

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

Институт ИК
Направление подготовки Мехатроника и робототехника
Кафедра ИКСУ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка алгоритмического и программного обеспечения системы управления шагающим роботом

УДК 621.865.8:004.41

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ41	Репин Дмитрий Николаевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гончаров В.И.	д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Конотопский Владимир Юрьевич	к.т.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Пустовойтова Марина Игоревна	к.х.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ИКСУ	Лиепиньш Андрей Вилнисович	к.т.н.		

Томск – 2016 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Код результата	Результат обучения
Профессиональные компетенции	
P1	Обладать естественнонаучными и математическими знаниями для решения инженерных задач в области разработки, производства и эксплуатации систем управления техническими объектами и средств автоматизации.
P2	Обладать знаниями о передовом отечественном и зарубежном опыте в области управления техническими объектами с использованием вычислительной техники
P3	Применять полученные знания (P1 и P2) для формулирования и решения инженерных задач при проектировании, производстве и эксплуатации современных систем управления техническими объектами и их составляющих с использованием передовых научно-технических знаний, достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.
P4	Уметь выбирать и применять соответствующие методы анализа и синтеза систем управления, методы расчета средств автоматизации, уметь выбирать и использовать подходящее программное обеспечение, техническое оборудование, приборы и оснащение для автоматизации и управления техническими объектами.
P5	Уметь находить электронные и литературные источники информации для решения задач по управлению техническими объектами.
P6	Уметь планировать и проводить эксперименты, обрабатывать данные и проводить моделирование с использованием вычислительной техники, использовать их результаты для ведения инновационной инженерной деятельности в области управления техническими объектами.
P7	Демонстрировать компетенции, связанные с инженерной деятельностью в области научно-исследовательских работ, проектирования и эксплуатации систем управления и средств автоматизации на предприятиях и организациях – потенциальных работодателях, а также готовность следовать их корпоративной культуре
Универсальные компетенции	
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации и управления техническими объектами, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам.
P10	Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду.
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

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

Институт кибернетики
Направление подготовки (специальность) «мехатроника и робототехника»
Кафедра ИКСУ

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой
_____ Лиепиньш А.В.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерская диссертация

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ЕМ41	Репин Дмитрий Николаевич

Тема работы:

Разработка алгоритмического и программного обеспечения системы управления шагающим роботом	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	782/с от 5.02.16

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <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>	1. Наименование объекта проектирования Мобильная шагающая квадропод - платформа 2. Требования к конструкции 2.1. Мобильная шагающая квадропод-платформа имеет грузовую площадку. 2.2. На платформе установлен источник питания, обеспечивающий автономную работу системы не менее 10 минут. 2.3. Вычислительное устройство обеспечивает непрерывную передачу данных по 16 вход/выходным каналам связи между роботом и ПК оператора. 2.4. Движение робота - всенаправленное.
--	---

	2.5. Алгоритм управления звеньями не должен допускать проскальзывания между поверхностями и ступнями. 2.5. В интерфейсе управления должна быть предусмотрена система защиты от ошибок оператора и обработчик ошибок.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Анализ существующих разработок. 2. Разработка конструкции несущей части робота. 3. Выбор элементной базы. 4. Построение математической модели робота. 5. Разработка программного обеспечения робота. 6. Разработать пользовательский интерфейс
Перечень графического материала	1. Сборочный чертеж 2. Деталирование
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский В. Ю.
Социальная ответственность	Пустовойтова М.И.
Раздел на иностранном языке	Бутакова Т.И.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Кинематический анализ	
Результаты работы	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гончаров В.И.	Д.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ41	Репин Дмитрий Николаевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ЕМ41	Репин Дмитрий Николаевич

Институт	ИК	Кафедра	ИКСУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Мехатроника и робототехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:
 - вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)
 - опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)
 - негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)
 - чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)

2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:
 - физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;
 - действие фактора на организм человека;
 - приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);
 - предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)

2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности
 - механические опасности (источники, средства защиты);
 - термические опасности (источники, средства защиты);
 - электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);
 - пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)

3. Охрана окружающей среды: – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий	
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Пустовойтова Марина Игоревна	Доцент, к.х.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ41	Репин Дмитрий Николаевич		

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ЕМ41	Репин Дмитрий Николаевич

Институт	ИК	Кафедра	ИКСУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Мехатроника и робототехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

Организация и планирование работ	
Расчет накопления готовности проекта	
Расчет сметы затрат на выполнение проекта	
Расчет заработной платы	
Расчет затрат на социальный налог	
Расчет затрат на электроэнергию	
Расчет амортизационных расходов	
Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных)	
Расчет общей себестоимости разработки	
Расчет прибыли	
Расчет НДС	
Цена разработки НИР	
Оценка экономической эффективности проекта	
Оценка научно-технического уровня НИР	
Организация и планирование работ	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Конотопский Владимир Юрьевич	Доцент, к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ41	Репин Дмитрий Николаевич		

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

Институт кибернетики

Направление подготовки (специальность) «мехатроника и робототехника»

Кафедра Иксу

Период выполнения _____ 2014 – 2016 уч. г

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.05.2016 г.	Основная часть	75
19.02.2016 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
13.04.2016 г.	Социальная ответственность	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гончаров В.И.	Д.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ИКСУ	Лиепиньш А.В.	К.Т.Н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 134 с., 43 рис., 24 табл., 26 источников, 29 с. прил.

Ключевые слова: шагающая мобильная платформа, квадропод, система управления, алгоритм, стабилизация, кинематика, сервопривод.

Объектом исследования является кинематика и алгоритмы позиционирования шагающей мобильной квадропод-платформы.

Цель работы – разработать алгоритмическое и программное обеспечение системы управления шагающим-мобильным роботом.

Основными методами для проведения исследования стали: эксперимент, математическое моделирование, измерение и анализ данных.

В результате исследования был предложен перечень материалов, достаточный для серийного изготовления мобильной шагающей квадропод – платформы, а также сконструирован опытный образец. Разработаны алгоритмы перемещения робота и программное обеспечение для его управления.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: по строению робот относится к классу «шагающих»; разработанные алгоритмы являются универсальными и применимы к любому роботу со схожей структурой, достаточно лишь изменить параметры описывающие габаритные размеры робота.

На данном этапе полученные алгоритмы для управления манипуляционными системами и шагающими роботами изучаются в учреждении дополнительного образования в рамках внеурочной деятельности.

В будущем планируется разработать учебный курс для студентов направлений «управление роботами» и «мехатроника и робототехника» трудоемкостью 36 часов.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

CAD – (англ. *computer-aided design/drafting*) - средства автоматизированного проектирования, в контексте указанной классификации термин обозначает средства САПР, предназначенные для автоматизации двумерного и/или трехмерного геометрического проектирования.

CAM (англ. *computer-aided manufacturing*) — средства технологической подготовки производства изделий, обеспечивают автоматизацию программирования и управления оборудования с ЧПУ или ГАПС (Гибких автоматизированных производственных систем).

CAE (англ. *computer-aided engineering*) — средства автоматизации инженерных расчётов, анализа и симуляции физических процессов.

Гексапод - это платформа (устройство), использующая для перемещения шесть конечностей/ног.

Квадропод – это платформа (устройство), использующая для передвижения четыре конечности/ноги.

САПР – система автоматизированного проектирования.

ЧПУ – числовое программное управление.

Манипулятор – механизм для управления пространственным положением орудий, объектов труда и конструкционных узлов и элементов.

Интерфейс — «общая граница» между отдельными системами, через которую они взаимодействуют; совокупность средств и правил, обеспечивающих взаимодействие отдельных систем (например, человека, программного обеспечения, аппаратного обеспечения и т. п.).

Процедура – это поименованная или иным образом идентифицированная часть компьютерной программы, содержащая описание определённого набора действий. Подпрограмма может быть многократно вызвана из разных частей программы.

Оглавление

Введение.....	13
1 Анализ технических решений.....	15
2 Проектирование платформы	27
2.1. Выбор конструкции.....	27
2.2. Габаритные параметры	28
2.3 Конструктивные особенности.....	28
2.4 Аппаратное обеспечение	30
2.5 Уровень CAD моделирования.....	33
2.6 Уровень САМ моделирования	34
2.7 Уровень CAE моделирования	35
2.7.1 Кинематический анализ.....	35
2.7.2 Решение обратной задачи кинематики геометрическими методами.	43
2.7.3 Модель SimMechanics	47
3 Программное и алгоритмическое обеспечение	49
3.1 Разработка алгоритмов	49
3.2 Математическое моделирование	55
3.3 Программное обеспечение для взаимодействия с пользователем.....	57
4 Социальная ответственность.....	62
4.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов.....	62
4.2 Техника безопасности.....	63
4.3 Производственная санитария	65
4.3.1 Микроклимат	65
4.3.2 Шум	66
4.3.3 Электромагнитные излучения.....	67
4.3.4 Освещение.....	68
4.3.5 Статическое электричество	69
4.4 Пожарная безопасность	70
4.4.1 Пожарная профилактика.....	70
4.4.2 Оценка пожарной безопасности помещения	71
4.4.3 Мероприятия по устранению и предупреждению пожаров.....	71
4.4 Охрана окружающей среды.....	74
5 Техничко – экономическое обоснование работы.....	76
5.1 Организация и планирование работ	76

5.1.1 Продолжительность этапов работ.....	78
5.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта.....	84
5.2.2 Расчет заработной платы	86
5.2.3 Расчет затрат на социальный налог	87
5.2.4 Расчет затрат на электроэнергию.....	87
5.2.5 Расчет амортизационных расходов	88
5.2.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных).....	90
5.2.7 Расчет общей себестоимости разработки	90
5.2.8 Расчет прибыли	91
5.2.9 Расчет НДС	91
5.2.10 Цена разработки НИР	92
5.3 Оценка экономической эффективности проекта.....	92
5.3.1 Оценка научно-технического уровня НИР	92
Заключение	98
Список публикаций.....	99
Список использованных источников	102
Приложение (А).....	105
2 THE DESIGN OF THE ROBOT	106
2.1 Introduction	106
2.2 Robot dimensions.....	108
2.3 Robot design features	109
2.4 Computer-aided design (CAD) model	111
2.6 Solution of inverse kinematic problem	120
Приложение Б.....	125

Введение

Двадцатый век запомнился нам как век великих открытий в области науки и техники. Использование передовых достижений в этих областях позволило повысить эффективность и качество производственных процессов. С точки зрения истории, техническая революция может рассматриваться как последовательность ярко выраженных этапов развития. Первый этап этого процесса можно было бы охарактеризовать словом "механизация"; ключевым фактором на этом этапе было использование механизмов и машин. С технической точки зрения, автоматизация может рассматриваться как последний этап промышленной революции. На этом этапе помимо станкостроения бурно развивается робототехника во всех сферах человеческой деятельности.

Особое место роботы заняли в промышленности. Благодаря появлению промышленных роботов многие производственные операции стали производиться в автоматическом режиме при этом сократилось время технологического цикла. Помимо автоматизированных конвейеров, важную роль в промышленности играют манипуляционные механизмы. Они занимают до 40% доли всех роботов в промышленности. Хотя робот и заменяет человека в таких видах деятельности как: сварка, сверление, покраска и т.д. все же он нуждается в постоянном обслуживании и регулировке. Так же со временем подобные роботы требуют замены. Для того чтобы данный процесс оставался неизменным необходимо готовить высококлассных специалистов не только в робототехнике в целом, но и в области манипуляционных систем в частности.

На сегодняшний день в России более 15 высших учебных заведений выпускают бакалавров и магистров в области робототехники. Так, в Томске, на май 2016 г., подготовка по направлению «робототехника» ведется в 2 ВУЗах. Дисциплины данного направления изучают и в учреждениях среднего образования. Только в Томске на сегодняшний день охват школьников в возрасте от 10 до 18 лет составляет 8 тысяч человек. Для выявления технически

одаренных людей требуется большая материальная база, но зачастую она дорога и не имеет образовательной программы. Данная проблема является острой и взята под контроль правительством РФ. На сегодняшний день, решением является компьютерное моделирование, но оно не является эффективным и не всегда модель адекватно способна отражать поведение реального объекта. Представленный в работе робот в первую очередь является манипуляционной системой, которая подойдет для изучения кинематики и шагающих механизмов.

Вторым направлением в решении проблемы подготовки высококлассных специалистов является отсутствие интересных задач. Для запуска процесса развития необходимо ставить сложные, требующие высокого уровня изучения задачи. Одной из таких задач является управление шагающей машиной. Решение требует рассмотрения вопросов кинематики, объектно-ориентированного и процедурного подхода к программированию и др.

Разработка алгоритмов движения, как части робота – манипулятора, так и шагающей системы целиком, а также созданное программное обеспечение и дидактический материал позволят отчасти решить проблемы, связанные с недостаточным обеспечением курсов для подготовки специалистов в области робототехники.

1 Анализ технических решений

Разработанная платформа может быть представлена как манипуляционная система, состоящая из основания и четырёх манипуляторов, имеющих три степени подвижности.

Манипулятор – механизм для управления пространственным положением орудий, объектов труда и конструктивных узлов и элементов [2]. Данный термин появился в середине XX века, благодаря применению сложных механизмов для манипулирования опасными объектами в атомной промышленности. В своей основе манипуляторы представляют собой пространственный механизм с несколькими степенями подвижности, они выполняют вспомогательные работы во многих отраслях промышленности и различных сферах человеческой деятельности. Манипуляторы изучаются в курсе - «теория манипуляторов», которая является подразделом теории машин и механизмов. В узком смысле, манипулятор можно представить как механическую руку. [2]

С повышением уровня развития науки и техники появились механизмы с параллельной кинематикой, такие как трипод, квадропод, гексапод и другие. В общей классификации такие объекты называют шагоходы, или шагающие машины — разнообразные машины, передвигающиеся с помощью ног шагающим ходом. Ввиду конструктивной сложности исполнения они пока не получили большого распространения в реальной жизни.

В сравнении с колёсной и гусеничной техникой, шагоходам свойственна повышенная проходимость по пересеченной местности. Такие механизмы обеспечивают улучшение кратковременной повторяемости позиционирования, снижение влияние инерционных сил. В основу таких механизмов легло строение паукообразных насекомых. Главная проблема в создании шагоходов это соотношение цены и эффективности (в том числе маршевой скорости движения), а также отсутствие достаточно энергоёмких и при этом компактных источников

энергии и быстродействующих приводов для ходовых ног. Однако на данное время в мире уже ведутся разработки по созданию полноценных шагающих машин.[8]

До появления теории манипуляторов копирование природных объектов, как правило, не позволяло создать работоспособные конструкции, которые можно было бы использовать в практике. Одним из первых, созданных в мире «шагающих аппаратов», стал, созданный в Институте механики МГУ в 70-е годы прошлого века, «шестиног». Данный аппарат получил весьма привлекательное название «МаШа», что является сокращением от «машина шестиногая». Внешний вид робота «Маша» представлен на рисунке 1.

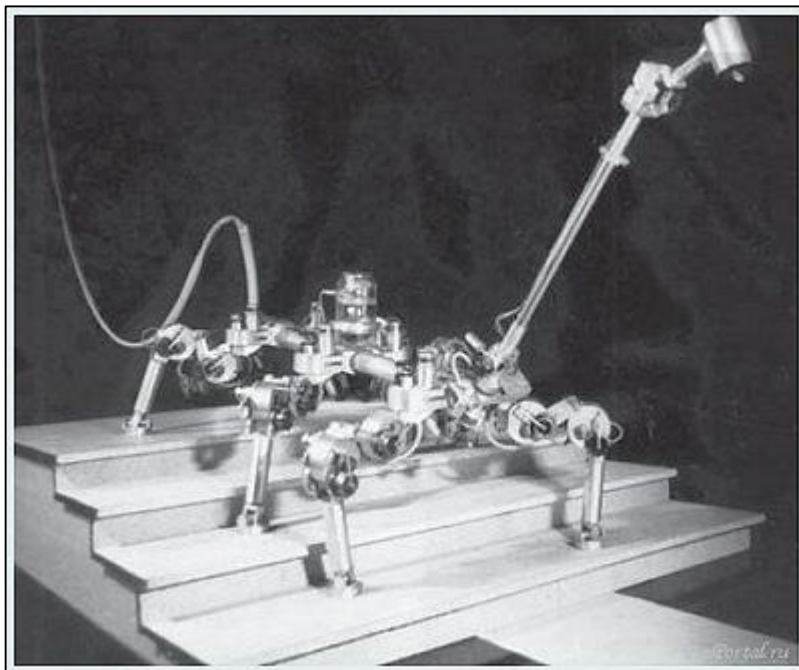


Рисунок 1 - Робот шестиног «МаШа» МГУ 1969 г.

Прообразом робота стал рыжий таракан вида «пруссак». Изучение походки таракана осуществлялось по видеозаписи. Таракана помещали в стеклянную трубку, которую устанавливали под наклоном и при помощи струи воздуха управляли направлением движения таракана. Эксперимент фиксировался на пленочную видео камеру. Затем производилась покадровая обработка изображений. Таким образом, было определено, что основным видом

походки таракана является походка три-три. Таракан всегда опирается на три лапы, которые образуют между собой опорный треугольник, внутри которого располагается центр тяжести тела. Такая походка значительно облегчает проблему устойчивости, так как опора робота на три ноги оказывается устойчивой.

Все конечности робота «MaШа» имеют три степени свободы и приводится в движение с помощью трех двигателей постоянного тока через редукторы. Конечности оснащены позиционными датчиками, которые измеряют углы поворота звеньев ноги по отношению друг к другу. Система управления роботом построена по принципу иерархии. Данная система создает управляющее воздействие, которое обеспечивает движение аппарата с автоматической приспособляемостью к небольшим неровностям поверхности по командам оператора робота (или верхнего уровня), который задает основные характеристики движения корпуса и ходьбы аппарата (например, ходьба назад, вбок, вперед, разворот на месте и т.п.).

Следом за появлением «MaШи» началась гонка технологий между США и СССР. В ответ на «MaШу» США предложили свою версию шагающего шестиногого робота. Менее чем через 10 лет в Европе также стали появляться «шагающие машины», но в течении этого времени MaШа оставался роботом, который определил свое время.

В 1985 г. Япония смогла отобрать у СССР первенство. Японские разработки TITAN III и TITAN IV, принадлежащие Токийскому технологическому институту (Tokyo Institute of Technology) – являются первыми среди шагающих механизмов, которые были оснащены искусственным интеллектом. Он позволял им преодолевать несложные препятствия. TITAN IV в 1985 г. в Government Pavilion of the Science Exhibition at Tsukuba за пол года суммарно преодолел 40 километров по поверхности разделенной на 3 уровня сложности. Вес данного робота составлял 160 килограмм, при этом длина одной конечности (всего их было шесть) составляла около 1,2 м. Несмотря на свои

внушительные размеры, робот развивал скорость 40 см/с. TITAN IV стал прообразом для множества шагающих роботов того времени.

С появления TITAN IV шагающие роботы стали разрабатываться для практического применения, например для исследования рельефов далеких планет, движения по пересеченной местности и т.д. В эти же годы в робототехнической лаборатории Port Harbour разрабатывался Research Aquarobot на протяжении четырех лет (1985-1989), который применялся для исследования морских глубин. [8]

Если шагающие механизмы рассматривать не только с позиции «платформа плюс конечности», то можно найти их множество применений, например в медицине. В 1948 г. Н.А. Берштейн – русский профессор изобразил человека с протезами, которые повторяли скелет ноги, оснащенной электроприводами. Данную идею поддержала НИИ Протезии, но трудности послевоенного времени не дали возможности ее развить. Уже в 60-е годы General Electric (Япония) представила полноценный экзоскелет.

В классе шагающих роботов также богатую историю имеют двуногие шагающие машины. В 1972 г. в институте механики МГУ была разработана модель робота, получившая название «Ришка». Модель имела 2 «ноги» и 2 колеса поддержки. Главной задачей было создание человекоподобного робота. Но уровень техники не позволял реализовать достаточно быструю систему стабилизации для организации «устойчивой» походки.[8]

В 1976-82 гг. в Институте механики МГУ проводилось исследование механико-математической модели двуногого робота, который представлял плоский пятизвенный механизм, состоящий из корпуса и двух ног. Походка аппарата, так же как и походка человека, представляла собой последовательность чередующихся фаз одноопорной и двухопорной. В одноопорной фазе аппарат опирается на одну ногу (опорную), другая нога при этом переносится. В двухопорной фазе он опирается на обе ноги. Одноопорное движение считается баллистическим (пассивным), т.е. это движение происходит по инерции. На

аппарат действуют только сила тяжести, и, разумеется, силы реакции опоры. А вот приложение каких-либо активных воздействий (моментов сил) в шарнирах («суставах») механизма происходит в двухопорной фазе. При ходьбе человека фаза двойной опоры занимает примерно 20% времени всего шагового цикла, в рассмотренной же модели робота двухопорная фаза считается мгновенной.

В 1990-х годах были сконструированы два макета двуногого шагающего робота: один с двумя телескопическими ногами, другой – антропоморфный, и разработаны алгоритмы управления ими на основе предложенного метода баллистического управления ходьбой [3].

В 1964 г. в Ленинграде была разработана модель двуногой машины Чебышева. Уже в 1969 г. Иширо Като (Япония) показал миру антропоморфный двуногий механизм WAP на основании разработанной в СССР модели. В этом же году компания представила разработку WAP-1. Интересным в данной разработке было то, что мышцы были сделаны из резины или каучука и устройство приводилось в движение с помощью пневматики за счет воздействия на "искусственные мускулы". Эта новаторская идея, которая совмещала в себе и простоту, и гениальность. Иширо Като работал при поддержке специальной исследовательской лаборатории гуманоидов (Humanoid Research Laboratory) при Waseda University (Токио). Интересен сам факт существования таковой в конце 60-х гг., не лучших годах для Японии. И нужно сказать, результат очевиден, поскольку за Иширо Като стоит большая часть истории современных двуногих машин.

Уже в 1970 г. появилась усовершенствованная модель WAP-2. В ней были разработаны специальные управляемые приводы, при этом под подошвы робота встраивались специальные датчики давления, что позволяло осуществить автоматический контроль положения. Встроенные датчики унаследовали в дальнейшем и паукообразные роботы.

В 1971 г. состоялось сразу две премьеры, а именно - WAP-3 и WL-1. Обе они равноценны по значимости в истории шагающих механизмов. WAP-3 - это

продолжение модели WAP-2, но, в отличие от предшественника, он имел спереди центр тяжести, что позволяло наклоняться и перемещаться не только по ровной поверхности, но и спускаться/подниматься, например, по лестнице. Таким образом, это был первый в мире робот, способный перемещаться не только по горизонтальной плоскости. WL-1 - это модель, управляемая мини-компьютером. Она так же, как и WAP-3, имела центр тяжести, расположенный спереди, но при этом могла менять направления ходьбы, что стало возможным за счет внедрения мини-компьютера.[8]

В 1973 г. в Японии (Иширо Като) стартовал проект WABOT-1, целью которого было создание полностью функционирующего антропоморфного робота. Помимо систем контроля управления, в WABOT-1 были встроены видео- и звуковая системы, которые позволяли оценивать расстояние до объектов и направление к ним. Таким образом, это одна из первых роботов-машин, которая имела "глаза" и "уши". Ко всему прочему WABOT-1 имел внешние рецепторы и звуковоспроизводящую систему (умел говорить). То есть, первый андроид был создан в 1973 г.

В 1980 г. Иширо Като разработал WL-9DR, управляемый с помощью 16-разрядного мини-компьютера. При этом если в предыдущих моделях "обдумывание" механизмом каждого шага составляло более чем 45 секунд, то в варианте WL-9DR на один шаг тратилось всего десять секунд.

В 1983 г. появилась модель WL-10, которая на "обдумывание" шага тратила около четырех с половиной секунд. В модели WL-10R применялись новые типы серво-механизмов и материалов. Была значительно добавлена степень свободы у членов робота. WL-10R мог свободно поворачиваться, ходить вперед и назад. Стали насущны еще одни параметры для шагающих механизмов, а именно - степени свободы.

В 1984 г. команда ученых токийского университета создает двуногого робота с восемью степенями свободы. При этом данный робот уже имел автономное питание от источника постоянного тока.

В 1985 г. Иширо Като создает WL-10RD. Теперь робот затрачивает от 2 до 5 секунд на каждый шаг. При совместной работе с HitachiLtd. модель WL-10R находит свое продолжение и в другом варианте - WHL-11 (WasedaHitachi Leg-11). В WHL-11 был добавлен компьютер и гидравлический привод.

Но вернемся к шагающим четвероногим и шестиногим роботам. Патентный поиск дает более десяти моделей шагающих роботов, имеющих более двух ног, при этом каждый из роботов имеет свои уникальные особенности и предназначение. Например, лесная машина фирмы «Табержек», робот лаборатории транспортных систем АН СССР, шагающая машина ASV (США), предназначенные для перемещения по пересечённой местности, мобильный робот Ambler (США), спроектированный по заказу NASA; шагающий робот MECANT, разработанный в Хельсинкском технологическом университете; Plustech – финская машина, предназначенная для лесного хозяйства. (рисунок 2)

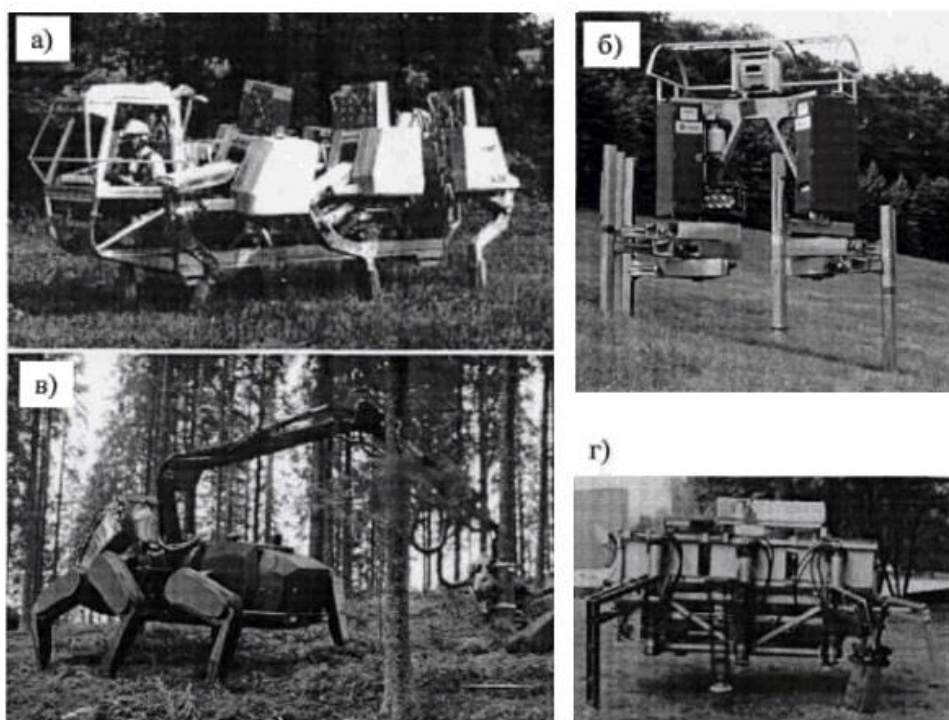


Рисунок 2 - а) ASV; б) Ambler; в) Plustech; г) Mecant

В 1995 г. в Японии разработан четырехлапый робот Aranho Robot. Каждая лапа представляет трехзвенный механизм на концах которого располагались

диски с множеством металлических зацепов. Робот выполнял движения вверх, вниз, влево, вправо вдоль отвесной стены без отрицательного наклона и имеющей неровную структуру. Внешний вид представлен на рисунке 3.

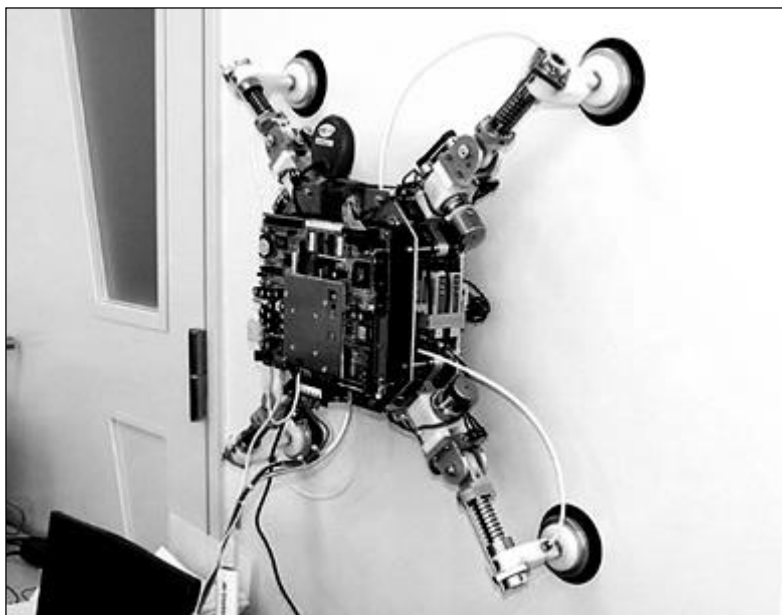


Рисунок 3 - Внешний вид Aranho Robot

В 2000 г. американский исследователь Джош Бонград представил миру квадропод – «морская звезда». Конечность робота так же имела трехзвенную структуру, но при этом робот имел возможность изменять алгоритмы перемещения при изменении количества ног/лучей. Известно что морские звезды способны отращивать части тела, так и робот менял походку в зависимости от того сколько конечностей подключены. Подобные алгоритмы будут полезны в будущем для создания шагающих боевых машин, которые при потере до половины конечностей смогут продолжать движение. Например, гексапод при потере двух конечностей становится квадроподом. Робот морская звезда представлен на рисунке 4.[1]



Рисунок 4 - Робот «морская звезда»

В 2011 г. технологический университет города Осака (Япония) представил разработку шагающего робота Asterisk. Робот имеет шесть конечностей, но особенность в том, что две из них могут использоваться как захват для переноса объектов, при этом робот становится квадроподом. Еще одна особенность в том, что в конструкции ног используются колесные диски, позволяющие быстро двигаться по поверхностям с отрицательным наклоном, и крючки для перемещения по сетчатому потолку. Общий вид робота представлен на рисунке 5.[1]

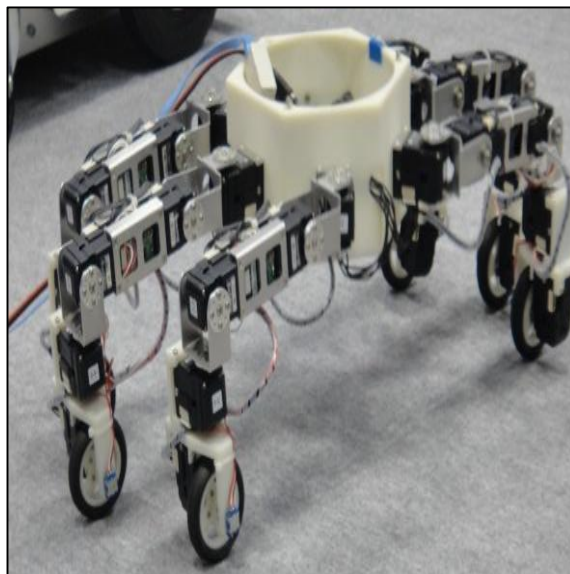


Рисунок 5 - Робот Asterisk

В 2011 г. норвежский ученый Карл Халворсен на научной конференции представил робота MorphNEH. Робот способен изменять геометрию. Корпус робота покрыт чешуйками, которые в сложенном состоянии придают ему форму шара. Робот использует такую форму для осуществления качения. Каждая конечность состоит из четырех звеньев. Всего в состав робота входят 30 серво двигателей.[1]

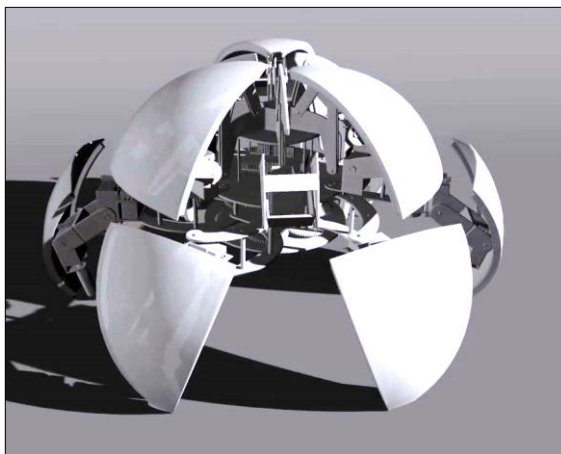


Рисунок 6 - Робот MorphNEH

В 2014 г. на рынке появился робот PhantomX с четырьмя конечностями. Отличительной особенностью робота является высокая скорость передвижения и высокая энергоэффективность. Эти параметры достигаются за счет наличия пружин между звеньями. После отрыва конечности подача тока на конечность прекращается на несколько миллисекунд, дальнейшее движение робот осуществляет за счет пружин.



Рисунок 7 - робот PhantomX

В 2014 г. в Корее в университете KIOST (Korean Institute of Ocean Science and Technology) был разработан и представлен робот Crabster CR200 задача которого – исследовать прибрежные воды глубиной до 200 метров. В воде такой краб перемещается с помощью винтов, а как только достигает дна, в дело вступают шесть пар ног. За счет уникальных использованных технических решений робот Crabster CR200 способен эффективно действовать в условиях быстрых подводных течений, скорость которых может превышать 1.5 метра в секунду, чего достаточно даже для того, чтобы сорвать маску с аквалангиста.[1]



Рисунок 8 - Робот Crabster CR200

В 2005 г. в США был создан четырехногий робот «БигДог» (Большая собака) (рисунок 9).



Рисунок 9 - робот BigDog

Этот робот может ходить, бегать и прыгать, преодолевать пересеченную местность, он прекрасно перемещается и по снегу, и по камням, и по грязи. За счет хорошо организованной системы управления он очень устойчив: если его толкнуть, то он, подобно человеку или животному, переставит ноги и не упадет. Энергию роботу дает бензиновый мотор, приводящий в действие гидравлическую систему. Ноги робота в точности скопированы с конечностей животных. В их конструкцию включены амортизаторы, гасящие энергию удара. Робот снабжен бортовым компьютером, управляющим передвижением в соответствии с окружающей обстановкой. Многочисленные датчики позволяют оператору робота отслеживать его местоположение, расположение своих и вражеских сил, контролировать состояние бортовых систем робота.

На сегодняшний день, в области теории движения и управления шагающими платформами Россия занимает одно из ведущих мест в мире. Данную задачу рассматривают такие авторы как: В.А. Лопата, И.М. Макаров, А.С. Ющенко, А.В. Тимофеев, В.Е. Павловский и др. [2]

Вопросы механики манипуляционных систем детально рассмотрены в работах учёных института машиностроения РАН, института механики МГУ, где разработана теория построения шагающих машин и показано что задачи обеспечения статической устойчивости, стабилизации и управление движением могут быть успешно решены.

2 Проектирование платформы

2.1. Выбор конструкции

В настоящее время существует не одна конструкция шагающих роботов. Выбор конфигурации платформы определит совокупность свойств изделия, влияющих на оптимизацию затрат ресурсов при производстве и эксплуатации, динамические характеристики платформы и т.д.

Рассмотрим два варианта конструкции: гексапод – платформа, оснащённая шестью конечностями и квадропод – платформа, оснащённая четырьмя конечностями [2]. В качестве критериев оценки примем такие показатели как: технологичность конструкции изделия; масса габаритные характеристики; динамические характеристики; надёжность. Рассматриваемые, показатели приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка конструкций шагающих платформ

Критерий	Гексапод	Квадропод
Материалоёмкость	-	+
Трудоёмкость	-	+
Требования к источнику питания	-	+
Масса	-	+
Скорость	-	+
Инертность	-	+
Управление	+	-
Точность	+	+

В результате проведённого анализа была выбрана конструкция «квадропод».

2.2. Габаритные параметры

Габаритные характеристики являются наиболее значимыми при выборе двигателей конструкции, так как данные характеристики определяют требуемые моменты, некоторые динамические свойства системы и т.д.

В качестве материала для изготовления крепёжных деталей и конструкции рассматривались: нержавеющая сталь (20ХН2МА) и алюминий. Наиболее важные характеристики материалов приведены в таблице 2. [3]

Таблица 2 – Выбор материала корпусных деталей

Характеристика	Нержавеющая сталь	Алюминий
Плотность	$7,86 \text{ г / см}^3$	$2,69 \text{ г / см}^3$
Твёрдость	57 HRC	32 HRC
Упругость	$1,2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$	$0,69 \cdot 10^5 \text{ МПа}$

Представленных характеристик достаточно для определения требуемого материала. Исходя из условий меньшей массы, не смотря на то, что модуль упругости нержавеющей стали выше, был выбран алюминий, так как коэффициенты упругости соизмеримы.

2.3 Конструктивные особенности

Для обеспечения охвата требуемой рабочей зоны необходимо обеспечить вращательные движения в двух плоскостях. Данное требование обусловлено тем, что для шагающего робота в процессе выноса ног осуществляется контроль высоты положения стопы над поверхностью, в противном случае при движении будет возникать эффект «проскальзывания».

Для подъема стоп используется ортогональное соединение сервоприводов, что значительно усложняет конструкцию. Для решения данной

задачи в конструкцию были введены универсальные соединительные кронштейны (рисунок 10), которые позволяют задать любой угол поворота осей вращения сервоприводов относительно друг друга.

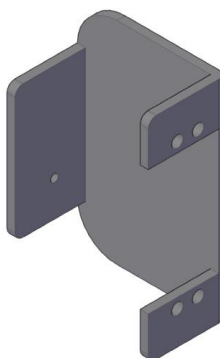


Рисунок 10 - Универсальный соединительный кронштейн

Центральная площадка является физическим ограничителем углов поворота конечности робота, поэтому выбор формы напрямую влияет на характеристики рабочей зоны конечности. Для увеличения разрешённого угла поворота плечевого сервопривода до стандартных 180 градусов, за основу формы площадки была выбрана четырёхконечная звезда. Такая форма (рисунок 11) позволяет осуществлять поворот конечности и не производить соударения конечности о корпус.

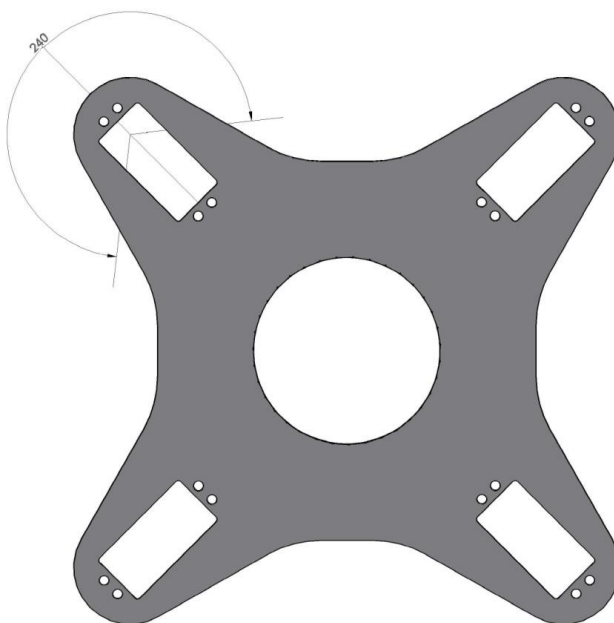


Рисунок 11 - Центральная площадка платформы

2.4 Аппаратное обеспечение

В широком смысле, система управления это систематизированный (строго определённый) набор средств сбора сведений о подконтрольном объекте и средств воздействия на его поведение, предназначенный для достижения определённых целей. В техническом плане выделяется понятие «структура управления» - устройство или набор устройств для манипулирования поведением других устройств или систем [8].

Для построения системы управления необходимо выбрать перечень устройств обеспечивающих предъявляемые к системе требования.

С целью обеспечения наибольшего показателя ресурсоэффективности, и сокращения времени производства управляющего блока, в качестве управляющего модуля была выбрана плата Arduino Mega. Преимущество состоит в том, что плата конструктивно содержит периферийные устройства для осуществления связи и управления различными электронными устройствами. Общий вид платы представлен на рисунке 12.

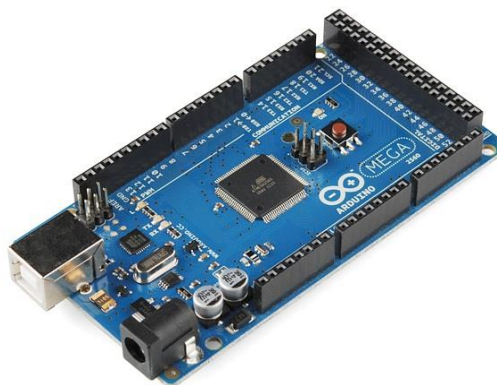


Рисунок 12 - Плата Arduino Mega

Arduino Mega построена на микроконтроллере ATmega1280. Платформа содержит 54 цифровых входа/выходов (14 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 16 аналоговых входов, 4 последовательных порта UART, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и

кнопку перезагрузки. Arduino Mega совместима со всеми платами расширения, разработанными для платформ Duemilanove или Diecimila. Краткие технические характеристики представлены в таблице 7 [9].

Таблица 3 - Основные характеристики Arduino Mega

Микроконтроллер	ATmega1280
Рабочее напряжение	5В
Входное напряжение (предельное)	6-20 В
Цифровые Входы/Выходы	54 (14 ШИМ)
Аналоговые входы	16
Постоянный ток через вход/выход	40 mA
Флеш-память	128 KB
ОЗУ	8 KB
Тактовая частота	16 MHz

Каждый из 54 цифровых выводов Mega, может настраиваться как вход или выход. Выводы работают при напряжении 5 В. Каждый вывод имеет нагрузочный резистор (стандартно отключен) 20-50 кОм и может пропускать до 40 мА.

На платформе Arduino Mega установлено несколько устройств для осуществления связи с компьютером, другими устройствами Arduino или микроконтроллерами. ATmega1280 поддерживает 4 порта последовательной передачи данных UART для TTL. Установленная на плате микросхема FTDI FT232RL направляет один из интерфейсов через USB, а драйверы FTDI предоставляют виртуальный COM порт программе на компьютере.

В плату встроена перезагружаемая плавкая вставка, защищающая порт USB компьютера от токов короткого замыкания и сверхтоков. Хотя практически все компьютеры имеют подобную защиту, тем не менее, данный предохранитель

обеспечивает дополнительный барьер. Предохранитель автоматически прерывает обмен данными при прохождении тока более 500 мА через USB порт.

В квадропод-платформе в качестве манипуляционной системы выступает конечность робота, приводимая в движение при помощи привода. Требования к приводу были определены на этапе САЕ моделирования (пункт 2.4.2). На основании полученных данных был выбран сервопривод Corona DS339HV, общий вид которого показан на рисунке 13.



Рисунок 13 - Сервопривод Corona DS339HV

При прочих равных условиях цифровой сервопривод Corona оснащён металлическим редуктором, что значительно увеличивает его надёжность и продолжительность эксплуатации. Основные характеристики привода приведены в таблице 8 [10].

Таблица 4 – Основные характеристики сервопривода Corona

Напряжение питания	6.0 - 7.4 v
Ток потребления	320 - 420 мА
Скорость	0.14 - 0.13 с/60°
Усилие	4.5 - 5.1 кг/см
Вес	32 г
Подшипник	MR106
Потенциометр	5-ползунковый, прямой привод
Рабочая температура	от -20 до 60 °С

2.5 Уровень CAD моделирования

В работе на уровне CAD применены графические пакеты компании Autodesk: Inventor и AutoCAD – в совокупности представляющие систему, предназначенную для создания цифровых прототипов промышленных изделий. Инструменты системы обеспечивают полный цикл проектирования и создания конструкторской документации. [4]

Исходя из конструктивных особенностей, в среде AutoCAD был выполнен сборочный чертёж конструкции платформы. Спецификация и сборочные единицы представлены в приложении А. Изометрическая проекция платформы представлена на рисунке 14.

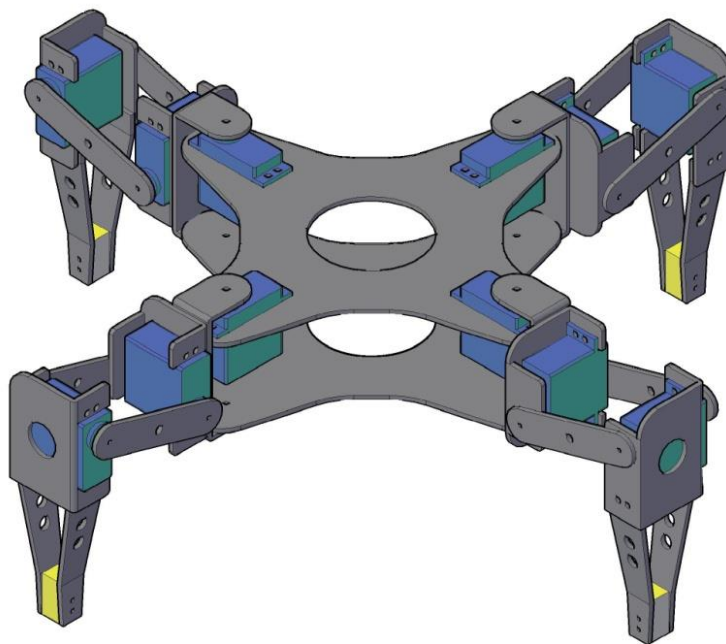


Рисунок 14 - Изометрическая проекция платформы

В среде Inventor в автоматическом режиме был произведён расчёт массы корпусных деталей. В качестве плотности материала было выбрано значение $2,69 \text{ г} / \text{см}^3$ для алюминия. Общая масса корпусных деталей составила 380 грамм.

Так же CAD среда Inventor позволяет осуществлять развёртки объёмных тел на плоскость. Развёртки необходимы для осуществления производства корпусных деталей платформы путём фрезерования. Пример развёртки представлен на рисунке 15.

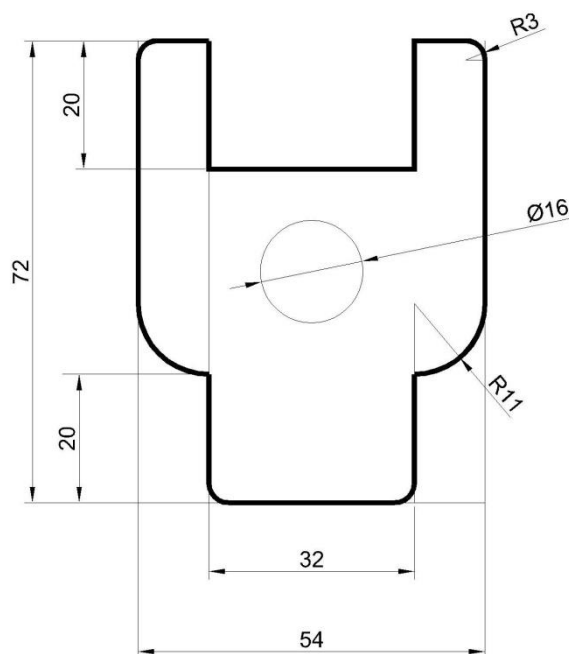


Рисунок 15 - Развёртка кронштейна

2.6 Уровень САМ моделирования

САМ средства обеспечивают автоматизацию программирования и управления оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) или гибких автоматизированных производственных систем (ГАПС) [6].

Для изготовления деталей был использован фрезерный станок с ЧПУ BF20 Vario, представленный на рисунке 16.



Рисунок 16 - Фрезерный станок с ЧПУ BF20 Vario

Данный станок имеет подвижный стол, с возможностью перемещаться в декартовых осях координат. В качестве управляющей программы станок использует пакет ADEM 9.0. CAM модуль системы ADEM позволяет программировать станки: фрезерные, токарные, лазерные, координатно-пробивные, электроэрозионные, гравировальные фрезерные и постоянно расширяет свою функциональность, направленную на поддержку каждого из направлений механообработки [6]. Программа CAM модуля представляет собой набор кадров, каждый из которых несёт операнд и параметр, задающий координаты на декартовы оси, с шагом 0.01 мм. Такая точность изготовления корпусных деталей позволила снизить трение в узлах конечностей робота, что привело к снижению требований предъявляемых к двигателям.

2.7 Уровень CAE моделирования

2.7.1 Кинематический анализ

Введём ряд обозначений: $A_1...A_4$ - группа шарниров горизонтального поворота конечности (плечевой сустав) $B_1...B_4$ и $C_1...C_4$ - группы шарниров вертикального поворота звеньев конечности; $h_1...h_4$ - расстояния от центра масс

(M) робот до шарниров группы A ; $soxa_1...soxa_4$ - длинна сочленения шарниров групп A и B ; $femur_1...femur_4$ - длинна сочленения шарниров групп B и C ; $tibia_1...tibia_4$ - длинна конечного звена ноги робота; $P_1...P_4$ – стопы (рисунок 17).

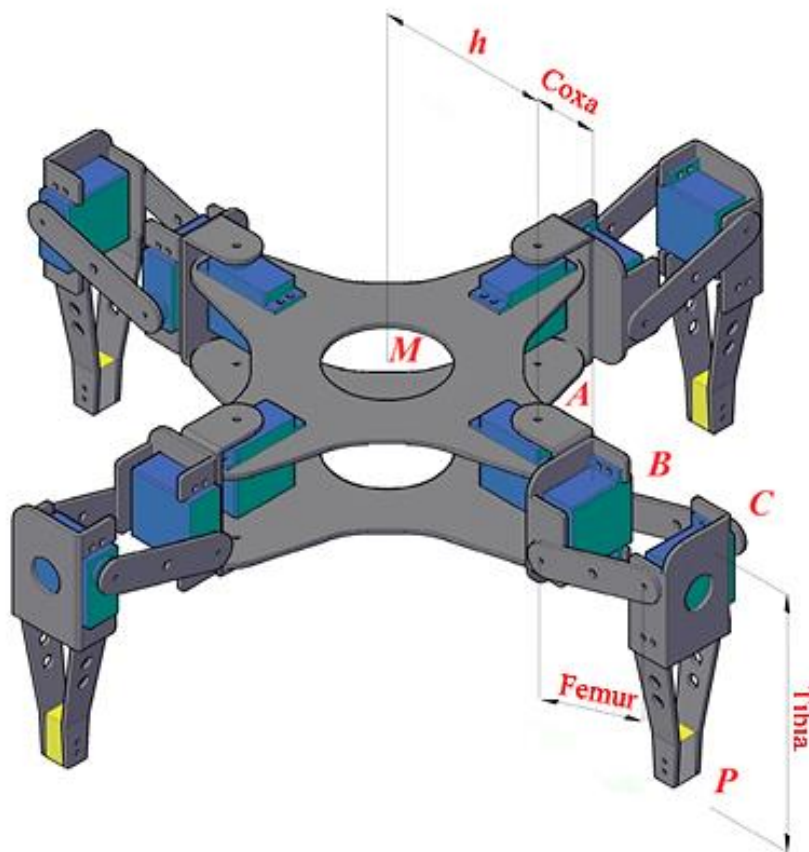


Рисунок 17 - Обозначения звеньев механизма

Для проверки кинематических характеристик механизма проведём кинематический анализ – аналитический и графический процесс расчёта, в результате которого определяются положения каждого звена механизма, перемещения точек звеньев и углы их поворота [7]. Данная процедура необходима для установления закона движения определяющего траекторию перемещения звеньев в рабочей зоне.

Рассмотрим решение прямой и обратной задач кинематики. Прямая задача кинематики – это вычисление положений (x_p, y_p, z_p) , конечного звена

механизма по его кинематической схеме и значениям обобщённых координат (углы $q_1, q_2 \dots q_n$), где n – число степеней свободы механизма. Обратная задача кинематики – это вычисление обобщённых координат ($q_1, q_2 \dots q_n$), по заданному положению (x_p, y_p, z_p) конечного звена механизма при известной кинематической схеме [7].

Для решения прямой задачи кинематики представим механизм в виде пространственной кинематической схемы. В силу симметричности механизма рассмотрим только одну конечность робота (рисунок 18).

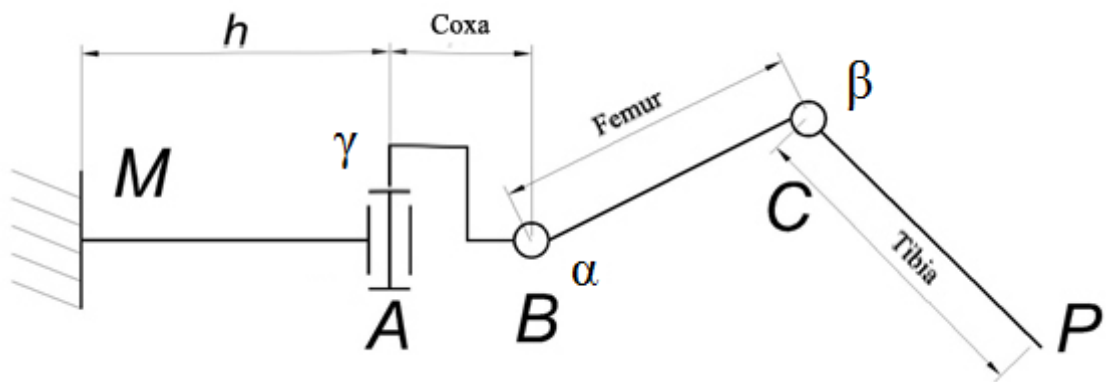


Рисунок 18 - Кинематическая схема конечности робота

Произведём расчёты методом Денавита-Хартенберга, для этого пользуясь правилами, расставим оси в сочленениях механизма:

- 1) ось z_n – вдоль сочленения звеньев n и $n+1$;
- 2) ось x_n направляется вдоль общего перпендикуляра к осям z_n и z_{n-1} ;
- 3) ось y_n дополняет системы до правой тройки [7].

На рисунке 19 представлена расстановка осей в соответствии с правилами Денавита-Хартенберга. Для расположения абсолютных осей координат был выбран шарнир А. Выбор обусловлен тем, что точка М физически не является подвижным звеном робота, и была представлена в виде жесткой заделки.

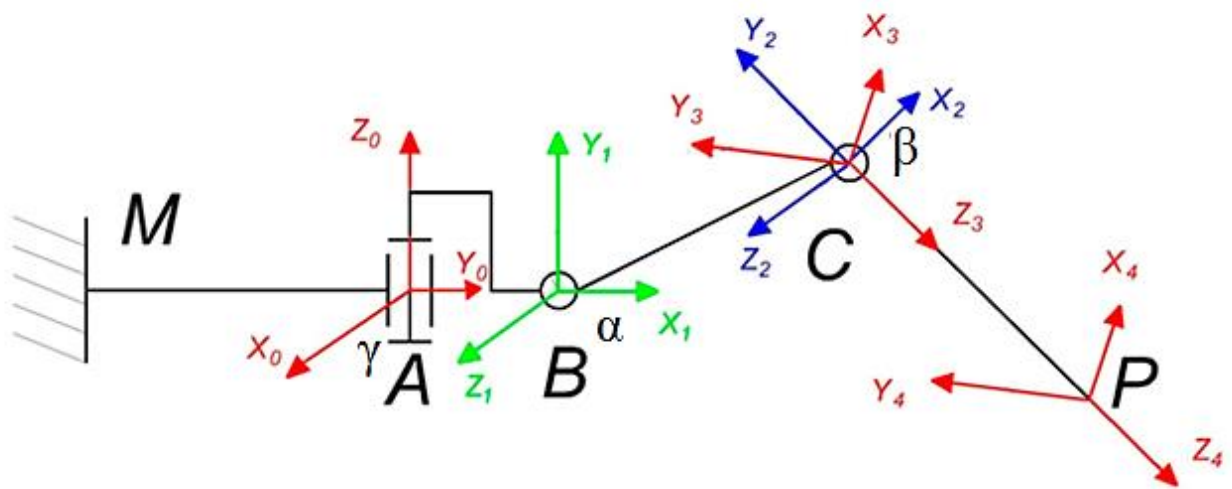


Рисунок 19 - Расстановка осей по правилу Денавита-Хартенберга

Способ расстановки связанных систем координат по правилу Денавита-Хартенберга, гарантирует переход от любой $n-1$ системы к n -ой системе применяя четыре последовательных преобразования:

- 1) поворот системы $n-1$ вокруг оси z_{n-1} на угол θ_n до установления параллельности осей x_n и x_{n-1} ;
- 2) переносом вдоль оси z_{n-1} на расстояние S_n до совпадения на одной прямой осей x_n и x_{n-1} ;
- 3) переносом вдоль оси x_n на расстояние a_n до совмещения систем координат n и $n-1$;
- 4) поворотом вокруг оси x_n на угол α_n до совпадения всех осей.

Приведённые выше правила определяют размерность матрицы преобразования T_n равную $(4 \cdot 4)$. Матрица перехода имеет общий вид:

$$T_n = \begin{pmatrix} \cos(\theta_n) & -\sin(\theta_n) \cdot \cos(\alpha_n) & \sin(\theta_n) \cdot \sin(\alpha_n) & a_n \cdot \cos(\theta_n) \\ \sin(\theta_n) & \cos(\theta_n) \cdot \cos(\alpha_n) & -\cos(\theta_n) \cdot \sin(\alpha_n) & a_n \cdot \sin(\theta_n) \\ 0 & \sin(\alpha_n) & \cos(\alpha_n) & S_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Для представленных на рисунке 19 преобразований найдём коэффициенты матриц перехода. Таких матриц будет три, так как

осуществляется три преобразования. Найденные коэффициенты представим в виде таблицы 3.

Таблица 5 – Коэффициенты матриц перехода

	θ_n	S_n	a_n	α_n
T_1	$\frac{\pi}{2} + \gamma$	0	<i>coxa</i>	$\frac{\pi}{2}$
T_2	α	0	<i>femur</i>	0
T_3	$\frac{\pi}{2} + \beta$	0	0	$\frac{\pi}{2}$
T_4	0	<i>tibia</i>	0	0

С учётом найденных коэффициентов матрицы T_1, T_2, T_3, T_4 примет вид:

$$T_1 = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma) & 0 & \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma) & coxa \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma) \\ \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma) & 0 & -\cos(\frac{\pi}{2} + \gamma) & coxa \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$T_2 = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & femur \cdot \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & coxa \cdot \sin(\alpha) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$T_3 = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\pi}{2} + \beta) & 0 & \sin(\frac{\pi}{2} + \beta) & 0 \\ \sin(\frac{\pi}{2} + \beta) & 0 & -\cos(\frac{\pi}{2} + \beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$T_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & tibia \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Для нахождения искомого вектора положения последовательно перемножим матрицы перехода. Конечный результат содержится в последнем столбце матрицы. Тогда выражения для нахождения координат запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} x &= coxa \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) + tibia \cdot [\cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \sin(\gamma) + \\ &+ \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \cos(\gamma)] + femur \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \cos(\alpha); \\ y &= coxa \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) + tibia \cdot [\cos\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \sin(\alpha) + \\ &+ \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \cdot \cos(\alpha)] + femur \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \cos(\alpha); \\ z &= femur \cdot \sin(\alpha) - tibia \cdot \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \cdot \cos(\alpha) - \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \cdot \sin(\alpha) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Представленные выражения являются решением прямой задачи кинематики для конечности относительно абсолютной системы координат. Данная система координат ориентирована по направлению конечности, для удобства расчётов необходимо отразить конечные координаты в системе связанной с центром масс робота. Для этого введём дополнительно матрицу поворота T_m , для этого поместим оси (x_M, y_M, z_M) в центр масс, как показано на рисунке 20.

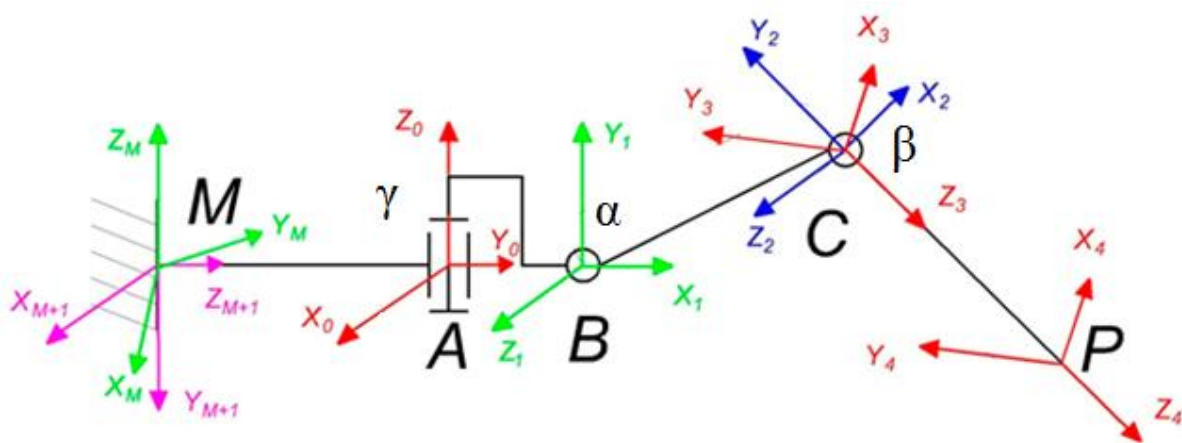


Рисунок 20 - Расстановка осей относительно центра масс

Составим матрицу перехода T_M и вспомогательную матрицу T_{M+1} , отражающую полученные координаты в системе x_0, y_0, z_0 в новых осях x_M, y_M, z_M , с учётом физического положения центра масс (45° относительно плечевого сустава). Коэффициенты матриц представлены в таблице 4.

Таблица 6 – Коэффициенты матрицы перехода

	θ_n	S_n	a_n	α_n
T_M	$-\frac{\pi}{4}$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
T_{M+1}	0	h	0	$\frac{\pi}{2}$

Тогда выражения для нахождения координат стопы робота относительно центра масс запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned}
 x = & tibia \cdot [\cos(\frac{\pi}{2} + \beta) \cdot \sin(\alpha) \cdot [\frac{\sqrt{2} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} + \frac{\sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2}] + \\
 & + \sin(\frac{\pi}{2} + \beta) \cdot \cos(\alpha) \cdot [\frac{\sqrt{2} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} + \frac{\sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2}] + \frac{\sqrt{2} \cdot h}{2} + \\
 & + \frac{\sqrt{2} \cdot coxa \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} + \frac{\sqrt{2} \cdot coxa \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} + femur \cdot \cos \alpha \cdot [\frac{\sqrt{2} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} + \\
 & + \frac{\sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2}];
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
y = & \frac{\sqrt{2} \cdot h}{2} - tibia \cdot [\cos(\frac{\pi}{2} + \beta) \cdot \sin(\alpha) \cdot [\frac{\sqrt{2} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} - \frac{\sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2}] + \\
& + \sin(\frac{\pi}{2} + \beta) \cdot \cos(\alpha) \cdot [\frac{\sqrt{2} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} - \frac{\sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2}]] + \frac{\sqrt{2} \cdot coxa \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} + \\
& + \frac{\sqrt{2} \cdot coxa \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} - femur \cdot \cos \alpha \cdot [\frac{\sqrt{2} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} - \frac{\sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2}]; \\
z = & femur \cdot \sin(\alpha) - tibia \cdot \left[\cos(\frac{\pi}{2} + \beta) \cdot \cos(\alpha) - \sin(\frac{\pi}{2} + \beta) \cdot \sin(\alpha) \right].
\end{aligned}$$

Таким образом, были найдены координаты стопы робота в двух системах отсчета: 1) относительно плечевого сустава; 2) относительно центра масс. Первые из них используются для перемещения стопы робота в пространстве, вторые для осуществления коррекции положения центра масс.

Обратная задача кинематики применяется тогда, когда имеется механизм состоящий из нескольких звеньев и требуется точно перевести рабочий орган в заданную точку. При помощи обратной кинематики для любого многосвязного объекта можно составить систему уравнений, описывающую положение суставов в пространстве и рассчитать требуемые углы поворота суставов. Человек применяет решение обратной задачи кинематики каждый день, но не задумывается об этом. Например, необходимо дотянуться до стоящей на столе кружки, для этого мозг должен отправить информацию мышцам, которые осуществят повороты на определенный угол в суставах: плече, локоть, запястье, пальцы. В результате кружка окажется в руках. Система уравнений, которые можно составить для человеческой руки, гораздо сложнее, чем система для конечности робота. Сложность уравнений прямо пропорциональна количеству звеньев описываемого объекта.

Для нахождения решения обратной задачи кинематики необходимо ввести ряд условных ограничений, так как в случае обратной задачи зачастую

имеем множество решений. Такими ограничениями являются физические углы поворота сервопривода:

- 1) для группы шарниров горизонтального поворота ($A_1...A_4$) - 240° ;
- 2) для групп шарниров вертикального поворота ($B_1...B_4$ и $C_1...C_4$) - 90° .

Решение обратной задачи кинематики представляется как произведение обратных матриц перехода, начиная от стопы заканчивая абсолютной системой отсчёта, и имеет вид:

$$R_i = T_4^{-1} \cdot T_3^{-1} \cdot T_2^{-1} \cdot T_1^{-1} \cdot T_{M+1}^{-1} \cdot T_M^{-1}. \quad (10)$$

Решение данного уравнения средствами доступной микроконтроллерной техники в режиме реального времени не представляется возможным. Поэтому решение было сведено к нахождению области устойчивого положения центра масс численными методами. В результате был сформирован массив данных, ограничивающий зоны перемещения центра масс робота при ходьбе.

2.7.2 Решение обратной задачи кинематики геометрическими методами.

В данном пункте рассмотрим решение задачи обратной кинематики геометрическим методом.

Для удобства представления изобразим конечность робота схематично как показано на рисунке 21 и 22.

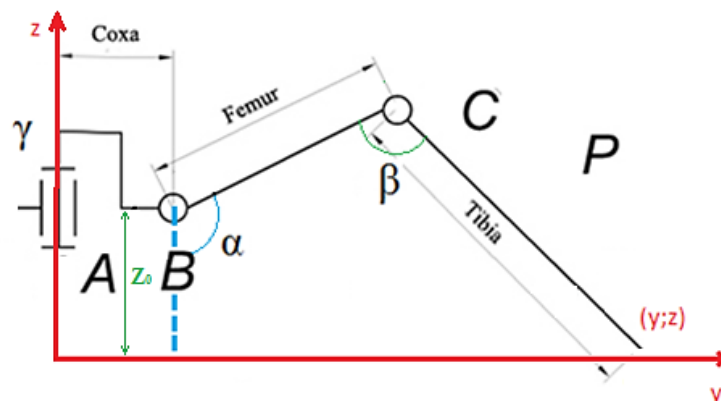


Рисунок 21 Правая передняя нога вид сбоку

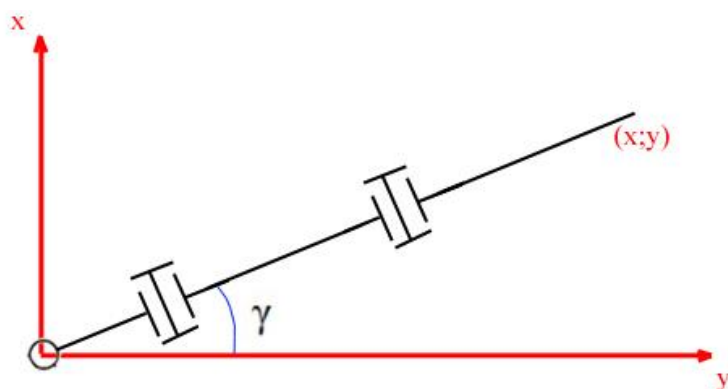


Рисунок 22 Правая передняя нога вид сверху

Необходимо найти углы α , β , γ при задании которых достигается желаемая точка с координатами (x,y,z) . Исходными данными для решения задачи являются длины суставов Coxa, Femur, Tibia. Данные величины являются константами и физически не могут изменить длину. Углы α , β , γ примем выходными параметрами.

Определим требуемые углы в общем виде. Угол γ легко найти, так как координаты на плоскость (x,y) заранее известны.

$$\frac{x}{y} = \tan(\gamma); \quad (11)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{x}{y}\right). \quad (12)$$

Для нахождения угла α разделим геометрическую фигуру, образованную между Femur, tibia, осью и воображаемой пунктирной параллельной оси z , как показано на рисунке 23 получим два треугольника.

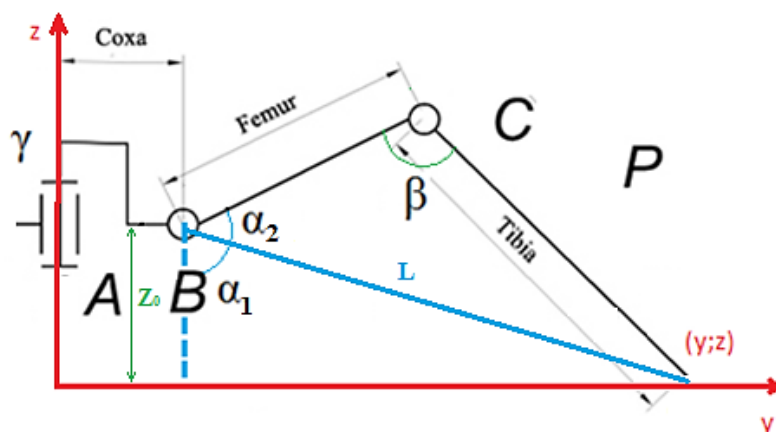


Рисунок 23 – вводим обозначения

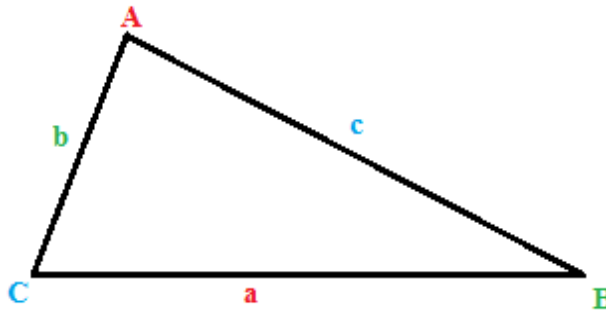
Каждый из полученных треугольников содержит гипотенузу длиной L , а так же углы α_1 и α_2 сумма которых образует искомый угол $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$. Величина z_0 задана начальными условиями – это стартовое положение робота. Длина гипотенузы в общем виде находится по следующему выражению:

$$L = \sqrt{z^2 + (y - coxa)^2} \quad (13)$$

Исходя из найденной гипотенузы L , известного катета z_0 и свойств прямоугольного треугольника можно определить угол α_1 прилежащий к гипотенузе:

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{z_0}{L}\right) \quad (14)$$

Для нахождения углов α_2 и β требуется воспользоваться правилами косинусов. Для треугольника со сторонами a, b, c и углами A, B, C правила формулируются следующим образом:



$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos A; \quad \cos A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \quad (15)$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cdot \cos B; \quad \cos A = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac} \quad (16)$$

$$c^2 = b^2 + c^2 - 2ab \cdot \cos C; \quad \cos A = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \quad (17)$$

Применяя закон косинусов получим:

$$tibia^2 = femur^2 + L^2 - 2(femur)(L) \cdot \cos(\alpha_2) \quad (18)$$

Выразим α_2 :

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{tibia^2 - femur^2 - L^2}{-2(femur)(L)}\right) \quad (19)$$

Таким образом, были найдены углы α_1 и α_2 . В общем виде искомый угол α , равный сумме углов α_1 и α_2 , запишется выражением:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{tibia^2 - femur^2 - L^2}{-2(femur)(L)}\right) + \arccos\left(\frac{z_0}{L}\right) \quad (20)$$

Общий вид выражения для нахождения угла β найдем по аналогии:

$$L^2 = tibia^2 + femur^2 - 2(tibia)(femur)\cos(\beta) \quad (21)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{L^2 - tibia^2 - femur^2}{-2(femur)(tibia)}\right) \quad (22)$$

Итоговые углы в общем виде приведены в таблице 7

Таблица 7 – Искомые углы

угол	выражение
α	$\arccos\left(\frac{tibia^2 - femur^2 - L^2}{-2(femur)(L)}\right) + \arccos\left(\frac{z_0}{L}\right)$
β	$\arccos\left(\frac{L^2 - tibia^2 - femur^2}{-2(femur)(tibia)}\right)$
γ	$\arctan\left(\frac{x}{y}\right)$

2.7.3 Модель SimMechanics

Для расчёта усилий двигателей, необходимых для обеспечения перемещения робота на уровне CAE был использован пакет прикладных программ Matlab 10, в частности подсистема simmechanics пакета simulink.

Модель одной конечности робота представлена на рисунке 24. Блоки «body» - моделируют корпусные детали робота, отличительная черта блока состоит не только в задании габаритных параметров объекта, но и его массы. Блоки «Revolute» – моделируют шарнирные соединения в различных плоскостях. Данный блок имеет возможность подключения к блоку возмущения и блоку сенсоров. Блоки «IC» - формируют возмущающее воздействие в виде задания угла поворота. Полученная модель является достаточным условием для установления действующих моментов инерции и моментов вращения, по косвенным признакам, суммарно равных 4.2 кг/см.

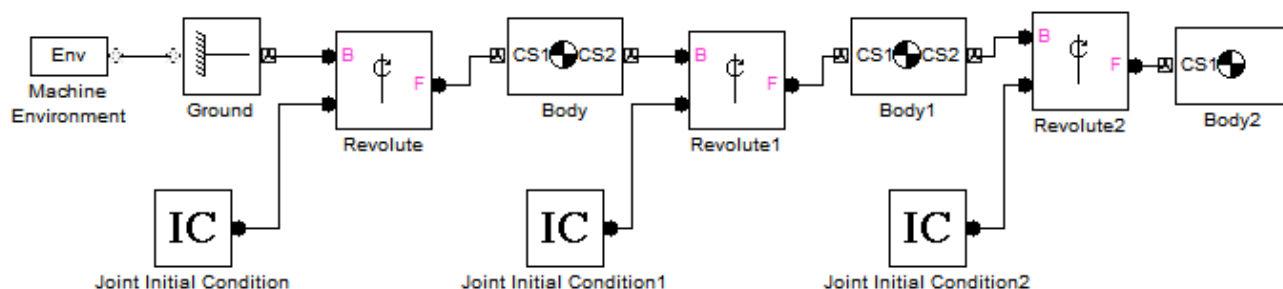


Рисунок 24 - Модель одной конечности в SimMechanics

Результат работы модели представлен на рисунке 25. Данная модель отражает работоспособность системы. Для увеличения полезной нагрузки возьмём коэффициент запаса 1,3. Таким образом, требуемые усилия составят $4,2 \cdot 1,3 = 5,46$ кг/см.

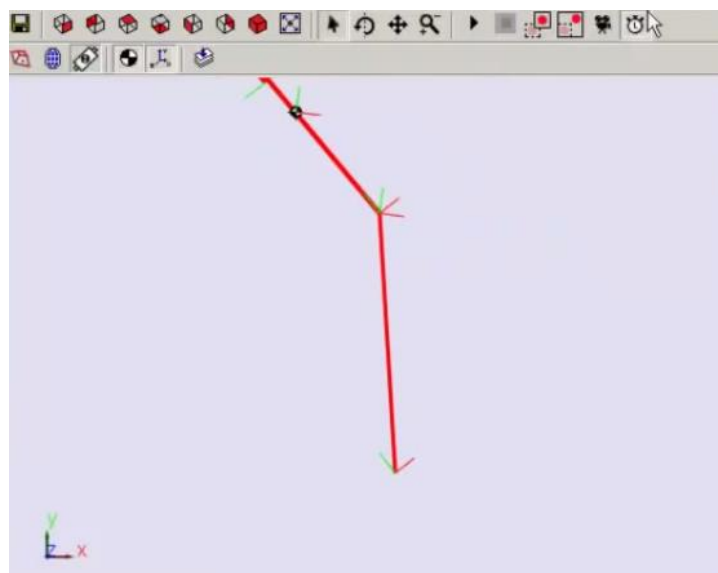


Рисунок 25 – результат работы модели SimMechanics.

На рисунке 26 приведена область нахождения центра масс робота для обеспечения устойчивого положения, полученная по данным пункта 2.7.

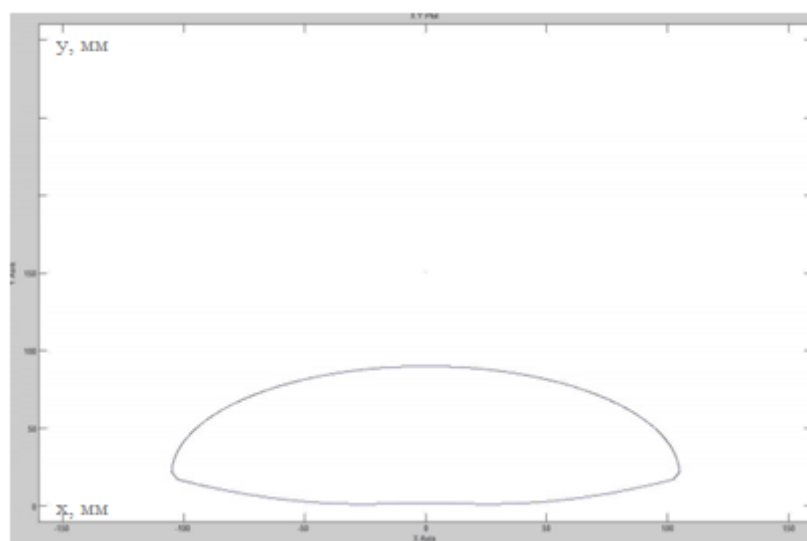


Рисунок 26 – Область нахождения центра масс при движении передними конечностями

3 Программное и алгоритмическое обеспечение

3.1 Разработка алгоритмов

Отличительной особенностью движения шагающих платформ является необходимость управления сразу несколькими приводами. Шагающая мобильная квадропод - платформа оснащена двенадцатью приводами, по три на каждую из конечностей.

Для удобства управления выходные валы сервоприводов занимают круговое расположение (рисунок 27), т.е. структура всех конечностей робота остаётся неизменной и не зависит от её положения. Данное допущение позволяет значительно упростить алгоритм управления роботом.

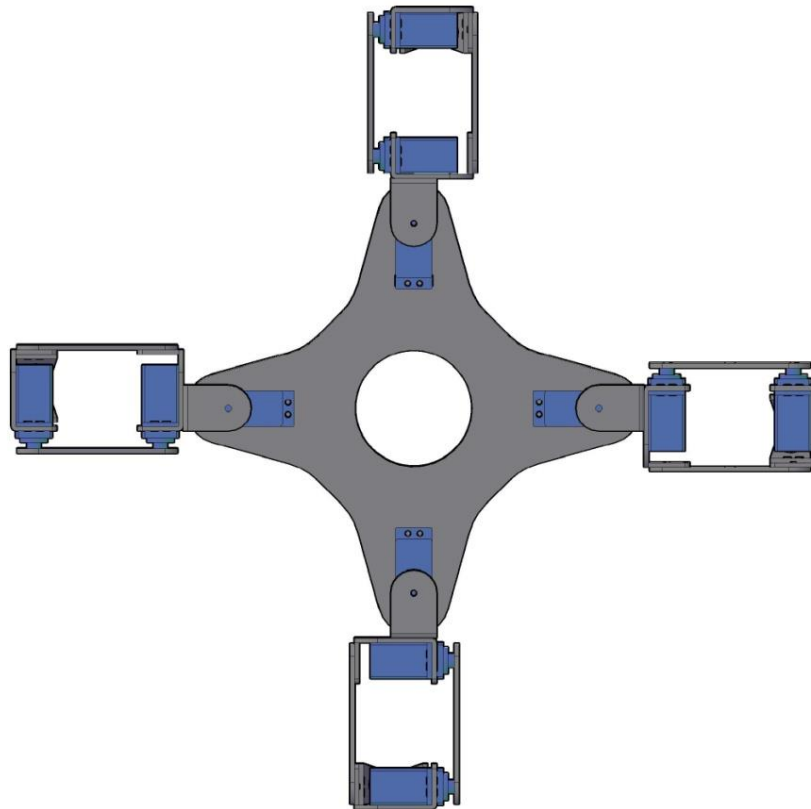


Рисунок 27 - Вид платформы сверху

Существуют два способа перемещения квадропода в пространстве:

- 1) «крестоход» – движение осуществляется в сторону одной шагающей ноги;
- 2) «бокоход» – движение осуществляется по направлению боковой части основания робота.

Способ «крестоход» обладает рядом недостатков, связанных с неравномерной нагрузкой на приводы конечностей, что снижает срок эксплуатации платформы. При движении способом «бокоход» нагрузка на конечности распределяется равномерно, что существенно сокращает износ движущихся частей робота. Исходя из соображений наибольшего срока службы, был выбран способ «бокоход». Повороты и иные элементы для «крестохода» и «бокохода» выполняются одинаково.

Для реализации движений был разработан многоуровневый алгоритм. Блок-схема верхнего уровня алгоритма представлена на рисунке 28.

На первом этапе происходит инициализация переменных и портов (например временная переменная – хранит время для выполнения поворота вала привода на угол в $2,7^\circ$). Эта процедура устанавливает нумерацию сигнальных каналов и объявляет типы данных переменных, используемых в программе. Блок калибровки устанавливает начальные значения углов поворота приводов, относительно которых ведется отсчет (при стандартных настройках углы равны друг другу и составляют 90°). Блок открытие последовательного порта объявляет работу с портом и устанавливает скорость передачи данных. Блок условий «ожидание указателя» запускает процедуру выбора действий в зависимости от символа на последовательном входе (функция case). Например, если на входе символ «U», то будет запущена процедура приседание.

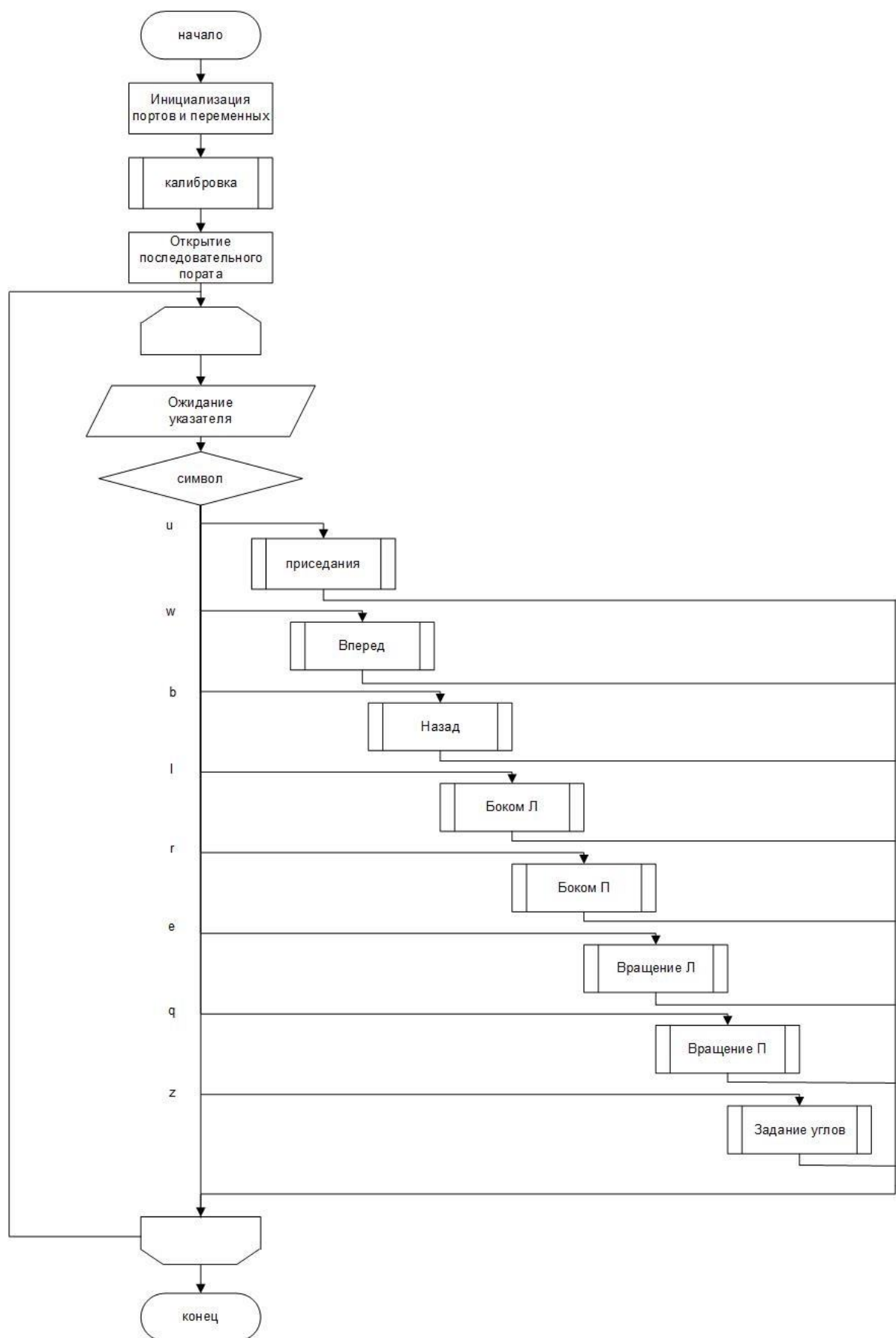


Рисунок 28 – Верхний уровень

В свою очередь каждую из процедур верхнего уровня можно разделить на более мелкие. Для удобства рассмотрим процедуру «вперед» (рисунок 29).

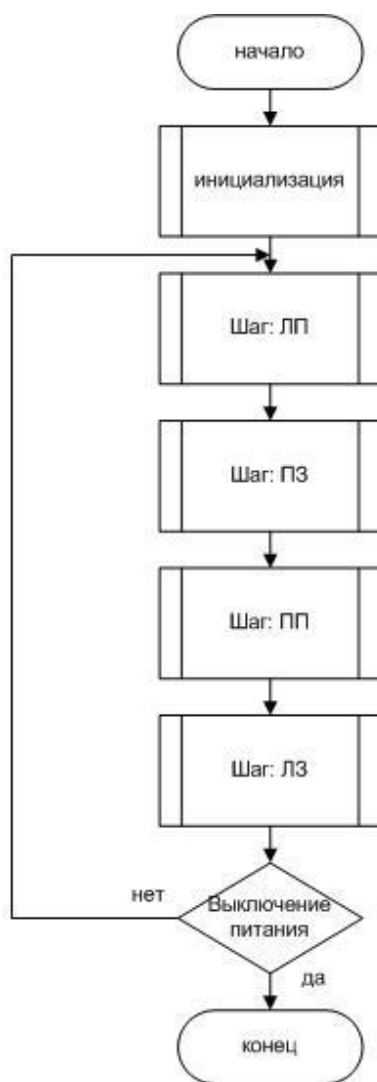


Рисунок 29 – процедура «вперед»

Данный уровень состоит из набора процедур (2..6), каждая из которых содержит набор функций для управления сервоприводами. Процедуры с 2 по 6 объединены в цикл с наперёд неизвестным количеством проходов, условием выхода из которого является отключение питания робота.

Процедура 2 (инициализация) задаёт исходное положение конечностей робота в пространстве и формирует точки отсчёта углов поворота приводов. Условным обозначениям процедур с 3 по 6 соответствуют конечности: ЛП - левая передняя; ПЗ – правая задняя; ПП – правая передняя; ЛЗ – левая задняя.

Такая последовательность исполнения процедур даёт возможность роботу одновременно опираться на три конечности, перемещаясь при этом на величину шага. В свою очередь процедура шаг содержит в себе набор процедур нижнего уровня: передача управляющего воздействия на сервоприводы для осуществления движения конечностью и стабилизация. Алгоритм процедуры шаг представлен на рисунке 30.



Рисунок 30 - Алгоритм процедуры «шаг»

Блок отвод центра масс (ЦМ), содержит в себе набор функций, передающий углы поворота на плечевые приводы робота, достаточные для перемещения центра масс в область устойчивого положения. Необходимость данной процедуры состоит в том, что при опоре на три конечности с совершением шага место положения геометрического центра масс изменяется, что может привести к падению робота. Определение области устойчивости

описано в (пункт 2.7). Процедуры с 3 по 4 содержат функции считывания текущего положения вала привода и функции передачи углов поворота, отсчитываемых от текущего положения вала. Процедура 6 содержит функции передачи значений углов на сервоприводы для переноса центра масс на конечность совершившую шаг, тем самым данная процедура является началом следующего шага накрест лежащей конечности.

На нижнем уровне алгоритма располагается процедура перенос ноги. Внутри данной процедуры осуществляется расчет требуемых для переноса углов поворотов приводов, а также выполнение перемещений на расчетный угол за заданное время. Блок схема представлена на рисунке 31.

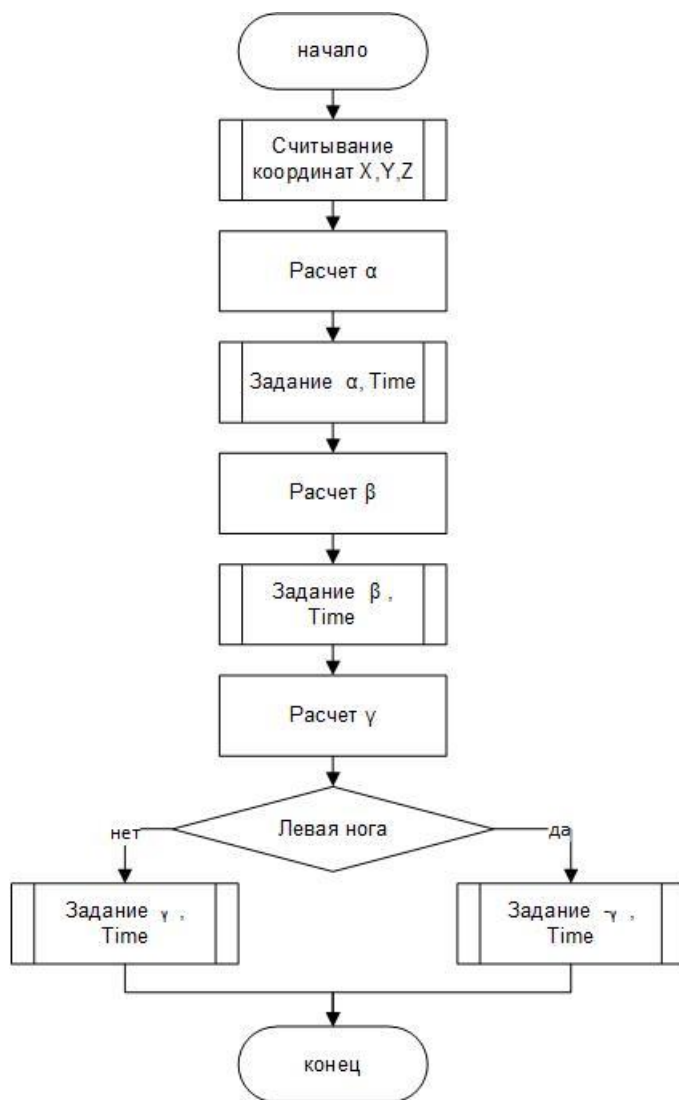


Рисунок 31 – процедура переноса ноги

3.2 Математическое моделирование

Математическое моделирование – это процесс исследования какого-либо объекта или системы объектов путем построения и изучения их математических моделей. По сути, большинство наук, использующих математический аппарат, кто-то в большей, а кто-то в меньшей степени, занимаются математическим моделированием, заменяя объект исследования его математической моделью. У данного метода есть свои плюсы и минусы. Минус заключается в том, что нет полного представления об объекте и его физических свойствах. Плюсы в том, что можно допускать ошибки, количество экспериментов над объектом можно произвести бесконечное множество.

Для задания движения в квадропод платформе применяются приводы Corona DS339HV, заявленный срок службы которых составляет тысяча часов. Для того чтобы продлить срок службы системы и предотвратить поломку в результате неправильных действий оператора была разработана и реализована математическая модель робота. Модель выполнена в программном продукте microsoft office excel 2013, содержит математическое описание геометрического положения всех ключевых расчетных точек робота. (Рисунок 32)

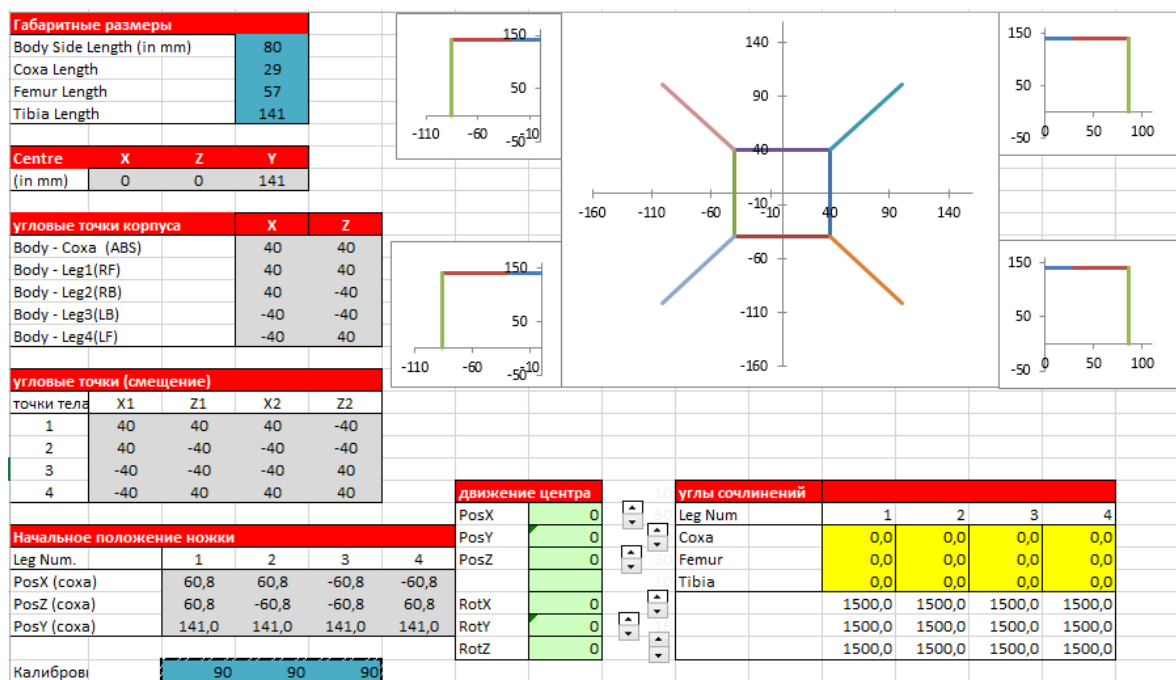


Рисунок 32 - Модель робота в MS Excel 2013

Модель рассчитана для квадропода, но при необходимости можно, модель легко перестраивается в модель, описывающую гексапод. Для работы с моделью в окне «габаритные размеры» необходимо указать характеристики робота и стартовые углы в графе «калибровка». Исходя из этих данных, будет рассчитаны начальные координаты стопы робота относительно базовой системы координат. После калибровки модель готова для внесения расчетных данных. Оператор может проверить полученное им решение, подставив его в модель (рисунок 33).

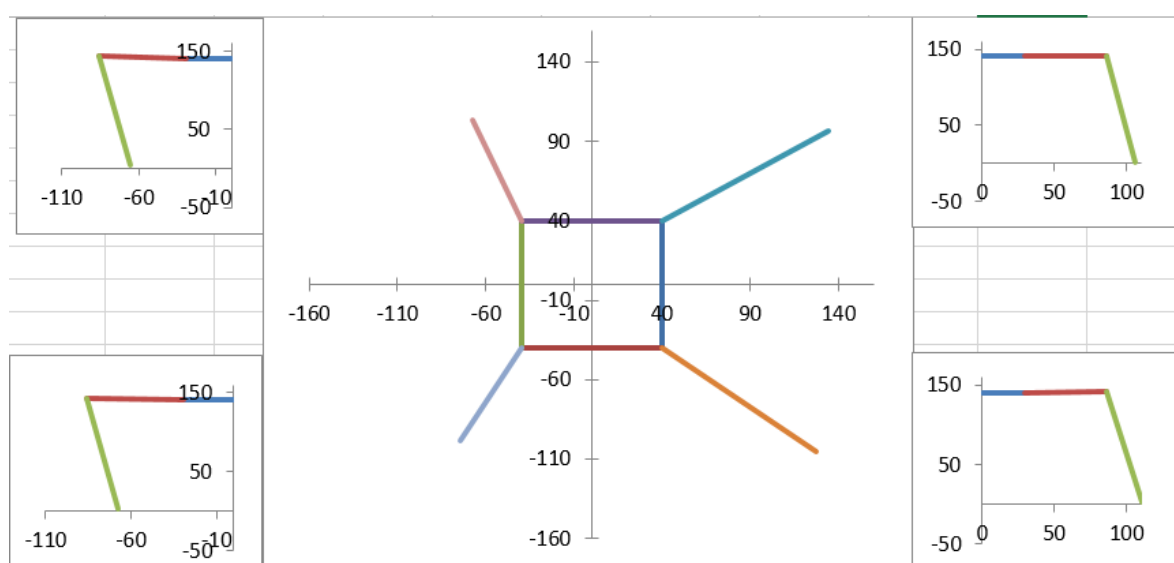


Рисунок 33 - Пример графиков при ненулевых начальных условиях

Помимо решения прямой задачи кинематики, разработанная модель производит решение обратной задачи. При этом решение производится для конечно точки, но и для каждой ключевой точки на конечности робота с учетом физических ограничений. Решение представлено относительно положения, занимаемого суставом на предыдущем шаге. Таким образом, можно построить вектор перемещения во всех плоскостях (рисунок 34).

Позиции суставов					
Leg Num		1	2	3	4
LegLengthXZ		103,1	106,8	63,4	59,4
CoxaStartPosY		141,0	141,0	141,0	141,0
CoxaEndPosY		141,0	141,0	141,0	141,0
CoxaStartPosXZ		0,0	0,0	0,0	0,0
CoxaEndPosXZ		29,0	29,0	-29,0	-29,0
FemurStartPosY		141,0	141,0	141,0	141,0
FemurEndPosY		142,0	142,5	142,8	143,5
FemurStartPosXZ		29,0	29,0	-29,0	-29,0
FemurEndPosXZ		86,0	86,0	-86,0	-85,9
TibiaStartPosY		142,0	142,5	142,8	143,5
TibiaEndPosY		2,4	3,7	3,0	4,0
TibiaStartPosXZ		86,0	86,0	-86,0	-85,9
TibiaEndPosXZ		105,7	110,5	-67,8	-65,6
FeetPosX		134,2	127,2	-74,3	-67,2
FeetPosY		141,0	141,0	141,0	141,0
FeetPosZ		96,2	-105,3	-98,3	103,2

Рисунок 34 - Таблица результатов

3.3 Программное обеспечение для взаимодействия с пользователем

Программа для взаимодействия с пользователем несет одноименное роботу название «квадропод». Данный программный продукт предназначен для осуществления дистанционного управления шагающей мобильной квадропод платформой. Программа «Квадропод» содержит в себе систему передачи данных в реальном времени, систему записи действий над объектом управления – робот. ПО разработано на языке высокого уровня C++, посредством Microsoft Visual Studio — это набор инструментов разработки, основанных на использовании компонентов, и других технологий для создания мощных, производительных приложений.

Программный продукт «Квадропод» состоит из больших блоков: интерфейс, процедуры, передача данных. На рисунке 35 представлено взаимодействие блоков программы между собой.

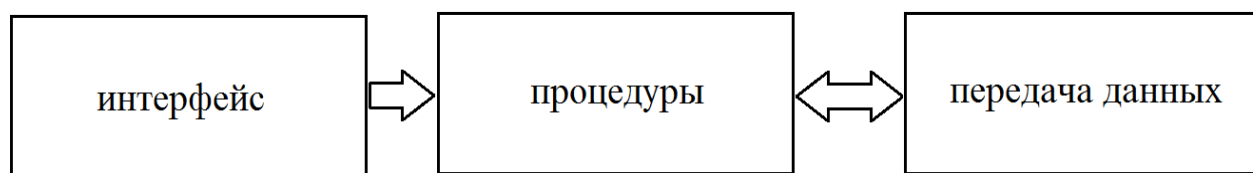


Рисунок 35 - Взаимодействие блоков программы

Блок интерфейс содержит описание пользовательской оболочки программы. Внешний вид пользовательского окна представлен на рисунке 36.



Рисунок 36- Внешний вид пользовательского окна

Пользовательское окно в своем составе содержит форму с размещенными на ней элементами. Каждый элемент является «методом», который описывает событие. В состав элементов входят: кнопки (button), текстовые окна (textBox). Всего окно имеет девять кнопок, каждая из которых запускает соответствующую ей процедуру, и 13 текстовых окон, для записи информации.

От блока «интерфейс» информация поступает в блок «процедуры». Процедура – это поименованная или иным образом идентифицированная часть компьютерной программы, содержащая описание определённого набора действий. Подпрограмма может быть многократно вызвана из разных частей программы. Программа содержит процедуры 3 типов:

- процедуры передачи;
- процедуры преобразования;
- процедуры обработки ошибок.

Процедуры передачи содержит обращение к заданному пользователем порту и отправка символа «активатора» на выход. Пример процедуры для передачи представлен на рисунке 37.

```
private: System::Void peredacha {  
    {std::string strCOM="\\\\.\\COM"+msclr::interop::marshal_as< std::string  
>(NstrCOM);  
  
        char * cstrCOM=(char*)strCOM.c_str();  
        Serial com1(cstrCOM);  
  
        const int BUF_SIZE=256;  
        char buf[BUF_SIZE];  
        for(int i=0;i<BUF_SIZE;i++) buf[i]='\0';  
        com1.WriteData("e",1);  
        com1.~Serial();}
```

Рисунок 37 - Процедура передачи символа «активатора»

Передача данных осуществляется на скорости 9600 бит/с при асинхронном режиме работы по протоколу интерфейса RS-232. Для проверки выполнения процедур было использовано программное обеспечение с функцией «echo user's message», Advanced Serial Port Monitor. Данная программа позволяет производить мониторинг входящей и исходящей информации не занимая порт.

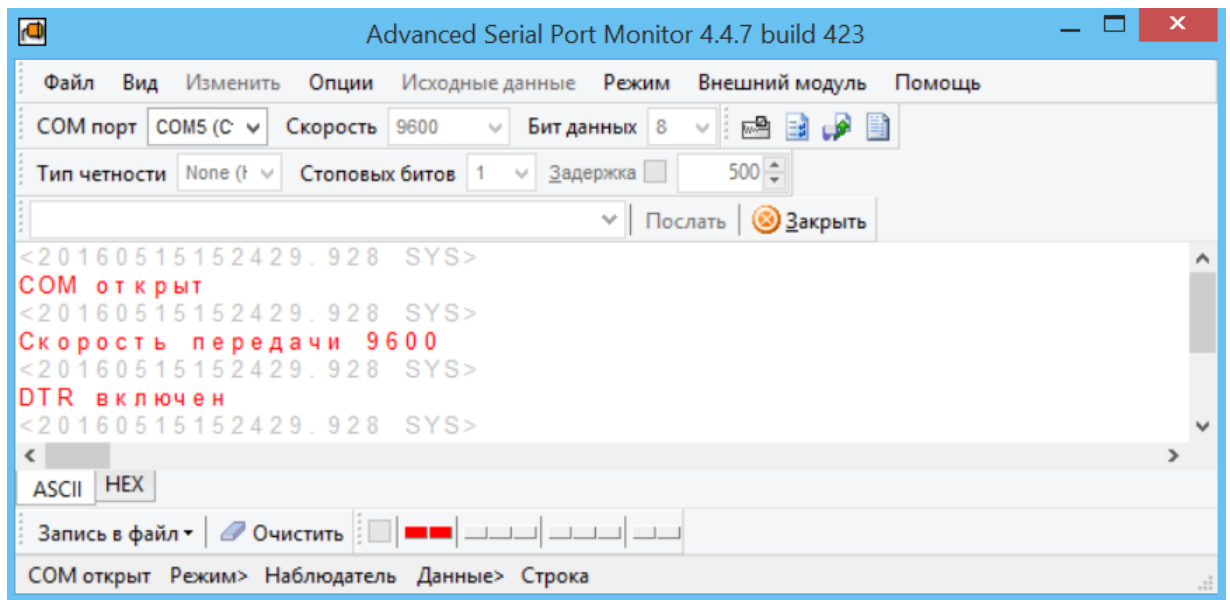


Рисунок 38 - Отслеживание состояние последовательного порта.

Процедура преобразования применяется для изменения типа данных передаваемых на последовательный порт. Для успешной передачи данных информация должна быть преобразована в массив типа `char*`. Данные процедуры вызываются каждый раз при нажатии кнопок. Также процедуры преобразования используются для перевода информации типа `string` в тип `char*`, при задании углов поворота привода вручную.

Пример процедуры преобразования на рисунке 39. Данная процедура берет информацию из текстового поля, затем конвертирует её. После конвертации информация помещается во вспомогательную/промежуточную переменную.

```
private: System::Void perevod {
    System::String^st1=gcnew String("");
    st1=textBox1->Text;
    double qq = System::Convert::ToDouble(st1);
    qq/=2;
    System::String^st2=gcnew String("");
    st2 = System::Convert::ToString(qq);
    textBox2->Text = st2;}
```

Рисунок 39 - Процедура преобразования.

Процедура «обработчик ошибок» включает в себя набор условий отказа выполнения программы. В ходе работы с программой пользователь может задать некорректные данные, например: неверно указан порт передачи данных, заданный угол не попадает в допустимый диапазон от «0» до «180», заданные координаты не могут быть достижимы, порт занят другим приложением и т.д. Пример функции из процедуры «обработчик ошибок» представлен на рисунке 40.

```
// проверяем – было ли соединение успешным
if(this->hSerial==INVALID_HANDLE_VALUE)
{
    // – выводим ошибку
    if(GetLastError()==ERROR_FILE_NOT_FOUND){
        // печатаем ошибку
        printf("ERROR: HE BEPEH COMport: %s not available.\n", portName);
    }
}
```

Рисунок 40 - Пример функции процедуры «обработчик ошибок»

В случае если в ходе выполнения программы возникла ошибка, для сообщения о ней, после отработки процедуры «обработчик ошибок», происходит вызов консоли. Пример сообщения об ошибке представлен на рисунке 41.

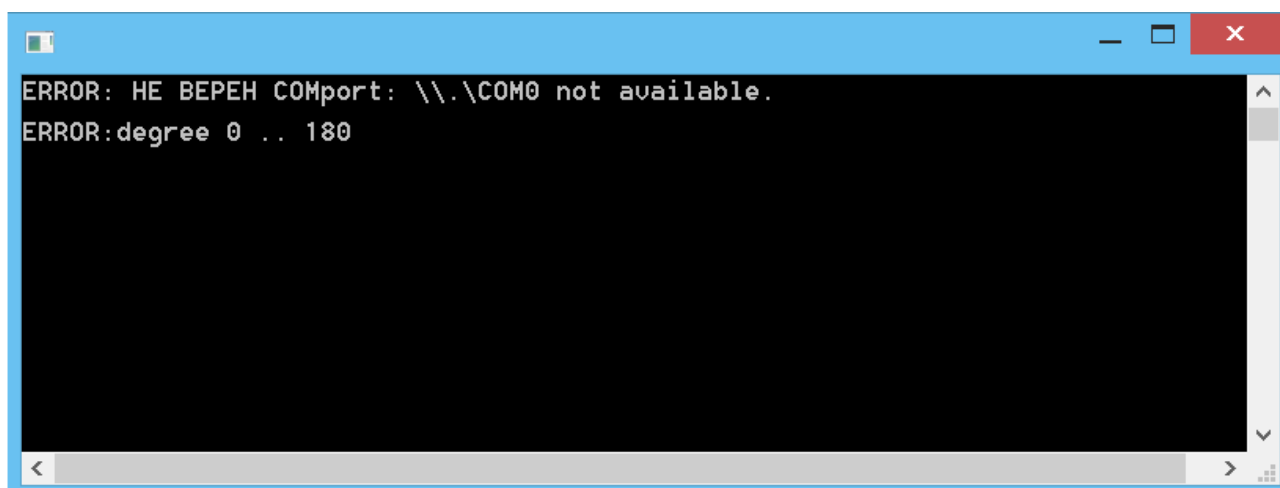


Рисунок 41 - Вывод сообщения об ошибках

4 Социальная ответственность

Данный раздел включает в себя оценку условий труда на рабочем месте, анализ вредных и опасных факторов труда, разработку мер защиты от них.

В работе рассматривается комплекс мероприятий, необходимых в процессе разработки робототехнического изделия. Производимые работы связаны с взаимодействием со сложными производственными комплексами, поэтому необходимо установить источники вредных факторов и произвести оценку условий труда.

4.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов

Работа, связанная с производством мобильной шагающей квадропод-платформы связана с рядом вредных факторов, таких как:

- 1) высокое напряжение электрической сети;
- 2) возникновение статического напряжения на поверхности станков и измерительных приборов;
- 3) продолжительная работа перед монитором компьютера (электромагнитное излучение);
- 4) шум, источниками которого являются: работа двигателя фрезерного станка; работа двигателя сверлильного станка; работа вентиляционной системы; работа двигателей шагающей мобильной квадропод-платформы.

Воздействие неблагоприятных факторов приводит к снижению работоспособности, вызываемому развивающимся утомлением работника.

4.2 Техника безопасности

Под техникой безопасности понимается система организационных мероприятий и технических средств, направленная на предотвращения воздействия на работника вредных и опасных производственных факторов.

Электрические установки представляют для человека большую потенциальную опасность, которая усугубляется тем, что органы чувств человека не могут на расстоянии обнаружить наличие электрического напряжения на оборудовании. Поэтому при работе со станками и токоведущими частями работа необходимо пользоваться индивидуальными средствами защиты, такими как диэлектрические перчатки, изолирующий резиновый коврик и инструментом с изолированными рукоятками. При этом все средства защиты должны проходить проверку в соответствии с нормами электробезопасности [1].

Так же анализ травматизма среди работников показывает, что, в основном, несчастные случаи происходят от воздействия физически опасных производственных факторов при использовании периферийных устройств и при выполнении сотрудниками несвойственных для них работ. На втором месте – случаи, связанные с воздействием электрического тока на работников.

Для предотвращения производственного травматизма необходим вводный инструктаж, который проводится перед началом выполнения работ. Лицо, не получившее инструктаж, к работам не допускается.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с электроприборами в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов. При возможности одновременного соприкосновения с металлическим элементом и металлическим корпусом электрооборудования, имеющим соединение с землей.

Таким образом, работа может проводиться только в помещениях без повышенной опасности. При этом существует опасность электропоражения:

- 1) при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время работы со станками;
- 2) при прикосновении к нетокведущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- 3) при соприкосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- 4) имеется опасность короткого замыкания в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Согласно нормам, установленным в [1] лаборатория 106 и 027, в которой проводились работы, по опасности электропоражения относится к помещениям без повышенной опасности, то есть отсутствуют условия, создающие повышенную опасность.

В лаборатории используются приборы, потребляющие напряжение 220В переменного тока с частотой 50Гц. Это напряжение опасно для жизни, поэтому обязательны следующие меры предосторожности:

- 1) перед началом работы нужно убедиться, что выключатели и розетка закреплены и не имеют оголённых токоведущих частей;
- 2) при обнаружении неисправности оборудования и приборов необходимо не делая никаких самостоятельных исправлений сообщить ответственному за оборудование;
- 3) запрещается загромождать рабочее место лишними предметами. При возникновении несчастного случая следует немедленно освободить пострадавшего от действия электрического тока и, вызвав врача, оказать ему необходимую помощь, согласно правилам, описанным в [4].

4.3 Производственная санитария

4.3.1 Микроклимат

Проанализируем микроклимат в помещении, где находится рабочее место. Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Эти параметры по отдельности и в комплексе влияют на организм человека, определяя его самочувствие. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 8.

Параметры микроклимата в помещении, где находится рабочее место, регулируются системой центрального отопления и приточно-вытяжной вентиляцией, и имеют следующие значения: влажность 50% в холодный период года и 40% в тёплый, скорость движения воздуха 0,1 - 0,2 м/с, температура летом 20..25°C, зимой 15..18°C, что соответствует требованиям [5].

Таблица 8 – Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата

Период года	Температура, °C	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещении ВЦ должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20

м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

В лабораториях 106 и 027 присутствует принудительная вентиляция. Её наличие обусловлено требованиями по объёму воздуха в помещении приходящегося на одного работника – более 40 м³.

В зимнее время в помещении необходимо предусмотреть систему отопления. В рассматриваемых лабораториях используется водяное отопление со встроенными нагревательными элементами и терморегуляторами.

4.3.2 Шум

В определенных обстоятельствах высокие уровни шумов могут пагубно сказываться на выполняемую человеком работу. В общем, человек способен нормально выполнять какие-либо простые, рутинные задания даже при таких высоких уровнях шума, как 130 – 140 дБ. При более высоких уровнях шумов, однако, могут происходить нарушения в работе двигательного аппарата и зрения.

Отрицательное влияние шумов на человека может продолжаться и после их прекращения. Это зачастую выражается в повышенной раздражительности. Кроме того, даже небольшие уровни шумов могут вызывать чувство беспокойства и увеличивать риск возникновения агрессии.

Сильный шум вызывает трудности в распознавании цветовых сигналов, снижает быстроту восприятия цвета, остроту зрения, зрительную адаптацию, нарушает восприятие визуальной информации, снижает способность быстро и точно выполнять координированные движения, уменьшает на 5-12% производительность труда. Длительное воздействие шума с уровнем звукового давления 90дБ снижает производительность труда на 30-60%.

В производственных лабораториях основными источниками шума являются: компьютер, маломощный фрезерный станок и аппаратура автоматики. В таблице 9 приведены предельно допустимые уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест [6].

Таблица 9 - Предельно допустимый уровень звука для трудовой деятельности.

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звука, дБ
Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, административно-управленческая деятельность; измерительные и аналитические работы в лаборатории; рабочие места в помещениях цехового управленческого аппарата в рабочих комнатах конторских	60

При выполнении основной работы на автоматизированном рабочем месте (АРМ) на базе ПК в аппаратной телемеханики и связи уровень звука не должен превышает 60 дБА. При работе со станочным оборудованием уровень шума превышает 90дБА, поэтому необходимо пользоваться берушами или шумоизолирующими наушниками. В лаборатории 106 уровень шума находится в пределах 30 – 60 дБ.

4.3.3 Электромагнитные излучения

Согласно [7] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг рабочего места по электрической составляющей представлена в таблице 10.

Таблица 10 - Временные уровни ЭМП, создаваемые ПК

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл

Возможные способы защиты от ЭМП:

- 1) увеличение расстояния от источника. Для избегания последствий экран видеомонитора должен находиться на расстоянии не менее 50 см;
- 2) применение экранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

4.3.4 Освещение

Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений оказывает положительное воздействие на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность.

Основной задачей светотехнических расчётов для искусственного освещения является определение требуемой мощности электрической осветительной установки для создания заданной освещённости в помещении.

Размещение светильников в помещении указано на рисунке 42.

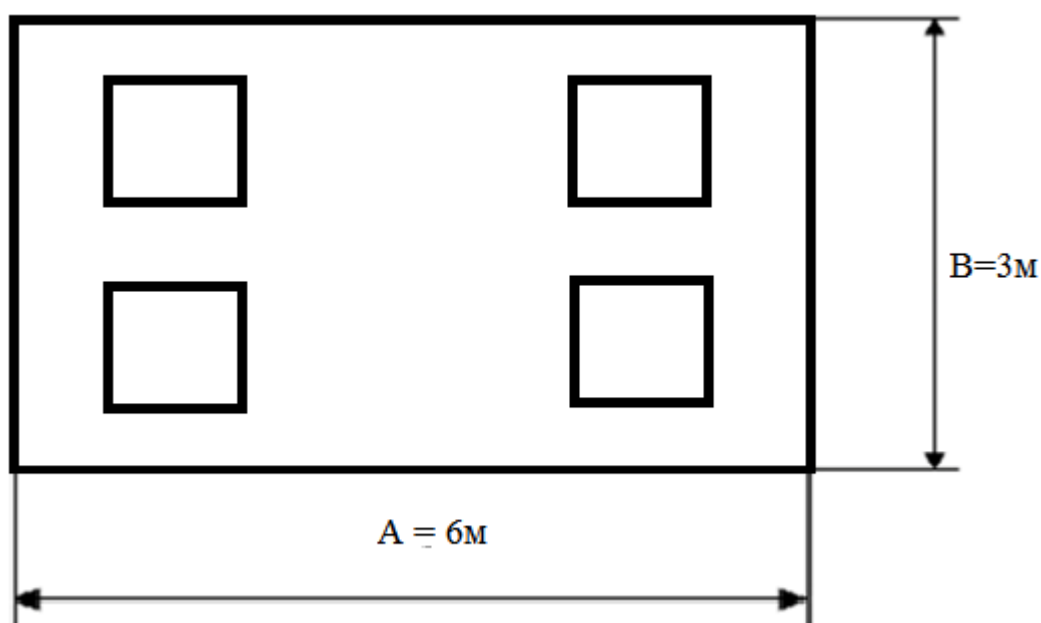


Рисунок 42 - План расположения светильников в помещении

Выбор освещённости осуществляется в зависимости от размера объёма различения (толщина линии, риски, высота буквы), контраста объекта с фоном, характеристики фона [5].

В помещении осуществляется работа с винтами d2·l10. Уровень освещенности должен быть $E_n=400$ лк (основное освещение). Экспериментальным путём было установлено, что освещённость лабораторий соответствует норме, при выполнении работ по осуществлению сборки шагающей мобильной квадропод-платформы. При включении персонального осветительного прибора значение достигает $E_n=450$ лк.

4.3.5 Статическое электричество

Статическое электричество возникает в результате сложных процессов, связанных с перераспределением электронов и ионов при соприкосновении двух поверхностей неоднородных жидких или твердых веществ, на которых образуется двойной электрический слой. При механическом разделении

поверхностей происходит разделение зарядов этого двойного электрического слоя. При этом между разделенными поверхностями, несущими электрический заряд, образуется разность потенциалов и возникает электрическое поле.

В помещении разрядные токи статического электричества чаще всего возникают при прикосновении персонала к любому из элементов станочного оборудования. Такие разряды опасности для человека не представляют, однако, кроме неприятных ощущений, они могут привести к выходу из строя системы автоматики станка.

Для снижения величин возникающих зарядов статического электричества в лабораториях покрытие полов выполнено из однослойного линолеума. Рабочие места оснащены статическими ковриками.

4.4 Пожарная безопасность

4.4.1 Пожарная профилактика

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным относятся: установление правил организации работ и соблюдение противопожарных мер.

4.4.2 Оценка пожарной безопасности помещения

Наличие в лабораториях 106 и 027 множества деревянных изделий (столы, шкафы, станины учебных стендов), электропроводов напряжением 220В, а также применение электронагревательных приборов с открытыми нагревательными элементами (паяльная станция, трансформаторные блоки питания) дает право отнести помещение по степени пожаро- и взрывобезопасности к категории Д.

В качестве возможных причин пожара можно указать следующие:

- 1) наличие горючей пыли (некоторые осевшие частицы пыли способны к самовозгоранию);
- 2) короткие замыкания;
- 3) опасная перегрузка сетей, которая ведет за собой сильный нагрев токоведущих частей и загорание изоляции;
- 4) нередко пожары происходят при пуске оборудования после ремонта.

Пожарная профилактика в таком случае основывается на устранении благоприятных условий возгорания. В рамках обеспечения пожарной безопасности решаются четыре задачи: предотвращение пожаров и возгорания, локализация возникших пожаров, защита людей и материальных ценностей, тушение пожара. Предотвращение пожара достигается путем исключения легко воспламеняемых предметов и источников возгорания, а также поддержанием среды в условиях, препятствующих возгоранию.

4.4.3 Мероприятия по устранению и предупреждению пожаров

Для предупреждения возникновения пожара необходимо соблюдать следующие правила пожарной безопасности:

- 1) исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

2) применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов.

Необходимо в лабораториях проводить следующие пожарно-профилактические мероприятия:

1) организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта;

2) эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования;

3) технические и конструктивные, связанные с правильным размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов.

Организационные мероприятия:

1) противопожарный инструктаж обслуживающего персонала;

2) обучение персонала правилам техники безопасности;

3) издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.

Эксплуатационные мероприятия:

1) соблюдение эксплуатационных норм оборудования;

2) обеспечение свободного подхода к оборудованию;

3) содержание в исправности изоляции токоведущих проводников.

Технические мероприятия:

1) соблюдение противопожарных мероприятий при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения. В лабораториях 106 и 027 имеется углекислотный огнетушитель типа ОУ–2, установлен рубильник, обесточивающий всю аудиторию, на двери аудитории приведен план эвакуации в случае пожара (рисунок 43);

2) профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

Кроме устранения самого очага пожара, нужно своевременно организовать эвакуацию людей.

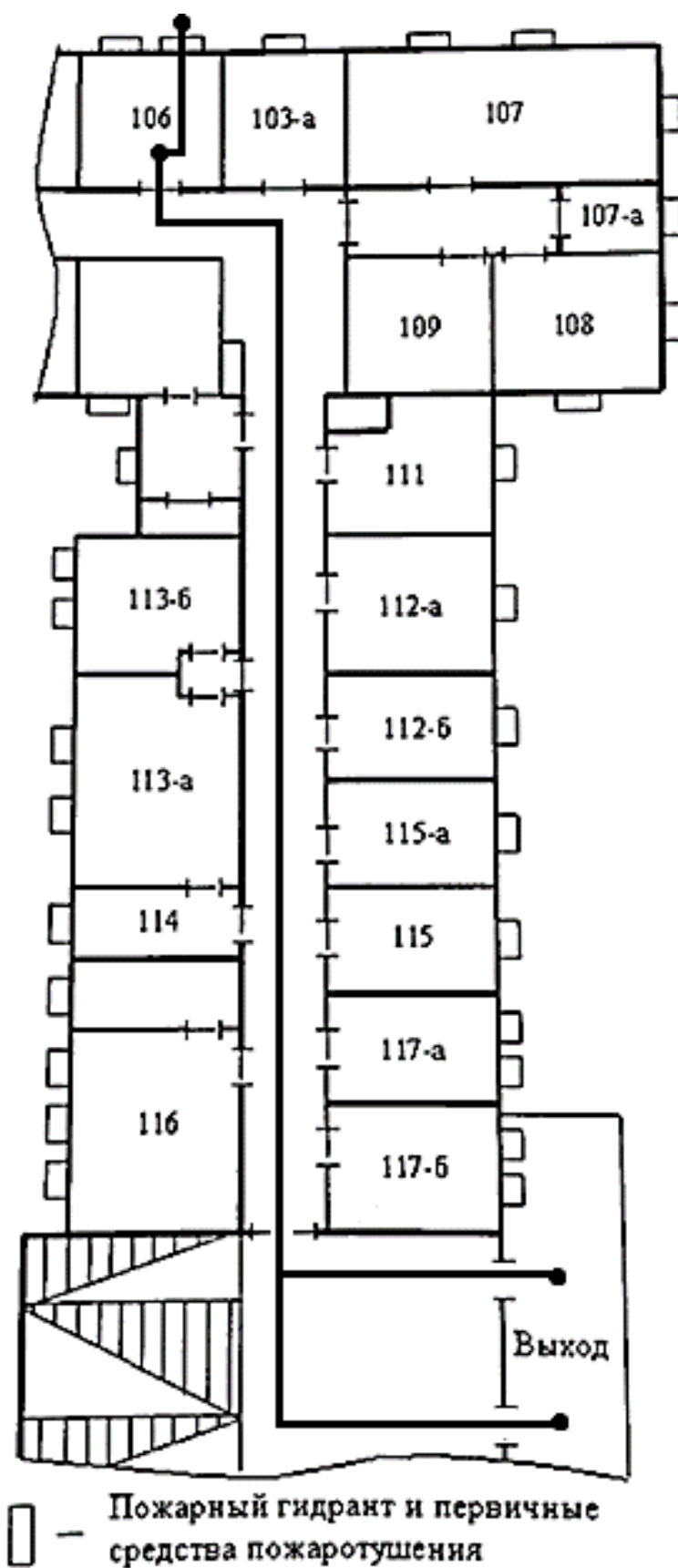


Рисунок 43 – Фрагмент плана эвакуации

4.4 Охрана окружающей среды

Вследствие развития научно-технического прогресса, постоянно увеличивается возможность воздействия на окружающую среду, создаются предпосылки для возникновения экологических кризисов. В то же время научно-технический прогресс расширяет возможности устранения создаваемых человеком ухудшений природной среды.

Защита окружающей среды - это комплексная проблема, требующая усилий всего человечества. Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий является полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам. Это потребует решения целого комплекса сложных технологических, конструкторских и организационных задач, основанных на использовании новейших научно-технических достижений.

Одна из самых серьезных проблем, связанных с разработкой данного проекта – это потребление электроэнергии. Увеличение количества компьютерных систем, внедряемых в производственную сферу, приводит к увеличению объема потребляемой электроэнергии, что влечет за собой увеличение мощностей электростанций и их количества. И то, и другое содействует нарушению экологической обстановки. Рост энергопотребления приводит к такому экологическому нарушению, как изменение климата – накопление углекислого газа в атмосфере Земли (парниковый эффект).

Необходимо стремиться к снижению энергопотребления, то есть разрабатывать и внедрять системы с малым энергопотреблением. В современных компьютерах, повсеместно используются режимы с пониженным потреблением электроэнергии при длительном простое. Стоит также отметить, что для снижения вреда, наносимого окружающей среде при производстве электроэнергии, необходимо искать принципиально новые виды производства электроэнергии.

Атмосфера всегда содержит определенное количество примесей, поступающих от естественных и антропогенных источников. В ходе выполнения исследований в воздушную среду были выброшены следующие отходы: металлическая пыль, углекислый газ, продукты распада паяльных окислов. Для предотвращения подобных выбросов следует пользоваться вентиляционными фильтрами.

Промышленные отходы и технический мусор, образовавшийся в результате исследований (металлические стружки, опилки, бумага) подлежат складированию с целью последующего вывоза специализированной организацией для дальнейшей утилизации.

5 Технико – экономическое обоснование работы

Целью данной работы является разработка алгоритмического и программного обеспечения системы управления шагающим-мобильным роботом. Для реализации поставленной цели необходимо тщательно продумать затраты на разработку.

В данном разделе производится расчет экономической оценки создания алгоритма и программного обеспечения для системы управления роботом, а также затраты на создание макета платформы для апробации реализованных алгоритмов. Для достижения этой цели необходимо решить несколько задач:

- организация трудоемкости выполнения работ;
- разработка календарного плана работ;
- расчет материальных затрат;
- расчет заработной платы основных исполнителей проекта;
- расчет затрат на электроэнергию;
- расчет амортизационных расходов;
- накладные расходы;
- расчет себестоимости разработки математической модели;
- определение затрат на реализацию физической модели;
- оценка экономической эффективности разработанной модели.

5.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

В данном пункте составляется полный перечень проводимых работ, определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график

реализации проекта. Так как число исполнителей редко превышает двух (степень распараллеливания всего комплекса работ незначительна) в большинстве случаев предпочтительным является линейный график. Для его построения хронологически упорядоченные вышеуказанные данные должны быть сведены в таблицу типа приведенной ниже

Таблица 11 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 50%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 0% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 60% И – 100%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 10% И – 100%
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	НР – 50% И – 100%
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	НР – 70% И – 100%
Расчет принципиальной схемы устройства	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

5.1.1 Продолжительность этапов работ

Расчет продолжительности этапов работ может осуществляться двумя методами:

технико-экономическим;
опытно-статистическим.

Первый применяется в случаях наличия достаточно развитой нормативной базы трудоемкости планируемых процессов, что в свою очередь обусловлено их высокой повторяемостью в устойчивой обстановке. Так как исполнитель работы зачастую не располагает соответствующими нормативами, то используется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

аналоговый;
экспертный.

Аналоговый способ привлекает внешней простотой и с околонулевыми затратами, но возможен только при наличии в поле зрения исполнителя НИР не устаревшего аналога, т.е. проекта в целом или хотя бы его фрагмента, который по всем значимым параметрам идентичен выполняемой НИР. В большинстве случаев он может применяться только локально – для отдельных элементов (этапов работы).

Экспертный способ используется при отсутствии вышеуказанных информационных ресурсов и предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию. Для определения вероятных (ожидаемых) значений продолжительности работ тож применяется по усмотрению исполнителя одна из двух формул.

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5}, \quad (23)$$

где $t_{\min}$ – минимальная продолжительность работы, дн.;

$t_{\max}$ – максимальная продолжительность работы, дн.;

Для выполнения перечисленных в таблице 12 работ требуются специалисты:

инженер – в его роли действует исполнитель НИР (ВКР);

научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ($T_{РД}$) ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д} \quad (24)$$

где $t_{ож}$ – продолжительность работы, дн.;

$K_{ВН}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно $K_{ВН} = 1$;

$K_{Д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ($K_{Д} = 1-1,2$; в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К} \quad (25)$$

где $T_{КД}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{К}$ – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}} \quad (26)$$

где ТКАЛ – календарные дни (ТКАЛ = 365);

ТВД – выходные дни (ТВД = 52);

ТПД – праздничные дни (ТПД = 10).

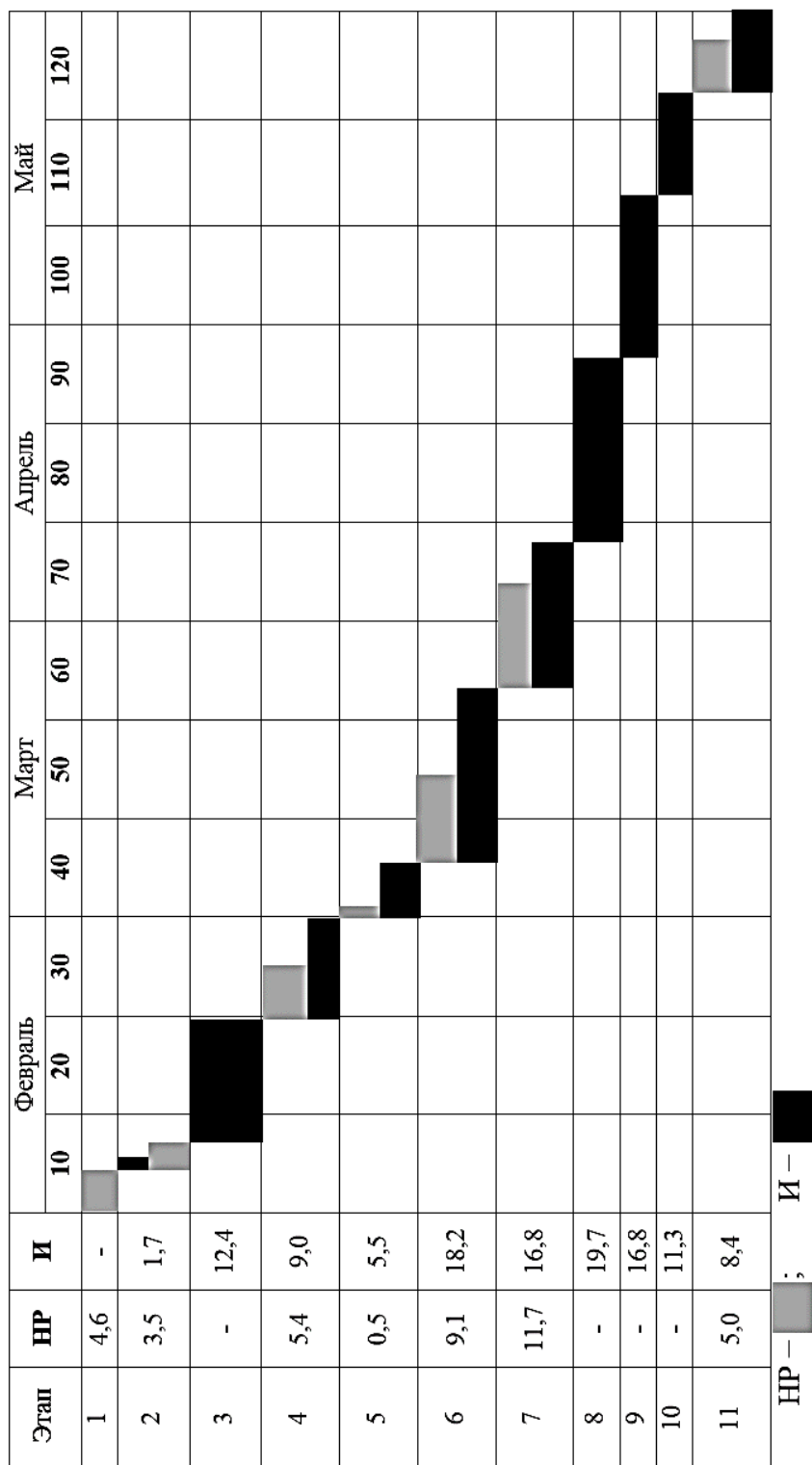
$$T_K = \frac{365}{365-52-10} = 1,205 \quad (27)$$

В таблице 12 приведен пример определения продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах (3–5) реализован экспертный способ по формуле (26), при использовании формулы (27) необходимо вставить в таблицу дополнительный столбец для tr_{prob} . Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоемкости этапа для каждого из двух участников проекта (научный руководитель и инженер) с учетом коэффициента $KД = 1,2$. Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение $тож \cdot KД$. Столбцы 8 и 9 содержат те же трудоемкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на ТК (здесь оно равно 1,212). Итог по столбцу 5 дает общую ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоемкости для каждого из участников проекта. Две последних величины далее будут использованы для определения затрат на оплату труда участников и прочие затраты. Величины трудоемкости этапов по исполнителям ТКД (данные столбцов 8 и 9 кроме итогов) позволяют построить линейный график осуществления проекта – см. пример в табл. 12.

Таблица 12 - Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни				Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
						Трд			
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$		НР	И	НР	И
1	2	3	4	5		6	7	8	9
Постановка задачи	НР	2	5	3,2		3,8	-	4,6	-
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	3	2,4		2,9	1,4	3,5	1,7
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	9	13	8,6		-	10,3	-	12,4
Разработка календарного плана	НР, И	5	8	6,2		4,5	7,4	5,4	9,0
Обсуждение литературы	НР, И	3	5	3,8		0,5	4,6	0,5	5,5
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	12	18	12,6		7,6	15,1	9,1	18,2
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	10	14	11,6		9,7	13,9	11,7	16,8
Расчет принципиальной схемы устройства	И	12	16	13,6		-	16,3	-	19,7
Оформление расчетно- пояснительной записки	И	11	15	11,6		-	13,9	-	16,8
Оформление графического материала	И	7	9	7,8		-	9,4	-	11,3
Подведение итогов	НР, И	5	7	5,8		4,2	7,0	5,0	8,4
Итого:				87,2		33,1	99,4	39,9	119,7

Таблица 13 - Линейный график работ



5.2.1 Расчет накопления готовности проекта

Цель данного пункта – оценка текущих состояний (результатов) работы над проектом. Величина накопления готовности работы показывает, на сколько процентов по окончании текущего (i-го) этапа выполнен общий объем работ по проекту в целом.

Введем обозначения:

ТР_{общ.} – общая трудоемкость проекта;

ТР_i (ТР_k) – трудоемкость i-го (k-го) этапа проекта, $i = \overline{1, I}$;

ТР_{iH} – накопленная трудоемкость i-го этапа проекта по его завершении;

ТР_{ij} (ТР_{kj}) – трудоемкость работ, выполняемых j-м участником на i-м этапе, здесь $j = \overline{1, m}$ – индекс исполнителя, в нашем примере $m = 2$.

Степень готовности определяется формулой (5.5)

$$СГ_i = \frac{ТР_i^H}{ТР_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i ТР_k}{ТР_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m ТР_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m ТР_{km}}. \quad (28)$$

Применительно к таблице (5.2) величины ТР_{ij} (ТР_{kj}) находятся в столбцах (6, j = 1) и (7, j = 2). ТР_{общ.} равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов. Пример расчета ТР_i (%) и СГ_i (%) на основе этих данных содержится в таблице (14).

Таблица 14 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого типа

Этап	ТР _i , %	СГ _i , %
Постановка задачи	2,9	2,9
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	3,3	6,2
Подбор и изучение материалов по тематике	7,8	13,9
Разработка календарного плана	9,0	22,9

Обсуждение литературы	3,8	26,7
Выбор структурной схемы устройства	17,1	43,8
Выбор принципиальной схемы устройства	17,9	61,7
Расчет принципиальной схемы устройства	12,3	74,0
Оформление расчетно-пояснительной записки	10,5	84,5
Оформление графического материала	7,1	91,6
Подведение итогов	8,4	100,0

5.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

5.2.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это $5 \div 20 \%$. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в указанных границах. Пример см. в табл. 15

Таблица 15 - Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	300	1 уп.	300
Картридж для принтера	1300	1 шт.	1300
Среда Arduino IDE 1.6.7	0	1 экз.	0
Лицензия ППП MatLab 2015a	0	1 экз.	0
Плата с AVR микроконтроллером	1340	1 шт.	1340
Расширительный модуль	1990	1 шт.	1990
Монтажная плата	390	1 шт.	390
Силовой модуль 2А	740	1 шт.	740
УЗ датчики	250	4 шт.	1000
Соединительные провода (набор)	350	1 шт.	350
Аккумулятор	1600	2 шт.	3200
Servo Corona DS339HV	1200	12 шт.	14400
Итого:			25010

Допустим, что ТЗР составляют 10 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны $S_{\text{мат}} = 25010 * 1,1 = 27511$ руб.

5.2.2 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера (в его роли выступает исполнитель проекта), а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Среднедневная тарифная заработная плата (ЗП_{дн-т}) рассчитывается по формуле:

$$\text{ЗП}_{\text{дн-т}} = \text{МО} / 24,83 \quad (29)$$

учитывающей, что в году 298 рабочих дней и, следовательно, в месяце в среднем 24,83 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе).

Расчеты затрат на полную заработную плату приведены в таблице 5.6. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 5.2. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: К_{ПР} = 1,1; К_{доп.ЗП} = 1,188; К_р = 1,3. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент К_и = 1,1·1,188·1,3 = 1,699. Вышеуказанное значение К_{доп.ЗП} применяется при шестидневной рабочей неделе, при пятидневной оно равно 1,113, соответственно в этом случае К_и = 1,62.

Таблица 16 - Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени , раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	23 264,86	936,97	33	1,699	52532,86
И	4500	181,3	99	1,699	30483,62
Итого:					83015,48

5.2.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, т.е. $C_{\text{соц.}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,3$. Итак, в нашем случае:

$$C_{\text{соц.}} = 83015,48 \cdot 0,3 = 24904,64 \text{ руб.}$$

5.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot ЦЭ \quad (30)$$

где $P_{\text{ОБ}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$ЦЭ$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$ – время работы оборудования, час.

Для ТПУ $ЦЭ = 5,257 \text{ руб./кВт·час (с НДС)}$.

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 5.2 для инженера (ТРД) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = \text{ТРД} \cdot K_t, \quad (31)$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к ТРД, определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение $t_{\text{об}}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{ОБ}} = P_{\text{ном.}} \cdot K_C \quad (32)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$KC \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности $KC = 1$.

Пример расчета затраты на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 17.

Таблица 17 - Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{ОБ}$, час	Потребляемая мощность РОБ, кВт	Затраты ЭОБ, руб.
Персональный компьютер	$795,2 * 0,8$ $= 636,16$	0,33	1103,62
Лазерный принтер	10	0,4	20,8
Итого:			1124,42

5.2.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта.

Используется формула

$$C_{AM} = \frac{N_A * C_{ОБ} * t_{рф} * n}{F_d}, \quad (33)$$

где N_A – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{ОБ}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР. При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т.п.;

ФД – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году. При этом второй вариант позволяет получить более объективную оценку САМ. Например, для ПК в 2015 г. (298 рабочих дней при шестидневной рабочей неделе) можно принять $ФД = 298 * 8 = 2384$ часа;

трф – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

Для ПК срок амортизации $2 \div 3$ года. Необходимо задать конкретное значение СА, например, 2,5 года. Далее определяется НА как величина обратная СА, в данном случае это $1 : 2,5 = 0,4$.

Стоимость ПК 26000 руб., время использования 795,2 часа, тогда для него $САМ(ПК) = (0,4 * 26000 * (99,4 * 8) * 1) / 2384 = 3468,99$ руб.

Стоимость принтера 5425 руб., его ФД = 500 час.; НА = 0,5; тогда его САМ (Пр) = $(0,5 * 5425 * 10 * 1) / 500 = 54,25$ руб.

Амортизация будет рассчитана общая для оборудования, использованного в макете робота, так как используются однотипные электронные компоненты. Данные компоненты подобны элементам в ПК, поэтому срок амортизации, как и для ПК, составит 2,5 года. ФД = 2384 час.; НА = 0,5; тогда его САМ (Платформы) = $(0,5 * 8455 * 200 * 1) / 2384 = 354,65$ руб.

Исключение составляет механическая часть робота (колесная платформа с двигателями). Срок амортизации механической части макета робота составляет 0,5 лет. ФД = 500 час.; НА = 2; время использования 50 часов, тогда САМ (Платформы) = $(2 * 3150 * 50 * 1) / 500 = 630$ руб.

Итого начислено амортизации 3553,24 руб.

5.2.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных)

Сюда относятся:

командировочные расходы, в т.ч. расходы по оплате суточных, транспортные расходы, компенсация стоимости жилья;

арендная плата за пользование имуществом;

оплата услуг связи;

услуги сторонних организаций.

Норма оплаты суточных – 100 руб./день.

5.2.7 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$\text{Спроч.} = (\text{Смат} + \text{Сзп} + \text{Ссоц} + \text{Сэл.об.} + \text{Сам} + \text{Спп}) \cdot 0,1$$

Для нашего примера это

$$\text{Спроч.} = (25010 + 83015,64 + 31741,64 + 1124,42 + 3553,24) \cdot 0,1 = 12193,42 \text{ руб.}$$

5.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Макет демонстрационной модели принципов КТ».

Таблица 18 - Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	Смат	25010

Основная заработная плата	Сзп	83015,64
Отчисления в социальные фонды	Ссоц	31741,64
Расходы на электроэнергию	Сэл.	1124,42
Амортизационные отчисления	Сам	3553,24
Непосредственно учитываемые расходы	Снр	0
Прочие расходы	Спроч	12193,42
Итого:		156638,4

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 156638,4$ руб.

5.2.8 Расчет прибыли

Прибыль от реализации проекта в зависимости от конкретной ситуации (масштаб и характер получаемого результата, степень его определенности и коммерциализации, специфика целевого сегмента рынка и т.д.) может определяться различными способами. Если исполнитель работы не располагает данными для применения «сложных» методов, то прибыль следует принять в размере $5 \div 20 \%$ от полной себестоимости проекта. В нашем примере она составляет 31327,68 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

5.2.9 Расчет НДС

НДС составляет 18% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это $(156638,4 + 31327,68) * 0,18 = 33833,9$ руб.

5.2.10 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае

$$\text{ЦНИР(КР)} = 156638,4 + 31327,68 + 33833,9 = 221799,98 \text{ руб.}$$

5.3 Оценка экономической эффективности проекта

Оценка экономического эффекта выходит за рамки представленной работы и предполагает отдельного системного исследования. При этом оценка может носить условно-прогнозный характер.

Разрабатываемая система управления роботом с использованием автономной и глобальной навигационных систем может быть использована в роботах разного назначения. Выполнять разного рода задачи, где требуется автономное движение по маршруту. Замена оператора, который управляет роботом как водитель внутри, а также замена дистанционному управлению со станции оператором, в зависимости от габаритов и назначения робота.

5.3.1 Оценка научно-технического уровня НИР

Научно-технический уровень характеризует влияние проекта на уровень и динамику обеспечения научно-технического прогресса в данной области. Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности, планируемых и выполняемых НИР, используется метод балльных оценок. Балльная оценка заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале присваивается определенное количество баллов. Обобщенную оценку проводят

по сумме баллов по всем показателям. На ее основе делается вывод о целесообразности НИР.

Сущность метода заключается в том, что на основе оценок признаков работы определяется интегральный показатель (индекс) ее научно-технического уровня по формуле:

$$K_{\text{НТУ}} = \sum_{i=1}^3 R_i \cdot n_i, \quad (34)$$

где ИНТУ – интегральный индекс научно-технического уровня;

R_i – весовой коэффициент i -го признака научно-технического эффекта;

n_i – количественная оценка i -го признака научно-технического эффекта, в баллах.

Таблица 19 - Весовые коэффициенты признаков НТУ

Признаки научно-технического эффекта НИР	Характеристика признака НИР	R_i
Уровень новизны	Систематизируются и обобщаются сведения, определяются пути дальнейших исследований	0,4
Теоретический уровень	Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий, устройство, вещество и т.п.)	0,1
Возможность реализации	Время реализации в течение первых лет	0,5

Таблица 20 - Баллы для оценки уровня новизны

Уровень новизны	Характеристика уровня новизны – n1	Баллы
Принципиально новая	Новое направление в науке и технике, новые факты и закономерности, новая теория, вещество, способ	8 – 10
Новая	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия дополняют ранее полученные результаты	5 – 7
Относительно новая	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	2 – 4
Не обладает новизной	Результат, который ранее был известен	0

Таблица 21 - Баллы значимости теоретических уровней

Теоретический уровень полученных результатов – n2	Баллы
Установка закона, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблемы, многоспектральный анализ взаимодействия между факторами с наличием объяснений	8
Разработка способа (алгоритм, программа и т. д.)	6
Элементарный анализ связей между фактами (наличие гипотезы, объяснения версии, практических рекомендаций)	2
Описание отдельных элементарных факторов, изложение наблюдений, опыта, результатов измерений	0,5

Таблица 22 – Возможность реализации результатов по времени

Время реализации – пЗ	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2

Так как все частные признаки научно-технического уровня оцениваются по 10-балльной шкале, а сумма весов R_i равна единице, то величина интегрального показателя также принадлежит интервалу $[0, 10]$.

В таблице 23 указано соответствие качественных уровней НИР значениям показателя, рассчитываемого по формуле.

Таблица 23

Уровень НТЭ	Показатель НТЭ
Низкий	1-4
Средний	4-7
Высокий	8-10

Для используемого в пособии примера частные оценки уровня p_i и их краткое обоснование даны в таблице (24).

Таблица 24 - Оценки научно-технического уровня НИР

Значимость	Фактор НТУ	Уровень фактора	Выбранный балл	Обоснование выбранного балла
0,4	Уровень новизны	Относительно новая	4	Внедрение системы в российские разработки, даст возможность обеспечить дополнительной функцией робототехнические комплексы
0,1	Теоретический уровень	Разработка способа (алгоритм, программа и т. д.)	6	Разработка алгоритма и программного обеспечения для системы управления роботом в автономном режиме. Моделирование и исследование методов непосредственно при разработки системы управления
0,5	Возможность реализации	В течение первых лет	10	Быстрое наполнение базы клиентов

Отсюда интегральный показатель научно-технического уровня для нашего проекта составляет:

$$Inty = 0,4 \cdot 4 + 0,1 \cdot 6 + 0,5 \cdot 10 = 1,6 + 0,6 + 5 = 7,4$$

Таким образом, исходя из данных таблицы 24, данный проект находится на границе среднего и высокого уровня научно-технического эффекта.

Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальными потребителями данной разработки могут быть физические и юридические лица, коммерческие организации.

Сегментирование было произведено по видам работ и отраслям применения.

Были выделены такие отрасли, как образование, военная промышленность. Основные виды работ: изучение манипуляторов, построение алгоритмов выхода из лабиринтов на шагающих машинах. В качестве критериев сегментации рынка были выбраны: сферы деятельности, для которых будет осуществляться поставка робота и перечень исполняемых роботом задач.

		Исполняемая задача		
Сфера деятельности		Диагностика систем вентиляции	Перемещение в условиях пересечённой местности	Обучение
	Промышленность			
	Обеспечение общественной безопасности			
	Сфера бытового обслуживания			

Рис. 23 Карта сегментирования рынка

На сегодняшний день, на Российском рынке не представлено производство шагающих мобильных платформ, поэтому все выделенные на карте сегменты рынка являются перспективными. На первом этапе производства шагающих мобильных платформ предприятие будет ориентироваться на сферу обеспечения общественной безопасности.

Заключение

Подводя итог выпускной квалификационной работы, можно констатировать то, что все поставленные задачи были успешно достигнуты:

1) проведённый анализ известных технических решений показывает острую необходимость развития и производства робототехнических систем на территории Российской Федерации;

2) изучены все основные этапы проектирования технических объектов и реализованы на примере проектирования мобильной платформы. Разработан перечень графического материала в соответствии с нормами ЕСКД, достаточного для производства продукта;

3) проведен кинематический анализ квадропод платформы;

4) произведено математическое моделирование;

5) подобрана элементная база и разработан алгоритм движения шагающего робота. В соответствии с алгоритмом написано программное обеспечение для носимой электроники;

6) разработано программное обеспечение для взаимодействия с пользователем;

7) на основе проведённых исследований был построен прототип робота и апробированы разработанные алгоритмы.

Список публикаций

1. Репин Д. Н. Разработка алгоритмического и программного обеспечения системы управления шагающим роботом // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 9-13 Ноября 2015. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 1 - С. 294-295

2 Репин Д. Н. Разработка системы управления роботом для регламента - Роботраффик // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 9-13 Ноября 2015. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 1 - С. 296-297

3 Репин Д. Н. Разработка математической модели управления шагающей мобильной квадропод – платформой [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 12-14 Ноября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 287-288.

4 Репин Д. Н. Применение систем CAD/CAM/CAE в проектировании шагающей мобильной платформы [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 14-18 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 2 - С. 239-240.

5 Репин Д. Н. USB осциллограф на базе ATMEL TINY 45-20SU. [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 13-16 Ноября 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 270-272.

6 Репин Д. Н. Разработка шагающей мобильной платформы на основе микроконтроллера ATMEGA 1280. [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 13-16 Ноября 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 268-270.

7 Репин Д. Н. Разработка X-WALKER QUADRUPEL ROBOT платформы [Электронный ресурс] // Современная техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 15-19 Апреля 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - Т. 2 - С. 335-336.

8 Репин Д. Н. , Мамонова (Степанченко) Т. Е. Моделирование системы обнаружения утечек на основе датчика разности во времени давления. [Электронный ресурс] // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 13-16 Ноября 2012. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012 - С. 253-255.

9 Репин Д. Н. Решение задачи стабилизации перевернутого маятника средствами SIMULINK // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25-26 Марта 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 20-22

10 Репин Д. Н. Алгоритм управления шагающей мобильной платформой // Технологии Microsoft в теории и практике программирования : сборник трудов XI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 23-24 Апреля 2014. - Томск: Томский политехнический университет, 2014 - С. 42-44

11 Гребенников А. В. , Репин Д. Н. , Черных А. А. Разработка четырехроторного беспилотного летательного аппарата. // Технологии Microsoft

в теории и практике программирования: сборник трудов X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 19-20 Марта 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 35-37

12 Репин Д. Н. , Гребенников А. В. Разработка шагающей мобильной платформы. // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сборник трудов X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 19-20 Марта 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 46-48

Список использованных источников

1. Россия 21 века. [Электронный ресурс. Дата обращения 20.04.15]. Режим доступа: <http://21russia.ru/article/>
2. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. — М.: Наука, 1978. — 400 с
3. Солнцев Ю. П., Вологжанина, С. А., Иголкин "Материаловедение" — Москва, Издательство: "Академия", 2012 - 496 стр.
4. Малюх В. Н. Введение в современные САПР: Курс лекций. — М.: ДМК Пресс, 2010.
5. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
6. Быков А. В., Силин В. В., Семенников В. В., Феоктистов В. Ю. ADEM CAD/CAM/TDM. Черчение, моделирование, механообработка. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
7. Артоболевский. И.И. Теория механизмов и машин: Учеб. для втузов. - 4-е изд., перераб. и доп. //М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988г. -640 с.
8. Юревич Е.И.. Основы робототехники 2-ое издание // БХВ-Петербург, 2005г. - 203 стр.
9. Официальный сайт Arduino [Электронный ресурс]. URL: <http://arduino.cc> Режим доступа: свободный (дата обращения: 2.03.2014)
10. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие - ; Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. — 36 с.
11. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.

12. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
13. Карпунин М.Г. и Майданчик Б.И.. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / - М.: Энергия, 1980. - 175 с.
14. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.
15. СанПиН 2.22.542-96 Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электро-вычислительным машинам и организации работы. М.: Госкомсанэпиднадзор, 1996. – 55с.
16. СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение. М.: 1995. - 35 с. – (Строительные нормы и правила РФ).
17. Расчет искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех специальностей. - Томск: Изд. ТПУ, 2004. - 15 с
18. НПВ 105-95 Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений, 1995 г.
19. Безопасность жизнедеятельности: Справочное пособие по дипломному проектированию / Под редакцией Иванова Н.И. и Фадына И.М. – СПб.: БГТУ, 1995 г.
20. ГОСТ Р 12.1.038-82 «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты». - М.: Госстандарт России, 1985
21. ГОСТ Р 12.1.019-2009. «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов». - М.: Госстандарт России, 2010.
22. Уилли Соммер. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freeduino. //Санкт – Петербург, 2012г. – 256с.
23. Белов А.В., Конструирование устройств на микроконтроллерах // СПб: наука и техника 2005.

24. ГОСТ 2.125-88 «правила выполнения эскизных документов» в редакции 2001г

25. ГОСТ 2.102-68 «виды и комплектность конструкторских документов» в редакции 2001г.

26. ГОСТ 2.701-84 «Схемы, виды и типы, общие требования к выполнению» в редакции 2001г.

Приложение (А)

Раздел

The design of the robot

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ41	Репин Дмитрий Николаевич		

Консультант кафедры _____ (ИКСУ) _____ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рудницкий Владислав Александрович	к.т.н., доцент		

Консультант – лингвист кафедры _____ (ИЯИК) _____ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ст. преп.	Бутакова Татьяна Ивановна			

2 THE DESIGN OF THE ROBOT

2.1 Introduction

There are several types of robots that are used to move the legs. Each robot type has its own advantages and disadvantages. Each robot has its own purpose. Further we will compare the robot design of two kinds of robot:

1. **Hexapod** is a six-legged walking robot that should not be confused with a Stewart platform (see Figure 1), a kind of parallel manipulator used in robotics applications. The hexapod robot is a mechanical vehicle that walks on six legs. Since a robot can be statically stable on three or more legs, the hexapod robot has a great deal of flexibility in how it can move. If legs become disabled, the robot may still be able to walk. Furthermore, not all of the robot's legs are needed for stability; other legs are free to reach new foot placements or manipulate a payload.

Many hexapod robots are biologically inspired by Hexapoda locomotion. Hexapods may be used to test biological theories about insect locomotion, motor control, and neurobiology.



Figure 1. Hexapod robot.

2. **Quadrapod** robot should not be confused with Quadruped, an animal (especially mammal) with four legs (limbs) for locomotion. The quadrapod is a machine (robot) with four legs for locomotion. Its examples are:

Lynxmotion (one of the oldest manufacturers of robot kits, see Figure 2, and Chebyushev Walking Machine.

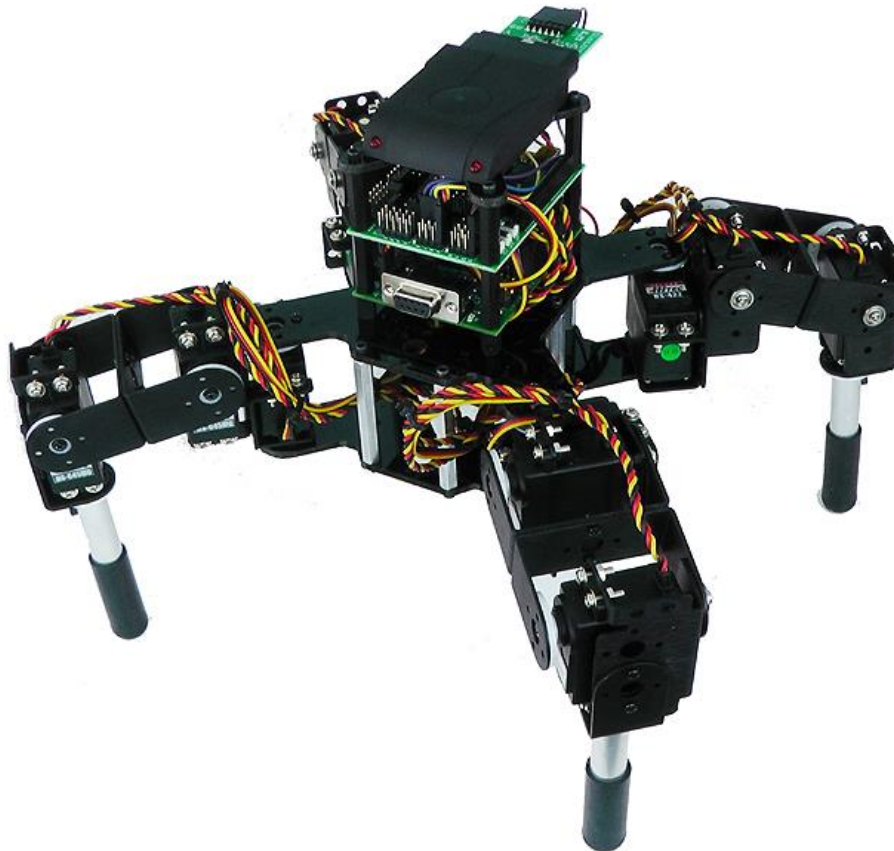


Figure 2. Quadrapod robot.

Table 1 shows that the second type of robot Quadrapod has more positive characteristics than the first one, Hexapod.

Table 1 Comparison table

Characteristics	Hexapod Robot	Quadrapod Robot
material expenditures	-	+
manufacturing complexity	-	+
source of power	-	+
weight	-	+

marching speed	-	+
passive power consumption	-	+
control system	+	-
precision control	+	+
the price of the component parts	-	+

2.2 Robot dimensions

Dimensions and weight of the robot is the most important characteristics of robot design. The length and weight of the legs determine the engine power to move. The necessary power for the rotation is called torque. The torque depends on the body material.

We will compare two metals to make body of the robot. The important characteristics of the materials are shown in Table 2.

Table 2. Materials comparison.

Characteristics	Stainless Steel	Aluminum
material density	$7,86g / cm^3$	$2,69g / cm^3$
material hardness	57 HRC	32 HRC
material elasticity	$1,2 \cdot 10^5 MPa$	$1,09 \cdot 10^5 MPa$

The Table above shows that aluminum is a less hard but lighter material. Elasticity coefficients of two materials are equal. Thus, we can conclude that aluminum is a better material to make the robot body from.

2.3 Robot design features

Figure 3 shows a general view of the robot. If we expand the robot's legs in line, the distance from the foot to the foot in diagonal is 0.5 meters.

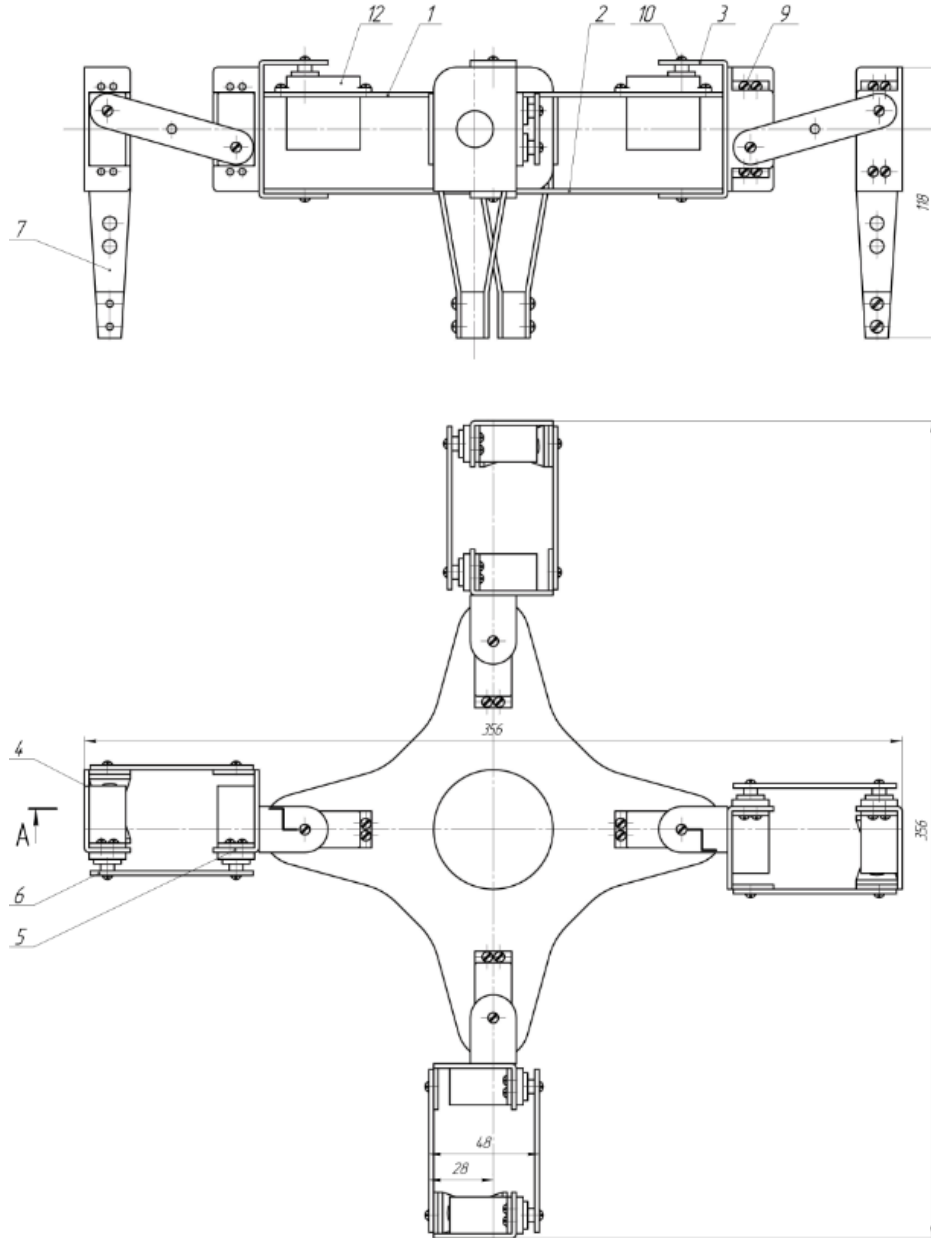


Figure 3. General view of the robot.

Three motors are mounted on the robot foot. Motor rotation axes are orthogonal to each other. The orthogonal position complicates the design. We offered

a universal supporting bracket (Figure 4). The bracket allows is to set the motor to rotate to any angle.

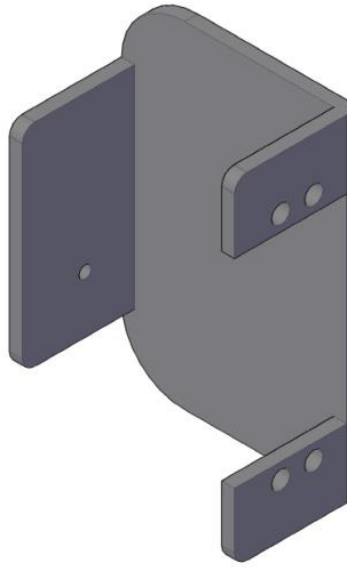


Figure 4. Universal supporting bracket.

The shape of the robot body restricts the movement of the robot legs. Size influences the working zone of legs. If the shape of the body is square, the leg can rotate 100 degrees. We made the body in the shape of a star. The star shape allows us to rotate the robot leg 240 degrees (Figure 5).

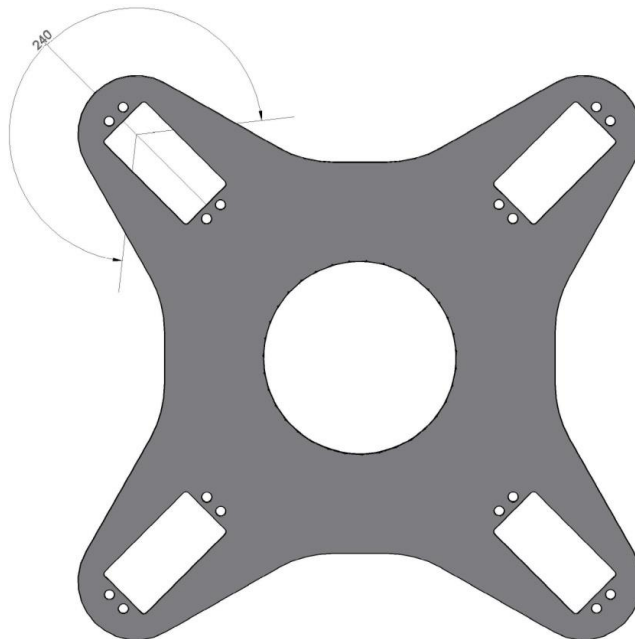


Figure 5. Body robot.

2.4 Computer-aided design (CAD) model

Drawing documentation was made in AutoCAD and Inventor programs. AutoCAD and Inventor is a commercial software's application for 2D and 3D CAD and drafting. AutoCAD is used across a wide range of industries, by architects, project managers, engineers, graphic designers, and other professionals. Isometric view the drawing was made in AutoCAD (Figure 6). The Inventor calculated the material weight.

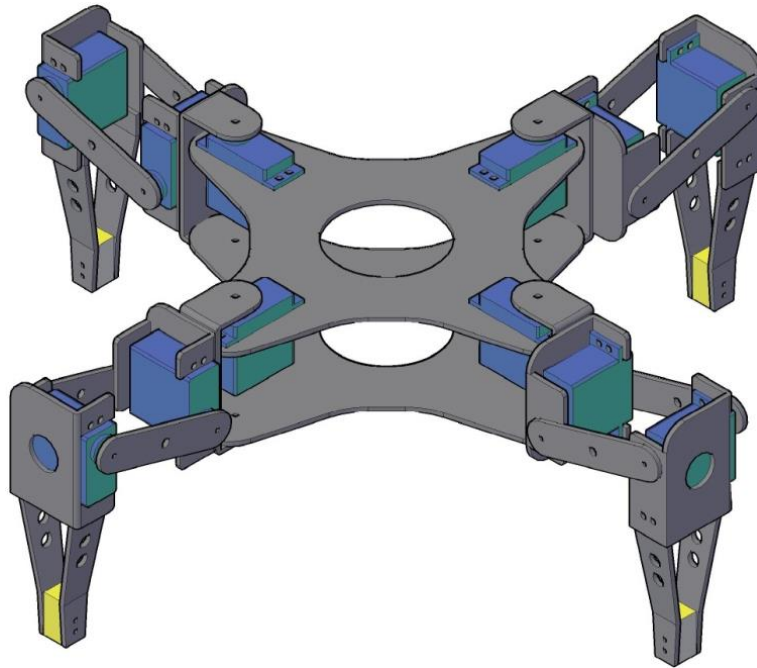


Figure 6. Isometric view

The estimated mass of the greatest parts was 360 grams. The projection scan of all details was made automatically (see Figure 7). The scan was used for cutting parts of the machine.

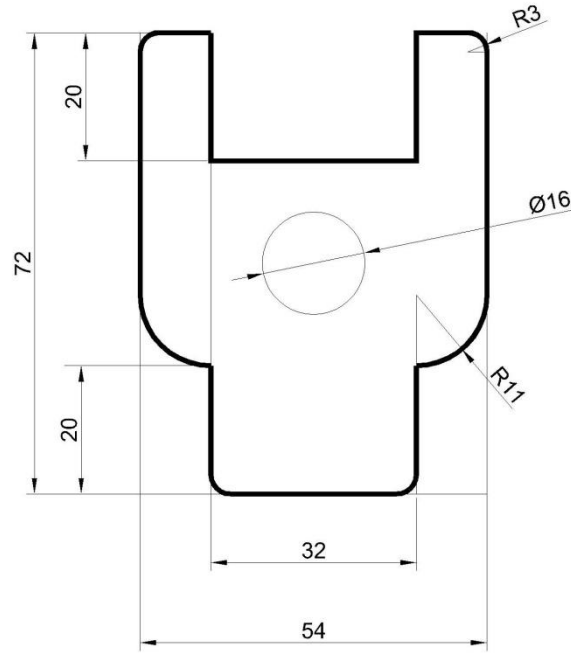


Figure 7. Scanning example

2.5 Kinematic analysis

Let us introduce the following notation where $A_1...A_4$ is a group of azimuth rotating joints (a shoulder joint); $B_1...B_4$ and $C_1...C_4$ are the groups of vertically rotating joints. Notations $h_1...h_4$ are the distances from the center of mass (M) to the joints of the group A ; $coxa_1...coxa_4$ is a length of an articulated coupling of the groups A and B ; $femur_1...femur_4$ is a length of an articulated coupling of groups B and C ; $tibia_1...tibia_4$ is a length of the end link of a robot leg; and $P_1...P_4$ are the robot feet (see Figure 7).

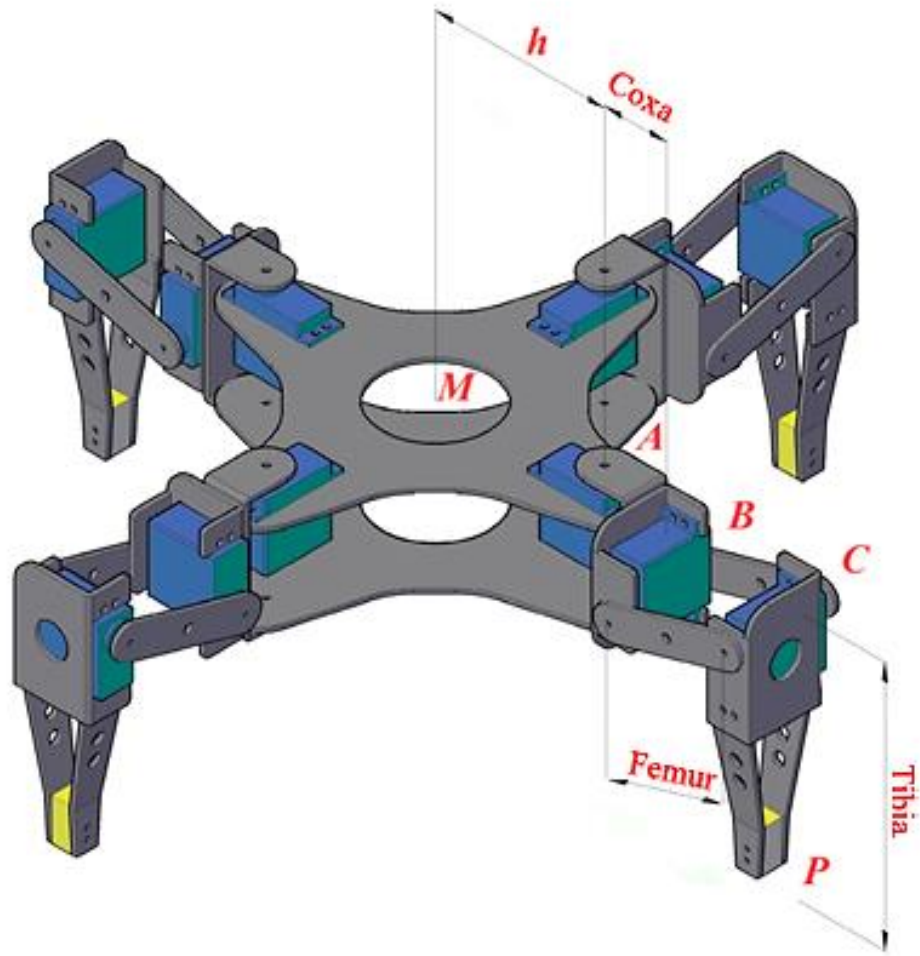


Figure 8. Motion rod identification.

To check the kinematic characteristics let us conduct the kinematic analysis of robotic mechanisms. The kinematic analysis is the analytical and graphical calculation process. The result of this process is the position finding of motion rod, the link displacement and the rotary traverse [7]. This procedure is needed to determine the motion law, which estimates the link movement pattern in the operational space.

Let us review the direct and the inverse kinematic problems solution. The direct kinematic problem is a calculation of location (x_p, y_p, z_p) , the end link of the mechanism by its kinematic scheme and the value of the internal coordinates

$(q_1, q_2 \dots q_n)$, by the position datum (x_p, y_p, z_p) of the end link of the mechanism by the familiar kinematic scheme [7].

To solve the direct kinematic problem we should represent the mechanism by a three-dimensional kinematic scheme. As the mechanism is symmetrical, we are to review only one robot limb (Figure 8).

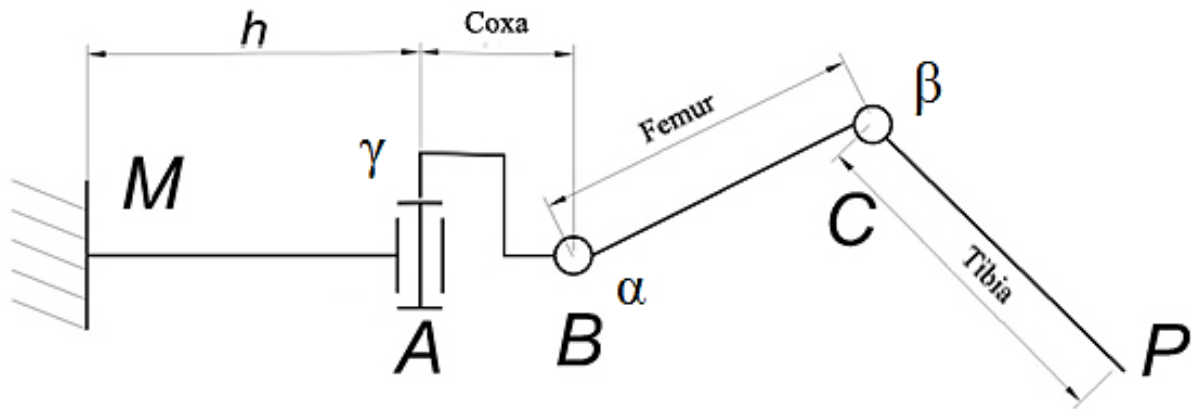


Figure 8. Kinematic scheme of robot limb.

Let us set the parameters by the Denavit-Hartenberg method. We need to attach the reference frames to the links according to the rules:

- 1) z_n -axis is in the direction of the joint axes n and $n+1$;
- 2) x_n -axis is parallel to the common normal: z_n and z_{n-1} ;
- 3) y_n -axis elaborates the systems up to the right-hand system [7].

The axes position according to the Denavit-Hartenberg method is presented in Figure 8. To place the absolute axis we choose A joint, because M is not a movable robot link and is presented as an anchorage.

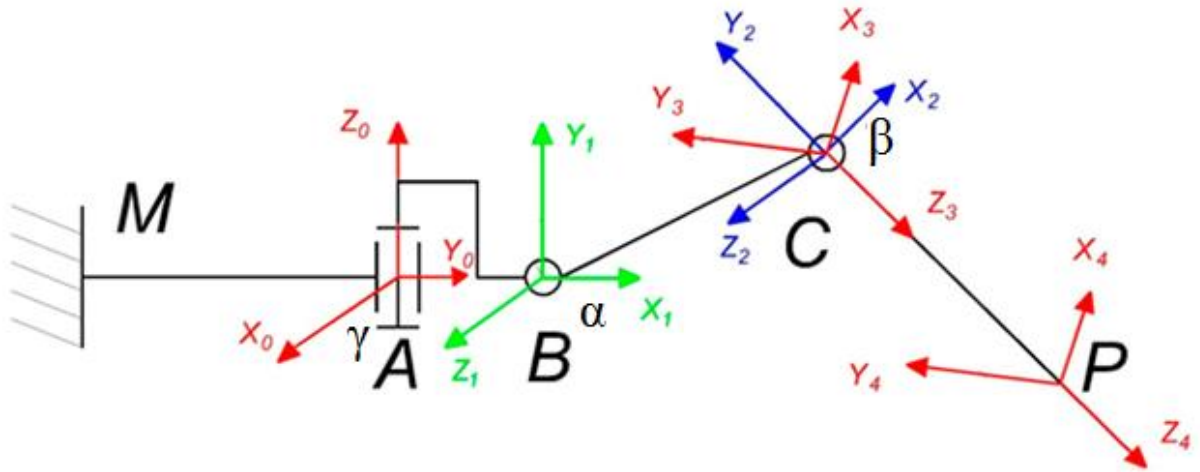


Figure 9. Axis placement according to Denavit-Hartenberg method.

The axes placement according to the Denavit-Hartenberg method guarantees the transition from any $n-1$ system to n - system using the following parameters:

- 1) by the rotation of the $n-1$ system about axis z_{n-1} for θ_n angle till the alignment of x_n and x_{n-1} ;
- 2) by the transition about the z_{n-1} axis to the S_n distance till the conformity on the x_n and x_{n-1} ;
- 3) by the transition about x_n axis to the a_n distance till the conformity on the n и $n-1$;
- 4) by the rotation around x_n axis and α_n angle till the alignment.

The rules noted above determine the transformation matrix T_n regularity, which is $4 \cdot 4$. The transition matrix has a standard form:

$$T_n = \begin{pmatrix} \cos(\theta_n) & -\sin(\theta_n) \cdot \cos(\alpha_n) & \sin(\theta_n) \cdot \sin(\alpha_n) & a_n \cdot \cos(\theta_n) \\ \sin(\theta_n) & \cos(\theta_n) \cdot \cos(\alpha_n) & -\cos(\theta_n) \cdot \sin(\alpha_n) & a_n \cdot \sin(\theta_n) \\ 0 & \sin(\alpha_n) & \cos(\alpha_n) & S_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Let us find the transition matrix indexes for the transformations depicted in Figure 9 As there are three transformations, there will be three matrixes.

The determined indexes are presented in Table 3.

Table 3. Indexes of transition matrixes.

	θ_n	S_n	a_n	α_n
T_1	$\frac{\pi}{2} + \gamma$	0	<i>coxa</i>	$\frac{\pi}{2}$
T_2	α	0	<i>femur</i>	0
T_3	$\frac{\pi}{2} + \beta$	0	0	$\frac{\pi}{2}$
T_4	0	<i>tibia</i>	0	0

Taking into account the indexes the matrixes T_1, T_2, T_3, T_4 are as follows:

$$T_1 = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma) & 0 & \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma) & coxa \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma) \\ \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma) & 0 & -\cos(\frac{\pi}{2} + \gamma) & coxa \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$T_1 = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma) & 0 & \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma) & coxa \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma) \\ \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma) & 0 & -\cos(\frac{\pi}{2} + \gamma) & coxa \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$T_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & tibia \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

To find the radius vector we are to subsequently multiply the transition matrixes. The result is in the last column of the matrix. The following formulas present the axes finding:

$$\begin{aligned}
 x &= coxa \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) + tibia \cdot [\cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \sin(\gamma) + \\
 &+ \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \cos(\gamma)] + femur \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \cos(\alpha); \\
 y &= coxa \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) + tibia \cdot [\cos\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \sin(\alpha) + \\
 &+ \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \cdot \cos(\alpha)] + femur \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \cos(\alpha); \\
 z &= femur \cdot \sin(\alpha) - tibia \cdot \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \cdot \cos(\alpha) - \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \cdot \sin(\alpha) \right].
 \end{aligned}$$

The presented formulas are the solution of the direct kinematic problem for the robot limbs about the absolute axis. The current system is oriented along the limb. We need to present the end axis in the system connected with the center of mass for computational convenience. For this purpose we add additional rotation matrix T_m . We need to place x_M, y_M, z_M axes to the center of mass as shown in Figure 10:

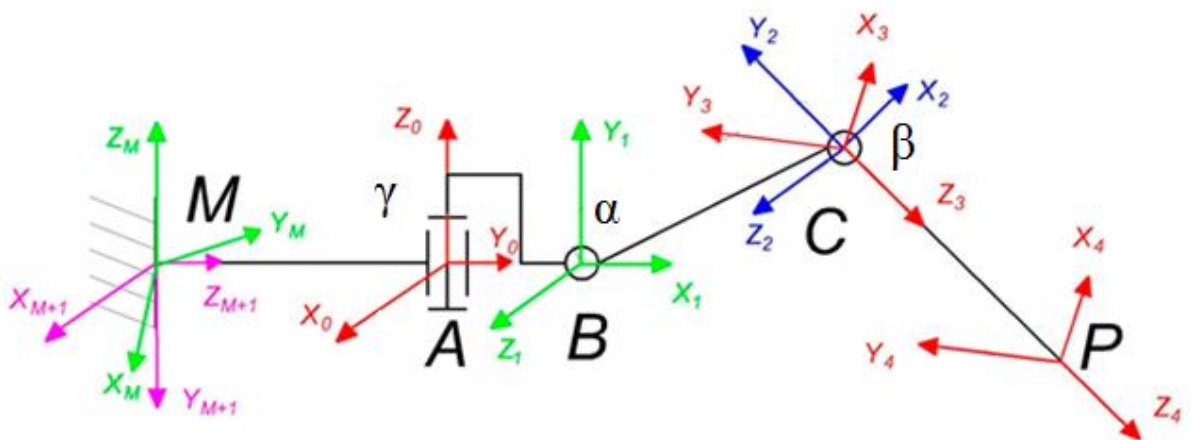


Figure 10. Placement of axes along the center of mass.

Let us compose transition matrix T_M and additional matrix T_{M+1} , which shows the found parameters in system x_0, y_0, z_0 in new axes x_M, y_M, z_M , taking into account the location of the center of mass (45° relative to the shoulder joint). The matrix indexes are presented in the Table 4.

Table 4. Indexes of transition matrix.

	θ_n	S_n	a_n	α_n
T_M	$-\frac{\pi}{4}$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
T_{M+1}	0	h	0	$\frac{\pi}{2}$

The formulas for the parameters of the robot feet relative to the center of mass are as follows:

$$\begin{aligned}
 x = & \text{tibia} \cdot \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \cdot \sin(\alpha) \cdot \left[\frac{\sqrt{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right)}{2} + \frac{\sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right)}{2} \right] + \right. \\
 & + \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \cdot \cos(\alpha) \cdot \left[\frac{\sqrt{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right)}{2} + \frac{\sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right)}{2} \right] + \frac{\sqrt{2} \cdot h}{2} + \\
 & + \frac{\sqrt{2} \cdot \text{coxa} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right)}{2} + \frac{\sqrt{2} \cdot \text{coxa} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right)}{2} + \text{femur} \cdot \cos \alpha \cdot \left[\frac{\sqrt{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right)}{2} + \right. \\
 & \left. + \frac{\sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right)}{2} \right] \Big];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y = & \frac{\sqrt{2} \cdot h}{2} - tibia \cdot [\cos(\frac{\pi}{2} + \beta) \cdot \sin(\alpha) \cdot [\frac{\sqrt{2} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} - \frac{\sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2}] + \\
& + \sin(\frac{\pi}{2} + \beta) \cdot \cos(\alpha) \cdot [\frac{\sqrt{2} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} - \frac{\sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2}]] + \frac{\sqrt{2} \cdot coxa \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} + \\
& + \frac{\sqrt{2} \cdot coxa \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} - femur \cdot \cos \alpha \cdot [\frac{\sqrt{2} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2} - \frac{\sqrt{2} \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \gamma)}{2}]; \\
z = & femur \cdot \sin(\alpha) - tibia \cdot \left[\cos(\frac{\pi}{2} + \beta) \cdot \cos(\alpha) - \sin(\frac{\pi}{2} + \beta) \cdot \sin(\alpha) \right].
\end{aligned}$$

As can be seen from the above, the parameters of the robot feet are found in two reference systems: 1) relative to the shoulder joint; 2) relative to the center of mass. The first ones are used for the spatial motion of the robot foot, the other are used to change the placement of the center of mass.

The inverse kinematic problem is used when there is a mechanism consisted from the several links and is needed to transit the actuating element in the given point. Using the inverse kinematics for any multilink object, we can compose the simultaneous equations, describing the placement of the joints in space and find the needed rotation joint angles. People use the inverse problem solution every day without elaborating. For example, to take a cup from a table, our brain sends the information to muscles, which make the rotations by the estimated angle in the joints: shoulders, elbows, wrists, fingers. Consequently, the cup will be in our hands. The system of equations, which can be composed for the human hand, is more difficult than the system of the robot limb. The difficultness of the equations is in direct proportion to the quantity of the links of the described object.

To find the solution of the inverse kinematic problem, we introduce the conditional constraints, as in the case of the inverse problem we have multiple solutions. These constraints are the physical rotation angles of the servo system:

3) for the group of horizontally rotation joints ($A_1...A_4$)- 240° ;

4) for the group of vertically rotation joints ($B_1...B_4$ и $C_1...C_4$) - 90° .

The solution of the inverse kinematic problem is the product of the inverse transition matrix, from the foot to the absolute reference system:

$$R_i = T_4^{-1} \cdot T_3^{-1} \cdot T_2^{-1} \cdot T_1^{-1} \cdot T_{M+1}^{-1} \cdot T_M^{-1}.$$

The solution of the current equation by means of the available micromanagement equipment in the real-time mode is not possible. That is why the solution was found numerically. As a result the data set was formed. This limits the zones of the center of mass transition during the movement.

2.6 Solution of inverse kinematic problem

Let us review the solution of the inverse kinematic problem by the geometrical method.

For convenience, let us outline the robot limb as presented in Figures 10 and 11.

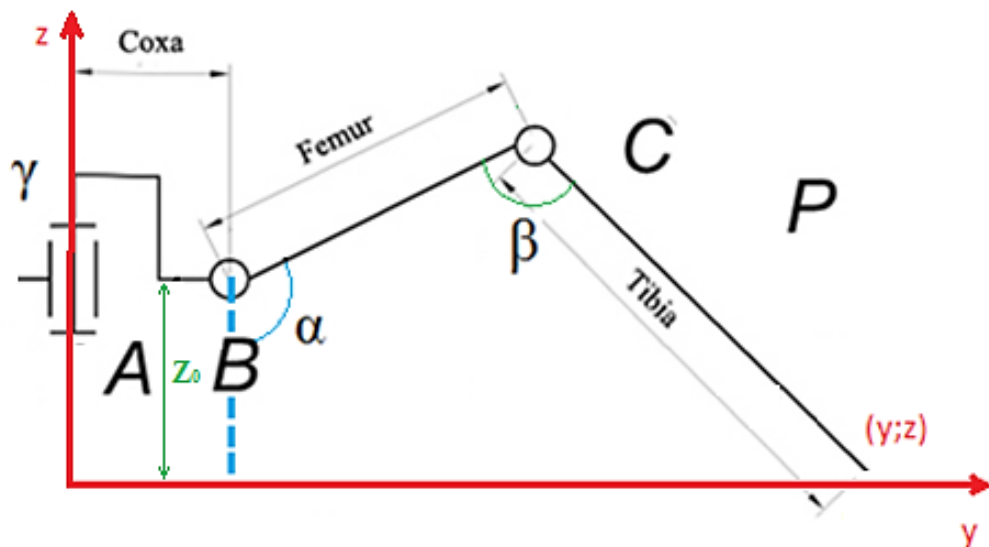


Figure 10. The right front foot in side elevation.

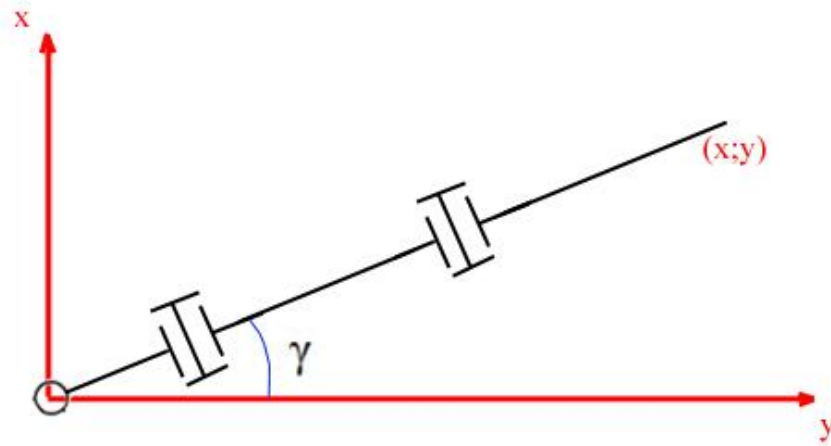


Figure 11 The right front foot

We need to find α , β , γ angles, determining which will reach the point of x , y , z axes. Basic data for the solution to the problems are the lengths of Coxa, Femur, and Tibia joints. The current quantities are the constants which cannot change the length. Angles α , β , γ are output parameters.

Let us determine the needed angles in the common view. The γ angle is easily found as the parameters on the axes x and y are known.

$$\frac{x}{y} = \tan(\gamma)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{x}{y}\right)$$

To determine angle α let we divide the geometrical figure, which is formed between Femur, Tibia, the axis, and the imaginary dotted parallel axis z as represented in Figure 12, where we can see two triangles:

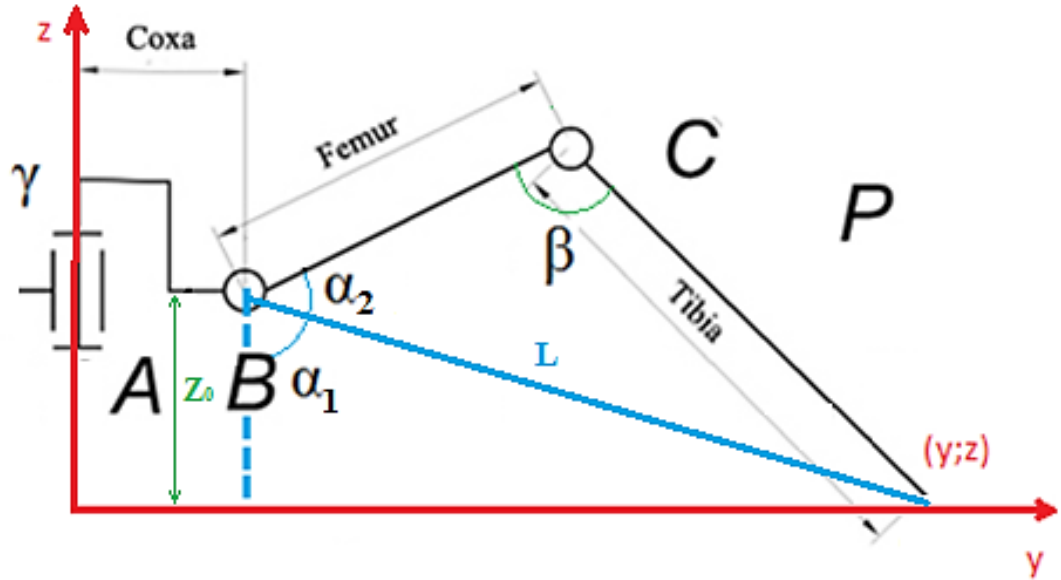


Figure 12. Division of object into triangles.

Each triangle has a hypotenuse with L length, and α_1 and α_2 angles. If we sum up these angles, we get the needed angle $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$.

The z_0 parameter is the robot start position.

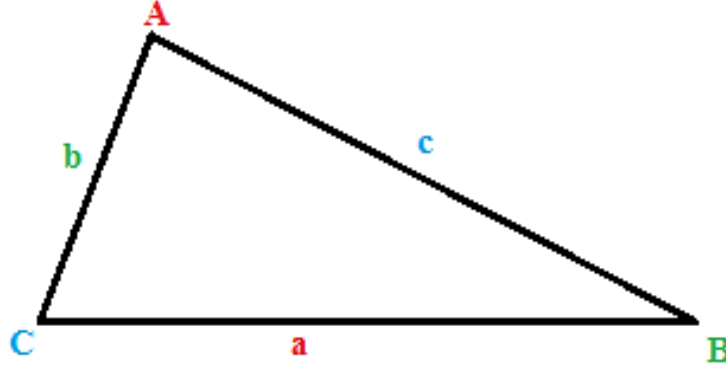
The length of hypotenuse in the common view can be found by the following formula:

$$L = \sqrt{z^2 + (y - coxa)^2}$$

Because of the found L -hypotenuse, the known z_0 - cathetus, and the right-angled triangle we can notify α_1 -angle, which is attached to the hypotenuse:

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{z_0}{L}\right)$$

To find angles α_2 and β we need to use the rules of cosine. For the triangle with the sides a , b and c and angles A, B and C, are formulated the following rules:



$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos A; \quad \cos A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cdot \cos B; \quad \cos A = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}$$

$$c^2 = b^2 + c^2 - 2ab \cdot \cos C; \quad \cos A = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$$

By using the cosine we get:

$$tibia^2 = femur^2 + L^2 - 2(femur)(L) \cdot \cos(\alpha_2)$$

Let us express α_2 :

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{tibia^2 - femur^2 - L^2}{-2(femur)(L)}\right)$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{tibia^2 - femur^2 - L^2}{-2(femur)(L)}\right)$$

Consequently we found angles α_1 and α_2 . The α -angle is equal to the sum of α_1 and α_2 , it is shown in the common view:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{tibia^2 - femur^2 - L^2}{-2(femur)(L)}\right) + \arccos\left(\frac{z_0}{L}\right)$$

Let us find the common view of the formula for the β finding:

$$L^2 = tibia^2 + femur^2 - 2(tibia)(femur)\cos(\beta)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{L^2 - tibia^2 - femur^2}{-2(femur)(tibia)}\right)$$

The final angles are stated in the common view in Table 5.

Table 5 Solution results

Angle	Formula
α	$\arccos\left(\frac{tibia^2 - femur^2 - L^2}{-2(femur)(L)}\right) + \arccos\left(\frac{z_0}{L}\right)$
β	$\arccos\left(\frac{L^2 - tibia^2 - femur^2}{-2(femur)(tibia)}\right)$
γ	$\arctan\left(\frac{x}{y}\right)$

Приложение Б

«Мобильная шагающая квадропод–платформа»

Сборочный чертёж

ДП 621.865.8 – 182.3