

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.06 Мехатроника и робототехника
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы			
Разработка программно-аппаратного обеспечения управления мобильным роботом			
УДК 004.415.2:004.42:004.942:621.865.8-182.3			
Студент			
Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Е62	Киселева Дарья Владимировна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Мамонова Татьяна Егоровна	К.Т.Н.		

Консультант

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

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Матвиенко Владимир Владиславович			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Мамонова Татьяна Егоровна	К.Т.Н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие естественно-научные, математические знания в области анализа, синтеза и проектирования для решения научных и инженерных задач производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств и систем, в том числе их систем управления
P2	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств и систем, принимать участие в командах по разработке и эксплуатации таких устройств и систем
P3	Применять полученные знания для решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных мехатронных и робототехнических устройств и систем (в том числе интеллектуальных) с использованием технологий мирового уровня, современных инструментальных и программных средств
P4	Определять, систематизировать и получать необходимую информацию в области проектирования, производства, исследований и эксплуатации мехатронных и робототехнических модулей, устройств и систем
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования для целей проектирования, производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических средств и систем с использованием передового отечественного и зарубежного опыта, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы
<i>Универсальные компетенции</i>	
P6	Интегрировать знания в области анализа, проектирования, производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств и систем со знаниями из смежных областей
P7	Понимать используемые современные методы, алгоритмы, модели и технические решения в мехатронике и робототехнике и знать области их применения, в том числе в автоматизированных производствах.
P8	Эффективно работать в профессиональной деятельности индивидуально и в качестве члена команды
P9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий
P10	Проявлять широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, демонстрировать понимание вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду.
P11	Следовать кодексу профессиональной этики и ответственности и международным нормам инженерной деятельности
P12	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности

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

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.06 Мехатроника и робототехника
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники
 Уровень образования – бакалавриат
 Период выполнения – осенний/весенний семестр 2019/2020 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.05.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
25.04.2020	Основная часть	60
04.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
13.05.2020	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Мамонова Татьяна Егоровна	к.т.н.		

Консультант (при наличии)

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

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Мамонова Татьяна Егоровна	к.т.н.		

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Обзор и анализ существующих решений. 2) Разработка структурной схемы. 3) Выбор программных и аппаратных компонентов. 4) Разработка функциональной схемы. 5) Построение системы приема-передачи данных между компонентами системы. 6) Вывод математической модели мобильной платформы. 7) Разработка алгоритма снятия параметров математической модели.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Структурная схема, функциональная схема</p>

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Конотопский Владимир Юрьевич, доцент ОСГН ШБИП, к.э.н.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Матвиенко Владимир Владиславович, ассистент ООД ШБИП</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p> </p>	
<p> </p>	
<p> </p>	

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

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

<p>Должность</p>	<p>ФИО</p>	<p>Ученая степень, звание</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>Ассистент ОАР ИШИТР</p>	<p>Беляев Александр Сергеевич</p>	<p> </p>	<p> </p>	<p> </p>

Задание принял к исполнению студент:

<p>Группа</p>	<p>ФИО</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>8Е62</p>	<p>Киселева Дарья Владимировна</p>	<p> </p>	<p> </p>

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

Студенту:

Группа	ФИО
8Е62	Киселевой Дарье Владимировне

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.06 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	Использовать действующие ценники и договорные цены на потребленные материальные и информационные ресурсы, а также указанную в МУ величину тарифа на эл. энергию
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	—
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Действующие ставки единого социального налога и НДС (см. МУ, ставка дисконтирования $i=0.1$)

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценка готовности полученного результата к выводу на целевые рынки, краткая характеристика этих рынков
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Построение плана-графика выполнения ВКР, составление соответствующей сметы затрат, расчет величины НДС и цены результата ВКР
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Качественная и количественная характеристика экономического и др. видов эффекта от внедрения результата, определение эффективности внедрения

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> Оценка конкурентоспособности технических решений Матрица SWOT Альтернативы проведения НИ График проведения и бюджет НИ - <u>выполнить</u> Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ - <u>выполнить</u>
--

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	К. Э. Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Е62	Киселева Дарья Владимировна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8Е62	Киселеваой Дарье Владимировне

Школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.06 Мехатроника и робототехника

Тема ВКР:

Разработка программно-аппаратного обеспечения управления мобильным роботом	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является программно-аппаратный комплекс для управления мобильной робототехнической платформой. Рабочей зоной является рабочее место оператора мобильной платформы.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).</p> <p>СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Требования к организации оборудования рабочих мест с ПК.</p> <p>ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</p> <p>СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.</p>
<p>2. Производственная безопасность:</p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Опасные и вредные факторы:</p> <p>Отклонение показателей микроклимата</p> <p>Превышение уровня шума</p> <p>Отсутствие или недостаток естественного света</p> <p>Недостаточная освещенность рабочей зоны</p> <p>Поражение электрическим током</p> <p>Повышенная напряженность электрического поля</p>

3. Экологическая безопасность:	Влияние вредных выбросов на атмосферу при производстве составных элементов системы. Негативное влияние на литосферу при утилизации составных элементов системы. Воздействие на гидросферу и селитебную зону пренебрежимо мало.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	ЧС техногенного характера – пожар (возгорание), диверсия.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Матвиенко Владимир Владиславович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8E62	Киселева Дарья Владимировна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 86 страниц, 17 рисунков, 15 таблиц, список используемых источников содержит 32 наименования.

Ключевые слова: мобильная платформа, система управления, математическая модель, обмен данными, программное обеспечение.

Цель работы – разработка программно-аппаратного обеспечения для управления мобильной робототехнической платформой Kuka YouBot.

В процессе выполнения работы был проведен анализ имеющихся систем управления мобильными роботами, была разработана структурная схема, был произведен выбор программных и аппаратных компонентов и разработана функциональная схема. Также была построена система приема-передачи данных между компонентами и выведена математическая модель мобильной платформы. Построение системы управления и модель для снятия параметров с мобильной платформы разработаны с использованием средств Matlab Simulink.

Содержание

Введение.....	12
1 Обзор аналогов.....	13
2 Разработка программно-аппаратного обеспечения для управления мобильным роботом.....	17
2.1 Цель и задачи.....	17
2.2 Разработка структурной схемы.....	17
2.3 Выбор программных и аппаратных компонентов.....	21
2.4 Функциональная схема системы управления.....	26
2.5 Система приема-передачи данных между компонентами.....	29
2.6 Математическая модель мобильной платформы.....	33
2.6.1 Кинематическая модель.....	33
2.6.2 Динамическая модель.....	36
2.6.3 Общая динамическая модель.....	40
2.7 Алгоритм снятия параметров динамической модели.....	42
2.8 Вывод по основной части.....	45
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	46
3.1 Организация и планирование работ.....	47
3.1.1 Продолжительность этапов работы.....	48
3.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта.....	54
3.2.1 Расчет затрат на материалы.....	54
3.2.2 Расчет заработной платы.....	55
3.2.3 Расчет затрат на социальный налог.....	56
3.2.4 Расчет затрат на электроэнергию.....	56
3.2.5 Расчет амортизационных расходов.....	58
3.2.6 Расчет прочих расходов.....	59
3.2.7 Расчет общей себестоимости разработки.....	59
3.2.8 Расчет НДС.....	59
3.2.9 Цена разработки НИР.....	60
3.3 Расчет экономической эффективности проекта.....	60

3.4 Вывод по финансовому менеджменту, ресурсоэффективности и ресурсосбережению	62
4 Социальная ответственность	63
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	64
4.1.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства	64
4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	64
4.2 Профессиональная социальная безопасность	65
4.2.1 Отклонение показателей микроклимата	67
4.2.2 Превышение уровня шума	68
4.2.3 Отсутствие или недостаток естественного света и недостаточная освещенность рабочей зоны.....	69
4.2.4 Поражение электрическим током.....	71
4.2.5 Повышенная напряженность электрического поля.....	72
4.3 Экологическая безопасность.....	73
4.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	73
4.3.2 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования	73
4.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	75
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	76
4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований	76
4.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при производстве объекта на предприятии	76
4.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	77
4.5 Вывод по социальной ответственности	79
Заключение	80
Conclusion.....	81
Список публикаций.....	82
Список использованной литературы.....	83

Введение

В современном мире происходит стремительный рост темпа внедрения роботов в промышленности и быту. За последний год в мире было продано более 484 тысяч промышленных роботов, а по оценкам специалистов в 2021 году это число достигнет 630 тысяч [1]. Большая часть внедренных роботов – это роботы, применяемые в помещении, то есть Indoor типа. Объемы мирового рынка Indoor роботов также стремительно растут и к 2026 году достигнут 50 миллиардов долларов [2]. В существующую статистику включены все промышленные роботы indoor типа, однако большая часть из них – это мобильные робототехнические платформы, которые внедряются в складские помещения и туда, где особенно важна скорость и точность перевозки грузов.

Повсеместно происходит замещение человека роботами и привлечение мобильных роботов для решения задач, которые ранее решались без их использования. Процесс внедрения мобильных роботов на производство очень трудоемкий. Необходимо разработать систему управления данным роботом, а также подготовить инфраструктуру помещения, в котором будет эксплуатироваться мобильный робот. Все эти задачи входят в понятие построения программно-аппаратного обеспечения управления мобильным роботом.

1 Обзор аналогов.

Основным преимуществом мобильных робототехнических платформ является их универсальность. Одни и те же мобильные платформы могут быть применены для решения различных задач, например, транспортировки грузов и построения карты местности. В зависимости от собственных характеристик, для каждой мобильной платформы может быть создана система управления для решения конкретной задачи.

Для того, чтобы познакомиться с существующими решениями по внедрению роботов на производство и склады, были рассмотрены следующие системы: складские роботы Ronavi H1500 (производство Россия), Kiva Amazon Robotics, Toru Cube, SBR robot. Все из перечисленных роботов применяются для работы в складских помещениях, однако базируются на различных алгоритмах и методах навигации в пространстве, требуют различных инфраструктурных и программных внедрений. Их интересующие особенности описаны ниже.

Мобильная платформа Ronavi H1500 предназначена для перемещения паллет и стеллажей весом до 1500 килограмм. Она оснащена поворотными колесами и способна осуществлять всенаправленное движение без поворота платформы. Навигация в помещении осуществляется за счет считывания QR-кодов на полу помещения, а обеспечение безопасности от столкновения с преградой – за счет лидара на борту платформы. Многофункциональность данной платформы обусловлена наличием у нее на борту операционной системой для роботов ROS, что позволяет легко осуществить перепрограммирование и подстройку робота для выполнения определенной задачи [3]. Изображение мобильной платформы Ronavi H1500 приведено на рисунке 1.



Рисунок 1 – Мобильная платформа Ronavi H1500

Мобильные роботы Kiva, используемые на складах Amazon являются лидерами по количеству применяемых в настоящий момент. Только в 2017 году их насчитывалось около 45 тысяч. Роботы Kiva способны перемещать грузы весом до 317 кг, оснащены неповоротным колесами и вращающейся платформой и, так же, как и Ronavi, ориентируются в пространстве по специальной разметке на полу и их бортовой компьютер оснащен операционной системой для роботов ROS [4]. На рисунке 2 представлено изображение мобильных роботов Kiva.



Рисунок 2 – Складские роботы Kiva

Мобильный робот TORU Cube так же, как и предыдущие роботы, имеет встроенную ROS, но в остальном значительно отличается от рассмотренных выше. Его система управления не требует дополнительного оснащения помещения специальными метками, робот перемещается по построенной заранее карте и по командам оператора, что не может обеспечить полную

автономность. Система безопасности робота избегает столкновения с препятствиями или человеком в рабочей зоне за счет лидаров на борту робота. Особенностью данной системы является возможность постоянного обновления карты для навигации роботов за счет соединения их в локальную беспроводную сеть. Таким образом, если один из роботов обнаружил изменение на складе или новое препятствие, данные об этом вносятся на общую карту [5]. Мобильные роботы TORU представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Мобильный робот TORU Cube

Робот SBR от Украинской компании SB Robotics собран на базе складского робота Буксир-1 компании "Стандарт-ПАК". Данные роботы предназначены для переноса грузов весом до 23 килограмм. Роботы SBR позиционируются как многофункциональные роботы-перевозчики. За счет малой грузоподъемности им сложно найти применение на складах, однако данные роботы хороши для автоматизированной курьерской доставки, в качестве работы официанта и помощников в переносе негабаритных грузов. Для перемещения внутри помещения роботу необходима разметка в виде специальных направляющих линий. Однако, так как робот оснащен микроконтроллером Arduino, его навигация может осуществляться за счет подсоединения дополнительных датчиков и настройки их обработки с помощью Arduino [6, 7]. Изображение робота SBR приведено на рисунке 4.



Рисунок 4 – Робот SBR

Основным преимуществом большинства рассмотренных систем является наличие предустановленной специализированной для конкретной модели операционной системы для робота. ROS позволяет легко перенастраивать роботов под выполнение конкретных задач, что значительно расширяет сферу применения каждой мобильной платформы, а ее распространенность позволяет разработчикам систем управления не подстраиваться под конкретную модель мобильного робота.

Из обзора существующих решений по управлению мобильными робототехническими платформами на складах, в промышленности и для иных целей был выделен недостаток, присущий не только рассматриваемым системам, но и большинству существующих на рынке решений. Основным и самым распространенным недостатком является необходимость подстройки инфраструктуры помещения для внедрения в него мобильной платформы. К таким методам подстройки относятся QR-метки на полу, направляющие линии, штрих-коды и направляющие рельсы. Все это значительно усложняет первичное внедрение роботов, а также их дальнейшую эксплуатацию, так как подобные объекты в промышленных помещениях требуют постоянного обновления, контроля и не дают возможности моментальных изменений внутри помещения.

2 Разработка программно-аппаратного обеспечения для управления мобильным роботом

2.1 Цель и задачи

Исходя из выявленного в обзоре аналогов недостатка, в рамках выпускной квалификационной работы бакалавра ставится цель разработать программно-аппаратный комплекс для управления мобильной робототехнической платформой Kuka Youbot. Для этого цель была разбита на следующие задачи:

- разработать структурную схему планируемой системы управления;
- осуществить выбор программных и аппаратных компонентов;
- разработать функциональную схему системы управления;
- построить систему приема-передачи данных между выбранными программными и аппаратными компонентами;
- вывести математическую модель используемой мобильной платформы;
- разработать алгоритм идентификации параметров математической модели.

2.2 Разработка структурной схемы

Для грамотного выбора программных и аппаратных компонентов системы необходимо в первую очередь определить требования к проектируемой системе управления и составить ее структурную схему.

При проектировании структурной схемы были проанализированы следующие требования:

- обеспечить движение мобильной платформы без использования дополнительной инфраструктуры в помещении;
- создать возможность введения в систему дополнительных датчиков, сенсоров и исполнительных элементов;

- минимизировать вычислительные ресурсы бортового компьютера мобильной платформы.

Для построения системы управления мобильным роботом необходимо в первую очередь определиться с требованиями к самому мобильному роботу. Для решения задачи по обезвешиванию солнечных панелей, робот должен передвигаться в ограниченном пространстве без препятствий, а его траектория может изменяться только в пределах данного пространства. Таким образом нет необходимости оснащать робота датчиками навигации в помещении, для предотвращения его столкновения с возможными препятствиями. Однако, так как регулировка скорости мобильной платформы носит основополагающий характер, робот, помимо двигателей, должен быть оснащен энкодерами на каждом из приводов. Для считывания и обработки данных с энкодеров, а также преобразования управляющих команд во вращение двигателей, мобильная платформа должна быть оснащена бортовым компьютером со встроенной системой управления. Таким образом, блок мобильной платформы на структурной схеме должен содержать также блок встроенной системы управления, блок двигателей и блок энкодеров.

Чтобы обеспечить движение платформы без использования дополнительной инфраструктуры, мобильный робот должен быть оснащен рядом датчиков и осуществлять движение согласно командам, подаваемым системой управления. Так как система управления, способная одновременно анализировать данные с датчиков мобильной платформы и строить динамически-меняющуюся траекторию движения робота, требует больших вычислительных ресурсов, а среди поставленных задач требуется минимизировать вычислительные ресурсы встроенного бортового компьютера, было принято решение о внедрении в систему управления мобильной платформой персонального компьютера, который будет анализировать данные с датчиков мобильной платформы, а также с внешних устройств и передавать на робота управляющие команды. Физически связь между персональным компьютером и мобильной платформой может осуществляться

проводным или беспроводным путем. В лабораторных условиях и при тестировании системы управления связь будет осуществляться проводным путем, по каналу, который предусматривает выбранная мобильная платформа, чаще всего это Ethernet. При эксплуатации системы на производстве для минимизации дополнительных устройств и проводов соединение и передача данных будет осуществляться беспроводным путем по протоколу, который предусматривает выбранная мобильная платформа, в большинстве случаев мобильные платформы оснащены Wi-Fi модулем.

Для установки связи персонального компьютера и мобильной платформы, для формирования сигналов управления для двигателей, а также для построения программной части системы управления необходимо выбрать среду разработки и методы или модели программирования. Рабочая среда может быть объединена в некоторый программный пакет, работа с которым значительно упростит процесс создания системы управления.

Одним из требований к системе является возможность внедрения в систему внешних датчиков и устройств. Для упрощения обработки сигналов внешних устройств и возможности беспрепятственного добавления в систему новых датчиков, необходимо установить в систему микроконтроллер, которые будет выполнять ЦАП и АЦП функции, а также фильтровать шумы. На стадии проектирования и тестирования, микроконтроллер должен передавать данные с внешних датчиков на персональный компьютер, а также получать с него команды для управления внешними устройствами. Связь между персональным компьютером и микроконтроллером осуществляется по поддерживаемому микроконтроллером протоколу, в большинстве случаев таким протоколом выступает USB. В дальнейшем, для упрощения эксплуатации системы микроконтроллер необходимо будет соединить с бортовым компьютером мобильной платформы.

Внешние устройства, необходимые для решения задачи обезвешивания, в разрабатываемой системе – это тензодатчики, энкодеры, а также линейный привод. Информационные и управляемые каналы данных

устройств подключаются к микроконтроллеру по стандартному протоколу MISO/MOSI.

В результате вся система состоит из четырех основных блоков: блок мобильной платформы, блок персонального компьютера, блок микроконтроллера и блок внешних устройств. Физически данные блоки соединяются между собой посредством проводных каналов связи. Обмен данными же происходит между их подблоками. На рисунке 5 представлена разработанная структурная схема, отражающая данную связь.

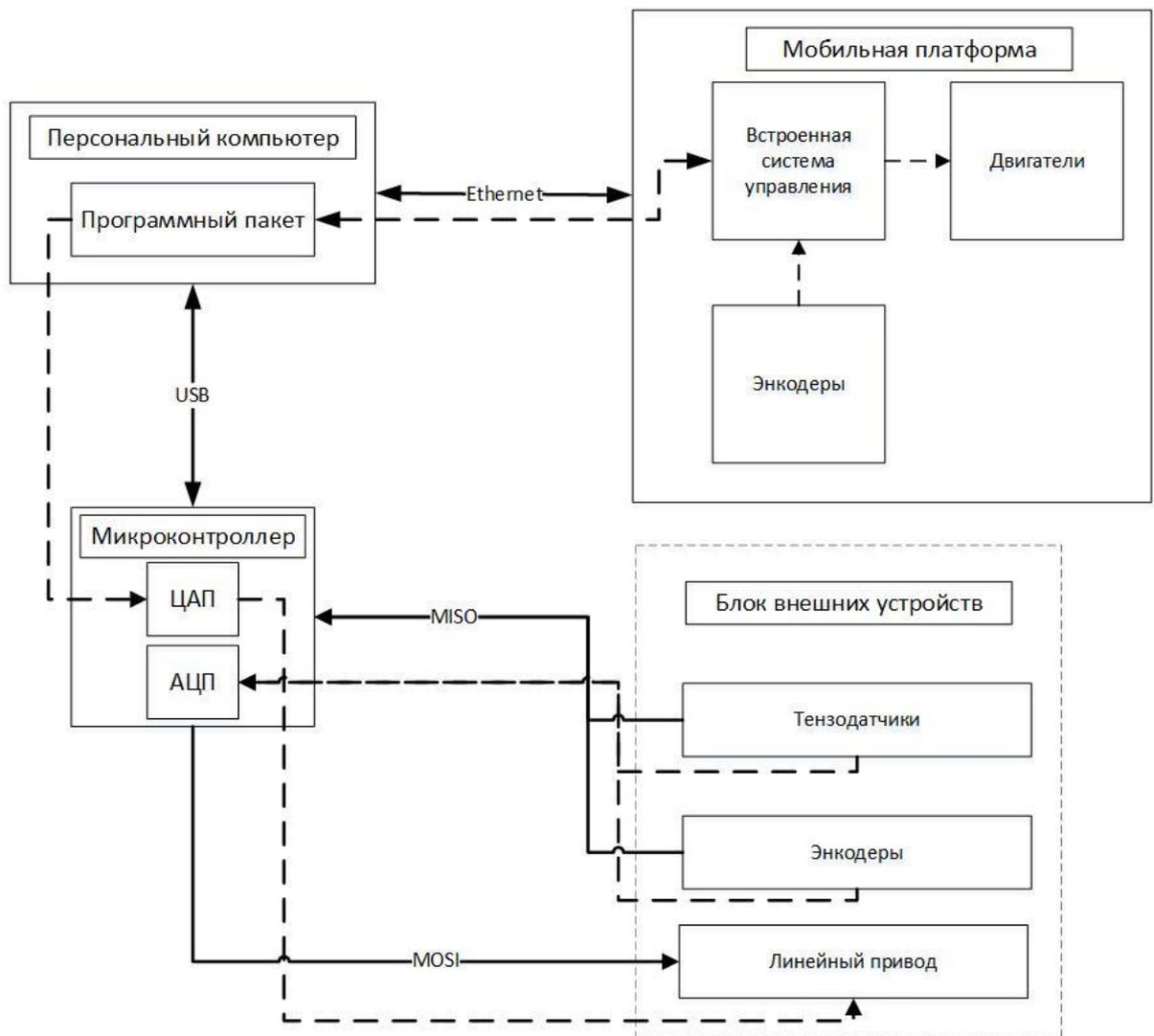


Рисунок 5 – Структурная схема системы управления

На представленной схеме сплошными линиями отражены физические соединения блоков, а также указаны протоколы их соединения. Пунктирными линиями обозначены каналы передачи данных.

Классическая структурная схема для управления мобильным роботом включает в себя следующие блоки: нижний уровень управления (приводный), тактический уровень, стратегический уровень, систему навигации и информационно-измерительную систему [8]. В данной системе роль нижнего уровня управления играют двигатели мобильной платформы. На тактическом уровне происходит преобразование команд управления в скорости двигателей, поэтому тактический уровень в данной системе представляет собой встроенную систему управления мобильной платформой. Роль стратегического уровня управления выполняет программный пакет на персональном компьютере, в котором будут реализованы основные алгоритмы управления мобильным роботом. Целью информационно-измерительной системы является получение и обработка информации с внешних сенсоров. В данной системе такие функции выполняет микроконтроллер. Система навигации в данном случае представлена лишь энкодерами двигателей мобильной платформы и встроенной системой управления мобильным роботом, которая анализирует данные с энкодеров и передает их на стратегический уровень управления. Блок внешних датчиков представлен тензодатчиками и энкодерами, а также линейным приводом.

После построения структурной схемы необходимо произвести выбор аппаратных и программных компонентов для составления функциональной схемы.

2.3 Выбор программных и аппаратных компонентов

Для реализации спроектированной структурной схемы и преобразования ее в функциональную схему, необходимо произвести выбор аппаратных и программных компонентов.

Значительную роль в выборе аппаратных компонентов сыграло их наличие на базе отделения автоматизации и робототехники ТПУ. В качестве управляемого мобильного робота была выбрана мобильная платформа Kuka YouBot, представленная на рисунке 6.



Рисунок 6 – Мобильная робототехническая платформа Kuka YouBot.

Конкурентом при выборе мобильной платформы могла стать мобильная робототехническая платформа для исследований и обучения Robotino компании Festo, однако, в отличие от Kuka YouBot, она не обладает достаточной грузоподъемностью для применения в задаче обезвешивания солнечных панелей, а именно 40 килограмм. В таблице 1 представлены значимые характеристики мобильной робототехнической платформы Kuka YouBot [9].

Таблица 1 – Технические характеристики Kuka Youbot

Характеристика	Значение
Масса	20 кг
Минимальная скорость	0,01 м/с
Максимальная скорость	0,8 м/с
Стандартное подключение	EtherCAT
Тип колес	Всенаправленные omni-колеса

Аналогично выбору мобильной платформы был произведен выбор микроконтроллера Arduino UNO, который представлен на рисунке 7.

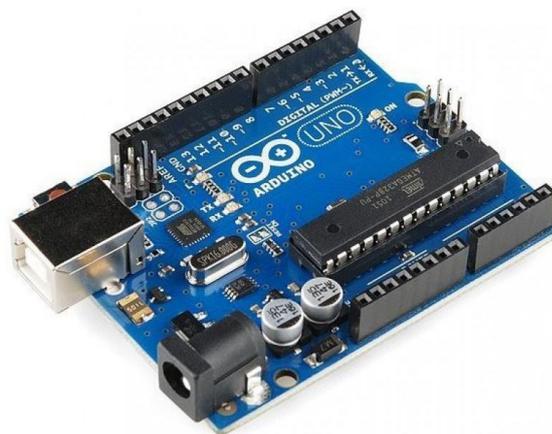


Рисунок 7 – Микроконтроллер Arduino UNO.

Значимые технические характеристики используемого микроконтроллера приведены в таблице 2 [10].

Таблица 2 – Характеристики микроконтроллера Arduino UNO

Характеристика	Значение
Базовый микроконтроллер	ATmega328
Число цифровых входов/выходов	14, 6 из них можно использовать для ШИМ
Число аналоговых входов	6
Тактовая частота	16 МГц
Питание и связь	USB

Особое внимание было уделено выбору программных компонентов для реализации спроектированной системы.

Исходя из анализа различных систем управления мобильными платформами, было установлено, что ROS является наиболее распространенной операционной системой, уже установленной в мобильных роботах. Robot Operating System позволит значительно упростить процесс построения системы управления, а также расширит возможности использования созданной системы управления на других мобильных платформах без необходимости адаптации и перестройки системы.

При выборе среды разработки важным критерием являлось простое взаимодействие с ROS, а также имеющийся опыт работы с выбранной средой. В качестве вариантов построения системы управления рассматривался программный пакет MatLab и IDE Visual Studio для написания программного кода управления на языке C++. Сравнительные характеристики двух рассматриваемых вариантов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики среды разработки

Критерий	Matlab Simulink	Visual Studio
Язык программирования	Язык операторно-структурных схем	C++
Взаимодействие с ROS	Не требует дополнительного ПО	Необходимо дополнительное ПО
Наличие библиотек для работы с ROS	ROS-Toolbox	ros.h

Так как работа с Matlab не потребует в будущем дополнительного программного обеспечения, и опыт работы с данным программным пакетом значительно больше, чем с программированием на языке C++, было принято решение о решении задачи управления роботом и обмена с ним данными с помощью взаимодействия ROS – операционной системы для роботов и пакета Matlab Simulink, установленного на сторонний персональный компьютер. Данная комбинация, хотя и усложняет само управление, но открывает ряд возможностей для создания более совершенного алгоритма для решения конкретной задачи, а также обеспечивает быстрое действие системы и упрощает сложные вычисления, которые могут быть реализованы за счет встроенных возможностей Simulink.

Для того, чтобы более точно понимать построение взаимодействия между Matlab и ROS, необходимо изучить структуру операционной системы роботов и ее особенности. ROS (Robot Operating System) – это фреймворк,

необходимый для программирования роботов, робототехнических систем и мобильных платформ [11]. Данная библиотека работает с Unix-подобными системами, включая Ubuntu Linux, которая установлена в том числе на Kuka YouBot. За счет ROS обеспечиваются стандартные службы операционной системы, такие как передача сообщений процессов, управление пакетами и реализация функций. Основными элементами, обеспечивающими работоспособность системы ROS, являются узлы, темы и сообщения, а также мастер, сервис и сервер параметров. Узлы управляют заданными функциями, производят вычисления и обеспечивают связь с другими узлами посредством сообщений определенного типа данных, передаваемых в конкретные темы, доступ к которым у узла обеспечивается за счет сервисов. Каждая тема, как и узел, имеют уникальные имена, а стандартные узлы и темы несут под собой также определенную функцию. Мастер в свою очередь необходим, чтобы обеспечить связь со сторонним компьютером. Сервер параметров обеспечивает изменение конфигураций узлов, работает с памятью и сохраняет передаваемые данные [12].

Чтобы обеспечить соединение и прием-передачу данных между Matlab и ROS в работе будет применен специализированный пакет ROS-Toolbox, который обеспечивает создание узлов ROS и организует передачу сообщений между двумя системами. Основным преимуществом ROS-Toolbox является то, что он позволяет автоматически генерировать C++ код из модели Simulink и проверять его работу с помощью симуляции или физически на роботе, что позволит в дальнейшем отказаться от использования в системе персонального компьютера, так как построенная модель может работать прямо с бортового компьютера мобильной платформы. Также взаимодействие с Simulink позволяет в режиме реального времени изменять параметры и переменные в системе. Именно это и оправдывает усложнение в целом всей системы введением дополнительного компьютера. Возможности, которые обеспечивает Simulink в связи с ROS, не оставляет сомнения в необходимости

обеспечения подобного взаимодействия для решения сложных задач с применением мобильных роботов.

2.4 Функциональная схема системы управления

В соответствии с выбранными программными и аппаратными компонентами была спроектирована функциональная схема системы управления, представленная на рисунке 8.

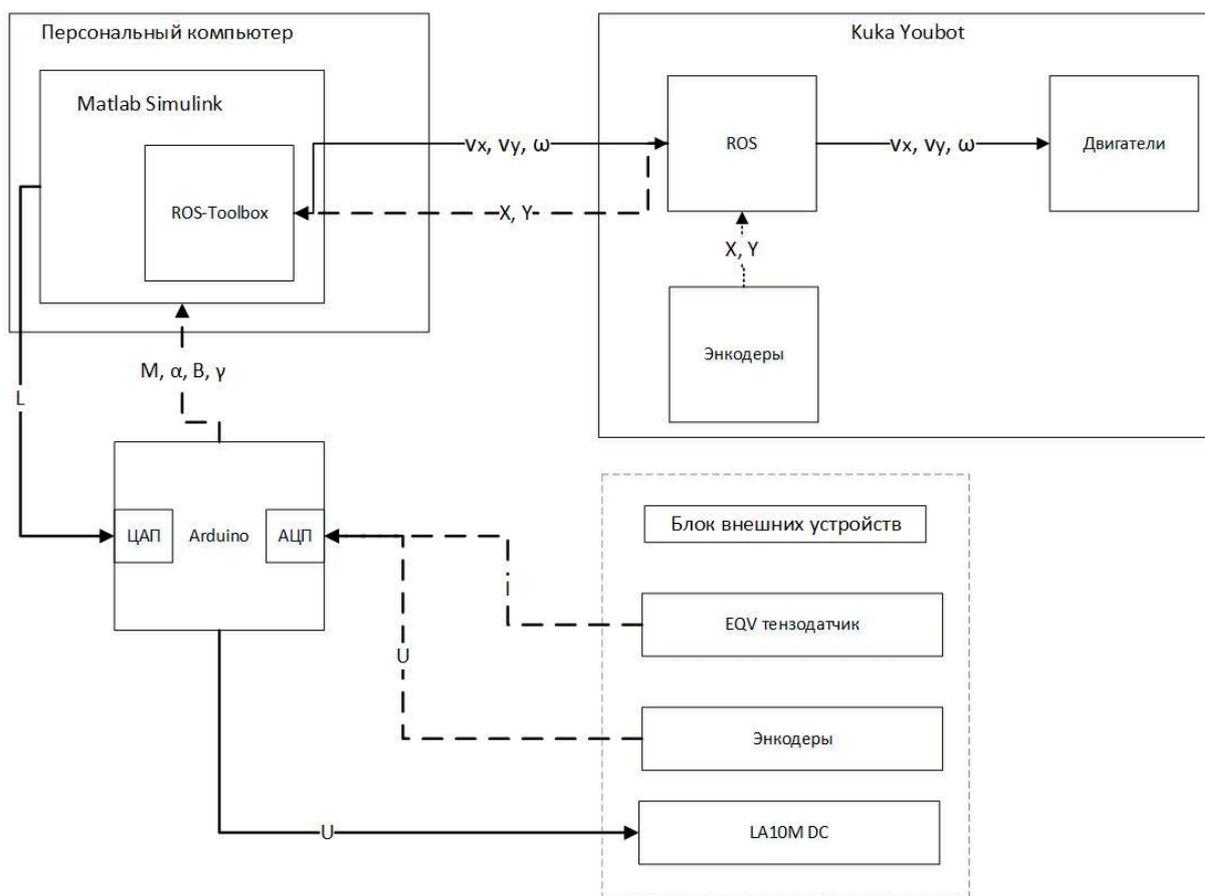


Рисунок 8 – Функциональная схема системы управления

На представленном рисунке сплошные линии обозначают передачу команд управления, а пунктирные – передачу информации. Указаны передаваемые переменные или физические величины – ток и напряжение.

Полноценная система управления работает следующим образом: чтобы мобильная платформа пришла в движение, ROS-Toolbox в Matlab передает на ROS в мобильной платформе сигналы управления в виде сообщений, а именно

– три значения скорости (линейные по оси X и Y и угловую). ROS в мобильной платформе преобразует полученные сообщения в команды управления и подает их на двигатели. Платформа приходит в движение. Параллельно ROS считывает данные с энкодеров приводов и передает их обратно в ROS-Toolbox в виде сообщений. ROS-Toolbox обрабатывает полученные сообщения и вводит их в регулятор скорости платформы в Matlab как обратную связь. Чтобы сформировать значения скоростей для мобильной платформы, Matlab анализирует данные, полученные с Arduino. Также на основе этих данных Matlab передает на Arduino сигналы для приведения в движение линейного привода, а именно высоту, на которую необходимо поднять или опустить привод, который и корректирует высоту устройства удержания солнечной панели. Arduino производит аналогово-цифровое и цифро-аналоговое преобразование поступающих в него данных с Matlab и с внешних датчиков. Остановка робота производится при полном раскрытии солнечной панели. В упрощенном представлении алгоритм данной работы системы представлен на рисунке 9.

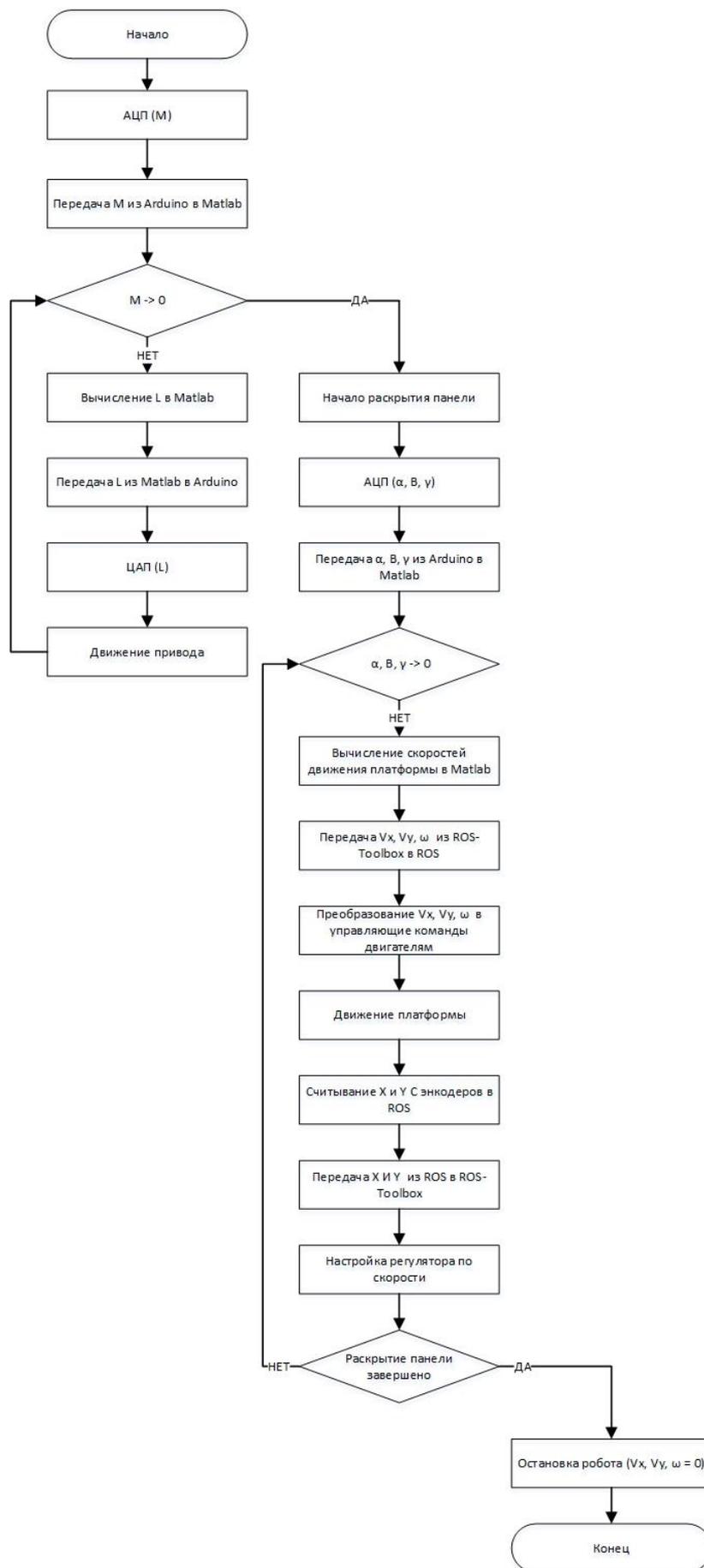


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма работы системы

2.5 Система приема-передачи данных между компонентами

Основой спроектированной системы управления является взаимодействие ROS и Matlab. Как уже было сказано выше, основной обмен данными происходит через специализированный пакет ROS-Toolbox.

Обмен данными между Simulink и ROS может осуществляться тремя основными способами: издатель-подписчик, клиент-сервер и дерево параметров, главные особенности которых представлены ниже.

Модель обмена данными издатель-подписчик требует передачи сообщений по теме, каждая из которых будет иметь свое уникальное имя в ROS, а каждая тема имеет под собой определенный тип данных, которые возможно передать в сообщении данной темы. Узел становится издателем, если хочет отправить сообщение в тему, в то время как другой узел становится подписчиком для получения сообщения из темы. Такая система позволяет реализовывать общение множества узлов, без необходимости их прямой связи, а значит и обеспечивает возможность беспрепятственного удаления или модификации каждого узла [13]. На рисунке 10 представлено графическое отображение модели обмена данными издатель-подписчик.



Рисунок 10 – Модель издатель-подписчик

Общение с помощью модели клиент-сервер обеспечивает более сложный обмен данными между узлами. В данной модели клиент отправляет сообщение-запрос и получает сообщение-ответ от сервера. В рассмотренной выше модели обмена данными издатель не требовал ответа от подписчика. Клиент-сервер обеспечивает прямую связь между двумя узлами, одновременно запрос не может быть отправлен более чем на один сервер. Это подразумевает, с одной стороны, упрощение системы и уменьшение объемов

памяти, но с другой стороны невозможность изменять параметры в процессе обмена данными, невозможность реализации множественных вопросов и блокировку узлов клиента до момента ответа сервера [14]. На рисунке 11 представлено графическое отображение модели обмена данными издатель-подписчик.



Рисунок 11 – Модель клиент-сервер

Модель общения при помощи дерева параметров отражает взаимодействие, при котором объект Matlab обращается к серверу параметров ROS. Такой метод общения применим для обращения к неизменяемым во времени данным, таким как, например, параметры конфигурации, максимально-допустимые значения переменных и так далее.

Для начала построения системы передачи данных между мобильной платформой и Simulink в первую очередь было выполнено их физическое соединение посредством Ethernet. Далее была проведена настройка локальной сети и протестирована передача данных. Для этого необходимо было узнать IP-адрес самого робота и создать на персональном компьютере локальную сеть с соответствующим IP-адресом. Когда локальная сеть была создана, необходимо было убедиться в том, что мобильная платформа действительно подключена именно к созданной сети – это проверяется в настройках соединения. Тестирование передачи данных осуществлялось при помощи запуска команды пинга на соответствующий IP-адрес в терминалах соединенных устройств.

После установки соединения, было необходимо настроить на работе мастер ROS, запустив его и проверив его IP-адрес. В случае необходимости

нужно было выполнить настройку мастера, передав ему IP-адрес установленного соединения и адрес хоста. В модели Simulink при ее первом запуске адрес мастера определился автоматически, так как до этого связь была установлена верно, а ROS запущен на роботе. Иначе настройку мастера необходимо было бы провести вручную в соответствующем окне ROS-Toolbox.

Для отправки данных применялся блок издателя, а также блок создания сообщения для отправки его в тему. В настройках блока издателя были указаны соответствующая тема и тип сообщения, которые будут переданы в узел, также тип сообщения был указан в блоке пустого сообщения. Данные темы и тип сообщений в ROS отвечают именно за задание скоростей мобильного робота. Генерация самого сообщения может быть осуществлена за счет стандартных средств Matlab. Объединение сгенерированного сообщения и блоков издателя осуществлялось с помощью шины Bus Assignment. Проверка передачи данных была проведена с помощью команды отображения активных узлов и задействованных тем в терминале робота. При корректной настройке модели, после вызова данных команд, помимо стандартного узла `rosout`, был также указан новый созданный узел, осуществляющий связь с Matlab. А в темах стали отображаться использованные в модели темы.

Создание подписчика было произведено аналогично и значительно проще, так как оно включает создание только одного блока. В настройках блока подписчика была указана тема, из которой будут считываться данные и тип сообщения, а для использования в модели полученных данных был применен Bus Selector. Тип сообщения и его тем заданы аналогично типам в блоке издателя. Из темы `odometry` извлекаются данные о положении мобильной платформы, что необходимо для построения регулятора в будущем.

Операторно-структурная схема модели, использованной для тестирования соединения, приведена на рисунке 12.

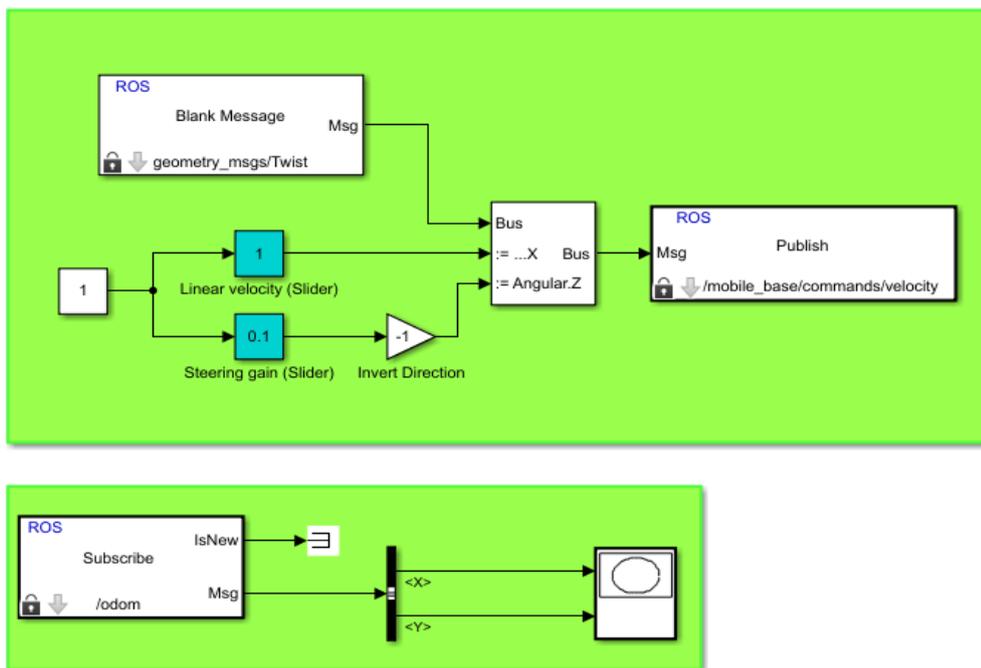


Рисунок 12 – Операторно-структурная схема модели

2.6 Математическая модель мобильной платформы

Вывод математической модели робота необходима для построения регулятора, а также проверки работы системы управления в отсутствие непосредственно мобильной платформы. Для полноценного моделирования необходимо вывести кинематическую и динамическую модель.

2.6.1 Кинематическая модель

Кинематическая модель мобильной робототехнической платформы представляет собой решение прямой и обратной задачи кинематики, то есть вывод зависимостей положения платформы от положения ее движителей, и наоборот. Для мобильной платформы Kuka YouBot кинематическая модель представляет собой связь между скоростью движения платформы и скоростью вращения каждого из ее колес.

Kuka YouBot – это четырехколесная мобильная платформа на колесах Илона, поэтому для вывода ее кинематической модели было принято использовать общую формулу (1), представленную в работе [15]. Данная формула может быть использована для вывода кинематической модели любой прямоугольной многоколесной omni-платформы.

$$\dot{\varphi} = \frac{1}{R * \sin(\delta)} * (\sin(\alpha + \delta) * (v_y + \omega * a_x) + \cos(\alpha + \delta) * (v_x - \omega * a_y)) \quad (1)$$

где $\dot{\varphi}$ – угловая скорость n-ного omni-колеса мобильной платформы, рад/с;

R – радиус колеса, м;

δ – угол наклона ролика omni-колеса, градусы;

α – угол наклона колеса относительно платформы, градусы;

a_x, a_y – координаты центра колеса относительно геометрического центра платформы, м;

v_x, v_y – линейные скорости мобильной платформы, м/с;

ω – угловая скорость мобильной платформы, рад/с.

В соответствии с параметром наклона колеса мобильного робота Кука YouBot, а именно $\alpha = 0$, формула (1) преобразуется в формулу (2) за счет внесения $\sin(\delta)$ в общую скобку.

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \frac{1}{R * \sin(\delta)} * \left(\sin(\delta) * (v_y + \omega * a_x) + \cos(\delta) * (v_x - \omega * a_y) \right) = \\ &= \frac{1}{R} * (v_y + \omega * a_x + ctg(\delta) * (v_x - \omega * a_y)) \end{aligned} \quad (2)$$

Также для удобства сгруппируем переменные в главной скобке, получив формулу (3).

$$\dot{\varphi} = \frac{1}{R} * (ctg(\delta) * v_x + v_y + (a_x - ctg(\delta) * a_y) * \omega) \quad (3)$$

Представим мобильную платформу таким образом, который приведен на рисунке 13. На данном рисунке указаны половины габаритных размеров платформы, обозначенные соответственно L и l , а также на колесах изображены наклоны роликов, контактирующих с подстилающей поверхностью.

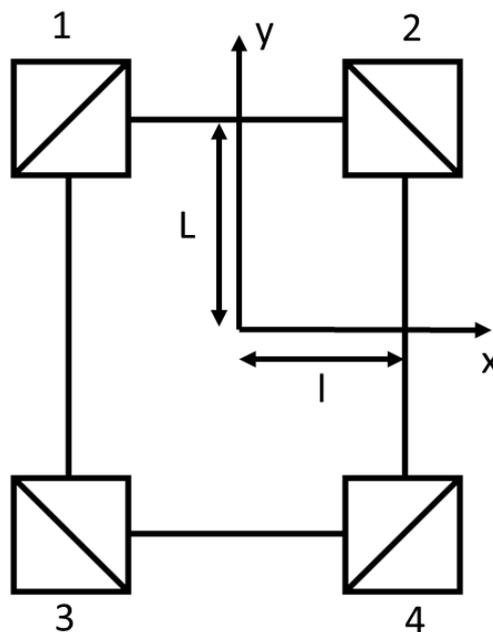


Рисунок 13 – Схематичное изображение мобильной платформы

Укажем координаты центра каждого из omni-колес, а также угол наклона его роликов:

- 1 колесо: $a_x = -l, a_y = L, \delta = 45^\circ$;
- 2 колесо: $a_x = l, a_y = L, \delta = -45^\circ$;
- 3 колесо: $a_x = -l, a_y = -L, \delta = -45^\circ$;
- 4 колесо: $a_x = l, a_y = -L, \delta = 45^\circ$.

Подставив приведенные значения в формулу (3), получим систему уравнений из угловых скоростей каждого колеса (4).

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = \frac{1}{R} * (v_x + v_y + (-L - l) * \omega) \\ \dot{\phi}_2 = \frac{1}{R} * (-v_x + v_y + (L + l) * \omega) \\ \dot{\phi}_3 = \frac{1}{R} * (-v_x + v_y + (-L - l) * \omega) \\ \dot{\phi}_4 = \frac{1}{R} * (v_x + v_y + (L + l) * \omega) \end{cases} \quad (4)$$

Запишем полученные уравнения в матричной форме в виде (5), где K – матрица коэффициентов, строки которой являются коэффициентами из системы (4) для каждого колеса, а столбцы – соответствующие скорости v_x, v_y и ω .

$$\dot{\phi} = - \frac{1}{R} * K * \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix} \quad (5)$$

Таким образом имеем матрицу K (6).

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -L - l \\ -1 & 1 & L + l \\ -1 & 1 & -L - l \\ 1 & 1 & L + l \end{pmatrix} \quad (6)$$

Просуммировав все уравнения системы (4) и сгруппировав по соответствующим переменным, запишем систему (7), которая является решением прямой задачи кинематики для данной мобильной платформы.

$$\begin{cases} v_x = \frac{R}{4} * (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3 + \dot{\varphi}_4) \\ v_y = \frac{R}{4} * (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3 + \dot{\varphi}_4) \\ \omega = \frac{R}{4(L+l)} * (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3 + \dot{\varphi}_4) \end{cases} \quad (7)$$

Подставив известные числовые данные о габаритах мобильной платформы и радиусе колеса, получим численную зависимость скорости движения мобильной платформы от угловой скорости вращения каждого колеса (8).

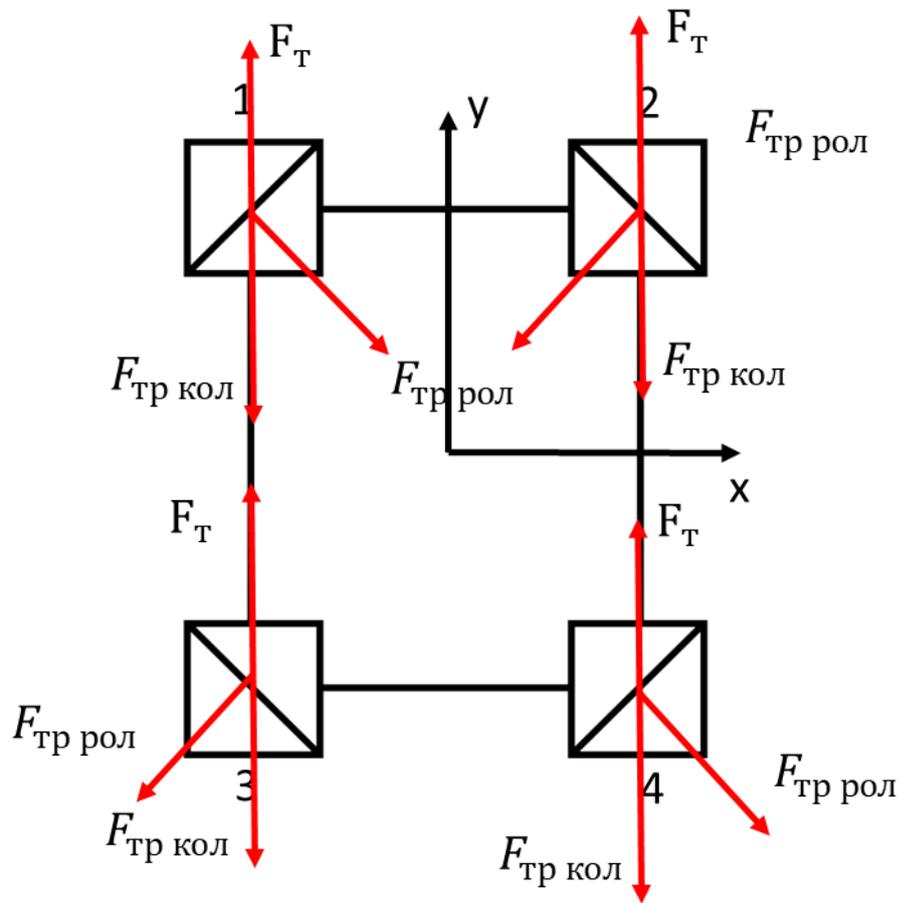
- $R = 0.05$ м;
- $L = 0,33$ м;
- $l = 0,15$ м.

$$\begin{cases} v_x = 0,0125 * (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3 + \dot{\varphi}_4) \\ v_y = 0,0125 * (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3 + \dot{\varphi}_4) \\ \omega = 0,026 * (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3 + \dot{\varphi}_4) \end{cases} \quad (8)$$

2.6.2 Динамическая модель

Динамическая модель робота представляет собой оценку влияния внешних силовых факторов на движение мобильной платформы, а также позволяет рассчитать необходимую силу тяги и момент двигателя, чтобы обеспечить требуемое движение мобильной платформы.

Опираясь на выведенную ранее кинематическую модель, рассмотрим движение мобильной платформы вдоль оси ОУ. Согласно системам (7) и (8), для того, чтобы платформа двигалась вдоль оси ОУ, направления вращения всех четырех колес должны быть в одну сторону и по часовой стрелке. Для построения упрощенной динамической модели будут рассмотрены следующие силы, действующие на каждое колесо: сила тяги, сила трения качения колеса, сила трения качения ролика. Расстановка векторов указанных сил приведена на рисунке 14.



F_T – сила тяги двигателя; $F_{\text{тр кол}}$ – сила трения качения колеса;
 $F_{\text{тр рол}}$ – сила трения качения ролика

Рисунок 14 – Расстановка сил, действующих на колеса мобильной платформы

Сила тяги направлена по направлению движения мобильной платформы, сила трения качения колеса – в противоположную ей сторону. Сила трения качения ролика направлена перпендикулярно ему в сторону противоположную направлению вращения [16].

На основе рисунка 14 составим уравнение, согласно второму закону Ньютона в проекциях на ось OY (9) [17].

$$F = F_{T1} + F_{T2} + F_{T3} + F_{T4} - F_{\text{тр кол}1} - F_{\text{тр кол}2} - F_{\text{тр кол}3} - F_{\text{тр кол}4} - F_{\text{тр рол}1} * \cos(\delta) - F_{\text{тр рол}2} * \cos(\delta) - F_{\text{тр рол}3} * \cos(\delta) - F_{\text{тр рол}4} * \cos(\delta) \quad (9)$$

Так как, согласно (7) и (8), для движения вдоль оси ОУ скорости вращения колес должны быть одинаковы, а также допустить, что распределение массы всей мобильной платформы происходит равномерно на каждое колесо, можно утверждать, что все взятые во внимание силы равны для каждого колеса, то есть:

$$\begin{aligned} F_{T1} &= F_{T2} = F_{T3} = F_{T4} = F_T \\ F_{\text{тр кол}1} &= F_{\text{тр кол}2} = F_{\text{тр кол}3} = F_{\text{тр кол}4} = F_{\text{тр кол}} \\ F_{\text{тр рол}1} &= F_{\text{тр рол}2} = F_{\text{тр рол}3} = F_{\text{тр рол}4} = F_{\text{тр рол}} \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом второй закон Ньютона приобретает вид (11).

$$F = 4 * F_T - 4 * F_{\text{тр кол}} - 4 * F_{\text{тр рол}} * \cos(\delta) \quad (11)$$

В соответствии с [16] и [17] запишем формулы для нахождения сил (12).

$$\begin{aligned} F &= m * a, \\ F_{\text{тр}} &= \frac{k}{R} * N, \end{aligned} \quad (12)$$

где m – масса мобильной платформы, кг;

a – ускорение движения платформы, м/с²;

k – коэффициент трения качения;

N – сила реакции опоры.

В соответствии с [18] сила реакции опоры определяется формулой (13).

$$N = m_1 * g, \quad (13)$$

где m_1 – масса платформы, приходящаяся на одно колесо, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Так как было принято, что масса платформы равномерно распределена между колесами, можно считать, что: $m_1 = \frac{m}{4}$, тогда формула силы трения качения преобразуется из (12) в (14).

$$F_{\text{тр}} = \frac{k}{R} * \frac{m}{4} * g \quad (14)$$

С учетом всех вышеупомянутых формул запишем полное уравнение второго закона Ньютона (15).

$$m * a = 4 * F_T - 4 * \frac{k}{R} * \frac{m}{4} * g - 4 * \frac{k}{r} * \frac{m}{4} * g * \cos(\delta) \quad (15)$$

где r – радиус ролика, м.

Путем переноса слагаемых, выразим из уравнения 15 силу тяги двигателя.

$$F_T = \frac{1}{4} * (M * a + 4 * \frac{k}{R} * \frac{m}{4} * g + 4 * \frac{k}{r} * \frac{m}{4} * g * \cos(\delta)) \quad (16)$$

В соответствии с [9] и [16] приведены числовые значения переменных для формулы (16).

- $m = 20$ кг;
- $a = 1,0$ м/с²;
- $g = 9.8$ м/с²;
- $k = 0,010$ м (для трения резины по бетону);
- $R = 0,050$ м;
- $r = 0,014$ м;
- $\delta = 45^\circ$.

Подставив числовые значения, найдем силу тяги для каждого колеса.

$$F_T = \frac{1}{4} * \left(20 * 1 + 4 * \frac{0.01}{0.05} * \frac{20}{4} * 9.8 + 4 * \frac{0.01}{0.014} * \frac{20}{4} * 9.8 * 0.7 \right) = 39,3 \text{ Н}$$

Теперь рассчитаем момент на валу каждого двигателя по формуле (17) [19].

$$M_{вр} = F_T * R \quad (17)$$

Подставив числовое значение, получим:

$$M_{вр} = 39,3 * 0,05 = 1,965 \text{ Н * м}$$

Номинальное значение вращающего момента на мобильной платформе Kuka YouBot [9] составляет 2,15 Н*м, что незначительно превышает полученное выше значение. Если брать во внимание запас по моменту, который есть на двигателях мобильной платформы, можно сделать вывод, что данная динамическая модель имеет может быть использована в дальнейшем при симуляции работы робота. Однако для увеличения точности модели необходимо экспериментально снять значения сил трения качения.

2.6.3 Общая динамическая модель

Для вывода зависимости между моментами вращения колес и скоростью движения робота, выведем формулу для обобщенной силы тяги мобильной платформы при движении вдоль оси X и Y. Для этого выразим значение силы тяги из формулы (17), а суммарный момент примем пропорциональным скорости вращения колес из формулы (7) кинематической модели. В результате имеем (18) [20].

$$F_{Tx} = \frac{1}{R} * (M_1 - M_2 - M_3 + M_4)$$

$$F_{Ty} = \frac{1}{R} * (M_1 + M_2 + M_3 + M_4)$$
(18)

где M_i – момент вращения i-того колеса платформы, Н*м.

Полученное значение обобщенной силы тяги при движении вдоль оси OY подставим в формулу (15), преобразовав ее. В результате имеем:

$$m * a = F_{Ty} - 4 * \frac{k}{R} * \frac{m}{4} * g - 4 * \frac{k}{r} * \frac{m}{4} * g * \cos(\delta)$$
(19)

Преобразуем полученную формулу, приняв ускорение как производную от скорости движения вдоль оси OY.

$$m * \dot{v}_y = \frac{1}{R} * (M_1 + M_2 + M_3 + M_4) - 4 * \frac{k}{R} * \frac{m}{4} * g - 4 * \frac{k}{r} * \frac{m}{4} * g * \cos(\delta)$$
(20)

Обозначив влияние сил трения качения постоянным коэффициентом μ_1 , получим зависимость скорости мобильной платформы от моментов вращения колес из формулы (20):

$$\dot{v}_y = \frac{1}{m * R} * (M_1 + M_2 + M_3 + M_4) - \frac{1}{m} * \mu_1 \quad (20)$$

Аналогично выразим зависимость для движения вдоль оси ОХ. Распределение сил при данном движении продемонстрировано на рисунке 15.

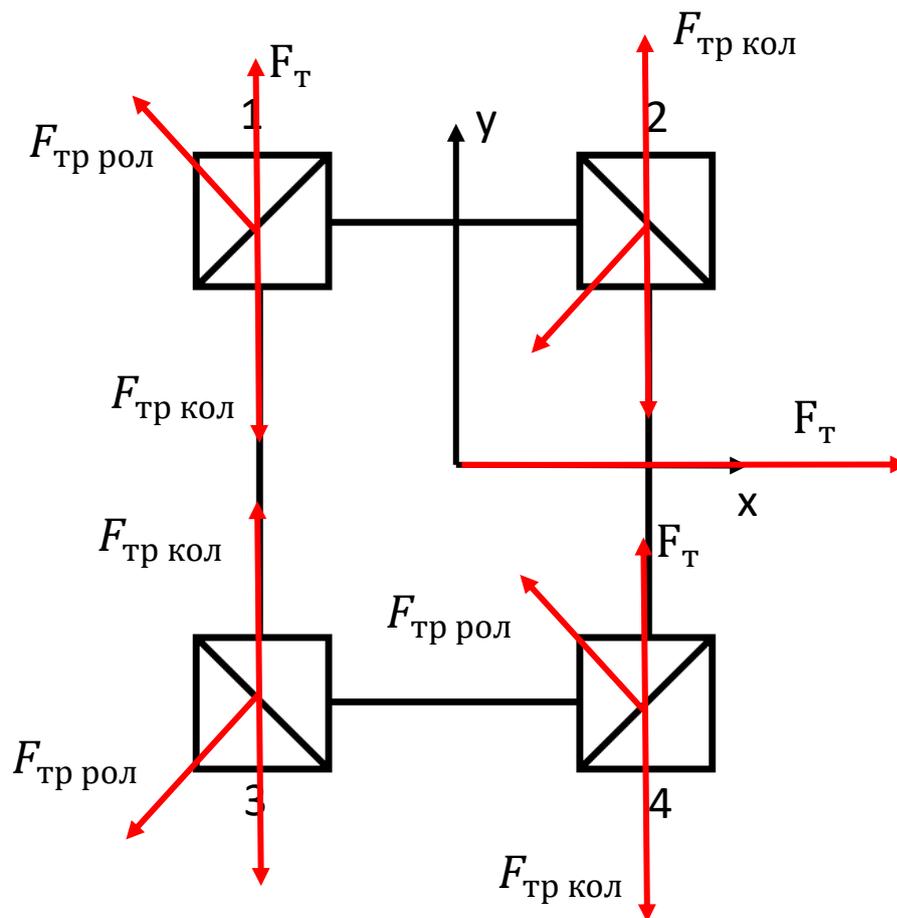


Рисунок 15 – Расстановка сил при движении вдоль оси ОХ

Как видно из рисунка 15, силы трения колес не оказывают влияния на движение вдоль оси ОХ, таким образом, для данного движения уравнение (15) принимает вид (21).

$$m * a = F_{Тx} - 4 * \frac{k}{r} * \frac{m}{4} * g * \cos(\delta) \quad (21)$$

Преобразуем полученную формулу (21), приняв ускорение как производную от скорости движения вдоль оси ОХ.

$$m * \dot{v}_x = \frac{1}{R} * (M_1 - M_2 - M_3 + M_4) - 4 * \frac{k}{r} * \frac{m}{4} * g * \cos(\delta) \quad (22)$$

Обозначив влияние силы трения качения постоянным коэффициентом μ_2 , получим зависимость скорости мобильной платформы от моментов вращения колес.

$$\dot{v}_x = \frac{1}{m * R} * (M_1 - M_2 - M_3 + M_4) - \frac{1}{m} * \mu_2 \quad (23)$$

Таким образом, общая динамическая модель принимает вид (24).

$$\begin{aligned} \dot{v}_y &= \frac{1}{m * R} * (M_1 + M_2 + M_3 + M_4) - \frac{1}{m} * \mu_1 \\ \dot{v}_x &= \frac{1}{m * R} * (M_1 - M_2 - M_3 + M_4) - \frac{1}{m} * \mu_2 \end{aligned} \quad (24)$$

Коэффициенты μ_1 и μ_2 определяются по формулам (25) .

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 4 * \frac{k}{R} * \frac{m}{4} * g + 4 * \frac{k}{r} * \frac{m}{4} * g * \cos(\delta) \\ \mu_2 &= 4 * \frac{k}{r} * \frac{m}{4} * g * \cos(\delta) \end{aligned} \quad (25)$$

2.7 Алгоритм снятия параметров динамической модели

Для точной идентификации параметров математической модели робототехнической платформы Kuka YouBot необходимо разработать алгоритм снятия данных параметров. В ходе выполнения нескольких калибровочных движений будет производится фиксация реальных скоростей колес и сравниваться с задающими и предполагаемыми моделью скоростями. На рисунке 16 приведен алгоритм для снятия параметров математической модели.

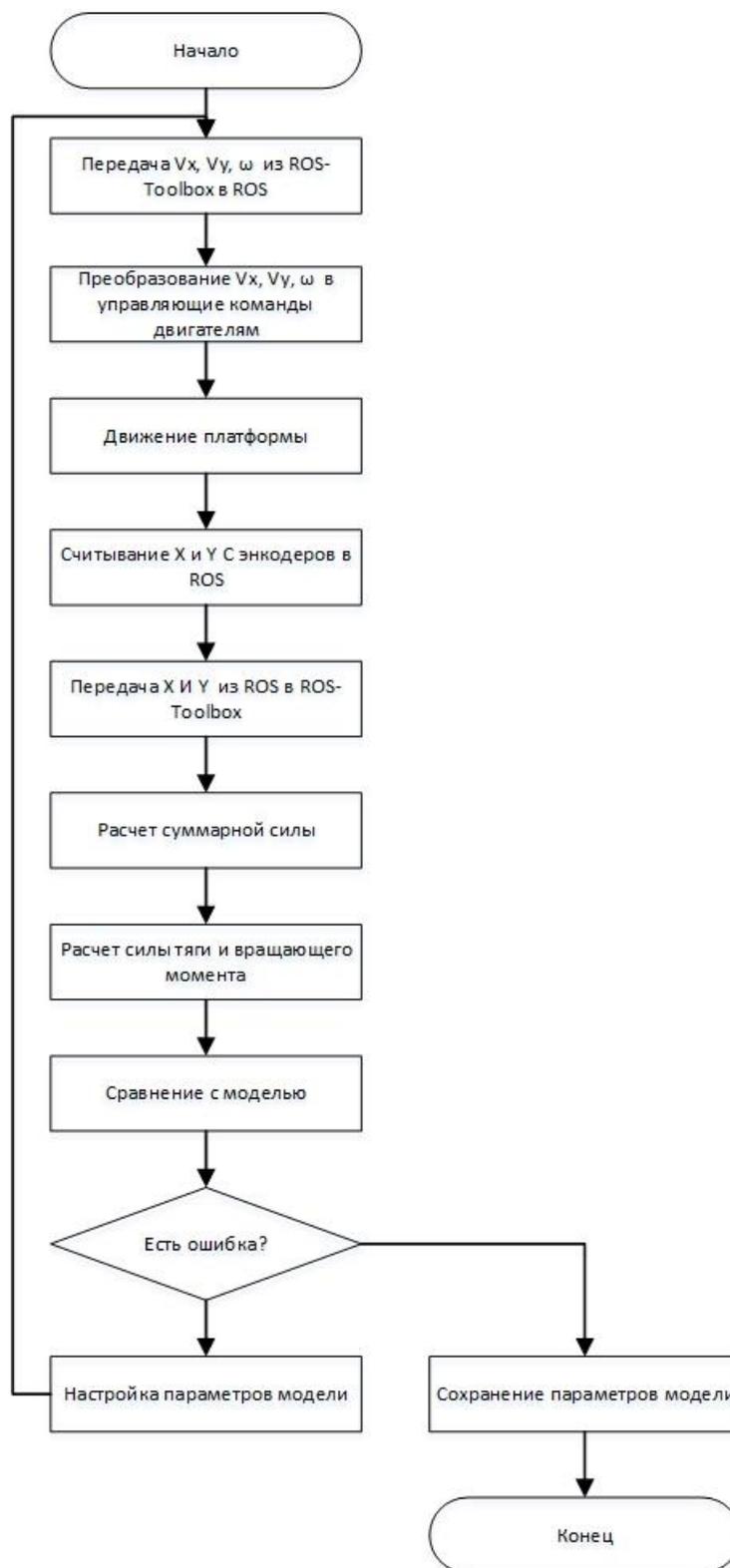


Рисунок 16 – Алгоритм идентификации параметров модели

Реализация данного алгоритма идентификации с применением средств Matlab Simulink и ROS-Toolbox представлены на рисунке 17.

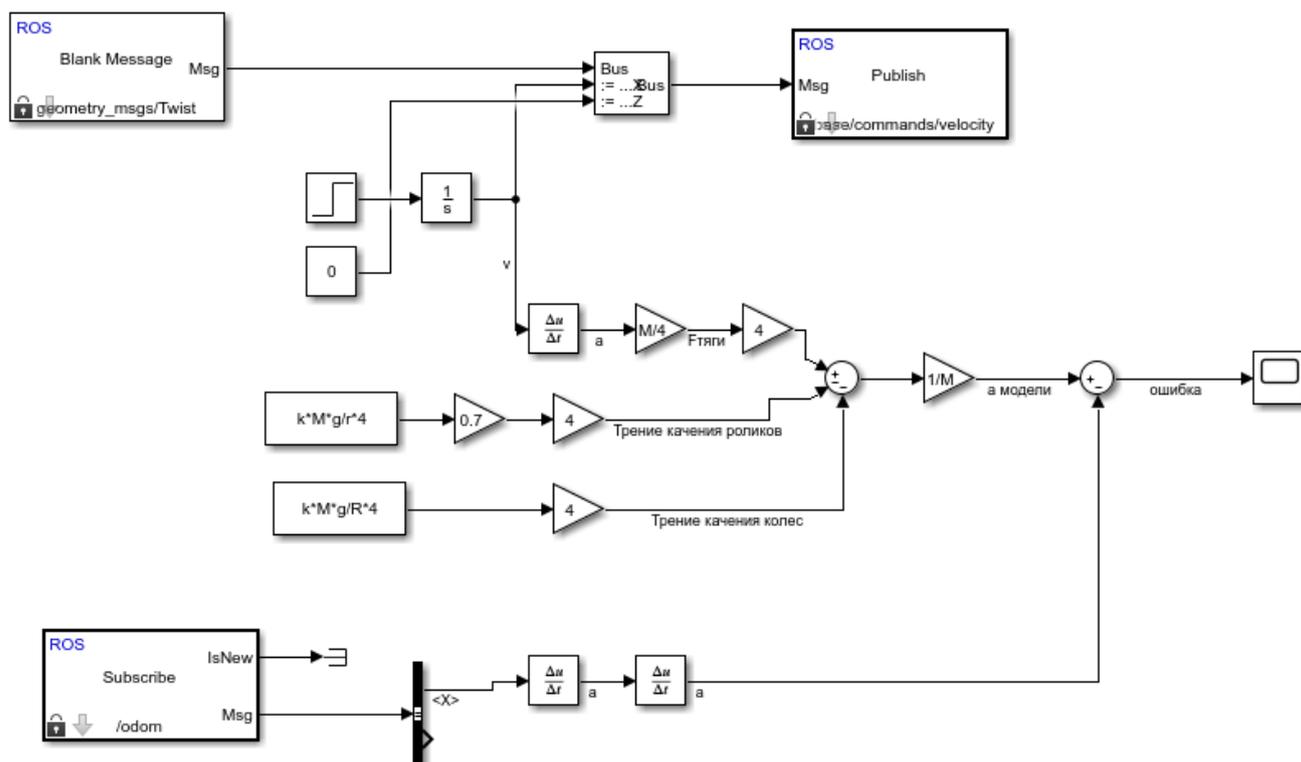


Рисунок 17 – Структурная схема для снятия параметров модели

На рисунке 17 в ROS отправляется сообщение с функцией скорости, а также принимается значение положения мобильной платформы. Так как описанная выше модель рассматривалась для прямолинейного движения вдоль одной из осей, в сообщении ROS с командами скорости указывается лишь одно значение скорости. Для проверки работы математической модели отправленные команды скоростей дифференцируются для получения значения ускорения. Далее рассчитывается идеальное значение силы тяги двигателей робота, без учета возможных сил трения. После этого, на основе данных об идеальной силе тяги и возможных силах трения вычисляется реальное ускорение мобильной платформы. В то же время, после двойного дифференцирования значения положения робота, мы имеем реальное ускорение. Реальное ускорение сравнивается с ускорением, предсказанным моделью и, в случае значительной разницы, совершаются корректировки значения сил трения в модели.

2.8 Вывод по основной части

В ходе разработки программно-аппаратного обеспечения управления мобильным роботом были рассмотрены существующие аналоги систем управления мобильными роботами, проведен выбор аппаратных и программных компонентов для реализации системы управления мобильной платформой Kuka Youbot. Были также спроектированы структурная и функциональная схемы будущей системы. Была построена система приема и передачи данных между отдельными компонентами системы, а также выведена математическая модель мобильной платформы, разработан алгоритм снятия параметров модели и спроектирована операторно-структурная схема для снятия данных параметров. Из поставленных перед проектом задач в настоящий момент, из-за сложившейся ситуации, не решена лишь одна – снятие параметров модели с реального робота.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данном проекте было разработано программно-аппаратное обеспечение для управления мобильной робототехнической платформой для решения задачи обезвешивания солнечных панелей космических аппаратов. Данное решение позволяет перенести вес обезвешиваемых элементов на мобильную платформу, что обеспечивает ряд преимуществ перед применяемыми на сегодняшний день методами обезвешивания.

Основной перспективой данной разработки является коммерческая ценность. Именно коммерческая ценность – это необходимое условие при поиске источников финансирования.

В данном разделе будет проведен комплексный анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы, а также оценены полные денежные затраты на разработку и реализацию.

3.1 Организация и планирование работ

Выполнением данного проекта занимались двое человек – научный руководитель и инженер (студент). Для каждого этапа работы назначается один или оба участника проекта. В таблице 4 указаны этапы работ и их исполнители.

Таблица 4 – 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 – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Выбор структурной схемы системы	НР, И	НР – 70% И – 100%
Выбор функциональной схемы системы	НР, И	НР – 80% И – 100%
Проектирование системы	И	И – 100%
Сборка и отладка спроектированной системы	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

3.1.1 Продолжительность этапов работы

Расчет продолжительности этапов работ осуществляется двумя методами:

- технико-экономический;
- опытно-статистический.

Первый применяется в случаях наличия достаточно развитой нормативной базы трудоемкости планируемых процессов. Так как соответствующими нормативами не обладаем, будет использоваться второй метод, который в свою очередь реализуется двумя способами:

- аналоговый;
- экспертный.

В данной работе будет использоваться экспертный метод, так как отсутствует какой-либо аналог.

Определение вероятных значений продолжительности работ $t_{ож}$ определяется по формуле (26).

$$t_{ож} = \frac{3 * t_{min} + 2 * t_{max}}{5} \quad (26)$$

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

t_{max} – максимальная продолжительность работы, дн.

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 (27).

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_{д} \quad (27)$$

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

$K_{вн}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, примем $K_{вн} = 1$;

K_D – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ, примем $K_D = 1,2$.

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле (28).

$$T_{KD} = T_{RD} \cdot T_K \quad (28)$$

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

T_K – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле (29).

$$T_K = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}} \quad (29)$$

где $T_{КАЛ}$ – календарные дни ($T_{КАЛ} = 365$);

$T_{ВД}$ – выходные дни ($T_{ВД} = 51$);

$T_{ПД}$ – праздничные дни ($T_{ПД} = 14$).

$$T_K = \frac{365}{365 - 51 - 14} = 1,217$$

В таблице 5 указаны продолжительность работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах (3-5) реализован экспертный способ по формуле 26. Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоемкости этапа для каждого из двух участников проекта (научный руководитель и инженер) с учетом коэффициента $K_D = 1,2$. Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение $t_{ож} \cdot K_D$. Столбцы 8 и 9 содержат те же трудоемкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на T_K (здесь оно равно 1,217). 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 $T_{кд}$ (данные столбцов 8 и 9 кроме итогов) позволяют построить линейный график осуществления проекта.

Таблица 5 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	3	5	3,8	4,56	–	5,55	–
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	3	5	3,8	4,56	0,456	5,55	0,55
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	10	15	12	4,32	14,4	5,26	17,52
Разработка календарного плана	НР, И	2	4	2,8	3,36	0,336	4,09	0,41
Выбор структурной схемы системы	НР, И	4	6	4,8	4,03	5,76	4,90	7,01
Выбор функциональной схемы системы	НР, И	4	6	4,8	4,61	5,76	5,61	7,01

Продолжение таблицы 5 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Проектирование системы	И	12	15	13,2	-	15,86	-	19,30
Сборка и отладка спроектированной системы	И	20	25	22	-	26,4	-	32,13
Оформление расчетно- пояснительной записки	И	7	10	8,2	-	9,86	-	12,00
Оформление графического материала	И	6	8	6,8	-	8,16	-	9,93
Подведение итогов	НР, И	3	5	3,8	2,74	4,56	3,33	5,55
Итого:				86	8,18	1,552	4,29	11,41

Таблица 6 – Линейный график работ

Этап	НР	И	февраль			март			апрель			май			июн ь
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
1	5,55	–	■												
2	5,55	0,55	■	■											
3	5,26	17,52		■	■	■									
4	4,09	0,41				■									
5	4,90	7,01				■	■								
6	5,61	7,01					■	■							
7	-	19,30						■	■	■					
8	–	32,13							■	■	■	■			
9	–	12,00											■	■	
10	–	9,93												■	■
11	3,33	5,55													■

НР – ■; И – ■.

3.2 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;
- прочие (накладные расходы) расходы.

3.2.1 Расчет затрат на материалы

В данной статье расходов приводится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. В таблице 7 представлены все материальные затраты в проекте.

Таблица 7 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Коммутационный шнур (Ethernet)	255	1 шт.	255
Кабель USB 2.0	159	1 шт.	159
Бумага для принтера формата А4	350	1 уп.	350
Картридж для принтера	2649	1 шт.	2649
Итого:			3413

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны $C_{\text{мат}} = 3413 * 1,05 = 3584$ руб.

3.2.2 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Оклад инженера принимается равным окладу соответствующего специалиста низшей квалификации в организации, где исполнитель проходил преддипломную практику. При отсутствии такового берется оклад инженера собственной кафедры (лаборатории).

Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле (30).

$$ЗП_{\text{дн-т}} = MO/25 \quad (30)$$

Учитывая, что в году 300 рабочий день и, следовательно, в месяце в среднем 25 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе).

Расчета затрат на полную заработную плату приведены в таблице 8. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 5. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{\text{ПР}} = 1,1$; $K_{\text{допЗП}} = 1,188$; $K_{\text{Р}} = 1,3$. 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 $K_{\text{И}} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$. Вышеуказанное значение $K_{\text{допЗП}}$ применяется при шестидневной рабочей неделе.

Таблица 8 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	43 264	1730,56	28	1,699	82 326,2
И	9 489	379,56	92	1,699	59 328,26
Итого:					141 654,46

3.2.3 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. $C_{соц} = C_{зп} * 0,3$. Итак, в нашем случае $C_{соц} = 141\ 654,46 * 0,3 = 42\ 496,34$ руб.

3.2.4 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 (31).

$$C_{эл.об} = P_{об} * t_{об} * Ц_{э} \quad (31)$$

где $P_{об}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{э}$ – тариф на 1 кВт·час;

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

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 5 для инженера ($T_{рд}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов по формуле (32).

$$(32)$$

$$t_{об} = T_{рд} * K_t$$

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

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле (33).

$$P_{об} = P_{ном} * K_C \quad (33)$$

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

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

Для ТПУ $Ц_{э} = 6,59$ руб./квт·час (с НДС). В таблице 9 представлены затраты на электроэнергию.

Таблица 9 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$, час	Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт	Затраты $C_{эл.об}$, руб.
Персональный компьютер	700	0,15	691,95
Мобильная робототехническая платформа	50	0,2	65,9
Принтер струйный	5	0,1	3,295
Итого:			761,145

3.2.5 Расчет амортизационных расходов

Амортизационные отчисления рассчитываются по формуле (34).

$$C_{AM} = \frac{N_A * C_{OB} * t_{рф} * n}{F_D} \quad (34)$$

где N_A – годовая норма амортизации единицы оборудования;

C_{OB} – 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.;

F_D – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования;

$t_{рф}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Следовательно, рассчитаем амортизационный расход персонального компьютера, мобильной робототехнической платформы и принтера струйного:

$$C_{AM.ПК} = \frac{N_A * C_{OB} * t_{рф} * n}{F_D} = \frac{0,3 * 25000 * 700 * 1}{2400} = 2187,5 \text{ руб.}$$

$$C_{AM.ЭЛ} = \frac{N_A * C_{OB} * t_{рф} * n}{F_D} = \frac{0,15 * 791885 * 50 * 1}{890} = 6673,2 \text{ руб.}$$

$$C_{AM.ПР} = \frac{N_A * C_{OB} * t_{рф} * n}{F_D} = \frac{0,5 * 2241 * 5 * 1}{500} = 11,2 \text{ руб.}$$

$$C_{AM} = C_{AM.ПК} + C_{AM.ЭЛ} + C_{AM.ПР} = 2187,5 + 6673,2 + 11,2 = 8871,9 \text{ руб.}$$

3.2.6 Расчет прочих расходов

Прочие расходы следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов.

$$C_{\text{проч}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{ЗП}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{ЭЛ.ОБ}} + C_{\text{АМ}}) \cdot 0,1 = (3413 + 141654,46 + 42496,34 + 761,145 + 8871,9) \cdot 0,1 = 19719,68 \text{ руб.}$$

3.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, определяем общую себестоимость проекта. Результаты приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	3 413
Основная заработная плата	$C_{\text{ЗП}}$	141 654,46
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	42 496,34
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{ЭЛ.ОБ}}$	761,15
Амортизационные отчисления	$C_{\text{АМ}}$	8 871,9
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	19 719,68
Итого:		216 916,53

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 216\,916,53$ руб.

3.2.8 Расчет НДС

Налог на добавленную стоимость составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли. Следовательно, НДС составляет:

$$\text{НДС} = C \cdot 0,2 = 216\,916,53 \cdot 0,2 = 43\,383,31 \text{ руб.}$$

3.2.9 Цена разработки НИР

Полная цена разработки равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, поэтому суммируем данные сметы.

$$C_{\text{НИР(КР)}} = 216\,916,53 + 43\,383,31 = 260\,299,84 \text{ руб.}$$

3.3 Расчет экономической эффективности проекта

Расчет экономической эффективности данного проекта невозможен, в виду конфиденциальности данных о стоимости подобных систем обезвешивания. Однако возможно выделить ряд факторов, оказывающих положительное влияние на экономическую эффективность разработки. К таким факторам относится экономия рабочего времени персонала, время работы оборудования, экономия электроэнергии и ресурсов при эксплуатации, а также повышение точности экспериментов.

Экономия рабочего времени персонала определяется в первую очередь возможностью привлечения меньших трудовых ресурсов. Так для проведения испытаний по обезвешиванию солнечных панелей сейчас необходима работа монтажеров панелей. В подвешивании панелей на направляющие рельсы участвуют от трех до пяти человек. Данная разработка позволяет исключить необходимость в большой команде монтажеров, так как настройка уровней панелей осуществляется автоматически, необходимо лишь выполнить присоединение панели к конструкции на работе, а для данной работы достаточно двух человек: крановщика, присоединяющего панели к конструкции в стене, и монтажера панелей к робототехническим платформам.

За счет простоты эксплуатации также значительно сокращается время работы оборудования. В настоящее время монтаж и демонтаж панелей занимает около полутора-двух часов. С применением новой технологии, время монтажа сокращается до одного часа. На время проведения эксперимента внедрение новой технологии не оказывает значительного влияния. Один

эксперимент длится около 15 минут, также для повторного тестирования необходимо провести замену пиропатронов на панелях и привести панели в исходное состояние. Это может занимать до получаса. Каждая система солнечных панелей тестируется 3 раза, далее происходит ее демонтаж. Таким образом, за счет сокращения времени монтажа в течение восьмичасового рабочего дня можно провести испытания для двух различных систем солнечных панелей, учитывая их полный монтаж и демонтаж, а технология, применяемая в настоящий момент, позволяет лишь провести полный эксперимент с одной системой панелей и произвести монтаж другой для последующих экспериментов в другой рабочий день.

Экономия электроэнергии осуществляется за счет использования мобильных роботов, вместо мощных электроприводов, применяемых при обезвешивании в настоящий момент. Использование мобильных роботов позволяет снизить электропотребления, а также предотвратить возможность выхода из строя электросети в связи с перегрузкой.

Экономия ресурсов при эксплуатации и обслуживании оборудования обусловлена необходимостью в настоящее время проводить регулярную проверку огромного числа механизмов и сочленений, проводить их своевременную смазку и замену. В предлагаемом решении необходимо проводить лишь плановое обслуживание элементов мобильной платформы, а выход из строя одного из элементов на мобильном роботе не повлечет за собой поломку элементов на других устройствах, что значительно упростит его замену в будущем.

Повышение точности получаемых данных основано на внедрении в систему дополнительных современных датчиков измерения. Так как при обезвешивании солнечных панелей очень важно знать такие показатели, как угол наклона, угол раскрытия, положение панелей относительно стартовой позиции и скорость раскрытия, внедренные в мобильную платформу

современные компоненты обеспечивают более полную информацию о получаемых данных, обладают более высокой точностью и эффективностью.

3.4 Вывод по финансовому менеджменту, ресурсоэффективности и ресурсосбережению

В ходе оценки финансовой эффективности разрабатываемого проекта был разработан календарный план проведения основных работ. Согласно ему количество дней, необходимых на разработку программно-аппаратного обеспечения для управления мобильной робототехнической платформой, составило 126 рабочих дней. Также были рассчитаны сметы затрат на разработку проекта. В результате, себестоимость проекта и его итоговая цена разработки составила 260 299,84 рублей.

4 Социальная ответственность

Целью данной работы является разработка программно-аппаратного обеспечения для управления мобильной робототехнической платформой. Разработанная система включает в себя персональный компьютер и мобильную платформу Kuka YouBot, а также микроконтроллер Arduino с блоком внешних датчиков и приводов, подключенный к мобильной платформе. Общение между мобильной платформой и персональным компьютером осуществляется посредством беспроводного канала передачи данных. Таким образом, оператор, управляющий программно-аппаратным комплексом не имеет прямого контакта с мобильной платформой. Прикладной направленностью данной разработки является решение задачи по обезвешиванию солнечных панелей космических аппаратов при тестировании их раскрытия в земных условиях.

Разработка и тестирование программно-аппаратного обеспечения проводится в корпусе ТПУ №10, в аудитории №101. Дальнейшая эксплуатация оборудования планируется в специализированных лабораториях на производствах космических аппаратов и их комплектующих.

Потенциальными пользователями разработанной системы обезвешивания (в состав которой входит программно-аппаратный комплекс управления мобильным роботом) будут являться инженеры-тестировщики, операторы и механики, работающие в специализированных лабораториях на базе производства космических аппаратов.

Социальной направленностью разрабатываемой системы обезвешивания является сбережение природных ресурсов и уменьшение загрязнения окружающей среды, так как увеличение точности тестирования раскрытия солнечных панелей предотвращает преждевременный выход из строя и необходимость производства новых космических аппаратов.

4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

4.1.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства

Государственный надзор и контроль в организациях осуществляют специально уполномоченные на то государственные органы и инспекции в соответствии с федеральными законами [21]. К таким органам относятся Федеральная инспекция труда, Государственная экспертиза условий труда, Федеральная служба по труду и занятости населения, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Госгортехнадзор, Госэнергонадзор, Госатомнадзор России), Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Госсанэпиднадзор России) и др. Так же в стране функционирует Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), положение о которой утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации, в соответствии с которым, система объединяет органы управления, силы и средства.

4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

При тестировании, настройке и эксплуатации программно-аппаратного обеспечения управления мобильным роботом оператор выполняет работу на персональном компьютере, поэтому важную роль играет то, как будет скомпоновано его рабочее место. Средствами отображения информации является монитор ПК, а часто используемыми органами управления — мышь и клавиатура. Рабочее место оборудуется в соответствии требованиями [22]. Оно должно занимать площадь не менее 6 квадратных метров, высота помещения должна быть не менее 4 метров, а объем - не менее 20 кубических

метров на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 720 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол должен также иметь подставку для ног, расположенную под углом 15° к поверхности стола. Длина подставки 400 мм, ширина - 350 мм. Так же рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество. Так же кресло оператора должно соответствовать требованиям [23]. Помимо это рабочее место должно соответствовать гигиеническим нормам СанПиН [24].

4.2 Профессиональная социальная безопасность

Факторы, способные оказывать негативное воздействие на состояние работника, а также нормативные документы, регулирующие соответствующие фактор производства приведены в таблице 11.

Таблица 11– Факторы производства

Факторы по ГОСТ (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы			Нормативные документы
	Разраб.	Тестир.	Экспл.	
Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений (1 октября 1996 г. N 21).

Продолжение таблицы 11– Факторы производства

Факторы по ГОСТ (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы			Нормативные документы
	Разраб.	Тестир.	Экспл.	
Превышение уровня шума	+	+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация.
Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95
Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	
Поражение электрическим током	+	+	+	ГОСТ 12.1.019-2017 Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
Повышенная напряженность электрического поля	+	+	+	ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.

4.2.1 Отклонение показателей микроклимата

На микроклимат в рабочем помещении может влиять температура за окном, нагревательные батареи, вентиляция, а также количество включенной техники в лаборатории.

Микроклимат рабочего помещения, играет значительную роль в работоспособности. Однако, состояние внутренней среды помещения может не только плодотворно влиять на здоровье человека, но и оказывать негативное воздействие. Микроклимат любых помещений характеризуется температурой воздуха, его влажностью и скоростью движения.

Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата приведены в таблице 12 и таблице 13 соответственно, исходя из требований СанПиН [25]. Вид деятельности оператора преимущественно сидячий это относится к категории 1а по энергозатратам.

Таблица 12 – Оптимальные величины показателей микроклимата

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхности, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	1а (до 139)	22-24	21-25	60-40	0,1
Теплый	1а (до 139)	23-25	22-26	60-40	0,1

В целях защиты, работающих от возможного перегревания или охлаждения, при температуре воздуха на рабочих местах выше или ниже допустимых величин, время пребывания на рабочих местах (непрерывно или суммарно за рабочую смену) должно быть ограничено.

Таблица 13 – Допустимые величины показателей микроклимата

Период года	Категория работ, Вт	Температура воздуха, °С		Температура поверхности, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин			Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин
Холодный	1а (до 139)	20,0-21,9	24,1-25	19-26	15-75	0,1	0,1
Теплый	1а (до 139)	21,0-22,9	25,1-26	20-29	15-75	0,1	0,2

4.2.2 Превышение уровня шума

Так как рабочее место оператора мобильной робототехнической платформы изолировано от самой платформы и возможных движущихся механизмов, шум в рабочем помещении может возникать лишь при работе ПК, системы кондиционирования воздуха, работы осветительных приборов дневного света, либо проникать извне. Повышенный шум ухудшает условия труда, оказывает вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается

реакция, увеличивается число ошибок при работе. Предельно допустимые уровни звукового давления представлены в таблице 14 [26].

Таблица 14 – Допустимые уровни звукового давления

Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Распространенные средства индивидуальной защиты от шума – это пробки, наушники, вкладыши (беруши) и шлемы. При превышении допустимых уровней звукового давления рекомендуется применить ряд мер коллективной защиты, которые могут включать в себя следующие мероприятия: оценка риска потери слуха работником, использование малошумных машин, использование материалов и конструкций, препятствующих распространению шума, привлечение к работам лиц, не имеющих медицинских противопоказаний по шуму, контроль правильности использования средств индивидуальной защиты.

4.2.3 Отсутствие или недостаток естественного света и недостаточная освещенность рабочей зоны

При работе оператора мобильной робототехнической платформы, в зависимости от расположения лаборатории в промышленном здании, могут возникать проблемы с поступлением естественного света, либо его отсутствием. Согласно нормам освещенности [27], освещенность рабочей зоны является вредным фактором, который негативно воздействует на зрение, а также приводит к быстрому утомлению и снижению работоспособности. Для нормализации освещенности производственных помещений и рабочих мест, в случае недостатка освещенности, рекомендуется применять следующие меры: дополнительные источники света, осветительные приборы и световые

проемы. В случае избытка освещенности, рекомендуется использовать светозащитные устройства, светофильтры и защитные очки. Также для снижения негативного влияния рассматриваемого фактора на здоровье и работоспособность человека, при работе за компьютером, необходимо соблюдать допустимое время нахождения перед монитором компьютера и делать перерывы в работе.

В таблице 15 представлены регламентированные допустимые характеристики освещенности рабочих мест в учебных аудиториях в университете, что аналогично предполагаемому рабочему месту оператора робототехнической платформы.

Таблица 15 – Допустимые характеристики освещенности

Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение				
КЕО, %		КЕО, %		Освещенность, лк			Показатель диска форта, М, не более	Коэффициент пульсации освещенности, Кп, %, не более
При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	Все	От	и		
							и	его
3,2	1,2	2,1	0,7	-	-	400	40	10

4.2.4 Поражение электрическим током

Поражение электрическим током возможно при контакте с незаизолированными проводами персональных компьютеров и прочего оборудования, находящегося в кабинете оператора мобильного робота, а также при нарушении правил эксплуатации и норм безопасности при работе с данным оборудованием [28].

Поражение электрическим током является наиболее опасным из всех видов вредного воздействия, по причине того, что электрический ток является невидимым для глаз человека. Действие электрического тока на организм человека носит своеобразный и разносторонний характер. Проходя через

организм человека, электрический ток производит термическое, электролитическое и биологическое действие.

Для предотвращения поражения электрическим током помещение, где размещается рабочее место оператора, должно быть оборудовано защитным заземлением в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации. Также основными техническими средствами защиты от поражения электрическим током являются отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности.

4.2.5 Повышенная напряженность электрического поля

Повышенная напряженность электрического поля в лаборатории может возникать в результате работы различных электронных устройств, таких как персональные компьютеры, а также сопутствующие им устройства отображения информации.

Негативное воздействие на человека повышенная напряженность электрического поля выражается в виде торможения рефлексов, нарушения памяти, понижения кровяного давления, замедления сокращений сердца, нарушений в печени и селезенке, помутнения хрусталика глаза. Для того чтобы уберечь операторов от получения хронических заболеваний при работе с робототехнической платформой, существуют временные требования к пребыванию в электрическом поле.

Исходя из гигиенических требований к персональным электронно-вычислительным машинам [29], пребывание в электрическом поле напряженностью до 5кВ/м включительно допускается в течение рабочего дня, а нахождение в поле напряженностью от 5 до 20 кВ/м допускается в течение одного часа. Для предотвращения негативного влияния электростатического

поля на организм человека, необходимо отслеживать время, проведенное за работой и своевременно осуществлять перерывы и проветривать помещение.

4.3 Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемой системы обезвешивания солнечных панелей космических аппаратов, составной частью которой является программно-аппаратное обеспечение для управления мобильным роботом, на окружающую среду, а также анализируется жизненный цикл объекта исследования и предлагаются мероприятия по защите окружающей среды.

4.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Все влияние разрабатываемого устройства на окружающую среду можно разделить на прямое и косвенное. Косвенное влияние обусловлено выбросами в атмосферу загрязняющих веществ в ходе производства деталей и материалов, используемых в проектируемой системе. Также, важным фактором является потребление энергии мобильной платформой и персональным компьютером оператора, так как производство электроэнергии тесно связано с пагубным воздействием на окружающую среду.

Прямым негативным влиянием от разработки и эксплуатации системы обезвешивания являются отходы материалов, которые оказывают влияние на литосферу при их утилизации.

4.3.2 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования

Жизненный цикл объекта исследования включает в себя 3 основные стадии: проектирование, производство и эксплуатация. Также немаловажным этапом является утилизация технического объекта или его производных после завершения эксплуатации.

На стадии проектирования выполняются теоретические и экспериментальные исследования, конструирование, разработка технической и проектной документации. В ходе проектирования выполняются расчеты и создаются опытные образцы изделия. На данном этапе влияние выполняемых работ на окружающую среду незначительно, однако следует отметить, что, зачастую проектирование требует создания значительного количества опытных образцов. После завершения этапа проектирования необходимо корректно произвести утилизацию отходов, в соответствии с их классификацией [30].

Стадия производства подразумевает под собой технологическую подготовку производства, массовое или единичное производство, сборку, настройку, заводские испытания и складирование готовой продукции. Данный этап является наиболее ресурсозатратным для рассматриваемого объекта исследования, поэтому этап производства оказывает наибольшее косвенное влияние на окружающую среду, которое было описано ранее. В связи со спецификой и областью применения проектируемой системы обезвешивания солнечных панелей, производство не подразумевает под собой массовости, а значит не требует складирования готовой продукции, что экономит как человеческие, так и природные ресурсы.

Стадия эксплуатации подразумевает под собой производственное использование разработанного технического изделия, его регулярную проверку, техобслуживание и дальнейшую утилизацию. Длительность стадии эксплуатации зависит от таких факторов как частота использования оборудования, регулярность технического обслуживания, а также техническое и моральное устаревание используемых технологий. Этап эксплуатации подразумевает под собой прямое влияние объекта исследования на окружающую среду, так как после выхода технического объекта из строя, а также в ходе его эксплуатации и при выполнении технического обслуживания

возникают производственные отходы, которые необходимо утилизировать в соответствии с их классом.

4.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Для уменьшения негативного влияния объекта исследования на окружающую среду рекомендуется:

- на стадии разработки:
 - при создании опытных образцов использовать биоразлагаемые материалы;
 - минимизировать отходы и потребление ресурсов за счет вторичного использования материалов образцов;
 - сортировать отходы;
 - маркировать и утилизировать отходы в соответствии с их классификацией.
- На стадии производства:
 - подвергать фильтрации воду при отведении ее в канализацию;
 - подвергать фильтрации выбрасываемые в атмосферу газы;
 - регулярно производить осмотр и замену фильтров;
 - очищать и повторно использовать воду при производстве.
- На стадии эксплуатации:
 - своевременно производить технический осмотр объекта и замену изношенных деталей;
 - соблюдать нормы режима работы технической системы для продления сроков ее эксплуатации;
 - маркировать и утилизировать отходы в соответствии с их классификацией.

Утилизация отходов является наиболее важным этапом при минимизации вреда окружающей среде. В связи со спецификой технической системы, стоит отметить, что особое внимание следует уделить утилизации электронных компонентов силовых и информационных устройств.

4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

При эксплуатации системы обезвешивания, наиболее вероятной ЧС, которая может быть инициирована объектом исследования, является возникновение пожара в кабинете оператора мобильной платформы, а также в лаборатории обезвешивания, в которой выполняется движение платформы. Пожар может возникнуть в результате неисправности электрических приборов или в результате короткого замыкания. Пожарная безопасность должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Исходя из установленной номенклатуры обозначений зданий по степени пожарной опасности, анализируемое в данной работе помещение (рабочая зона оператора) относится к категории В [31]. Основными источниками возникновения пожара могут являться неработоспособное электрооборудование, неисправности в проводке, розетках и выключателях, электрические приборы с дефектами, а также перегрузка в электроэнергетической системе и короткое замыкание в электроустановке.

4.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при производстве объекта на предприятии

Наиболее вероятная ЧС, которая может возникнуть на предприятии во время производства и эксплуатации объекта исследования – это диверсия.

Наиболее вероятной причиной диверсии является отсутствие надлежащего контроля со стороны организации. В следствии диверсии на производстве может возникнуть серьезная чрезвычайная ситуация, например, пожар, отключение электроэнергии или выход из строя опасного оборудования. Также целью диверсии на предприятиях повышенной секретности может стать кража документации, взлом персональных компьютеров и серверов. В соответствии с целью диверсии меры по устранению чрезвычайной ситуации для каждого случая должны быть различны.

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

Человек, выполняющий работы в помещении, в случае возникновения пожара или его признаков (задымление, запах горения или тления различных материалов, повышение температуры и т.п.) обязан выполнить следующие действия:

- немедленно сообщить об этом по телефону «01» в пожарную часть (при этом необходимо четко назвать адрес учреждения, место возникновения пожара, а также сообщить свою должность и фамилию).
- задействовать систему оповещения людей о пожаре, приступить самому и привлечь других лиц к эвакуации людей из здания в безопасное место согласно плану эвакуации.
- принять по возможности меры по тушению пожара имеющимися в учреждении средствами пожаротушения и сохранности материальных ценностей.
- известить о пожаре руководителя или другого работника.

Меры безопасности обеспечиваются системами предотвращения пожара и противопожарной защиты исходя из требований пожарной безопасности [32].

Средствами обеспечения пожаробезопасности являются огнетушитель, находящийся в рабочем помещении (класса Е), а также пожарный кран, находящийся в здании; системы автоматической пожарной сигнализации; средства организации эвакуации.

Для предотвращения возникновения чрезвычайной ситуации необходимо регулярно проводить следующие мероприятия:

- обучение, в т.ч. распространение знаний о пожаробезопасном поведении (о необходимости установки домашних индикаторов задымленности и хранения зажигалок и спичек в местах, недоступных детям).
- пожарный надзор, предусматривающий разработку государственных норм пожарной безопасности и строительных норм, а также проверку их выполнения.
- обеспечение оборудованием и техникой разработки (установка переносных огнетушителей и изготовление зажигалок безопасного пользования).

Также, перед началом работы работнику необходимо пройти инструктаж и оставить свою подпись в журнале о прохождении инструктажа по пожарной безопасности.

Для предотвращения возникновения диверсии на производстве необходимо регулярно проводить следующие мероприятия:

- установка контрольно-пропускного пункта при входе в потенциально-опасные зоны или зоны особой секретности на производстве;
- снабжение рабочих зон, а также потенциально-опасных зон камерами видео наблюдения;
- обучение персонала действиям, связанным с противодействием диверсии.

Также для предотвращения диверсии руководство производства должно своевременно производить выплату заработной платы, а также обеспечивать персонал социальной поддержкой и регулярными премиями.

4.5 Вывод по социальной ответственности

В данном разделе были проанализированы основные опасные факторы, которые могут возникнуть при разработке и эксплуатации устройства, представленного в ВКР. Был проведен анализ данных факторов на соответствие нормам, устанавливаемым государственными стандартами. Были проанализированы факторы негативного влияния объекта исследования на окружающую среду на каждом из этапов жизненного цикла технического объекта. Были проанализированы возможные чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть на производстве, предложены меры по предотвращению их возникновения.

Заключение

В ходе выполнения данной работы были:

- проведен обзор существующих систем управления мобильными роботами;
- разработана структурная схема системы управления;
- проведен обзор и выбор программных и аппаратных компонентов;
- разработана функциональная схема;
- разработана система приема-передачи данных;
- проведен вывод математической модели мобильной платформы;
- разработан алгоритм для снятия параметров математической модели.

А также проведен анализ финансовой эффективности и социальной значимости проекта.

Conclusion

In the course of this work:

- a review of existing control systems for mobile robots was made;
- a block diagram of the control system was developed;
- a review and selection of software and hardware components was made;
- a functional diagram was developed;
- a system for receiving and transmitting data was developed;
- a mathematical model of a mobile platform was developed;
- an algorithm for taking parameters of a mathematical model was developed.

An analysis of the financial effectiveness and social significance of the project was made too.

Список публикаций

1. Киселева Д.В. Обмен данными между Matlab Simulink и ROS с применением пакета ROS-Toolbox / Д.В. Киселева, А.С. Ельцов // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 17–20 февраля 2020 г.) / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – С. 225-227.

2. Ельцов А.С. Разработка мобильного робота на базе omni платформы / А.С. Ельцов, А.С. Беляев, Д.В. Киселева // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 17–20 февраля 2020 г.) / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – С. 269-270.

Список использованной литературы

1. Аналитический обзор мирового рынка робототехники: сайт – URL: https://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank_robotics_review_2019_17.07.2019_m.pdf (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.
2. Статистика мирового рынка роботов indoor типа: сайт – URL: <https://www.statista.com/statistics/822051/global-indoor-robots-market-size/#statisticContainer> (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.
3. Складской робот Ronavi H1500: сайт – URL: <http://robotrends.ru/robopedia/ronavi-h1500> (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.
4. Складские роботы Amazon: сайт – URL: <http://robotrends.ru/robopedia/kiva> (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.
5. Робот TORU Cube: сайт – URL: <https://tqm.com.ua/likbez/interview/avg-roboty-na-sklade> (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.
6. Роботы SBR: сайт – URL: <http://robotrends.ru/robopedia/sbr> (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.
7. Складской робот Буксир-1: сайт – URL: <http://robotrends.ru/robopedia/buksir> (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.
8. Системы управления интеллектуальных мобильных роботов в среде Dyn-Soft RobSim 5: сайт – URL: <http://robsim.dynsoft.ru/design3.pdf> (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.
9. Полная спецификация мобильного робота Kuka YouBot: сайт – URL: <http://www.youbot->

store.com/wiki/index.php/YouBot_Detailed_Specifications (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.

10. Технические характеристики Arduino UNO: сайт – URL: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno> (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.

11. Операционная система робота (РОС): сайт – URL: <https://ww2.mathworks.cn/help/ros/guide/robot-operating-system-ros.html> (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.

12. Операционная система РОС: сайт – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ROS_\(операционная_система\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/ROS_(операционная_система)) (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.

13. Модель обмена данными издатель-подписчик: сайт – URL: <https://docs.exponenta.ru/R2019a/robotics/examples/exchange-data-with-ros-publishers.html> (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.

14. Модель обмена данными клиент-сервер: сайт – URL: <https://docs.exponenta.ru/ros/ug/call-and-provide-ros-services.html> (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.

15. A. Gferrer, Geometry and kinematics of the Mecanum wheel. Comput. Aided Geom. Design 25 (2008), no. 9, 784-791.

16. Сила трения качения: сайт – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Трение_качения (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.

17. Второй закон Ньютона: сайт – URL: <https://sites.google.com/site/zakonifizika/home/zakony-nutona/vtoroj-zakon-nutona> (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.

18. Сила реакции опоры: сайт – URL: <http://fizmat.by/kursy/dinamika/sily> (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.

19. Крутящий момент: сайт – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Момент_силы (дата обращения: 20.03.2020). – Текст: Электронный.
20. Адамов Б.И. Применение аппарата неголономных связей в задачах идентификации параметров и управления движением: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. МЭИ, Москва, 2016.
21. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018).
22. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования ГОСТ 12.2.032-78.
23. Система "Человек-машина". Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования ГОСТ 21889-76.
24. Требования к организации оборудования рабочих мест с ПК регулируется СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.
25. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений СанПиН 2.2.4.548-96.
26. Шум. Общие требования безопасности ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ.
27. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95
28. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты ГОСТ 12.1.019-2017.
29. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.
30. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Паспорт отхода I-IV класса опасности. Основные требования. ГОСТ Р 53691-2009

31. Нормы пожарной безопасности. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности НПБ 105-03.

32. Пожарная безопасность. Общие требования ГОСТ 12.1.004-91.