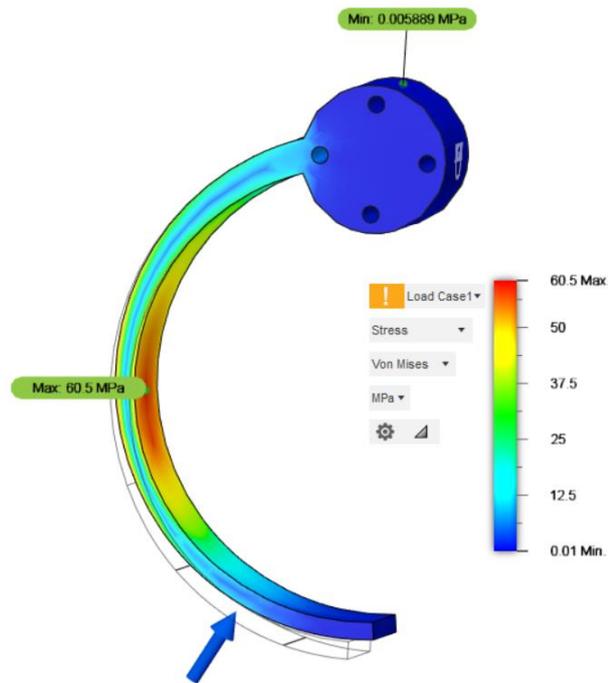


Рисунок 17 – Движитель с увеличенной толщиной в месте излома

2.4 Описание структуры робототехнической платформы

Учитывая топологию, описанную выше, для движения робототехнической платформы необходимо наличие шести приводов. Каждый привод должен состоять из двигателя, редуктора, датчиков обратной связи и схемы управления. В качестве схемы управления будет использоваться комбинация микроконтроллера, для генерации управляющих сигналов и силового драйвера, который будет преобразовывать управляющие сигналы с микроконтроллера в силовые сигналы для двигателя. В связи с необходимостью постоянно отслеживать положение движителя требуется применение датчика угла поворота. Поскольку управление системой с помощью эквивалентного вектора силы без измерения силы тока на приводе не представляется возможной, необходимо применение датчика тока для каждого привода. Для упрощения и удешевления изготовления было принято решение управлять двумя приводами с помощью одного контроллера. Поскольку все привода в системе должны быть согласованы, у них должна быть возможность обмена

данными друг с другом. На данном этапе можно сформировать мехатронный модуль включающий в себя две силовые схемы, контроллер, два двигателя и датчики.

Чтобы упорядоченно управлять приводными контроллерами необходим ещё один контроллер, в свою очередь, данный контроллер должен будет связываться с одноплатным компьютером. На одноплатном компьютере будут решаться задачи машинного зрения, сбора данных с необходимых датчиков и управлением этими данными.

Сформированная структурная схема платформы представлена на рисунке 18.

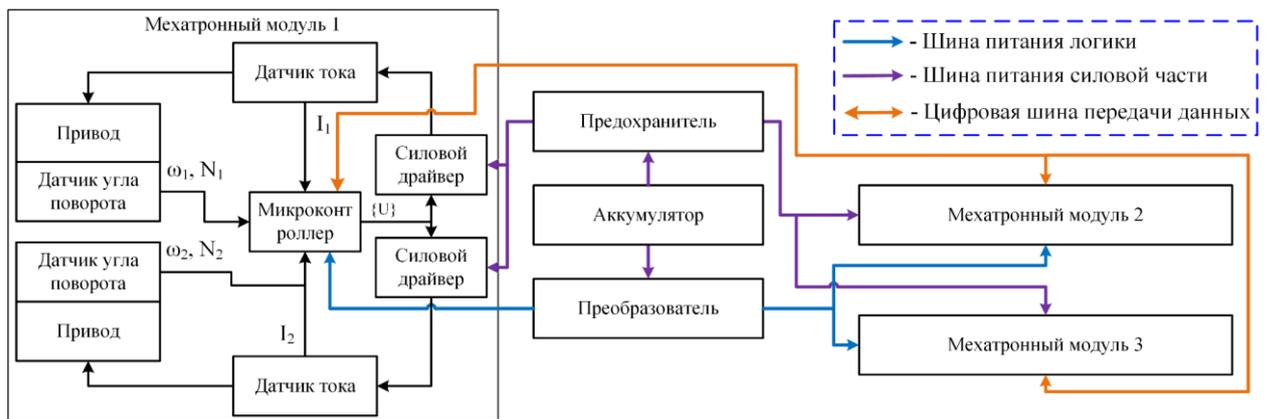


Рисунок 18 – Структура робототехнической платформы

На рисунке выше имеются следующие обозначения:

N_1, N_2 – количество оборотов двух датчиков угла поворота мехатронного модуля;

ω_1, ω_2 – угловые скорости двигателя, полученные с двух датчиков угла поворота мехатронного модуля;

I_1, I_2 – значения силы тока, полученные с двух датчиков тока мехатронного модуля;

$\{U\}$ – множество значений напряжений, подающихся с контроллера на силовые драйвера;

Для лучшего понимания работы системы необходимо произвести выбор исполнительных устройств системы и сформировать функциональную схему.

2.5 Выбор элементной базы разрабатываемого робота

2.5.1 Выбор двигателя для системы

При выполнении шагающих движений робот будет совершать колебательные движения, это связано с движителями в форме дуги. Точка крепления движителя к валу двигателя будет передвигаться по дуге. На рисунке 19 представлена схема движения движителя во время выполнения роботом одного шага.

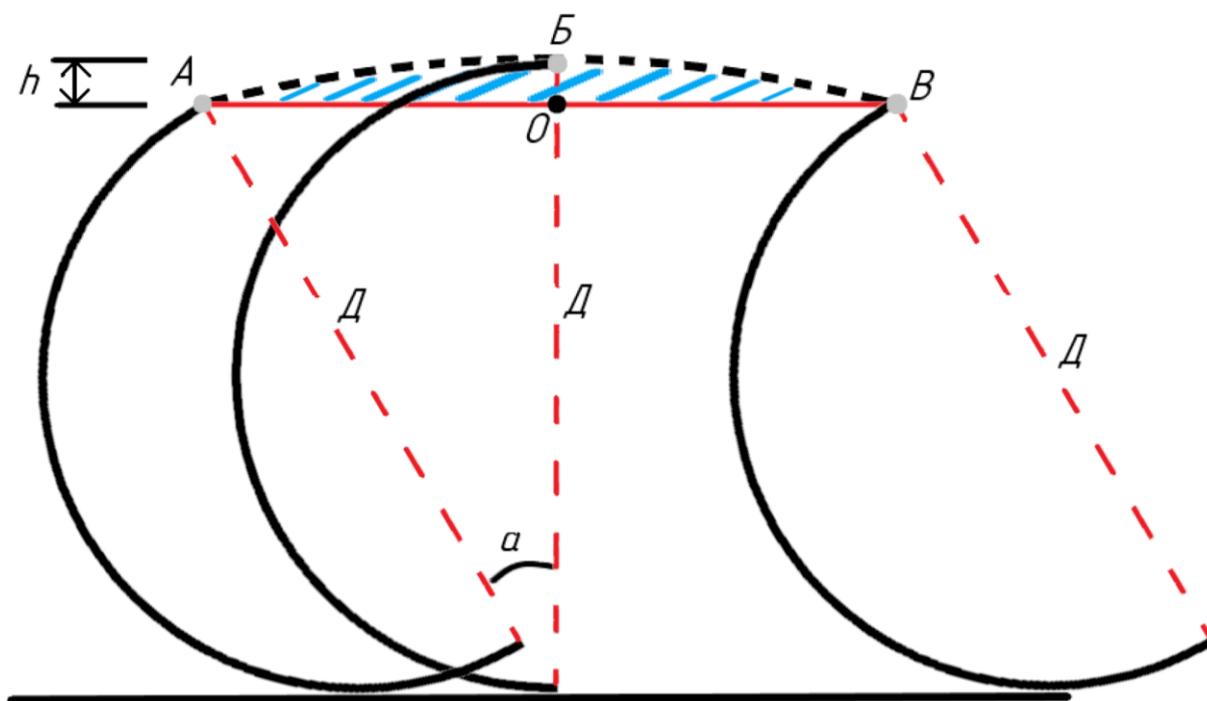


Рисунок 19 - Схема движителя в движении

Поскольку робот будет передвигаться с помощью шагов, движитель будет иметь две фазы передвижения, первая фаза - движитель двигается по земле, вторая фаза - движитель двигается в воздухе. Пусть точка A будет креплением движителя и началом движения, D диаметр дуги движителя. При

передвижении движителя на угол α , точка крепления окажется в точке B . Затем движитель, с конфигурацией, показанной на рисунке 19, начнёт отрываться от поверхности и перейдёт во вторую фазу. После завершения второй фазы, движитель снова окажется на поверхности под таким же углом α и начнётся первая фаза. В результате, точка крепления движителя к валу двигателя движется по дуге ABB . Стоит отметить, что передвижение этой точки по части дуги BB движитель находится в воздухе. Помимо этого, можно выделить сегмент $ABBO$.

Для преодоления препятствий в 80 мм, угол отклонения α будет равен $123,75^\circ$, при дальнейших расчётах это значение угла будет максимальным. Диаметр движителя D составляет 120 мм, он же является радиусом дуги ABB . Зная эти параметры можно вычислить расстояние AB , которое проходит точка крепления. Длина дуги AB , исходя из источника [12]:

$$L_{AB} = \frac{\alpha\pi}{180^\circ} \cdot D \quad (13)$$

Подставляя известные значения можно получить значение $L_{AB} = 0,259$ м. При преодолении данного расстояния точка будет подниматься на высоту h (рисунок 19), которую можно определить как высоту сегмента $ABBO$ [12], учитывая, что сегмент $ABBO$ имеет угол $2 \cdot \alpha$:

$$h = D \cdot \left(1 - \cos \frac{2\alpha}{2}\right) \quad (14)$$

Используя известные значения, высота получается $h = 0,187$ м.

При передвижении из точки A в точку B тело приобретает энергию равную [13]:

$$E = E_n + E_k, \quad (15)$$

где $E_n = mgh$ – потенциальная энергия, Дж;

$$E_k = \frac{m\mathcal{G}^2}{2} \text{ – кинетическая энергия, Дж;}$$

m – масса, которую необходимо будет поднимать движителю, кг;

g – скорость передвижения робота, м/с.

Если предполагать, что движение начинается в точке A и заканчивается в точке B , то задача сводится к нахождению работы по перемещению точки вверх на высоту h , соответственно:

$$A = E = E_n = mgh \quad (16)$$

Согласно [14], мощность является величиной, которая характеризует скорость преобразования или передачи электрической энергии, тогда:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{mgh}{t} \quad (17)$$

Подставляя в (17) (16), можно получить следующую зависимость:

$$N = \frac{mgD(1 - \cos \frac{2 \cdot \alpha}{2})}{t} \quad (18)$$

где $t = \frac{L_{AB}}{g}$ – время, за которое необходимо преодолевать расстояние AB (рисунок 19), для достижения заданной скорости, сек.

Зная пройденное расстояние и работу, которая совершается при прохождении этого расстояния, можно найти силу [14]:

$$F = \frac{A}{L_{AB}} = \frac{mgh}{L_{AB}} \quad (19)$$

При передвижении, робот имеет три точки опоры на поверхность, данные точки расположены в вершинах равнобедренного треугольника. В таком случае общая масса будет равномерно распределяться между тремя движителями. При массе робота в 8 кг, на каждый движитель будет приходиться по 2,7 кг. Подставляя в (18) и (19) известные значения можно получить параметры мощности и силы $N = 28$ Вт и $F = 19$ Н.

Зная силу и плечо приложения силы, которое равняется диаметру движителя, можно определить момент на валу двигателя:

$$M = Fd, \quad (20)$$

где $d = D$ – плечо приложения силы, м.

Подставляя в (20) выражение (19), можно получить следующую зависимость:

$$M = \frac{mgD(1 - \cos \frac{2 \cdot \alpha}{2})180}{\alpha\pi} \quad (21)$$

В результате вычислений, момент будет равен $M = 2,26$ Нм.

Помимо мощности и момента для выбора двигателя необходимо знать частоту вращения. Угловая скорость есть изменение угла со временем [14]:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} \quad (22)$$

где $t = \frac{L_{AB}}{g}$ – время за которое необходимо преодолевать угол, для достижения заданной скорости, сек.

Зная угловую скорость, можно определить частоту вращения:

$$n = \frac{\frac{\alpha g}{L_{AB}} \cdot 60}{360^\circ} \quad (23)$$

Подставляя в выражение выше, можно получить следующую зависимость:

$$n = \frac{g \cdot 60 \cdot 180}{\pi D \cdot 360^\circ} \quad (24)$$

В ходе проведения расчётов были получены следующие диапазоны параметров двигателя:

$$M = 2,26 \text{ Нм};$$

$$N = 28 \text{ Вт};$$

$$n = 80 \text{ об/мин.}$$

Чтобы облегчить выбор приводного механизма было решено искать подходящее решение в виде мотор-редукторов. После обзора рынка был найден доступный и подходящий по характеристикам мотор-редуктор, характеристики которого представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики мотор-редуктора

Наименование	JGB37-545
Напряжение питания, В	24
Частота на холостом ходу, об/мин	140
Частота в рабочем режиме, об/мин	115
Коэффициент редукции	90
Номинальный момент, Н·м	2,4
Максимальный момент, Н·м	3,9
Сопротивление обмотки, Ом	2,6
Ток ХХ, А	0,3
Рабочий ток, А	1,9
Пиковый ток, А	15

Исходя из параметров приведенных выше можно сделать вывод о том, что параметры данного мотор-редуктора удовлетворяют найденным параметрам. Помимо этого, данный мотор-редуктор обладает интегрированным датчиком угла поворота, что значительно облегчает проектирование, а также интегрирование данного мотор-редуктора в систему.

2.5.2 Выбор силовой управляющей части

Для управления выбранными приводами необходимо наличие силовых схем управления. Использование готового устройства позволит обеспечить широкий диапазон возможностей и высокую производительность, в то же время

убирая необходимость в индивидуальном проектировании устройства управления, что требует меньшего времени разработки. Используя данные таблицы 1 можно сделать вывод, что для управления выбранным двигателем необходим силовой драйвер, максимальный ток которого должен быть не менее 15 А, рабочее напряжение должно быть не менее 24 В. Поскольку выбранный мотор-редуктор имеет в своём составе двигатель постоянного тока, для изменения направления вращения двигателя необходимо менять направление протекания тока, для чего лучше всего применять мостовую H-электрическую схему.

Исходя из описанного выше был выбран силовой драйвер, выполненный на транзисторах IRF3205, характеристики которого представлены в таблице ниже.

Таблица 4 – Характеристики силового драйвера

Наименование	H-Bridge IRF3205
Номинальное рабочее напряжение, В	36
Номинальный рабочий ток, А	15
Пиковый ток, А	30

Судя по таблице, можно сделать вывод о том, что данное силовое управляющее решение удовлетворяет поставленным условиям. Вместе с этим выбранный силовой драйвер имеет два канала управления, что несомненно является большим плюсом, поскольку позволяет ускорить разработку и снизить цену системы.

2.5.3 Выбор управляющего контроллера

Выбор контроллера основывается на минимальной необходимой рабочей частоте и необходимой периферии. Исходя из функциональной схемы к контроллеру будет подключаться датчик тока, для этого на борту контроллера необходимо наличие встроенного АЦП, это облегчит подключение и уменьшит стоимость системы. Вместе с этим, к контроллеру будет подключаться силовая схема управления, которая управляется широтно-импульсным сигналом, который необходимо будет генерировать контроллером, для этого на его борту необходимо наличие таймера с режимом генерации широтно-импульсного сигнала. Помимо этого, таймер необходим также и для подключения энкодера, поскольку энкодер генерирует импульсный квадратный сигнал.

Двигателей в мехатронном модуле будет два, соответственно, для управления ими понадобится подключение двух силовых управляющих канала, двух датчиков тока и угла поворота. Исходя из этого, контроллер должен иметь минимум четыре таймера и два канала АЦП.

Вместе с тем, что описано выше, контроллеру необходимо будет коммуницировать с контроллером на верхнем уровне. Поскольку планируется с помощью одного контроллера управлять двумя приводами, значит, всего в системе будет три контроллера.

Пользуясь описанным, выше можно производить выбор. В данном случае было решено использовать контроллер компании STMicroelectronics, серии 32F1, на базе отладочной платы. Характеристики контроллера представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики микроконтроллера

Микроконтроллер	stm32f303vct6
Ядро	ARM Cortex-M4
Максимальная частота ядра, МГц	72
Объём памяти FLASH, кБайт	256
Объём оперативной памяти, кБайт	40
Кол-во входов/выходов	87
Интерфейсы	CAN, I ² C, IrDA, LIN, SPI, UART/USART, USB
Периферия	DMA, I ² S, POR, PWM, WDT
АЦП/ЦАП	4x12б/2x12б
Напряжение питания, В	2-3,6

Исходя из данных, приведённых в таблице, выше можно судить о том, что данный контроллер имеет необходимое для реализации алгоритмов количество АЦП, а также, в таблице не указано, восемь таймеров, чего вполне хватит для реализации управления тремя двигателями. Помимо этого, данный контроллер обладает встроенной периферией, которая позволяет легко считывать данные с энкодера, просто подключив его к нужным выводам контроллера. Вместе с этим, данный контроллер обладает различными интерфейсами передачи данных, в том числе USB, к тому же на отладочной плате имеется уже распаянный разъём USB, что позволит сократить время подключения и отладки алгоритмов управления.

2.5.4 Выбор измерительных устройств системы

Выбранный ранее мотор-редуктор имеет в наличии датчик угла поворота, что убирает необходимость его выбора, данный датчик имеет разрешающую способность в 32 тика на один оборот вала двигателя, что составляет $11,25^\circ/\text{тик}$, на один оборот выходящего с редуктора вала приходится 2880 тиков, здесь $0,125^\circ/\text{тик}$. Исходя из приведенных характеристик можно сделать вывод о том, что можно добиться высокого уровня управления положением выходящего после редуктора вала.

Следующим измерительным устройством в системе является датчик тока, необходимый для измерения тока в процессе работы, который, в свою очередь, будет использован в расчётах силомоментных показателей мехатронных модулей и получения общего вектора силы. Поскольку пиковый ток привода составляет 20 А, необходимо применение датчика, который сможет пропускать через себя такой ток. Помимо этого, у измерительного устройства должна быть возможность пропускания тока в обе стороны, поскольку планируется вращение вала двигателя в обе стороны, для реализации поворота робота на месте. Для лучшего регулирования тока необходимо отслеживать показания тока порядка 0,01 А.

Зная, что у выбранного микроконтроллера АЦП имеет 12 разрядов и его опорное напряжение составляет 3,3 В, можно получить минимальное уловимое значение напряжения, которое составляет 0,0008 В. Соответственно, чувствительность датчика не должна быть меньше этого параметра.

В данном случае было решено использовать датчик ACS758, характеристики которого представлены в таблице ниже. Работа датчика основана на эффекте Холла [15].

Таблица 6 – Характеристики датчика тока ACS758-050B

Наименование	ACS758LCB-050B-PFF-T
Напряжение питания логики, В	3,3 - 5,5
Максимальный ток измерения, А	50
Коэффициент передачи, В/А	0,041
Направленность пропускания тока	В обе стороны

Исходя из данных, приведенных в таблице, выше можно сделать вывод о том, что данный датчик подходит для измерения тока в порядке 0,01 А.

2.6 Формирование функциональной и принципиальной схем с выбранными устройствами

Используя выбранные устройства можно произвести формирование функциональной схемы. Выбранные силовые схемы управления имеют два канала управления, управляются с помощью широтно-импульсной модуляции, такой сигнал будет генерировать микроконтроллер, на котором, в свою очередь имеется специальная периферия для выполнения данной задачи.

Встроенные энкодеры на выбранном мотор-редукторе генерируют сигнал с частотой пропорциональной вращению, считывать такой сигнал и производить дальнейшие расчёты позволит встроенный таймер выбранного микроконтроллера в режиме энкодера. У выбранного контроллера на борту имеется восемь встроенных таймеров, которые можно активировать переключением режимов. Было принято решение подключать датчик угла поворота к третьему таймеру контроллера.

Выходом измерительного токового датчика является аналоговый сигнал в диапазоне от нуля до 3,3 В. Для считывания такого сигнала необходимо подключить выход датчика к встроенному АЦП микроконтроллера.

Все привода будут питаться от аккумуляторной батареи 24 В. Управляющим и периферийным устройствам необходимо меньшее напряжение в 3,3 В, для чего будет применяться преобразователь постоянного тока DC-DC Down HW-613. Чтобы обезопасить систему от короткого замыкания, в силовой цепи будет применяться предохранитель на 100 А.

Резюмируя описанное выше была сформирована, функциональная схема, представленная на рисунке 20.

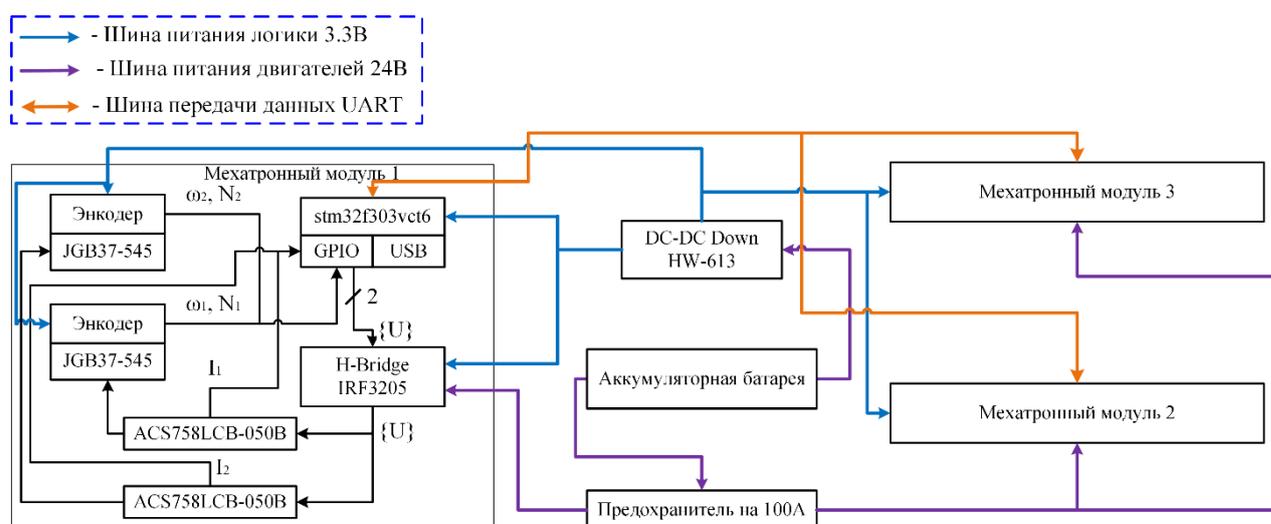


Рисунок 20 – Функциональная схема нижнего уровня робототехнической системы

По функциональной схеме была составлена принципиальная схема подключения для одного мехатронного модуля, остальные два будут иметь аналогичную схему подключения. Принципиальная схема представлена в приложении Б.

2.7 Изготовление стенда мобильной робототехнической платформы

После получения необходимой документации для разработки мобильной робототехнической платформы была получена трёхмерная модель, представленная на рисунке 21. После чего, платформа была изготовлена, готовая платформа представлена на рисунке 22.

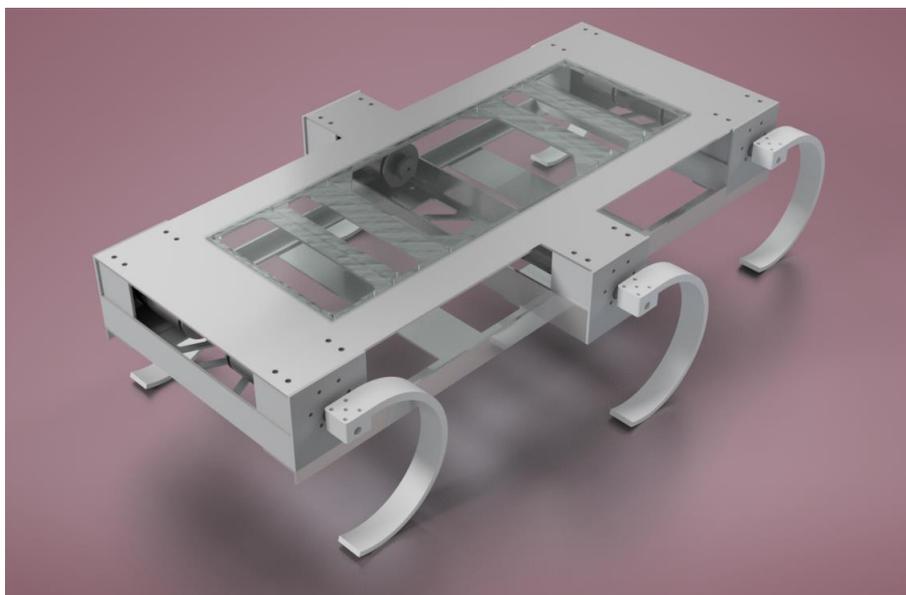


Рисунок 21 – Трёхмерная модель робота

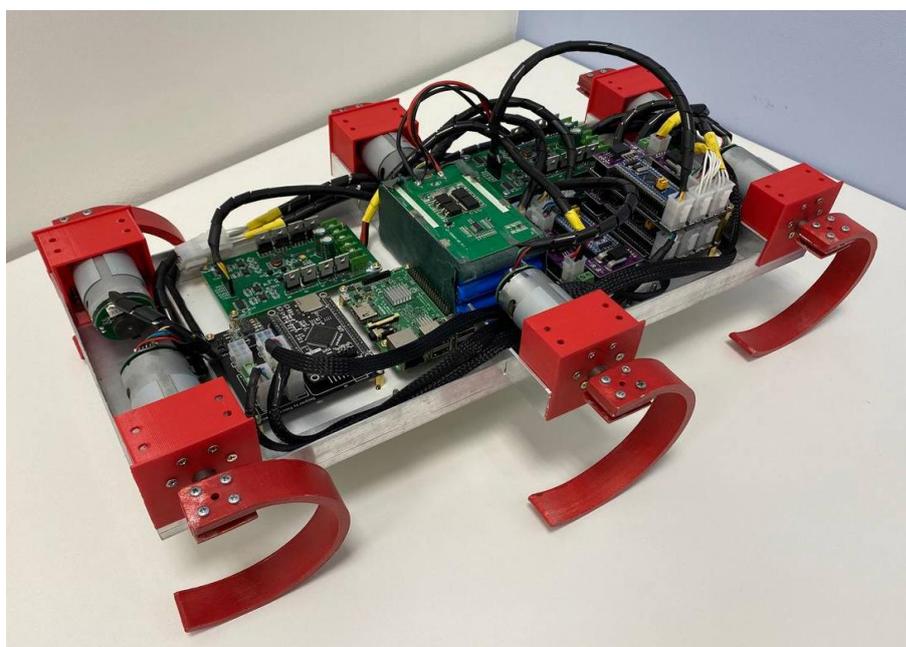


Рисунок 22 – Изготовленная платформа

4 Концепция стартап-проекта

Несмотря на то, что автоматизация и роботизация стремительно проникают во все процессы производства, вытесняя человека, на предприятиях всё ещё возникают опасные ситуации, связанные с утечками и авариями. На данный момент эта проблема решается специально обученными людьми, которые проводят обходы территории предприятия с целью выявления утечек, аварийных ситуаций и подобных случаев. Однако, на результаты работы человека влияет множество факторов, таких как его самочувствие, острота его зрения, чуткость обоняния и так далее, что увеличивает процент пропущенных неисправностей. Помимо этого, человек производит осмотр оборудования один раз в смену, риск поломки увеличивается, поскольку в остальное время диагностика не производится.

Идея заключается в разработке и создании робота для автономного передвижения по территории предприятий, работы с измерительным инструментом и детектирования на начальных стадиях различных аварийных ситуаций.

4.1 Описание продукта как результата НИР

В связи с этим предлагается использование специализированных роботов для регулярного проведения диагностики на производствах. Одна единица робота представляет из себя гексапедальную конструкцию (600x400x260 мм), оснащённую несколькими камерами для проведения осмотров и передвижения, лидаром для эффективного обхода препятствий и построения карты местности, набором датчиков, в зависимости от производства набор датчиков может меняться. Робот будет иметь на борту аккумулятор, с помощью которого сможет функционировать без дополнительной зарядки не менее одного часа. Вместе с этим, у робота предусматривается связь с оператором, для удалённого контроля. Связь будет происходить посредством

удалённого устройства, им может являться планшет или компьютер, подключенного к общей с роботом сети Wi-Fi.

Для автономной работы робота, к нему предусматривается зарядная станция, которая также будет являться точкой подключения Wi-Fi. Каждая станция будет связана с главным компьютером, при зарядке, робот будет иметь возможность передавать всю собранную информацию на главный компьютер. Количество роботов и зарядных станций будет зависеть от размера территорий на которых будут функционировать роботы и от задач, которые им надо будет решать.

4.2 Интеллектуальная собственность

Стратегия защиты интеллектуальной собственности на первом этапе в виде «ноу-хау». В случае публикации информации о технологии будет проводиться закрепление приоритета - направлена заявка на патент (до 12 мес.) Далее оформлен международный приоритет по РСТ и только потом национальная заявка. Данная стратегия позволит минимизировать затраты на патентование и оптимизировать защиту интеллектуальной собственности.

4.3 Объем и емкость рынка

Потенциальными заказчиками выступают предприятия, на которых возможны аварийные ситуации, приносящие вред окружающей среде, опасных для жизни человека и приносящие большие убытки компаниям. Основными среди них могут являться предприятия нефтегазовой, химической и ядерной отрасли.

На основании открытого источника в России насчитывается 26 477 крупных и средних производственных компаний, именно этот показатель представляет собой рынок «ТАМ» (общий объем целевого рынка) [16].

Если учитывать, что потенциально достижимый рынок (SAM) составляет 50% общего объема целевого рынка, следовательно, SAM = 13 238 компаний.

Примем, что показатель SOM (реально достижимый объем рынка) составляет 20% от показателя SAM, поскольку, не каждый будет готов приобрести данного робота. Так, например, данное проектное решение не будет конкурентоспособным по отношению к предложениям компании «BFG Robotics (БФГ Роботикс)», поскольку она занимает лидирующие позиции среди компаний, работающих в сфере интеграции промышленных роботов [17]. На основании этого суждения и принципу Парето, лишь 20% из выделяемого потенциально достижимого объема рынка будет готова приобрести разрабатываемую продукцию. $SOM = SAM * 20\% = 2\,647$ компаний.

Отталкиваясь от предполагаемой цены, составляющей 1,3 миллиона рублей, в денежном эквиваленте показатели объема рынка будут равны:

$$TAM = 26\,477 * 1,2 = 31,77 \text{ млрд руб.}$$

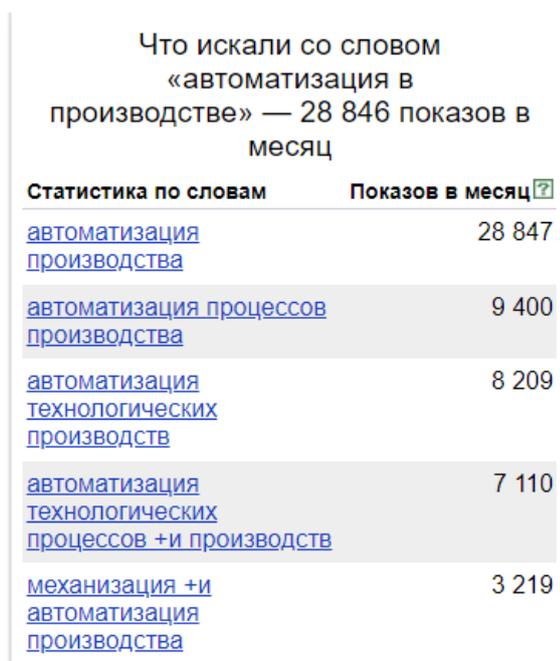
$$SAM = 13\,238 * 1,2 = 15,89 \text{ млрд руб.}$$

$$SOM = 2\,647 * 1,2 = 3,18 \text{ млрд руб.}$$

Вместе с этим, расчет этих показателей в денежном эквиваленте производился с учетом того, что робот будет позиционироваться именно как робот-помощник с возможностью самостоятельного устранения некоторых производственных проблем. Так как при дальнейшем развитии продукта возможным вариантом развития является применение данных роботов в производстве с полным взятием на себя функций по контролю, которые выполнял человек, включая синхронизацию с ИИ производства.

4.4 Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли

Спрос при помощи оценки статистики в интернете. Запрос «роботизация в производстве» и «автоматизация в производстве» имеет небольшую популярность по запросам. В среднем 20 тысяч показов за месяц, что косвенно может сказать о том, что этот рынок, либо ещё очень молод, либо этот рынок довольно-таки мал по количеству игроков на нем.



Что искали со словом «автоматизация в производстве» — 28 846 показов в месяц

Статистика по словам	Показов в месяц 
автоматизация производства	28 847
автоматизация процессов производства	9 400
автоматизация технологических производств	8 209
автоматизация технологических процессов +и производств	7 110
механизация +и автоматизация производства	3 219

Рисунок 30 – статистика запросов «автоматизация в производстве»

На рисунке 30 отображена статистика запросов «роботизация в производстве».

Что искали со словом
«роботизация в
производстве» — 925 показов в
месяц

Статистика по словам	Показов в месяц ?
роботизация производства	925
автоматизация +и роботизация производства	253
процесс роботизации производства	77
роботизация промышленного производства	72
компьютеризация +и роботизация производства	54
роботизация производства экономика	53
роботизация современного производства	40
роботизация производства +в россии	25

Рисунок 31 - статистика запросов «роботизация в производстве»

По информации из источника от ноября 2021 года, роботы в производстве преимущественно в России используются для: перемещения, сварки и пайки, обработки, дозирования и 20% помечены как без спецификации [18].

Также относительно перспектив внедрения такого робота стоит отметить, что ниша, в которую предполагается внедрение робота, почти полностью свободна. Поскольку структура рынка сервисной робототехники B2B сегмента включает: логистику, специальное назначение, диагностику, медицину и так далее. 5% роботов задействовано в медицине, что приносит 47% выручки всего сегмента, а оставшаяся большая часть роботов – это роботы специального назначения (военные). Таким образом, при ясном позиционировании робота и хорошим финансовым возможностями для целевой аудитории, незанятая ниша роботов помощников на производстве позволит

снизить издержки производства, связанные с несвоевременным ремонтом или реагированием на проблемы производственных участков.

В денежном выражении общий объём мирового рынка робототехники на данный момент составляет 50 миллиардов долларов, а по прогнозам к 2030 году этот объём станет равным 200 миллиардов долларов.

При определении границ рынка выделено три основных взаимосвязанных класса, относящихся к разрабатываемому продукту (рисунок 32):

1. Рынок труда.
2. Устройства (датчики) для внутреннего мониторинга ситуации на производстве.
3. Устройства для внешнего мониторинга состояния на производстве.

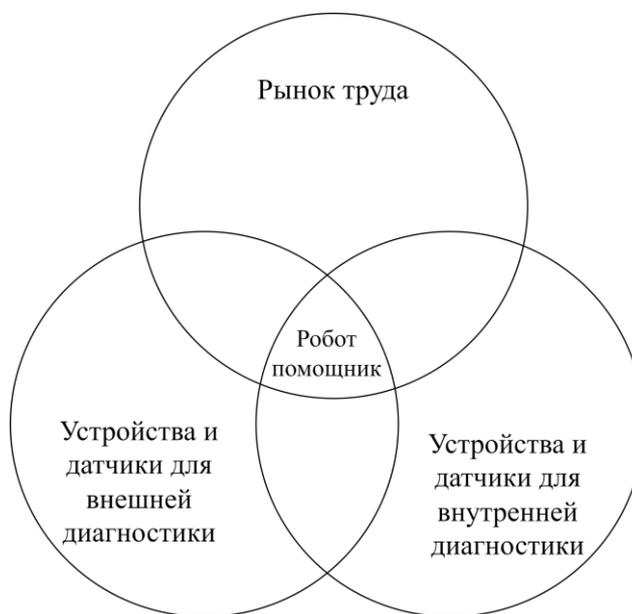


Рисунок 32 – Границы рынка датчиков мониторинга физической активности

В самом центре на пересечении трех рынков можно выделить рынок роботов помощников с возможностью самостоятельного устранения производственных проблем.

Субъекты рынка роботов помощников с возможностью самостоятельного устранения производственных проблем представлены на рисунке 33.



Рисунок 33 – Схема взаимодействия субъектов на рынке роботов помощников

Таким образом, был идентифицирован рынок, определены его границы, выделены субъекты рынка и их взаимодействие.

4.5 Планируемая стоимость продукта

Ценообразование наценки. С учетом уровня удельной стоимости и желаемой доли прибыли в структуре цены этот метод используется для установления пределов допустимых цен. Типичная норма прибыли для промышленного производства составляет 20-23 %.

Себестоимость единицы товара = переменные затраты + (фиксированная цена / продажу одной штуки);

При расчёте будет учитываться первый год, в который планируется продать 20 штук. Стоимость исполнительных элементов и расходных материалов на единицу товара составляет 763 803. В таблице 1 приведены аренда, стоимость оборудования и заработная плата на 1 человека, всё это приведено с учетом амортизации.

Таблица 7 – Затраты в первый год продаж

ЖКХ	
Стоимость электричества, рублей/год	96 000
Аренда помещения, руб/год	360 000
Итого:	22 800
Зарплата и социальные отчисления	
1 сборщик, руб/год	480 000
Социальные отчисления (30,1 % от ЗП), руб/год	144 000
Итого:	31 200
Транспортные расходы	
Доставка робота до предприятий, руб/год	100 000
Итого:	5 000
Основные средства	
Амортизация основных средств	107 016
Итого:	5 351
Реклама	
Контекстная реклама	50 000
Автоматизированный сервис "WBSTAT.pro"	0
Итого:	2 500
Итоговая себестоимость:	830 654

Следовательно, полная себестоимость товара составляет 830 653 руб.

Примем желаемый доход 60% от суммы затрат на единицу товара, тогда:

$$\text{Цена} = 830\,653 + 830\,653 \cdot 60\% = 1\,330\,000 \text{ руб.}$$

Приведем примерный план продаж на 5 лет (таблица 8).

Таблица 8 – Производственный план и план продаж на 5 лет

	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год	Итого за год
Цена реализации, рублей	1350000					
Себестоимость, рублей	830 653	830 653	830 653	830 653	830 653	4 153 268
Объем продаж, штук	20	30	40	50	60	200
Выручка от реализации, млн. рублей	26,6	39,9	53,2	66,5	79,8	266
Персонал, человек	3	5	7	7	7	
Зарплата в год, млн. рублей	1,44	2,4	3,36	3,36	3,36	
социальные отчисления (30,1 % от ЗП), руб/год	432 000	720 000	1 008 000	1 008 000	1 008 000	
Суммарные издержки, млн. руб	18,485	28,04	37,594	45,901	54,207	184,227
Прибыль до налогообложения, млн. рублей	7,303	10,674	14,045	18,539	23,033	73,596
Налог на прибыль (20%), млн. рублей	1,461	2,135	2,809	3,708	4,607	14,719
Чистая прибыль, млн рублей	5,843	8,539	11,236	14,831	18,427	58,877
Чистая прибыль, накопленным итогом, млн рублей	5,843	14,382	25,618	40,45	58,877	
Годовая ставка дисконтирования	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	
Дисконтированные денежные потоки, млн рублей	5,037	12,398	22,085	34,871	50,756	

Таким образом за 5 лет будет продано 200 единиц товара, что составляет 7,5% рынка России.

На год разработки требуется 1 638 500 руб., на первый год при объеме продаж в 20 единиц товара необходимо 16 613 000 руб. Таким образом сумма инвестиций составляет 18 251 500 руб.

Для расчета срока окупаемости данного товара в процессе его работы необходимо получить среднюю зарплату человека, который выполняет функции робота. Для этого был произведен поиск вакансий на рынке труда по запросу “Обходчик на предприятиях”. При поиске, было найдено много вакансий, из обязанностей выделены основные:

- Выявление дефектов при визуальном и измерительном контроле;
- Работа с мерительным инструментом;
- Умение работать с нормативной документацией;
- Выполнение необходимых действий по предотвращению аварийных ситуаций, утечек, выходе из строя оборудования.

Основные из найденных вакансий представлены в таблице 3, вместе с этим в таблице представлено расположение места работы и компания, предоставляющая вакансию.

Таблица 9 – Вакансии по запросу «Обходчик на предприятиях»

Наименование	Расположение вакансии	Работодатель	Зарплата, руб
Обходчик водопроводных сетей	Куюки	PCO ЭКО	50 000,00
Машинист-обходчик по котельному/турбинному оборудованию (ТЭЦ 22)	Москва	МОСЭНЕРГО	50 000,00
Машинист-обходчик по турбинному оборудованию ПГУ	Москва	Ситиэнерго	57 000,00
Машинист-обходчик по турбинному оборудованию	Сочи	Интер РАО Управление сервисами	67 000,00
Инспектор-контролер (на склад)	Челябинск	Компания SPAR Урал	50 000,00

Таблица 9 продолжение– Вакансии по запросу “Обходчик на предприятиях”

Контролер ОТК	Челябинск	ООО "Инициатива"	67 000,00
Контролер ОТК	Челябинск	ООО "Инициатива"	72 000,00
Контролер в производство черных металлов	Челябинск	ООО "Инициатива"	72 000,00

Исходя из таблицы можно получить среднюю зарплату “Обходчика на предприятиях” по рынку, которая составляет 60 625 рублей.

При учёте данной зарплаты, а также, зная цену работа, которая составляет 1 330 000 руб, можно найти срок окупаемости, который составляет ~22 месяца.

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

Для выявления преимуществ создаваемого продукта был проведен патентный поиск, который проводился на основе программного продукта Orbit Questel. В результате поиска, по ключевым словам, связанным с проектом, были найдены 248 патентных семейств, среди которых имеются патенты в России, на рисунке 34 приведён график распределения количества патентов, приходящихся на каждый год.

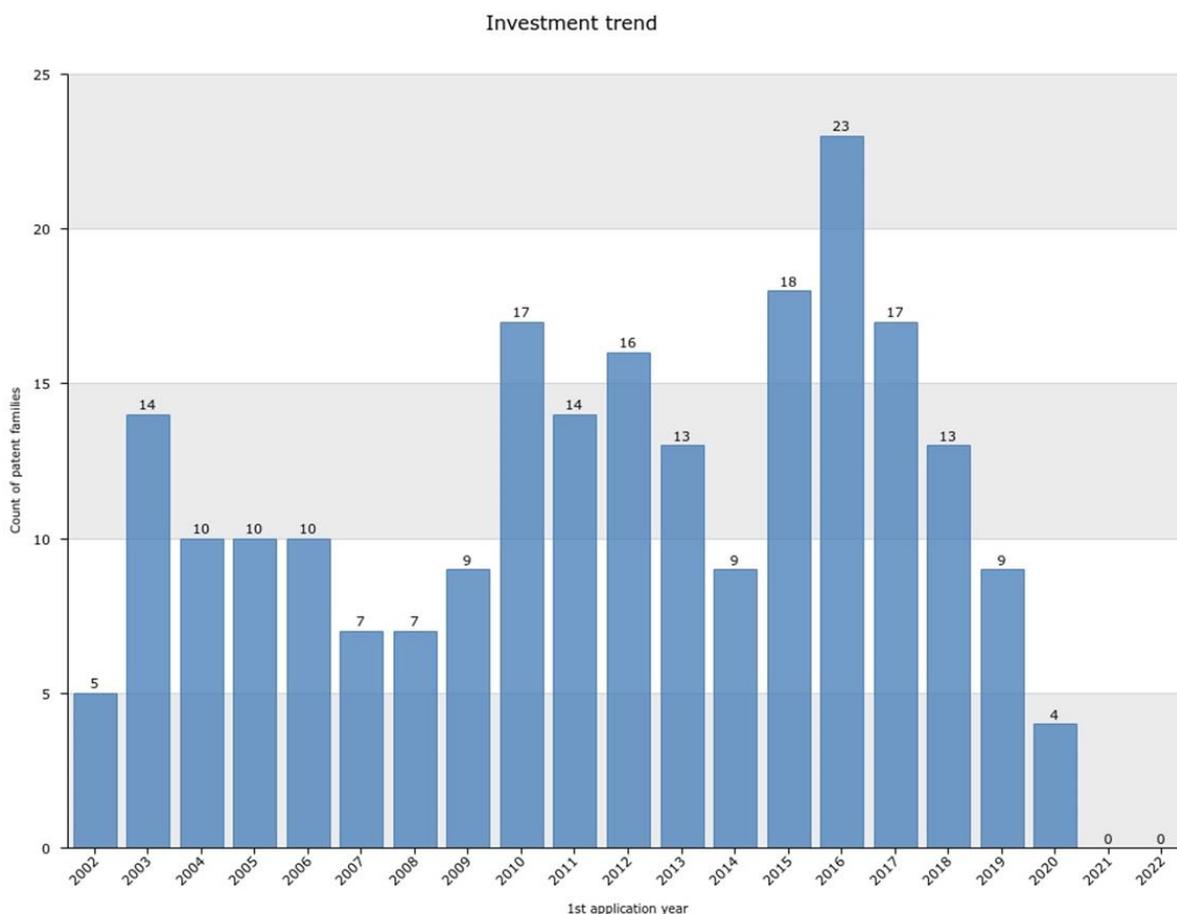


Рисунок 34 – Распределение патентов по годам

По графику можно сделать вывод, что смежные, с разрабатываемым продуктом, тематики достаточно популярны среди разработчиков.

После этого, был изучен каждый патент и проведено соответствие с разрабатываемым продуктом. В результате, были отобраны 11 наиболее близких, к предлагаемой разработке, решений. На рисунке 35 приведена эволюция отобранных заявок по годам.

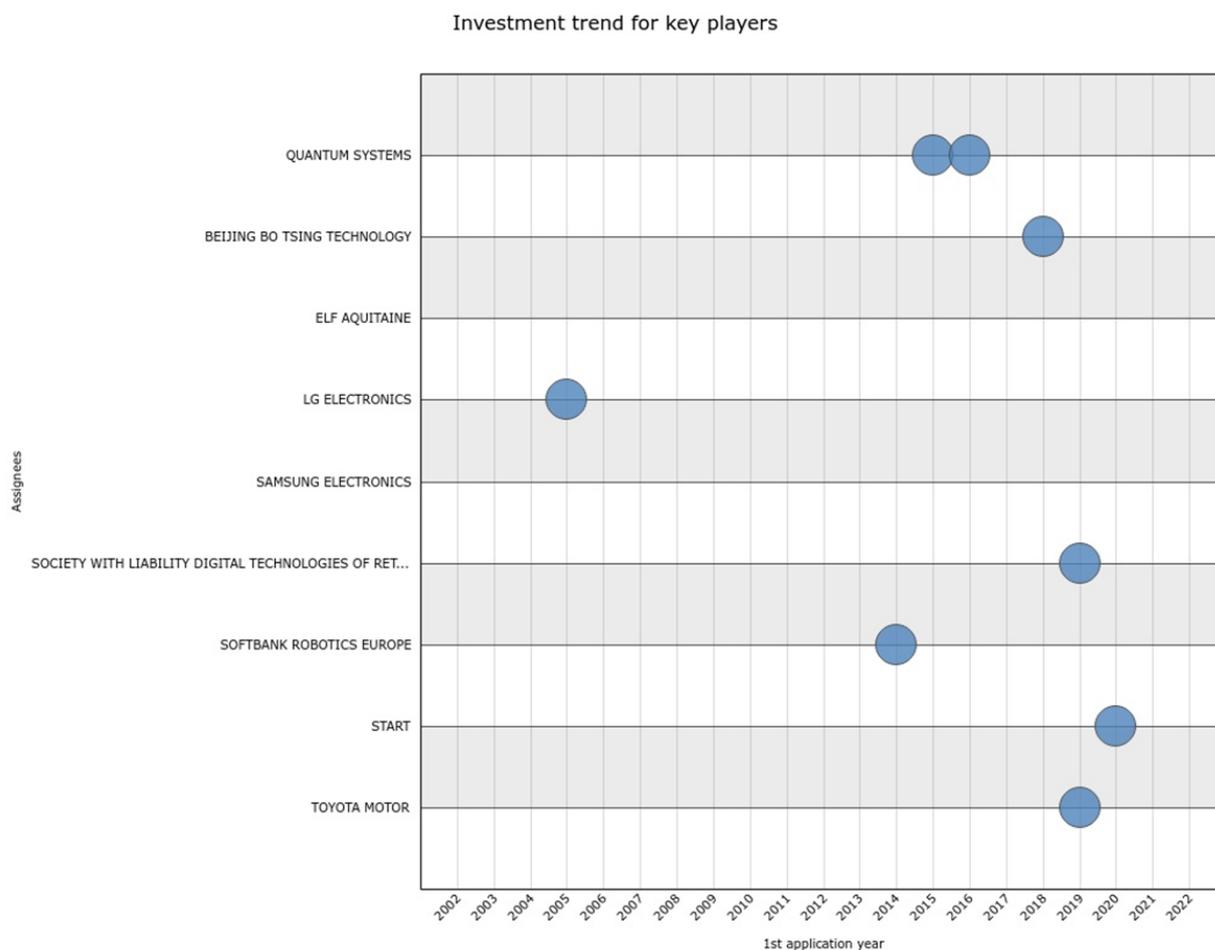


Рисунок 35 – Эволюция заявок на патенты с 2002 года до 2022 года

По рисунку выше видно, что максимально близкие решения, к предлагаемому, находятся во временном промежутке 2014-2020 года, что может означать, что данная тематика набирает популярность и заниматься решением данных проблем является актуальной задачей.

Помимо описанного выше, на рисунках 34 и 35 видно, что в 2020 и 2021 годах происходит спад и полное отсутствие патентов, что может быть связано с распространяющейся эпидемией в эти года.

Из рассмотренных патентов хочется отметить мобильное устройство для мониторинга [19]. Устройство состоит из самоходного робота, на котором закреплены датчики для обнаружения ЧС. Помимо этого, с предлагаемым устройством идут устройства для оповещения центрального монитора,

пожарной части, полицейского участка или жильца, находящегося вдали от дома или офиса. В случае обнаружения ЧС робот инициирует связь со средствами мониторинга и блоком управления автоматической связью, чтобы предупредить соответствующий персонал о происходящем ЧС.

Ещё одним потенциальным конкурентом выступает изобретение [20]. Оно состоит из мобильной платформы и системы управления. Предлагается использование для патрулирования территорий, движение по заданному маршруту.

Вместе с этим, ещё одним косвенным конкурентом является продукт компании “TARIS” – робот для телеинспекции трубопроводов [21].

Преимущества и недостатки по отношению к предлагаемому продукту представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Преимущества и недостатки конкурентов

Наименование	Робот гексапод	Устройство для мониторинга	Робот для патрулирования	Робот для телеинспекции
Движение по пересеченной местности	+	–	+-	–
Автономное передвижение	+	–	–	–
Удаленное управление	+	+	+	+
Датчики сигнализации	+	+	–	–
Телеметрия	+	–	+	+
Мобильность	+	+	+	–

По таблице можно сделать вывод, что предлагаемое решение лишено тех недостатков, которые имеются у схожих решений.

4.7 Целевые сегменты потребителей

Целевым сегментом являются предприятия нефтяной отрасли, энергетической отрасли, химической и тяжелой промышленности. Поскольку применение робота в опасных участках позволит снизить риски причинения вреда здоровью работников, а также своевременная сигнализация позволит снизить издержки производств и снизить вероятность происхождения ЧС. Помимо приведенных отраслей применение робота возможно и на предприятиях автомобилестроения, авиастроения, машиностроения и т.д.

4.8 Бизнес-модели проекта. Производственный план и план продаж

Четкое понимание бизнес-положения разрабатываемых продуктов может быть получено с помощью применения методологии S.P.A.C.E.

Приведем краткое описание сути методологии. В данном случае, S.P.A.C.E. это аббревиатура, где S – Supplier (типаж поставщика: хирург, терапевт, аптека), P – Product (продукт по простоте реализации и использования: кухня, смартфон, фонарик), A – Average (стоимость продукта: дорого, доступно, дешево), C – Customer (количество потенциальных покупателей: мало заказчиков, крупный рынок, массовый рынок), E – Evaluation (принятие решения о покупке: коллегиальное решение, совет друзей, спонтанное решение).

На основе имеющихся данных о продукте, запросах потенциальных потребителей, собственном понимании проблематики и позиционировании продукта построим SPACE-модель (рисунок 36):

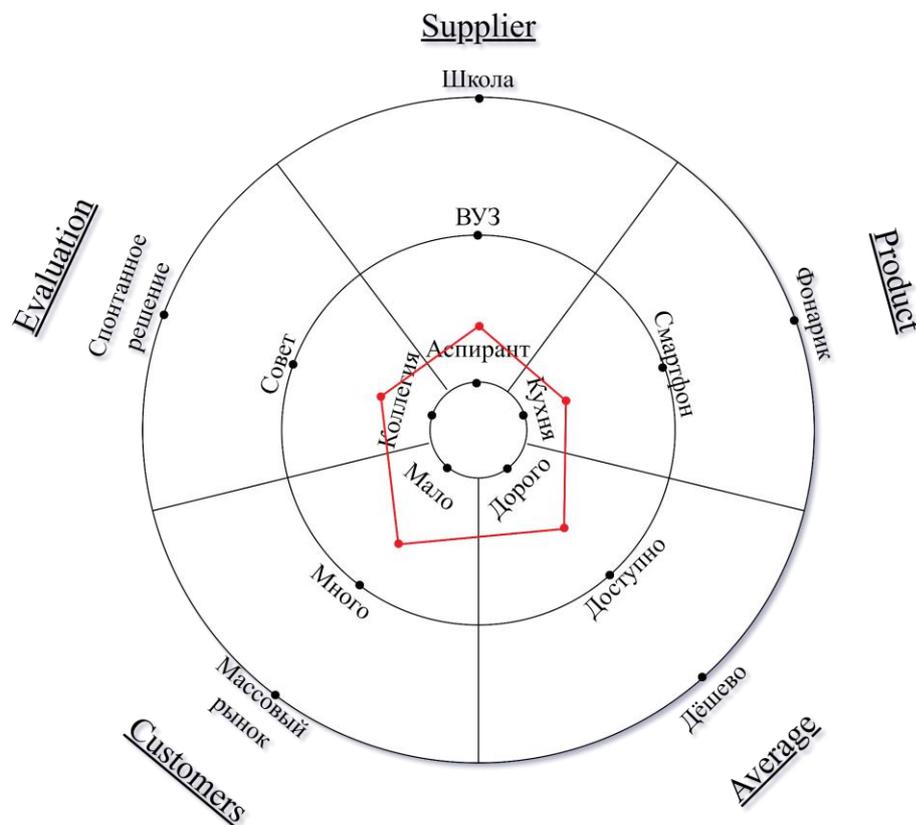


Рисунок 36 – SPACE-модель

По полученной диаграмме видно, что по стоимости товар занимает промежуточное значение между доступно и дорого, это объясняется тем, что продукт представляет принципиально новую идею и имеет малое количество конкурентов. Процесс внедрения и использования данного робота обещает быть простым и доступным, с максимально понятным интерфейсом оператора. Компанией будет гарантировано бесплатное технической обслуживание. Предполагается, что заказчик при покупке будет опираться на коллегиальное решение.

Помимо SPACE-модели была применена матрица А. Остервальдера. Она отражает как производственный план, так и план продаж, и саму бизнес-модель процесса в целом.

Таблица 11 – Бизнес-модель по Остервальдеру

Ключевые партнеры	Ключевые виды деятельности	Ценностные предложения	Взаимоотношения с клиентами	Потребительские сегменты	
<p>Сококонкуренция:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Поставщики исполнительных элементов и расходных материалов для создания продукта; - Специалисты по покраске корпуса; - Специалисты по дизайну. 	<p>Производство.</p> <p>Автономный робот гексапод для диагностики на предприятиях – готовый продукт.</p> <p>Разрешение проблем.</p> <p>Работа с измерительным инструментом. Диагностика оборудования на предприятиях. Детектирование и возможное предотвращение аварийных ситуаций на предприятиях.</p>	<p>1. Автономное передвижение по территории предприятия</p> <p>2. Проведение измерений различных показателей, для выявления нарушений, поломок и т.п.</p> <p>3. Запись и сохранение фото и видео материала.</p> <p>4. Локальная обработка медиафайлов.</p> <p>5. Возможность удаленного управления роботом</p> <p>б. Возможность взаимодействия с некоторыми объектами (поворот клапана, передвижение малогабаритных объектов)</p>	<p>1. Постоянная техническая и консультационная поддержка клиентов</p> <p>2. Горячая телефонная линия, электронная почта для оформления заказа, помощи при выборе товара.</p>	<p>Выделены следующие сегменты:</p> <p>Продажи на рынке B2B:</p> <p>Различные предприятия, из которых основные нефтегазовой и химической отрасли</p>	
	<p>Ключевые ресурсы</p>				<p>Каналы сбыта</p>
	<p>Материальные ресурсы – сырье для изготовления единицы товара</p>				<p>Прямые:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Интернет-магазин 2. Государственные заказы 3. Хозяйственные договора
<p>Структура издержек</p> <p>Фиксированные издержки – заработная плата работникам, налоги, аренда.</p> <p>Переменные издержки – расходные материалы, сырье для изготовления продукта.</p>		<p>Потоки поступления доходов</p> <p>1. Доход от разовых сделок с юридическими лицами.</p> <p>Генерирование дохода за счет:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Масштабирования продукта. 2. Реклама продукции. 			

На основе прогноза о продажах и оценке чистой прибыли и планируемой амортизации, построен денежный поток от операционной и инвестиционной деятельности (таблица 12).

Таблица 12 – Денежные потоки на 5 лет

	0 год	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год	
Денежный поток, млн рублей	-22,75	-15,28	3,41	37,06	89,41	164,19	69%

Далее определены показатели эффективности инвестиций – NPV, PI, DPP, IRR, которые представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Показатели эффективности инвестиций

Дисконтированный период окупаемости, месяцев	2,514728682
Чистый приведённый доход за 5 лет, млн рублей	41,72
Внутренняя норма доходности, %	68,93
Индекс прибыльности за 5 лет	1,833846154

Все показатели соответствуют критериям эффективности, а значит проект следует считать коммерчески эффективным.

При определении ставки дисконтирования были приняты средние уровни депозитов в современных условиях. Ставка дисконтирования была оценена на уровне 16 процентов. Однако, даже при ее росте, запас финансовой прочности модели составляет $68,9\% - 16\% = 52,9\%$

4.9 Стратегия продвижения продукта на рынок

Продвижение продукта возможно, если покупатель готов приобрести продукт, который ему действительно нужен.

Наша цель – доказать, что автоматизация процесса диагностирования выхода из строя оборудования приведет к экономии и увеличению прибыли.

Можно выделить следующие способы продвижения продукта:

- прямые продажи;
- изготовление роботов на заказ (под нужды предприятий);
- реклама и рекламные акции в целях побуждения интереса к продукту;
- возможность установки на предприятии на пробный срок;
- участие в конференции и выставках для привлечения клиентов и инвесторов

Все это в той или иной степени сказывается на объеме продаж продукции, что позволит увеличить ее внедрение на рынок.

5 Социальная ответственность

5.1 Введение

В рамках данной ВКР разрабатывается мобильная робототехническая платформа шагающего типа для диагностики утечек и аварийных ситуаций на предприятиях. Данная разработка будет применяться на предприятиях различных типов, такие как, нефтедобывающие, нефтеперерабатывающие, химические, ядерные производства, атомные, гидро и теплоэлектростанции. Вместе с этим, робот может внедряться в производства автомобилей, мебельную промышленность, лёгкую и тяжёлую промышленность.

Размер рабочего помещения, в котором будет разрабатываться и изготавливаться данная робототехническая платформа должен составлять не менее 49 квадратных метров, это обуславливается необходимостью размещения там следующего оборудования:

- Пять персональных компьютеров и соответствующие рабочие места для них;
- Три 3D-принтера и соответствующие рабочие зоны для их эксплуатации;
- Три рабочие зоны для изготовления электронных компонентов, работа с паяльным оборудованием;
- Две рабочие зоны с инструментом для конечной сборки всех комплектующих в целого робота.

В рамках разработки предлагаемой робототехнической платформы предполагаются следующие рабочие процессы:

- Проектирование и разработка узлов робототехнической платформы на рабочих местах с персональными компьютерами;
- Печать конструкционных деталей робота на 3D-принтерах;
- Изготовление печатных плат путём припаивания различных

электронных компонентов;

- Сборка готовых узлов работа в единую конструкцию.

5.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Работы, выполняемые при разработке мобильной платформы, относятся к категории Па [22]. Работы по разработке конструкторской документации и программного кода проводились на персональном компьютере. При изготовлении макета робототехнической платформы использовалось следующее оборудование: паяльники; 3D-принтеры; исполнительные элементы, в том числе мотор-редукторы на базе двигателя постоянного тока, различные датчики обратной связи и платы коммутации; конструкционные материалы; набор инструментов.

Рабочее место при работе сидя должно оборудоваться в соответствии требованиям [23]. Так как высота рабочей поверхности стола является нерегулируемой, необходимо оснастить рабочее место стулом с возможностью регулирования высоты сиденья и подставкой для ног, чтобы обеспечить возможность работы для человека с меньшим ростом. Высота стола и диапазон регулирования высоты кресел необходимо определить с помощью номограмм, представленных в стандарте. Кресло работника должно удовлетворять требованиям [24]. Высоту рабочей поверхности, с учетом специфики работы (печатание на клавиатуре, легкие сборочные работы) необходимо принять равным 655 мм. Размещение монитора компьютера, как средства отображения информации, должно находиться в пределах горизонтальной и вертикальной зон зрительного наблюдения.

Рабочее место при выполнении работ стоя должно соответствовать требованиям [25]. Регулируемые параметры в зависимости от тяжести труда и роста, работающего следует выбирать по номограмме, представленной в

стандарте. Организация рабочего места и конструкция оборудования должны обеспечивать прямое и свободное положение корпуса тела работающего или наклон его вперед не более чем на 15 градусов.

Для работников указанной категории труда продолжительность работ, согласно [26], устанавливается в размере 40 часов в неделю. При этом к работе с оборудованием, использованным при разработке, должны допускаться работники, имеющие необходимые компетенции. Права и обязанности работника и работодателя, по подготовке и дополнительному профессиональному образованию также закреплены в трудовом кодексе [26].

5.3 Производственная безопасность

Вредные и опасные факторы, действие которых возможно при разработке мобильной робототехнической платформы представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Возможные вредные и опасные производственные факторы при разработке проектного решения

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015 [27])	Нормативные документы
Опасные факторы	
Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действия которого попадает работающий.	ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [28]; ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление [29]; ГОСТ Р 12.1.019-2017 ССБТ Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [30].
Движущиеся твердые объекты, наносящие удар по телу работающего.	ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное общие требования безопасности [31].

Таблица 14 продолжение – Возможные вредные и опасные производственные факторы при разработке проектного решения

Неподвижные режущие, колющие, обдирающие, разрывающие части твердых объектов, воздействующие на работающего при соприкосновении с ним.	Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 27 ноября 2020 года N835н «Об утверждении Правил по охране труда при работе с инструментом и приспособлениями» [32].
Вредные факторы	
Отсутствие или недостаток необходимого искусственного и естественного освещения.	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [33].
Повышенный уровень шума.	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [34].
Факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды.	ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [22]
Монотонность труда, вызывающая монотонию.	МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности» [35].

Производственные факторы, связанные с электрическим током, возникают при работах с паяльными станциями и подключением исполнительных элементов. Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие. Согласно [28], допустимые нормы напряжения и тока, воздействующих на человека, приведены в таблице 15. Для того, чтобы избежать поражения электрическим током, помещение, где размещаются рабочие места и разрабатываемое устройство, должно быть оборудовано защитным заземлением [29]. Основными техническими средствами защиты также являются автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности. Перед началом работ по разработке и изготовлению робототехнической платформы необходимо изучить правила

электробезопасности, которые описаны в требованиях к электробезопасности [30].

Таблица 15 – Предельно допустимые значения напряжения и тока прикосновения при нормальном режиме работы установки

Род тока	Напряжение, В	Ток, А
Переменный, 50 Гц	<2.0	<0.3
Постоянный	<8.0	<1.0

Наличие движущихся твердых объектов, наносящих удар по телу работающего, обусловлено наличием вращающихся движителей. При сборке и тестировании данной мобильной платформы возможен перелом движителя и его последующий отскок, что может привести к получению травм на теле работника. Согласно [31], для минимизации опасности данного фактора, при запуске и тестировании, робот должен находиться за ограждениями. Защитные ограждения должны быть снабжены приспособлениями для надежного удержания их в закрытом (рабочем) положении.

Наличие неподвижных режущих, колющих, обдирающих, разрывающих частей твердых объектов, оказывающих возможное воздействие на работающего при соприкосновении с ними обусловлено необходимостью работы с инструментами при изготовлении робота. Согласно [32], чтобы снизить вероятность возможного воздействия данного фактора, при работе с ручным инструментом и приспособлениями ударного действия необходимо использовать средства индивидуальной защиты глаз и средства индивидуальной защиты рук работающего от механических воздействий.

Возникновение опасных и вредных факторов, связанных с недостатком естественного и искусственного освещения, может быть связано с неправильным проектированием систем освещенности и выходом их из строя. Плохое освещение негативно влияет на зрительный аппарат работников. Также

при недостатке освещения работники склонны к быстрому утомлению, мигрени и бессоннице. Установленные нормы естественного, искусственного и совмещенного освещения зданий и сооружений, селитебных территорий, площадок предприятий и мест производства работ вне зданий прописаны в Своде правил [33].

Ниже приведен расчет равномерного искусственного освещения горизонтальной поверхности рабочего места инженера по изготовлению мобильной робототехнической платформы методом коэффициента светового потока.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Исходные данные для расчета освещения

Площадь помещения, м ²	Ширина, м	Длина, м	Высота, м	Высота раб. поверхности, м
49	7	7	4	0,75

В качестве светильника можно выбрать люминесцентную лампу ОД - 2-30. Длину подвеса h_c можно взять равной 0,5 м и рассчитать высоту подвеса по формуле:

$$h_n = H - h_c = 4 - 0,5 = 3,5 \text{ м} \quad (32)$$

Высота подвеса равна минимальной высоте, допускаемой для соответствующего типа ламп.

Определим расчетную высоту:

$$h = h_n - h_{pn} = 3,5 - 0,75 = 2,75 \text{ м}, \quad (33)$$

где h_{pn} – высота рабочей поверхности.

Согласно данным, для расчета производственных факторов параметр оптимальности расположения светильников λ равен 1,4. Рассчитаем расстояние между рядами светильников L и расстояние от крайнего ряда до стены l :

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,75 = 3,85 \quad (33)$$

$$l = \frac{L}{3} = 1,28 \quad (34)$$

Примем расстояние между светильниками равным 0.5 м. и рассчитаем общее число ламп. Для этого найдем количество рядов $n_{\text{ряд}}$ и количество светильников в ряду $n_{\text{св}}$:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{\left(B - \frac{2L}{3}\right)}{L} + 1 = \frac{\left(7 - \frac{2 \cdot 3.85}{3}\right)}{3.85} + 1 \approx 3 \quad (35)$$

$$n_{\text{св}} = \frac{\left(A - \frac{2L}{3}\right)}{l_{\text{св}} + 0.5} = \frac{\left(7 - \frac{2 \cdot 3.85}{3}\right)}{0.933 + 0.5} \approx 3 \quad (36)$$

где $l_{\text{св}}$ – длина светильника, равная, согласно данным для расчета производственных факторов, 0,933 м.

Рассчитаем количество светильников:

$$N = n_{\text{св}} \cdot n_{\text{ряд}} = 9 \quad (39)$$

Рассчитаем индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h(A + B)} = \frac{49}{2.75 \cdot (7 + 7)} \approx 1,27 \quad (38)$$

Стены помещения оклеены светлыми обоями, потолок светлый деревянный. Тогда коэффициенты отражения стен и потолка будут соответственно равны 30 и 50 %. Исходя из индекса помещения, коэффициентов отражения стен и потолка, а также типа лампочки по табличным данным был определен коэффициент использования светового потока $\eta = 0.5$. Так как в помещение происходит малое выделение пыли, то коэффициент запаса примем $K_3 = 1.5$. Нормативную освещенность, согласно [33], примем $E_n = 200$ лк. Рассчитаем световой поток:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N_{\text{л}} \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 49 \cdot 1.5 \cdot 1.1}{18 \cdot 0.5} \approx 1796,6 \text{ лм}, \quad (39)$$

где $Z = 1.1$ – коэффициент неравномерности освещения люминесцентной

лампы;

$N_l = 2N$ – количество ламп, с учетом их количества в светильниках.

Ближайшее по номиналу значение светового потока $\Phi_n = 1650$ лм.

Проведем проверку полученных значений потока:

$$\frac{\Phi_n - \Phi}{\Phi_n} \cdot 100\% = \frac{1650 - 1796,6}{1650} \approx -8\% \quad (40)$$

Полученное значение отклонения лежит в диапазоне $[-10\%, 20\%]$, следовательно, световой поток рассчитан корректно.

Проведем расчет мощности системы освещения:

$$P = N_l \cdot p_l = 18 \cdot 30 = 540 \text{ Вт}, \quad (41)$$

где p_l – мощность одной лампы в светильнике.

Одним из важных факторов, влияющих на качество выполняемой работы, является шум. Наличие шума при процессе сборки мобильной платформы связано с работой инструментами и включением исполнительных элементов (приводов, клапанов и др.). Шум ухудшает условия труда, оказывая вредное действие на организм человека. Работники в условиях длительного шумового воздействия испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, боли в ушах и т. д. Такие нарушения в работе ряда органов и систем организма человека могут вызвать негативные изменения в эмоциональном состоянии человека вплоть до стрессовых. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением, ухудшается речевая коммутация. Все это снижает работоспособность человека и его производительность, качество и безопасность труда. Длительное воздействие интенсивного шума (выше 80 дБ) на слух человека приводит к его частичной или полной потере. Распространенные средства индивидуальной защиты от шума – это пробки,

наушники, вкладыши (беруши) и шлемы [34].

Меры коллективной защиты могут включать в себя, в частности:

- оценку риска потери слуха работником;
- использование малошумных машин;
- использование материалов и конструкций, препятствующих распространению шума и вибрации;
- привлечение к работам лиц, не имеющих медицинских противопоказаний по шуму;
- контроль правильности использования средств индивидуальной защиты.

Микроклимат характеризуется тремя показателями в теплое и холодное время года: температура, относительная влажность и скорость потока воздуха. Категория работ при разработке проектного решения – Па [22]. Показатели, соответствующие данной категории приведены в таблице 17.

Таблица 17 – Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений [22]

Оптимальные показатели характеристик микроклимата			
Время года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения, м/с
Холодное	18-20	40-60	0.2
Теплое	21-23	40-60	0.3
Допустимые показатели характеристик микроклимата			
Время года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения, м/с
Холодное	17-23	<75	<0.3
Теплое	18-27	<65	0.2-0.4

Несоблюдение параметров микроклимата может приводить к быстрой утомляемости, повышению уровня потоотделения и артериального давления, слабость, нарушение координации. Помещение, в котором проводится

разработка мобильной робототехнической платформы, должно быть оборудовано системой климат контроля с возможностью выбора температуры и скорости потока воздуха для поддержания оптимальных, или близких к оптимальным параметрам микроклимата.

Монотонная работа возникает во время оформления конструкторской документации по проекту. Это ведет к снижению работоспособности вследствие монотонии, а также перенапряжению зрительных анализаторов. Для того чтобы это избежать необходимо делать периодические перерывы через 2, 4 и 6 часов после начала работы, сопровождающиеся физической активностью, отдыхом, психологической разгрузкой [35].

5.4 Экологическая безопасность

В ходе анализа процесса по разработке проектного решения были выявлены возможные воздействия на литосферу и гидросферу.

Воздействие на литосферу могут оказывать сброс твердых отходов производства металлических и полупроводниковых элементов, входящих в состав робототехнической платформы и ЭВМ. Для минимизации воздействия на литосферу твердых отходов необходимо их утилизировать в соответствии с [36].

В случае попадания жидких компонентов разрабатываемого решения, например, смазочных материалов, покрасочных материалов, в сточные воды, необходимо проверить их концентрацию, и если она не удовлетворяет ПДК [37] провести их предварительную очистку, прежде чем они попадут в поверхностные водоемы [38].

5.5 Безопасность в ЧС

При разработке проектного решения возможны ЧС природного

характера, геологического воздействия, а также техногенные аварии (аварии на электроэнергетических объектах, на коммунальных системах обеспечения, пожар).

Наиболее вероятной ЧС является пожар. Источником его возникновения могут быть:

- возгорание электрической проводки, вследствие короткого замыкания и нарушения условий эксплуатации;
- возгорание приборов, вследствие неисправности электронных подсистем;
- возгорание аккумуляторных батарей, которыми снабжается робот, вследствие короткого замыкания.

Для предотвращения возгорания, согласно стандарту [39], необходимо обеспечить электрические цепи, которые могут привести к возгоранию, устройствами защитного отключения. Для предотвращения перегрузки, необходимо соблюдать номинальные требования к работе приборов.

Согласно требованиям к противопожарной защите [39], помещение оборудовано автоматическими средствами пожарной сигнализации, средствами пожаротушения (огнетушитель), средства акустического оповещения сотрудников. Также для организации управления движением людей к путям эвакуации, в помещениях установлены схема пути эвакуации (план эвакуации здания, в котором проводилась разработка представлен на рисунке 37), эвакуационные выходы оборудованы светящейся табличкой «Выход».



Рисунок 37 – План эвакуации помещения

В случае возникновения пожара необходимо сообщить в пожарную службу по телефону «101», «112», сообщить на вахту. Для самостоятельного тушения пожара необходимо применять огнетушители подходящего типа (углекислотные). При использовании огнетушителя необходимо соблюдать правила использования.

5.6 Выводы по разделу

В рамках раздела “Социальная ответственность” были рассмотрены основные правовые и организационные нормативные документы. Вместе с этим, были определены опасные и вредные факторы, появление которых возможно при разработке проектного решения и выявлены способы минимизации их влияния на работников. Также был выполнен расчет искусственного освещения методом коэффициента светового потока. В ходе анализа возможного влияния процесса разработки мобильной

робототехнической платформы на экологию, были выявлены воздействия на литосферу и гидросферу. Помимо этого, были выделены возможные ЧС, среди которых наиболее вероятным является возникновение пожара.

Заключение

В ходе выпускной квалификационной работы был представлен алгоритм управления электромеханическими системами посредством эквивалентного вектора силы системы. Были предложены этапы проведения исследований в данной области с нарастающим уровнем сложности систем, от одномерных до многомерных. Помимо этого, были получены выражения сил для одномерных систем, на примере движения шара в потоке воздуха в аэротрубе.

Вместе с этим, была разработана мобильная робототехническая платформа шагающего типа с дуговыми движителями. Проведён расчёт параметров сечения движителя, после чего, было проведено исследование влияния силы на движитель, под разными углами и скорректированы форма и сечение движителя. Выведены закономерности для получения параметров привода у роботов на дуговых движителях. Проведён выбор элементной базы робота и получена необходимая документация для изготовления. После чего, был изготовлен прототип робота.

Во время разработки прототипа, разрабатывалась система управления роботом. Первым делом были получены модели приводов и построены ПИД регуляторы, для регулирования параметров двигателя. Затем, были получены кинематические уравнения для дуговых движителей. Уравнения были проверены в программном пакете Matlab и построены траектории движения точки крепления, которые говорят о том, что уравнения действительны. После всего этого, был предложен алгоритм управления шагающим роботом с дуговыми движителями.

Список публикаций

1. Поберезкин, Никита. Разработка мехатронного модуля для мобильного робота повышенной проходимости / Н. И. Поберезкин // Современные проблемы машиностроения сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 26-30 октября 2020 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; под ред. Е. Н. Пашкова . — Томск: Томский политехнический университет, 2020. — [С. 109-110]. — Заглавие с экрана. — [Библиогр.: с. 110 (2 назв.)].

2. Поберезкин, Никита. Разработка мобильного робота гексапода для преодоления пересечённой местности / Н. И. Поберезкин; науч. рук. А. С. Беляев // Молодежь и современные информационные технологии сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 17-20 февраля 2020 г., г. Томск: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа информационных технологий и робототехники ; под ред. Д. М. Сонькина [и др.] . — Томск: Изд-во ТПУ, 2020. — [С. 246-247]. — Заглавие с титульного экрана. — [Библиогр.: с. 247 (3 назв.)].

3. Петрова, Екатерина Евгеньевна. Разработка роботизированного модуля по приготовлению коктейлей типа шоты в рамках системы роботизированного бара / Е. Е. Петрова, Н. Поберезкин // Молодежь и современные информационные технологии сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 21-25 марта 2022 г., г. Томск: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа информационных технологий и робототехники ; ред. кол. А. Ю. Дёмин, Н. Г. Марков, В. Г. Спицын [и др.]. — Томск: Изд-во ТПУ, 2022. — [С. 283-284]. — Заглавие с титульного экрана. — [Библиогр.: с. 284 (1 назв.)].

Список литературы

1. Ларкина В.А. — Шагающие роботы для спасательных операций. Обзор и анализ существующих моделей // Кибернетика и программирование. – 2021. – № 1. – С. 35 - 73. DOI: 10.25136/2644-5522.2021.1.35862 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=35862
2. Жмудь, В. А. Введение в робототехнику / В. А. Жмудь, Я. Носек, Л. Димитров // Автоматика и программная инженерия. – 2019. – № 4(30). – С. 34-49. – EDN TFCZXX.
3. Лопота, А. В. Мобильные наземные робототехнические комплексы профессионального назначения / А. В. Лопота, Б. А. Спасский // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8. – № 1. – С. 5-17. – DOI 10.31776/RTSJ.8101. – EDN JAQTQG.
4. Методы повышения быстродействия и точности систем навигации и управления движением автоматических робототехнических средств / И. В. Меркурьев, Е. В. Комерзан, О. В. Свириденко, Л. Р. Лабахуа // Системные технологии. – 2018. – № 3(28). – С. 99-104. – EDN YOCKTJ.
5. Зикратова, Т. В. Метод группового управления в мультиагентных робототехнических системах в условиях воздействия дестабилизирующих факторов / Т. В. Зикратова // Труды учебных заведений связи. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 92-100. – DOI 10.31854/1813-324X-2021-7-3-92-100. – EDN JFMYBF.
6. Движение частиц в воздушном потоке // А.А. Соболев, Н.А. Мельников, Л.О. Тютюнник. Тольяттинский государственный университет. Вектор науки ТГУ. №3(17), 2011 — с. 82–86. - URL: <http://masters.donntu.org/2014/fimm/mitina/library/article7.htm>
7. Лобовое сопротивление // Интернет ресурс «Wikipedia» URL: [ССЫЛКА](#)

8. Васильев А.В. – Принципы построения и классификация шасси мобильных роботов наземного применения и планетоходов // Информатика, телекоммуникации и управление, Санкт-Петербург: Издательство: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
9. Xilun Ding, Zhiying Wang, Alberto Rovetta and J.M. Zhu. Locomotion analysis of hexapod robot. //Climbing and Walking Robots,2010, InTech.- 291-309 с. <http://www.intechopen.com/books/climbing-and-walking-robots>
10. И. В. Богомаз. Механика: Учебное пособие. – Красноярск: Изд-во Сибирский федеральный университет, 2012. – 346с. ISBN 978-5-7638-2178-9
11. Прочность на изгиб. – Компания по производству пластика для 3D-печати // Электронный ресурс «REC 3D» URL: <https://rec3d.ru/rec-wiki/prochnost-na-izgib/>
12. Длина дуги окружности // Электронный ресурс «2mb» URL: <https://2mb.ru/matematika/geometriya/dlina-dugi-okruzhnosti/>
13. Работа, мощность, энергия // Электронный ресурс «Математика и Физика», URL: <https://educon.by/index.php/materials/phys/energy>
14. Кравченко Н. С., Твердохлебов С. И. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011 – 285 с. [9453–2011].
15. Эффект Холла // Интернет ресурс «Wikipedia» URL: [ссылка](#)
16. Сколько в России крупных заводов? Давайте посчитаем // Электронный ресурс «Яндекс Дзен» URL: <https://zen.yandex.ru/media/sdelanounas.ru/skolko-v-rossii-krupnyh-zavodov-davaite-poschitaem-5f32fa35148048284a0e201f>
17. Список крупнейших интеграторов промышленных роботов в России 2021 // Электронный ресурс «TADVISER» URL: <https://www.tadviser.ru/index.php>

18. Робототехника: фантастика, которая станет реальной // Электронный ресурс «Газпромбанк инвестиции» URL: <https://gazprombank.investments/blog/market/robotics/#history>
19. Патент EP-522 200 B1 // Электронный ресурс «Orbit Questel» URL: https://subj.orbit.com/obj/servlet/get_pds/EP-522200B1.pdf?userid=ZO07CPVI&type=0&pdfid=91099540&ekey=962
20. Патент RU 2 759 345 C1 // Электронный ресурс «Orbit Questel» URL: https://subj.orbit.com/obj/servlet/get_pds/RU2759345C1.pdf?userid=ZO07CPVI&type=0&pdfid=107781919&ekey=1340
21. SIGMA 200 система телеинспекции трубопроводов // Электронный ресурс «TARIS» URL: <https://taris.ru/teleinspekziya-truboprovodov/robot-sigma>
22. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
23. ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя.
24. ГОСТ 21889-76. Система "Человек-машина". Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования;
25. ГОСТ 12.2.033-78. Рабочее место при выполнении работ стоя
26. Трудовой кодекс Российской Федерации от 13.12.2001 г. N 197-ФЗ (ТК РФ);
27. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. Перечень опасных и вредных факторов;
28. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов;

29. ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление;
30. ГОСТ Р 12.1.019-2017 ССБТ Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты;
31. ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
32. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 27 ноября 2020 года N835н «Об утверждении Правил по охране труда при работе с инструментом и приспособлениями».
33. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.
34. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
35. МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности».
36. ГОСТ 17.4.3.04-85 Охрана природы (ССОП). Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения.
37. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
38. ГОСТ 17.1.3.07-82 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков.
39. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования.

Приложение А

(обязательное)

Техническое задание на разработку

Разработчик

Поберезкин Н.И.

Заказчик

Зав. отдел. ОАР Филипас А.А.

«10» сентября 2022 г.

«10» сентября 2022 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ**на разработку мобильного робота повышенной проходимости****Шифр:** Мобильный робот

Назначение: Мобильная робототехническая платформа шагающего типа для диагностики утечек и аварийных ситуаций на предприятиях.

Цель: Автономное передвижение по территории завода, проведение измерений, сбор данных и диагностика оборудования для предотвращения аварийных ситуаций на начальных стадиях развития.

Объект управления: Наземный шагающий мобильный робототехнический комплекс, который движется по изменяющемуся рельефу.

1. *Робот должен иметь следующие технические характеристики:*

- 1.1. Обладать габаритами, не более 550 мм х 400 мм х 200 мм в положении стоя.
- 1.2. Передвигаться со скоростью не менее 1 м/с в режиме хождения и не менее 1.7 м/с в режиме бега.
- 1.3. Обладать массой не более 12 кг.
- 1.4. Базироваться на шагающем шасси.
- 1.5. Работать без устройств подзарядки не менее 1,5 ч.
- 1.6. Иметь на борту камеру с разрешением не менее 1920×1080 (Full HD, 60 кадров в сек).

2. *Робот должен обеспечивать выполнение следующих функций в автоматическом режиме:*

- 2.1. Передвигаться по пересеченной местности.
- 2.2. Определять лестницы и препятствия, которые пройти не может.
- 2.3. Принимать решение об обходе препятствия или о подъеме по лестнице.
- 2.4. Диагностировать аварийные ситуации.
- 2.5. Проводить измерения.
- 2.6. Диагностика работоспособности всех устройств системы.
- 2.7. Контроль уровня напряжения.
- 2.8. Определять тип подстилающей поверхности.
- 2.9. Считывание показаний со следующих датчиков:
 - 2.9.1. Датчиков положения.
 - 2.9.2. Датчиков тока.
 - 2.9.3. Датчика глобальной навигации.
 - 2.9.4. Гироскопа, акселерометра.
 - 2.9.5. Датчиков расстояния.
 - 2.9.6. Датчиков давления.
- 2.10. Обработка следующих алгоритмов передвижения в зависимости от выбора режима:
 - 2.10.1. Подъем.
 - 2.10.2. Движение вперед.
 - 2.10.3. Движение назад.
 - 2.10.4. Поворот направо, налево.
 - 2.10.5. Опускание.

3. *Робот должен обеспечивать выполнение следующих функций в интерактивном режиме взаимодействия с пользователем:*

- 3.1. Вывод изображения с камеры, по запросу оператора.
- 3.2. Настройка:
 - 3.2.1. Желаемого направления движения.
 - 3.2.2. Желаемой скорости.

Параметры, предъявляемые к работе системы:

Время работы не менее 1 часа, без использования зарядного устройства.

Рабочее напряжение от 12 В до 24 В.

Требования к программной части системы:

Программная часть должна иметь интуитивно понятный интерфейс, содержащий основное окно с элементами управления для движения и элементы отображающие значения датчиков в реальном времени.

Требования к оборудованию:

Зарядное устройство для литий-ионной батареи – iMAX B6AC на 80 Вт, 6А.

В процессе выполнения технического задание может подвергаться изменению по согласованию сторон.

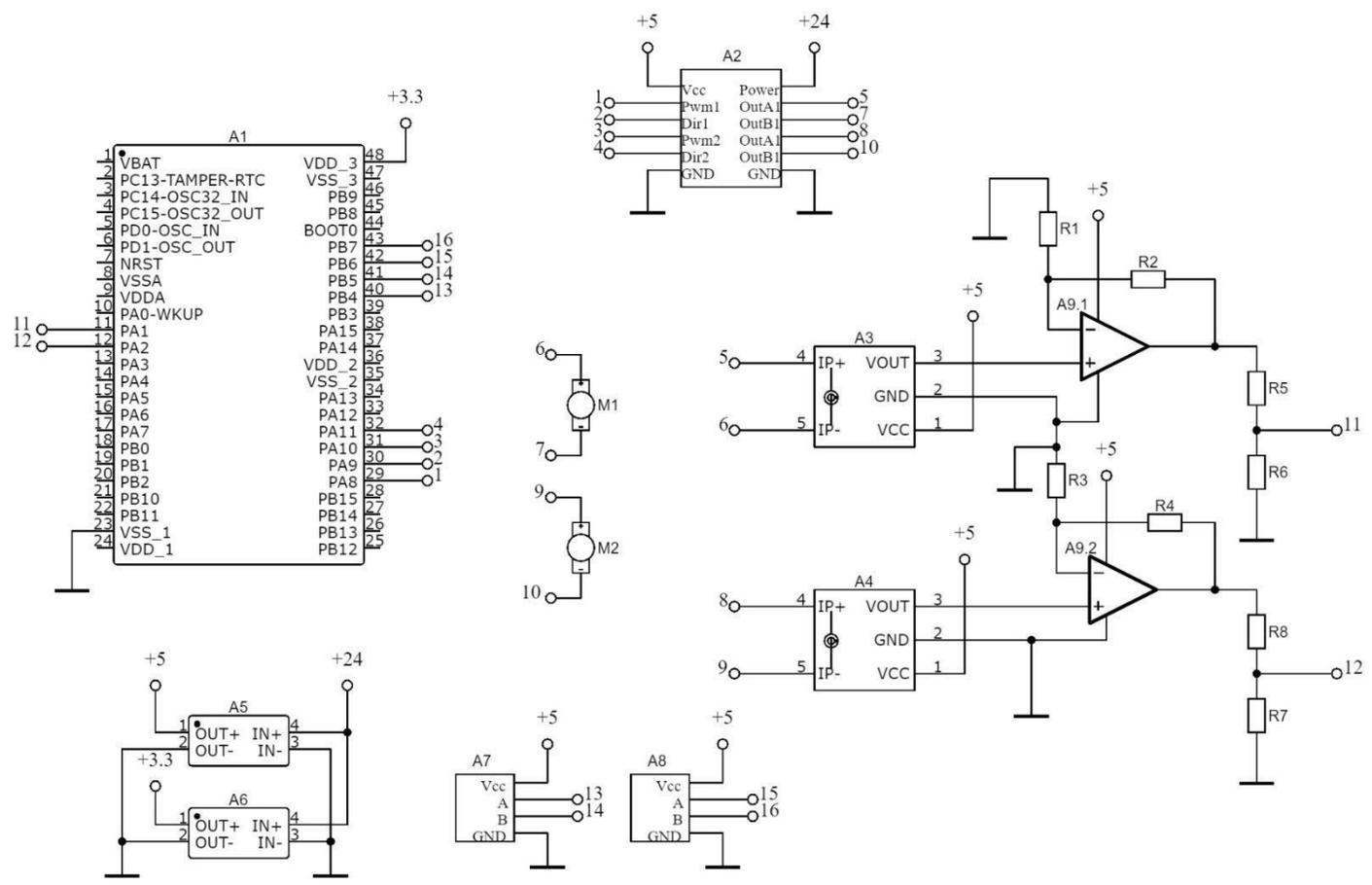
Приложение Б

(Обязательное)

Принципиальная схема нижнего уров

ФЮРА.ХХХХХХ.001.ЭМ

Перв. примен.
Справ. №
А
Подп. и дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Подп. и дата
Инв. № подл.



				ФЮРА.ХХХХХХ.001.ЭМ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Принципиальная схема подключения устройств	
Разраб.		Подберезкин Н.		20.12.2021		
Пров.					Лист	Листов 1
Т. контр.					ТПУ ИШИТР ОАР ВЕМО2	
Н. контр.						
Утв.						

Перв. примен.		Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Приме- чание
Справ. №				1	A1	STM32F103C8T6	1	
				2	A2	H-bridge IRF3205	1	
				3	A3, A4	ACS758LCB-050B	2	
				4	A5, A6	DC-DC Down HW-613	2	
				5	A7, A8	Энкодер, Холл, 1000 т/об	2	
				6	A9	LM358	1	
				7	M1, M2	JGB37-545	2	
				8	R1, R3	1 кОм, 0,25 Вт, 5%	2	
				9	R2, R4	9 кОм, 0,25 Вт, 5%	2	
				10	R5, R8	100 Ом, 0,25 Вт, 5%	2	
				11	R6, R7	200 Ом, 0,25 Вт, 5%	2	
Подп. и дата		Инв.№ д/дл		Взаминв.№		Подп. и дата		
					ФЮРА.ХХХХХХ.001.ЭМ			
Изм.		Лист		№ док-м.		Подп.		Дата
Разраб.		Поберезкин Н.И.						20.12
Пров.								
И контр.								
Утв.								
Принципиальная схема подключения устройств						Лит.	Лист	Листов
							1	1
						ТПУ		ИШИТР
						ОАР		гр.8ЕМО2

Копировал

Формат А4

Приложение В

(справочное)

Developing a mobile walking robotics platform

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8EM02	Поберезкин Никита		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой – руководитель ОАР на правах кафедры	Филипас Александр Александрович	к.т.н., доцент		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ст. преподаватель ОИЯ ШБИП	Инна Леонидовна Пичугова			

2 Developing a mobile walking robotics platform

Based on the terms of reference for the development of the robot, a series of development tasks were drawn up:

- Move at a speed of at least 1.7 m/s.
- Overcoming obstacles on the move with a minimum height of 8 cm.
- Stand-alone operation for at least 1 hour.
- Measurement of drive current and speed.
- Temperature measurement, gas leakage and smoke detection.

2.1 Selecting a propulsion system for a walking design

Before designing, it is necessary to decide what type of propulsion for the walking platform apply. Walking thrusters can be divided into several basic classes:

- Lever;
- Telescopic;
- Cyclical.

Lever-motor units are divided into single-lever and pantograph units. Single-lever thrusters can change their configuration due to the moving elements. The number of degrees of freedom depends on the number of these elements and is usually more than one. The segments are interconnected by an actuator and the leading segment has two actuators. The pantograph mover has the ability to control the supporting part of the limb. This type of mover is applicable in several applications. In a first application variant, the robot will change its height within a large range while the supporting part of the limb will remain in the same place when lifted on the limb. A second application variant involves using an actuator

to control the supporting segment, with the actuator being located in the body of the robot rather than at the articulation, as was the case with lever-type thrusters. This option allows a significant reduction in the force of gravity acting on the limb during lifting, resulting in increased stability.

The telescopic mover is a piston with a spring, pneumatic or hydraulic actuator. The piston is normally mounted on a pivoting axle without any additional components. In lever-type thrusters, movement is achieved by varying the height of the limb, while telescopic thrusters change the level of the piston cylinder extension. Also, with this type of propulsion, forward movement depends on the angle of rotation of the actuator on which the piston is fixed and whose plane of rotation is perpendicular to the direction of movement and crosses the surface. Sideways movement and pivoting requires another actuator, which will change its angle of inclination to the surface in a plane perpendicular to the first. Another difference between a telescopic propulsor and a lever propulsor is the arc of rotation, which is in a plane perpendicular to the plane of motion.

A cyclic mover is a single shaped segment attached to an actuator shaft which rotates in a perpendicular plane to the plane of motion. This type of mover requires a single actuator, while in others the minimum number of actuators is two, for rotation in two planes. The cyclic mover has an increased speed when travelling over rough terrain, due to the fact that it has only one drive and one articulation, but it is inferior to lever and telescopic movers in terms of cross-country capability.

At this point, a table can be generated with the advantages and disadvantages of each mover class. A comparison of thrusters is presented in Table 1.

Table 1 – Comparative analysis of mover classes

Name	Lever	Telescopic	Cyclical
Min. number of drives	2	2	1
Min. number of joints	2	2	1
Robot speed	Low	Medium	High
Stability in motion	High	Low	High
Robot walkability	High	High	Medium
Difficulty of production	Medium	High	Low

As the robot under development needs to travel at a speed of at least 1.7 m/s and overcome obstacles of at least 8 cm, a cyclic propulsion type was chosen.

The cyclic mover, on the other hand, has several representations, they are shown in Figure 8. It is necessary to decide on the most suitable one for the task at hand.



Figure 8 – "Compass", "Four-rod" and "Half-rod" propulsion options

The Compass propulsor is a straight support made of plastic material and secured to the drive by the upper part. When moving, this type of propulsor makes contact with the surface at one point and describes the trajectory shown in Figure

9. Because of that, when the robot is moving on such propulsors, the body oscillates, which reduces the stability of movement. At the same time, during the contact cycle with the surface of this propulsor, the shoulder of the force application is preserved, which leads to an increase in the energy consumption of the motor. The main advantage of the Compass propulsor is its ease of manufacture.

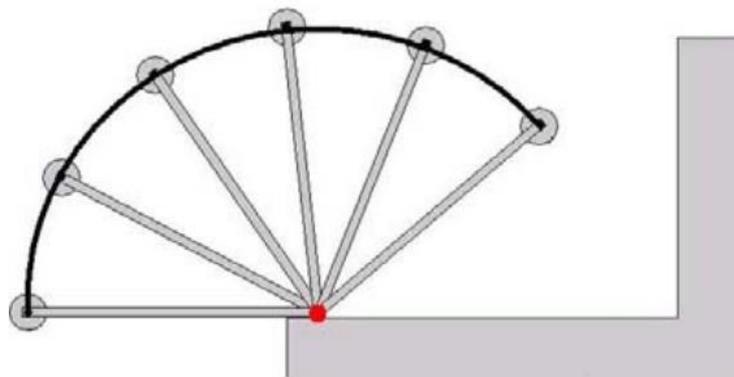


Figure 9 – Compass mover during stair climbing. Black line – hip path, red dot – point of contact with the surface

The "quadrupedal" propulsor consists of 2 plates of rigid material and 2 plates of plastic material attached to each other in a shape resembling the limbs of a four-legged animal. This type of propulsor, when moving, has 2 points of support on the surface and the trajectory shown in Figure 10. The cyclic undercarriage consumes less energy to operate and has reduced oscillation when climbing obstacles. When driving in a straight line, it causes similar vibrations to the Compass propulsor, but its plastic properties are higher.

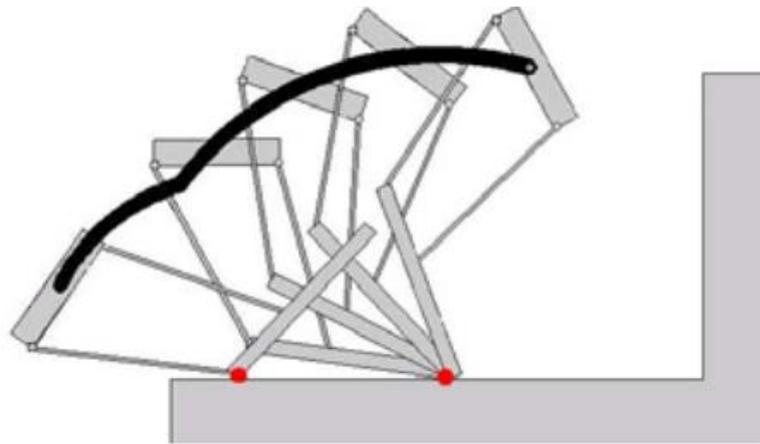


Figure 10 – 'Quadruped' mover in a frame-by-frame animation. The black line is the hip trajectory. The two points are the (consecutive) foot contact points

The arc mover is an averaged version between the previously proposed ones. It is essentially an arc of plastic material attached to a pivoting axle at one end. The mover is also referred to as a hybrid mover, due to the fact that it performs a single-axis rotation of each of the elements when moving, in some sources [8] called a stepper with a "wheeled" stepping principle. Figure 11 shows the trajectory described by the propulsor when moving on the surface. Using the figure, it can be said that this propulsor will have lower power consumption and less hull oscillation along the course of movement on straight and rough stretches of surface. The reduction of oscillation during travel allows for increased stability, which is a definite advantage for walking structures.

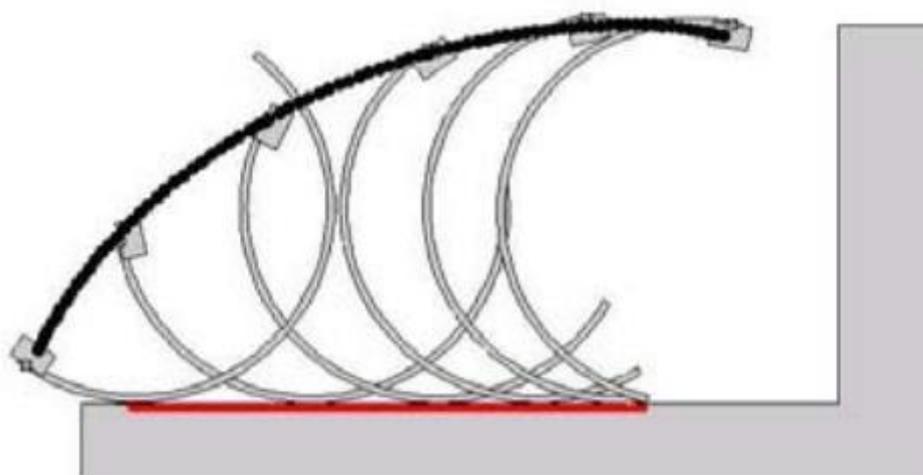


Figure 11 – Arc thruster in the frame-by-frame animation. The black line is the trajectory of the motor shaft. Red line – foot contact points

Considering the information above, a table (Table 2) can be generated to show the advantages and disadvantages of each type of cyclic thrusters.

Table 2 – Comparative analysis of cyclic thrusters

Name	Compass	Four-strand	Arc
Passability	High	High	High
Travel speed	High	High	High
Energy costs	High	Medium	Low
Fluctuating movement	Significant	Medium	Minor
Production	Light	Heavy	Average

Given the data presented in the table above, a cyclic arc propulsion system was selected for the robot under development.

2.2 System topology

The choice of enclosure is based on the stability of the robot in motion, which is directly related to the number of walking elements in the structure. There are different body topologies, some of the most common are bipedal (Figure 12 a), quadrupedal (Figure 12 b) and hexapedal (Figure 12 c).

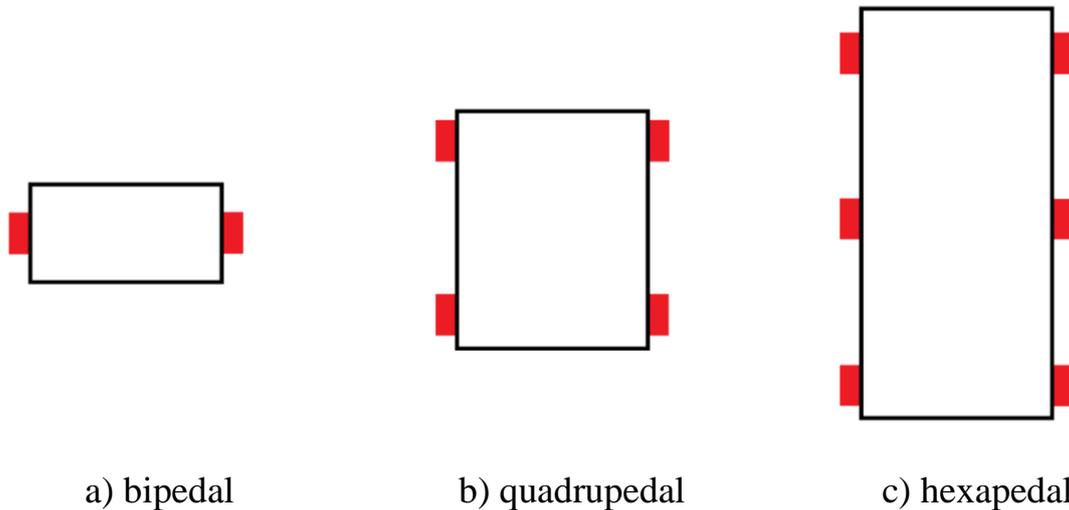


Figure 12 – Shapes of topologies

Of the presented topologies, the hexapedal topology will be the most stable, because at any given time of movement it will have three points of support on the surface on which it is moving. Therefore, this topology was chosen for the robotic platform under development.

The topology of the robotic platform must also consider the geometry of the hull. As the hexapedal type of design was previously decided upon, geometries for bipeds and quadrupeds will not be considered. In terms of geometry, the designs can be divided into the following types [9]:

- An axisymmetric body (Figure 13 a). These are usually hexagonal or rounded shapes.
- An oblong body (Figure 13 b). The most common shapes are rectangular.
- Articulated body (Figure 13 c). A body with movable body parts.

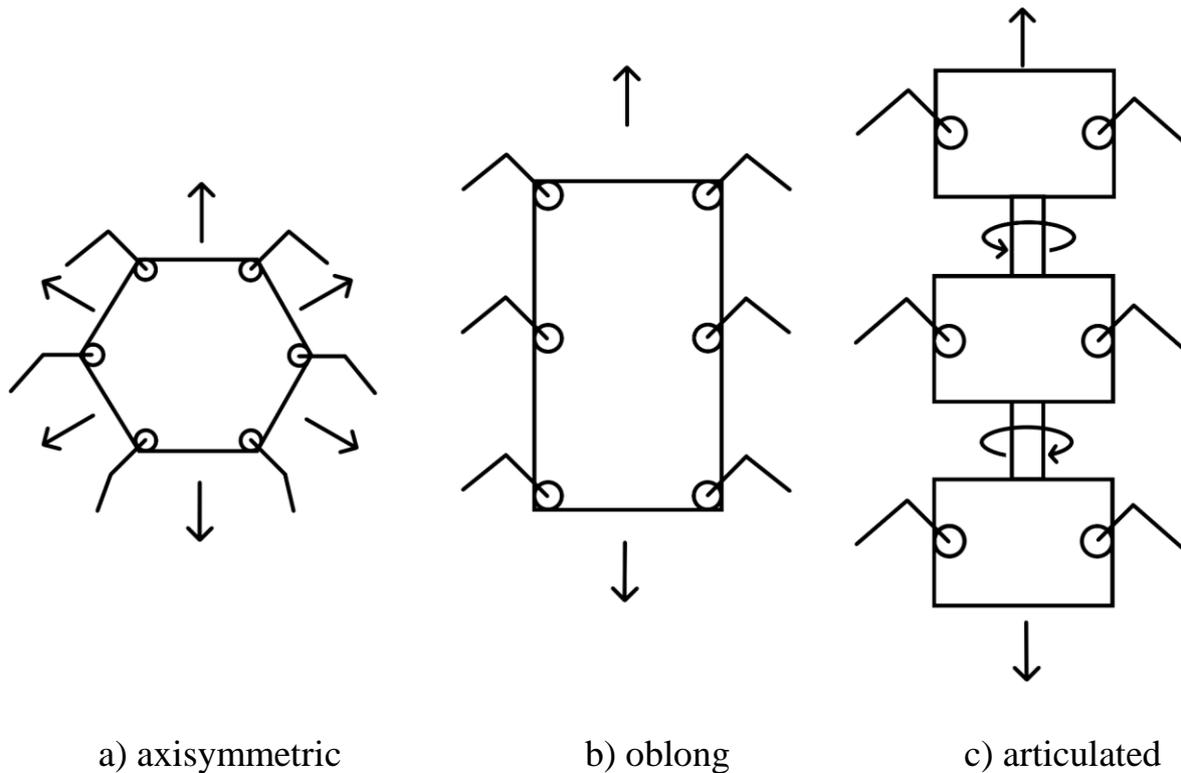


Figure 13 – Enclosure diagrams

The main advantage of the axisymmetric hull is the lack of structural orientation. The arc cyclic stepper mover was chosen above, the application of this type of hull is not possible. The main advantage of the oblong hull is the greater structural adaptability to move along the axis of symmetry, i.e. to move straight ahead. This ability is achieved by the pronounced directionality of this housing. The articulated body allows robots to achieve greater adaptability in movement; it is an elongated structure consisting of articulated parts. The disadvantage of the design is the large number of joints, which leads to increased power consumption and reduced structural reliability. From the above it can be concluded that in this case the elongated body is the best option.

As a result, the overall topology of the system is a rectangular hull with the dimensions specified in the specification and six single-axis cyclic walking thrusters mounted three on each side. This topology will have the ability to move in different ways, such as:

- Tripod, where all the legs of the hexapod are split into two groups to form a tripod with three points of support in the plane of motion;
- Bipedal, movement is achieved by alternately moving two legs, with the remaining legs in contact with the surface;
- quadrupedal, the movement is achieved by alternately moving the four legs, with the others in a contact position;
- hexapod, all the legs of the hexapod move at the same time. This method can be used to perform dynamic jumps, and to cross certain kinds of obstacles.

2.3 Searching for propulsion parameters

Once the robot topology and thrusters have been determined, the thruster diameter, thickness and cross-sectional width must be determined.

The diameter of the propulsor must be selected based on the conditions of passability. The technical specification specifies the minimum size of the obstacle to be passed, which is 80 mm. It was decided that the diameter of the undercarriage would be 50% of the minimum height of the obstacle, which is 120 mm. This diameter would allow the robot to overcome obstacles between 80mm and 120mm and to travel at high speed.

Knowing the diameter of the propulsor it is possible to decide what material can be used to make the propulsors and to find the width and thickness of the cross section of the propulsor. Figure 14a is a schematic representation of the propulsor, the cross section is shown in Figure 14b.

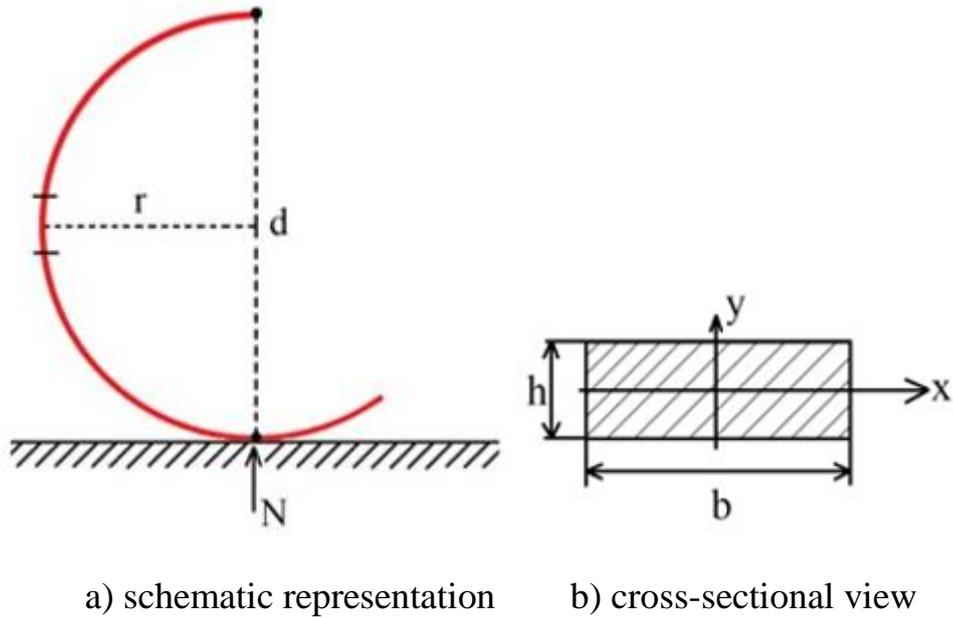


Figure 14 – Image of the propulsor

During movement, a bending force acts on the propulsor, which generates a bending moment. A suitable material for the construction of the propulsor and its width and thickness can be found using the strength condition [10]:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_x} \leq [\sigma] \quad (12)$$

where σ_{\max} is the maximum normal stress, MPa;

$M_{\max} = N \cdot r$ – maximum bending moment, N·m [14];

$N = F_{\text{grav}} = m \cdot g$ – support reaction force, N [14];

r is the shoulder of the force, m;

$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6}$ – axial moment of resistance of the section, m³ [10].

Let the width and thickness of the propulsor be 20 mm and 4 mm respectively. Then, knowing the maximum mass of the robot, the following parameters can be obtained, according to expression (12)

$$M_{\max} = 4.39 \text{ Nm};$$

$$W_x = 5.3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3;$$

$$\sigma_{max} = 82.32 \text{ MPa.}$$

The maximum load that can be supported by a thruster with this cross section is 82 MPa. It is known from source [11] that for PLA plastic, one of the most common plastics for 3D printing, the bending strength condition is 94.2 MPa, which can indicate that condition (12) is met. At the same time, the tensile strength for other PETG and ABS plastics is 76 MPa and 65 MPa, respectively. Consequently, it can be concluded that the most suitable material, when applied in additive manufacturing, would be PLA plastic, and also the thickness of the mover must be at least 4 mm across the mover. In order to verify the analytical calculations, a study of the selected propulsor parameters was carried out in the Autodesk Fusion 360 simulation environment. The research was carried out in static load mode. Figure 15 shows a bending stress simulation of the propulsor with the cross section indicated above. It is subjected to a force equal to 80 N.

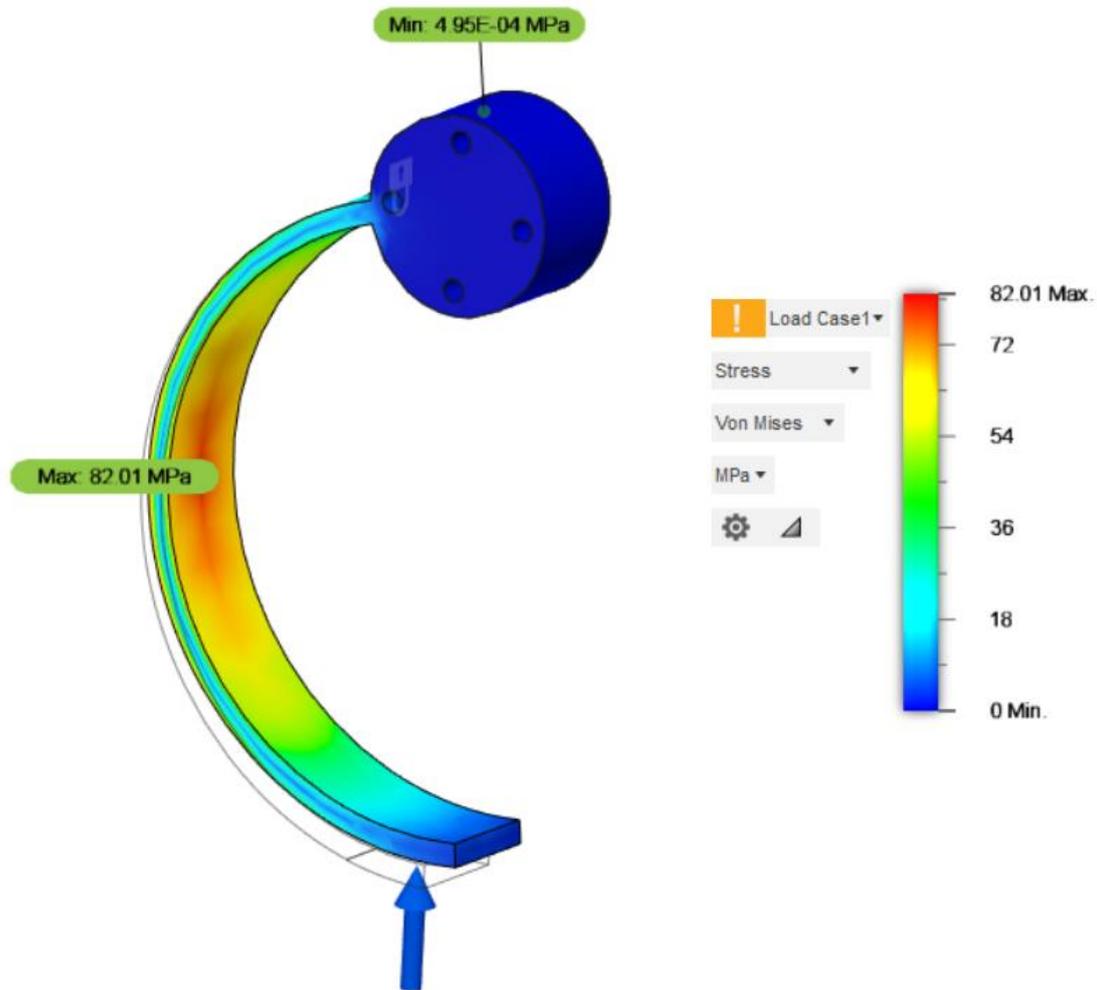


Figure 15 – Load modelling in Autodesk Fusion

The figure above confirms the correctness of the analytical calculations; the maximum stress in this case is 82.01 MPa. However, the thrusters will have forces at different angles when moving. Figure 16 shows the thrusters with forces at different angles. From this figure, it can be seen that by changing the angle of force action by 30 degrees relative to the vertical axis (Figure 16a), the maximum stress has increased to 94.36 MPa, which exceeds the limit value for the material selected above.

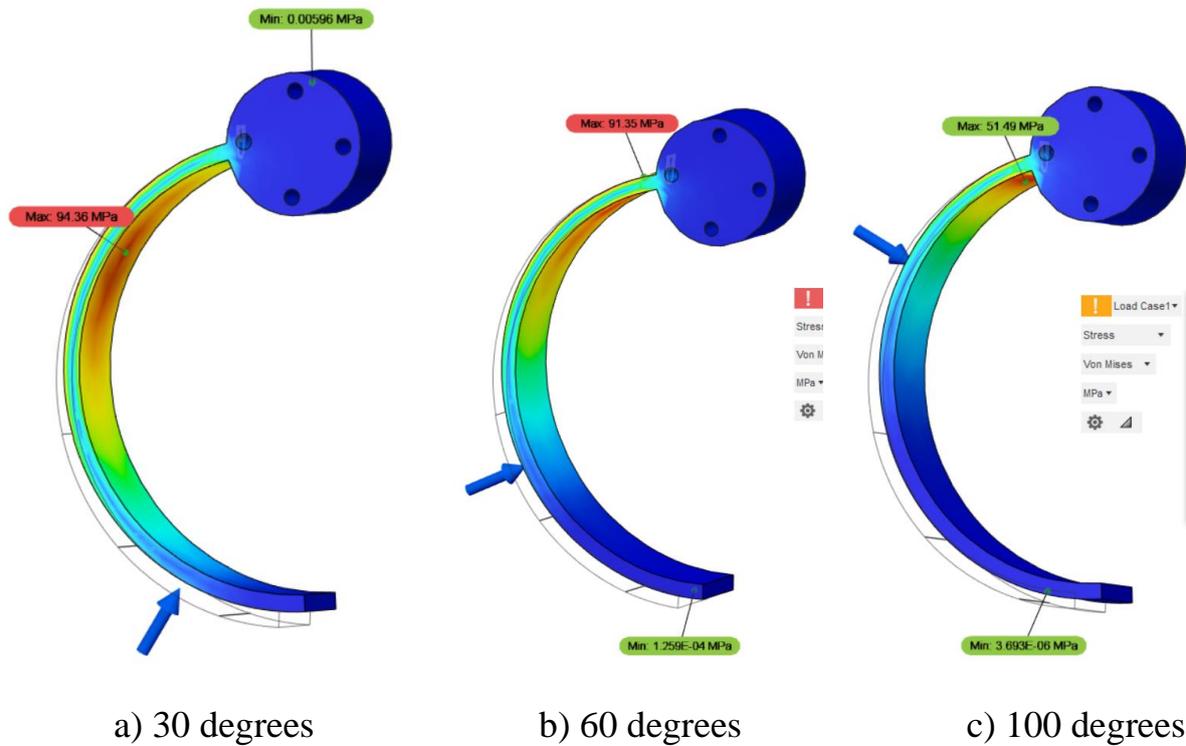


Figure 16 – Study of thruster loads at different angles

This problem can be solved by increasing the thickness of the thruster at the break point, using inequality (12) the thickness was found to be 6 mm. Figure 17 shows the propulsor with increased thickness at the point of break to 6 mm. It can be seen from the figure that the increased thickness has reduced the stress value to 60.5 MPa, which satisfies the strength condition.

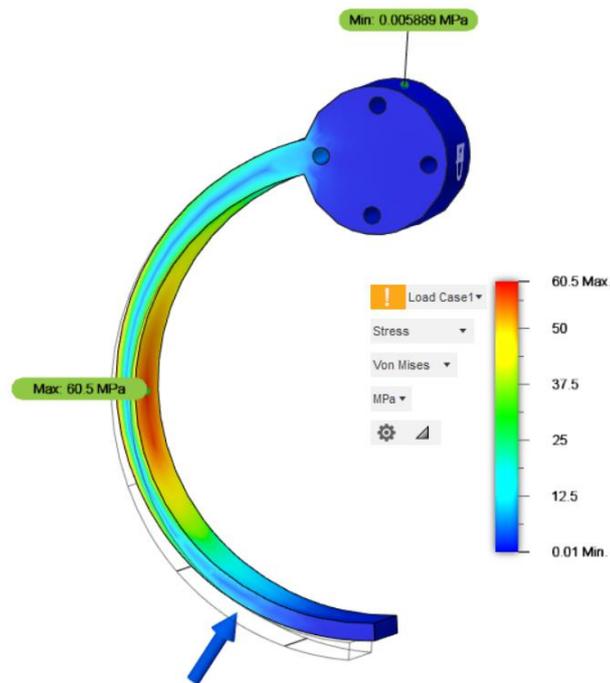


Figure 17 – Propulsor with increased thickness at breakpoint

2.4 Description of the structure of the robotics platform

As it was described in the previous sections, six actuators are required to move the robotic platform. Each actuator shall consist of a motor, gearbox, feedback sensors and control circuitry. The control circuitry will be a combination of a microcontroller, for generating control signals and a power driver, which will convert the control signals from the microcontroller into power signals for the motor. Due to the need to constantly monitor the position of the thruster, the use of a steering angle sensor is required. As it is not possible to control the system with an equivalent force vector without measuring the current at the actuator, a current sensor is required for each actuator. To simplify and reduce manufacturing costs, it was decided to control the two actuators with a single controller. Since all the drives in the system must be coordinated, they must be able to communicate with each other. At this stage, it is possible to form a mechatronic module comprising two power circuits, a controller, two motors and sensors.

In order to control the drive controllers in an orderly manner, another controller is needed, which in turn will need to communicate with the single-board computer. The single-board computer will take care of machine vision tasks, collecting data from the required sensors and managing this data.

The resulting block diagram of the platform is shown in Figure 18.

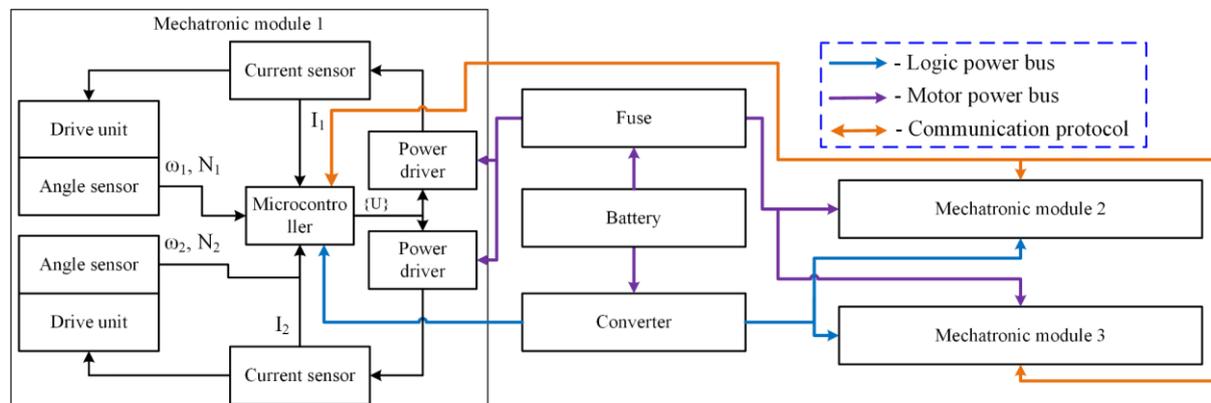


Figure 18 – Structure of the robotics platform

The diagram above has the following symbols:

N_1 , N_2 – number of revolutions of the two sensors of the mechatronic module;

ω_1 , ω_2 – motor angular velocities obtained from the two mechatronic module's angle encoders;

I_1 , I_2 are the current values obtained from the two current sensors of the mechatronic module;

{U} is the set of voltages supplied from the controller to the power drivers;

For a better understanding of the system's operation, it is necessary to select the system's actuators and form a functional diagram.