

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: 09.04.04 «Программная инженерия»
 Отделение школы (НОЦ): Отделение информационных технологий

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка модели для предсказания класса дорожной поверхности на основе показаний датчиков мобильного робота

УДК 004.832.21:004.421:007.52:681.586

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ПМОИ1	Рыбаченко Иван Александрович		20.06.2022

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ	Губин Евгений Иванович	к.ф.м.н.		20.06.2022

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОИТ	Кайда Анастасия Юрьевна			20.06.2022

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Антоневич О.А.	к.б.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ ИШИТР	Савельев А.О.	к.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

по направлению 09.04.04 «Программная инженерия»

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен самостоятельно приобретать, развивать и применять математические, естественно-научные, социально-экономические и профессиональные знания для решения нестандартных задач, в том числе в новой или незнакомой среде и в междисциплинарном контексте
ОПК(У)-2	Способен разрабатывать оригинальные алгоритмы и программные средства, в том числе с использованием современных интеллектуальных технологий, для решения профессиональных задач
ОПК(У)-3	Способен анализировать профессиональную информацию, выделять в ней главное, структурировать, оформлять и представлять в виде аналитических обзоров с обоснованными выводами и рекомендациями
ОПК(У)-4	Способен применять на практике новые научные принципы и методы исследований
ОПК(У)-5	Способен разрабатывать и модернизировать программное и аппаратное обеспечение информационных и автоматизированных систем
ОПК(У)-6	Способен самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности
ОПК(У)-7	Способен применять при решении профессиональных задач методы и средства получения, хранения, переработки и трансляции информации посредством современных компьютерных технологий, в том числе, в глобальных компьютерных сетях
ОПК(У)-8	Способен осуществлять эффективное управление разработкой программных средств и проектов
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен к созданию вариантов архитектуры программного средства
ПК(У)-2	Способен разрабатывать и администрировать системы управления базами данных

ПК(У)-3	Способен управлять процессами и проектами по созданию (модификации) информационных ресурсов
ПК(У)-4	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий
ПК(У)-5	Способен осуществлять руководство разработкой комплексных проектов на всех стадиях и этапах выполнения работ

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

Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки (специальность) 09.04.04 Программная инженерия
 Отделение школы (НОЦ) Информационных технологий

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Савельев А.О.
 (подпись) (дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ПМОИ1	Рыбаченко Ивану Александровичу

Тема работы:

Разработка модели для предсказания класса дорожной поверхности на основе показаний датчиков мобильного робота	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 45-47/с от 14.02.2022

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.2022
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является автономная навигация.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор методов классификации дорожной поверхности. 2. Исследование предметной области, выбор метода анализа данных. 3. Разведочный анализ данных. 4. Разработка модели для классификации дорожной поверхности. 5. Работа над разделом по финансовому менеджменту, ресурсоэффективности и ресурсосбережения. 6. Работа над разделом по социальной ответственности. 7. Работа над разделом на английском языке.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Диаграмма Ганта.
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Основная часть</p>	<p>Доцент ОИТ ИШИТР, к.ф.-м.н., доцент Губин Е. И.</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Доцент ОСГН ШБИП, к.ф.н., доцент Меньшикова Е. В.</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Доцент ООД ШБИП, к.б.н., доцент Антоневи́ч О. А.</p>
<p>Английский язык</p>	<p>Доцент ОИЯ, к.ф.н., доцент Степура С. Н.</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Глава 1. Обзор предметной области</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>1.03.2022</p>
--	------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОИТ ИШИТР	Губин Е. И.	к.ф.-м.н., доцент		1.03.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ПМОИ1	Рыбаченко Иван Александрович		1.03.2022

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

Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки (специальность) 09.04.04 Программная инженерия
 Уровень образования магистратура
 Отделение школы (НОЦ) Информационных технологий
 Период выполнения весенний семестр 2021 /2022 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

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

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.2022
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.06.2022	Основная часть	70
10.06.2022	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
10.06.2022	Социальная ответственность	10
10.06.2022	Английский язык	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОИТ ИШИТР	Губин Е. И.	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОИТ ИШИТР	Савельев А. О.	к.т.н.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ПМОИ1	Рыбаченко Ивану Александровичу

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОИТ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	09.04.04 «Программная инженерия»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Бюджет – 666 351 руб. Затраты на заработную плату – 303 175 руб. Прочие расходы – 417 руб.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Тариф на электроэнергию 5,8 кВт/ч</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Налог во внебюджетные фонды 27,1 Районный коэффициент – 1,3 Накладные расходы – 16%</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)</i>	<i>Оценка потенциальных потребителей исследования, SWOT – анализ,</i>
2. <i>Формирование плана и бюджета инженерного проекта (ИП)</i>	<i>Планирование этапов работ, определение трудоемкости и построение календарного графика, формирование бюджета.</i>
3. <i>Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков</i>	<i>Оценка сравнительной эффективности исследования. Интегральный показатель ресурсоэффективности – 3.95 Интегральный показатель эффективности – 3.95 Сравнительная эффективность проекта – 0.86</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности НТИ
2. Матрица SWOT
3. График разработки
4. Бюджет НТИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.04.2022
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Меньшикова Екатерина Валентиновна	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ПМОИ1	Рыбаченко Иван Александрович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
8ПМ0И1		Рыбаченко Иван Александрович	
Школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	ОИТ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	09.04.04 Программная инженерия (Big Data Solutions)

Тема ВКР:

Разработка предсказательной модели класса дорожной поверхности на основе показаний датчиков мобильного робота	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования:</i> мобильный робот <i>Область применения:</i> сельское хозяйство, геодезия <i>Рабочая зона:</i> офисное помещение <i>Климатическая зона:</i> умеренная <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> колёсный мобильный робот, персональный компьютер <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> установка и контроль траектории движения робота</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> - Трудовой кодекс РФ - Федеральный закон «О персональных данных» - Рабочее место при выполнении работ сидя ГОСТ 12.2.032-78 - Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов ГОСТ Р ИСО 9241-1-2007
<p>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Вредные и опасные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – умственное перенапряжение – повышенная пульсация светового потока – отсутствие или недостаток необходимого естественного освещения – отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения – повышенный уровень шума – движущиеся твёрдые объекты, наносящие удар по телу работающего <p>Средства защиты от выявленных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – осветительные приборы – наушники – ограждение от движущегося робота <p>Расчёт будет производиться по фактору недостатка искусственного освещения</p>
<p>3. Экологическая безопасность при эксплуатации</p>	<p>Воздействие на селитебную зону: шумовое воздействие во время движения робота Воздействие на литосферу: загрязнение пластиком и токсичными веществами из аккумулятора в случае аварии робота</p>

	<p>Воздействие на гидросферу: загрязнение пластиком и токсичными веществами из аккумулятора в случае аварии робота</p> <p>Воздействие на атмосферу: загрязнение продуктами горения пластика в случае возгорания робота</p>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения	<p>Возможные ЧС: пожар, террористический акт</p> <p>Наиболее типичная ЧС: пожар</p>
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	к.б.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ПМОИ1	Рыбаченко Иван Александрович		

Реферат

Магистерская диссертация содержит 100 страниц, 47 рисунков, 27 таблиц, 49 источников и 5 приложений.

Ключевые слова: классификация, мобильный робот.

Объектом исследования является автономная навигация.

Предметом исследования является классификатор дорожной поверхности.

Цель работы – разработка модели для классификации поверхности движения мобильного робота.

В работе проведён анализ существующих подходов к классификации дорожной поверхности на основе датчиков мобильного робота и разработана собственная модель для решения задачи. Дано описание используемого при разработке модели набора данных, проведен его разведочный анализ и коррекция найденных недостатков. Проведено сравнение трех вариантов классификатора – SVM, Random Forest, Neural Network. Наиболее высокую точность показала модель Random Forest. Точность разработанного классификатора составила 76%, что соответствует средним значениям конкурентных моделей.

Оглавление

Термины и сокращения	15
Введение.....	16
Глава 1. Обзор предметной области.....	17
1.1 Классификация систем навигации.....	17
1.2 Датчики для автономной навигации	18
1.2.1 Акселерометр	18
1.2.2 Гироскоп	19
1.2.3 Энкодер.....	21
1.2.4 Датчик тока	21
1.3 Задача классификации дорожной поверхности	22
1.4 Применение машинного обучения в задаче классификации дорожной поверхности	22
1.4.1 Модели.....	22
1.4.2 Признаки.....	24
Выводы по главе.....	24
Глава 2. Разработка модели для классификации дорожной поверхности	25
2.1 Описание набора данных.....	25
2.1.1 Общая характеристика.....	25
2.1.2 Тестовый стенд для сбора данных.....	25
2.1.3 Эксперименты для сбора данных	26
2.2 Разведочный анализ данных	27
2.2.1 Проверка гипотезы о нормальном распределении данных.....	27
2.2.2 Исследование корреляции показаний гироскопа.....	29
2.2.3 Исследований атрибута <i>скор.зад.Х</i> на наличие выбросов	33
2.2.4 Разделимость целевого атрибута по значениям акселерометра и суммы токов	39
2.3 Разработка классификационной модели.....	41
2.3.1 Предобработка набора данных	41
2.3.2 Случайный лес	42
2.3.3 SVM.....	43
2.3.4 Нейронная сеть	43
2.3.5 Валидация модели	45
Выводы по главе.....	45
Глава 3. Финансовый менеджмент	46

Введение	46
3.1 Предпроектный анализ	46
3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	46
3.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	47
3.1.3 SWOT-анализ	48
3.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации	49
3.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	50
3.2 Инициация проекта	51
3.3 Планирование управления научно-техническим проектом.....	52
3.3.1 Иерархическая структура работ.....	52
3.3.2 Бюджет научного исследования	57
3.3.3 Реестр рисков проекта.....	60
3.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования ..	60
Выводы по главе	61
Глава 4. Социальная ответственность.....	63
Введение	63
4.1 Правовые и организационные вопросы безопасности	64
4.1.1 Правовые вопросы организации работы над проектным решением	64
4.1.2 Организация рабочей зоны.....	65
4.2 Производственная безопасность.....	66
4.2.1 Вредные и опасные факторы производства.....	66
4.2.2 Умственное перенапряжение	67
4.2.3 Повышенная пульсация светового потока.....	68
4.2.4 Отсутствие или недостаток необходимого естественного освещения	68
4.2.5 Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения.....	69
4.2.6 Повышенный уровень шума.....	69
4.2.7 Движущиеся твёрдые объекты, наносящие удар по телу работающего	70
4.2.8 Расчет уровня освещения	70
4.3 Экологическая безопасность.....	71
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	72

Выводы по главе	73
Заключение	74
Список литературы	75
Приложение А	83
Приложение Б	85
Приложение В.....	86
Приложение Г	87
Приложение Д.....	88

Термины и сокращения

1. **МЭМС (микроэлектромеханические системы)** – микроустройства, объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические составляющие.

2. **GMDH (Group Method of Data Handling)** – группа алгоритмов компьютерного математического моделирования многопараметрических наборов данных, отличающихся полностью автоматической структурной и параметрической оптимизацией моделей.

3. **Одометрия** – использование данных о движении приводов для оценки перемещения.

4. **ИНС (Инерциальная Навигационная Система)** – система навигации, основанная на свойствах инерции тел, являющаяся автономной, то есть не требующая наличия внешних ориентиров или поступающих извне сигналов.

Введение

С ростом автономности мобильной робототехники растёт потребность в повышении точности позиционирования. Для определения положения и ориентации робота могут применяться как внешние системы навигации (GPS, Глонасс), так и системы навигации, изолированные от внешнего мира. Последние позволяют обеспечить полную автономность робота и являются незаменимыми в условиях недоступности глобальной системы позиционирования. Входящая информация для автономной системы навигации может быть получена от взаимодействия с внешним миром (камера, радар, микрофон) или из внутренних датчиков робота (акселерометр, гироскоп, одометрия).

Сопутствующей к задаче позиционирования на основе внутренних датчиков робота является задача определения типа дорожной поверхности. Знание о типе поверхности может быть использовано, например, для повышения точности управления роботом, планирования траектории движения робота или для составления карты местности. Одним из методов решения задачи классификации дорожной поверхности является разработка модели машинного обучения.

Цель работы – разработка модели для классификации поверхности движения мобильного робота.

Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

1. Ознакомиться с предметной областью
2. Описать используемый набор данных
3. Разработать несколько моделей для классификации поверхности движения мобильного робота
4. Выбрать лучшую модель и дать оценку её точности

Практическим результатом работы является модель для классификации поверхности, по которой движется колёсный робот.

Глава 1. Обзор предметной области

1.1 Классификация систем навигации

В зависимости от источника информации о местоположении выделяется 4 группы систем навигации [1]:

- 1) Глобальная. Система навигации, основанная на взаимодействии со спутниковой системой.
- 2) Персональная. Система позиционирования части робота, например, манипулятора.
- 3) Автономная. Система навигации, основанная на датчиках, установленных непосредственно на роботе.
- 4) Локальная. Система навигации, основанная на взаимодействии с установленными в области движения маяками.

Существует более простая классификация, основанная на расположении вычислительного блока для расчёта положения в пространстве [2]:

- 1) Пассивная. Робот получает информацию о своём положении извне в готовом виде.
- 2) Активная. Робот рассчитывает своё положение самостоятельно.

Настоящая работа посвящена автономной активной системе навигации. Источниками информации для такой системы могут выступать 4 группы датчиков [3]:

- 1) Колёсные датчики (энкодер, датчики тока)
- 2) Датчики расстояния (радар, лидар)
- 3) Инерциальные датчики (гироскоп, акселерометр)
- 4) Датчики видео/аудио (камера, микрофон)

В настоящей работе в качестве источников информации используются колёсные и инерциальные датчики.

1.2 Датчики для автономной навигации

1.2.1 Акселерометр

Акселерометр – это прибор, измеряющий проекцию кажущегося ускорения (разности между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением). Акселерометры бывают механические, электронные, пьезоэлектрические и термальные [4]. Наиболее популярными являются микроэлектромеханические акселерометры (МЭМС-акселерометры).

В упрощённом виде акселерометр, основанный на конденсаторном принципе, имеет устройство, показанное на рисунке 1 [5]. Подвижная часть системы – классический грузик на подвесах. При наличии ускорения грузик смещается относительно неподвижной части акселерометра. Обкладка конденсатора, прикрепленная к грузику, смещается относительно обкладки на неподвижной части. Емкость меняется, при неизменном заряде меняется напряжение – это изменение можно измерить и рассчитать смещение грузика. Откуда, зная его массу и параметры подвеса, легко найти и искомое ускорение.

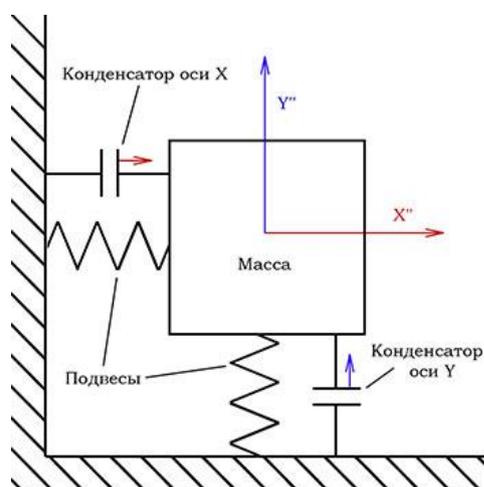


Рисунок 1 – Устройство акселерометра, основанного на конденсаторном принципе

Устройство МЭМС-акселерометра отличается от описанного выше, но в его основу положен тот же принцип.

Основными причинами погрешности МЭМС-акселерометра являются [6]:

1. изменение температуры;
2. вибрационные воздействия;
3. перекрестное ускорение;
4. внутренние шумы акселерометра.

Акселерометр может быть подвержен дрейфу нуля. Эффект дрейфа нуля проявляется в ненулевых показаниях акселерометра при фактическом отсутствии ускорения.

1.2.2 Гироскоп

Гироскоп – это прибор, измеряющий угол наклона предмета к земной поверхности. Гироскопы делятся на 2 типа – оптические и механические [7]. В рассматриваемом роботе используется микроэлектромеханический гироскоп.

Наиболее простым примером гироскопа с точки зрения устройства является гироскоп роторного типа. Центральной частью механического гироскопа роторного типа является вращающийся ротор. Ротор закреплён в системе из нескольких внутренних рам. Внутренние рамы соединены таким образом, что каждая из них может свободно вращаться вокруг определённой оси. На рисунке 2 продемонстрировано внутреннее устройство гироскопа.

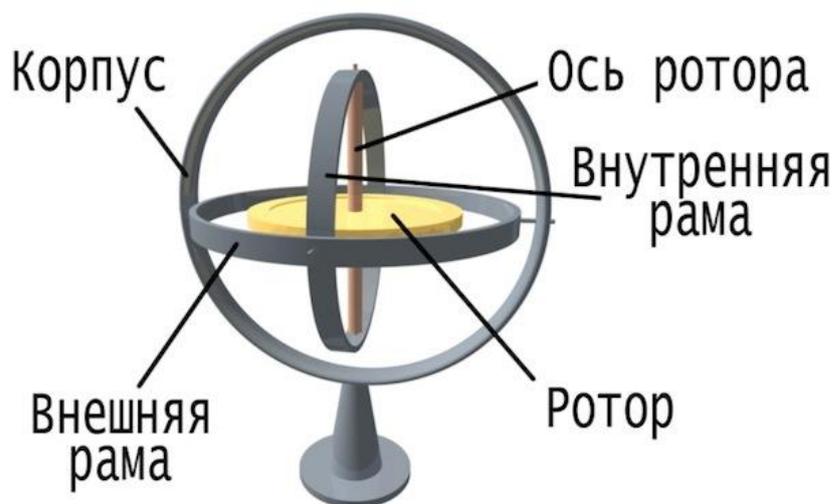


Рисунок 2 – Внутреннее устройство гироскопа

На постоянно вращающийся ротор действует сила Кориолиса, вследствие чего при вращении гироскопа ротор сохраняет свою ориентацию в пространстве. Сохранение ориентации ротора было бы невозможным без системы внутренних рам, которые при вращении гироскопа изменяют углы наклона. Специальные датчики считывают углы наклона рам и позволяют судить об углах наклона самого гироскопа.

Источники ошибок гироскопа можно разделить на 2 категории – имеющие механическую и электронную природу [8]. Механические ошибки могут быть связаны с нарушением перпендикулярности осей гироскопа, изменением его собственной частоты, а также с Броуновским шумом. Как следствие механических ошибок, возможен дрейф гироскопа, т.е. уход его оси вращения от первоначального положения. Ошибки электронной природы затрагивают процесс снятия показаний с датчиков гироскопа и приводят к появлению шума в показаниях гироскопа. В силу своей инерционной природы при отсутствии калибровки со временем погрешность гироскопа накапливается [9].

Устройство МЭМС-гироскопа похоже на устройство МЭМС-акселерометра.

1.2.3 Энкодер

Энкодер (преобразователь угловых перемещений) – это электронное устройство, позволяющее с необходимой точностью измерить различные параметры вращения какой-либо детали, как правило, вала электродвигателя или редуктора [10].

Измеряемыми параметрами могут быть: скорость вращения, угловое положение по отношению к нулевой метке, направление вращения.

Энкодеры делятся на абсолютные и инкрементальные [11]. В рассматриваемом роботе используется инкрементальный энкодер.

У абсолютного энкодера весь круг поворота разделен на определенное количество секторов, чаще всего одинакового размера. Эти сектора пронумерованы. Энкодер при работе выдает номер сектора, в котором на данный момент он находится. Поэтому он и называется абсолютным. У этого типа энкодера всегда можно определить, на какой угол относительно нулевого сектора повернут энкодер в конкретный момент, то есть, при повороте он выдает значения номеров секторов, до максимального значения. Далее он переходит снова на ноль.

Точность значений, выдаваемых энкодером в значительной степени зависит от того, насколько качественно он закреплён на валу [11].

1.2.4 Датчик тока

Датчиками тока являются устройства, с помощью которых определяется сила постоянного или переменного тока в электрических цепях [12]. В их конструкцию входят магнитопровод с зазором и компенсационной обмоткой, датчик Холла, а также электронная плата, выполняющая обработку электрических сигналов. Основным чувствительным элементом служит датчик Холла, закрепляемый в зазоре магнитопровода и соединяемый со входом усилителя.

Принцип действия в целом одинаковый для всех подобных устройств. Под действием измеряемого тока возникает магнитное поле, затем, с помощью датчика Холла осуществляется выработка соответствующего напряжения. Далее это напряжение усиливается на выходе и подается на выходную обмотку.

1.3 Задача классификации дорожной поверхности

Знание о типе поверхности может быть использовано для повышения точности управления роботом, планирования траектории движения робота или для составления карты местности.

При использовании акселерометра в решении задачи классификации дорожной поверхности стоит учитывать зависимость его показаний от скорости движения робота. Существует несколько подходов к созданию классификатора дорожной поверхности, не зависящего от скорости движения робота:

- 1) Вычисление признаков, не зависящих от скорости движения робота [13]
- 2) Комбинация нескольких классификаторов, каждый из которых заточен под свой диапазон скоростей движения робота [14]
- 3) Расширение обучающей выборки для включения в неё различных скоростей движения робота [15]

1.4 Применение машинного обучения в задаче классификации дорожной поверхности

1.4.1 Модели

Работа [16] проводит сравнение классификаторов на основе алгоритмов *Random Forest*, *SVM*, *K Nearest Neighbors* и *Naive Bayes*. Классификатор на основе *SVM* показал наибольшую точность.

Классификаторы на основе SVM встречаются наиболее часто, однако имеются современные работы, использующие *K Nearest Neighbors* [17] и при этом демонстрирующие высокую точность классификации.

Важное место в решении задачи классификации дорожной поверхности занимают нейронные сети. Работа [15] предлагает использовать нейронные сети для предсказания категории поверхности по вручную подготовленным шаблонам как показано на рисунке 3.

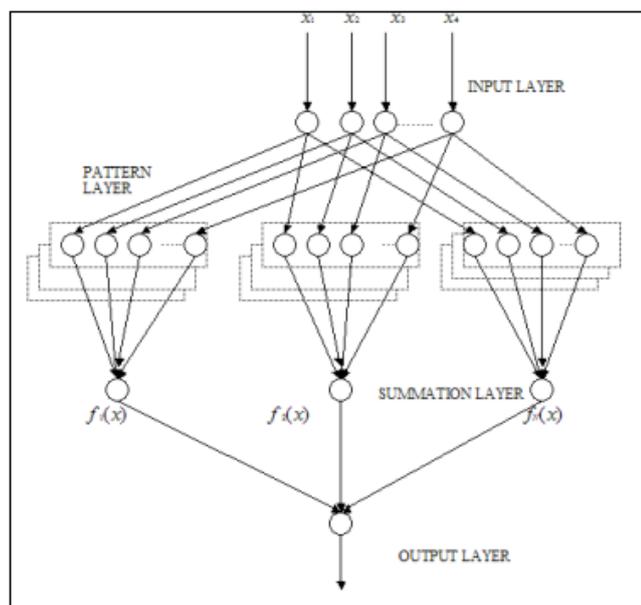


Рисунок 3 – Нейронная сеть на основе шаблонов

Ряд работ [18], [19], [20] в качестве модели использует многослойную нейронную сеть. Число скрытых слоёв в работах варьируется от 1 до 4.

Работа [21] рассматривает данные с датчиков как поток данных и применяет для классификации ансамбль LSTM-моделей.

Работы [22] и [23] перед слоем LSTM добавляют свёрточный слой. Таким образом в этих работах вопрос выделения признаков из сырых данных решается не вручную, а на уровне модели.

1.4.2 Признаки

Многие работы в качестве признака используют данные, полученные с акселерометра. Работы, использующие все 3 оси акселерометра и только ось Z, встречаются одинаково часто.

Гироскоп как источник признаков для модели используется реже. Для гироскопа применимы те же преобразования, что и для акселерометра. Наиболее часто используются сразу все 3 оси гироскопа, реже используемые оси ограничиваются осями X и Y.

Показания с колёсных датчиков редко используются в работах по классификации дорожной поверхности, чаще они применяются для предсказания коэффициента проскальзывания колёс. Значения тока могут переводиться из временного диапазона в частотный.

Выводы по главе

В первой главе была дана классификация систем навигации, описаны принципы действия основных датчиков, используемых в автономной навигации, представлены особенности задачи классификации дорожной поверхности и дано описание существующих методов решения задачи.

Улучшение классификатора дорожной поверхности возможно через изменение набора признаков или совершенствование модели. Если объединить все работы о классификации дорожной поверхности, то набор признаков достаточно широк и значительных изменений не претерпевает. Основные улучшения возможны в вопросе выбора признаков из широкого набора.

Среди используемых моделей наиболее часто встречается SVM. Набирает популярность использование нейронной сети. Модель, основанная на нейронной сети, активно совершенствуется, что говорит о перспективности разработок в этом направлении.

Глава 2. Разработка модели для классификации дорожной поверхности

2.1 Описание набора данных

2.1.1 Общая характеристика

Для работы был предоставлен набор данных, полученный в результате серии экспериментов [24]. Набор данных содержит 40 атрибутов. Атрибуты могут быть разделены на 4 категории:

1. 15 атрибутов, полученных с датчиков робота (приложение А);
2. 13 атрибутов кинематики (приложение Б);
3. 8 атрибутов террамеханики (приложение В);
4. 4 целевых атрибута (приложение Г).

2.1.2 Тестовый стенд для сбора данных

Для сбора данных использовался лабораторный стенд, включающий в себя робота, поверхность, по которой движется робот, и систему определения координат робота.

Модель робота – Festo Robotino. Робот имеет 3 колеса, расположенных под углом друг к другу. Каждое колесо управляется отдельным двигателем. При помощи подачи различных напряжений на колёса, возможно движение робота в любом направлении. Управление роботом осуществляется заданием целевой скорости движения вдоль оси X, целевой скорости движения вдоль оси Y и целевой скорости вращения вокруг оси Z.

На работе установлены следующие датчики:

- 1) Энкодер инкрементальный DunkerMotoren RE 30-2-500
- 2) Гироскоп-акселерометр MPU 6050

Поверхность движения робота представляет собой мозаику из плит разных материалов. Материалы подобраны таким образом, что траектория движения робота сильно искажается при перемещении с одного материала на

другой. На рисунке 4 продемонстрированы фрагменты дорожной поверхности.



Рисунок 4 – Фрагменты дорожной поверхности

Для определения координат робота использовалась закреплённая над стендом камера.

2.1.3 Эксперименты для сбора данных

Запуск робота осуществлялся на каждой из 5 типов дорожной поверхности с каждой из 6 целевых скоростей. Итого было 30 запусков робота. Внутри каждого запуска целевая скорость робота и тип дорожной поверхности оставались фиксированными. Целевые скорости робота представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Целевые скорости движения робота

№	dx/dt (мм/с)	dy/dt (мм/с)	$d\varphi/dt$ (градус/с)
1	100	0	0
2	0	100	0
3	100	100	0
4	0	0	24
5	0	0	48
6	0	0	96

Продолжительность каждого запуска составляла 4 секунды. Набор данных был получен разбиением значений, полученных с датчиков, на интервалы по 0,5 секунды. Значения датчиков были усреднены на этих

интервалах. Таким образом, каждому запуску робота соответствует 8 строк в наборе данных. Поскольку общее число запусков – 30, то число строк в наборе данных – 240.

2.2 Разведочный анализ данных

2.2.1 Проверка гипотезы о нормальном распределении данных

Знание о том, соответствует ли выборка нормальному закону распределения, полезно для выбора дальнейших методов анализа данных, например, критерий Стьюдента применим только для нормальных распределений [25]. Существует большое количество критериев проверки распределения на соответствие нормальному закону, например, критерии Шапиро-Уилка, Колмогорова-Смирнова, Лиллиефорса, Хи-квадрат.

Критерий Колмогорова-Смирнова не может быть применён для проверки нормальности распределения, поскольку параметры нормального распределения заранее неизвестны. Для проверки нормальности распределения может быть использован критерий Лиллиефорса, который является модификацией критерия Колмогорова-Смирнова и предполагает вычисление параметров нормального распределения из тестируемой выборки.

Проверим для каждого из атрибутов i можно ли описать его законом нормального распределения. В качестве критерия согласия применим критерий Лиллиефорса. Выберем уровень значимости – 0.05.

Выдвинем нулевую гипотезу H_0 – генеральная совокупность атрибута i имеет нормальное распределение. Альтернативная гипотеза H_1 – генеральная совокупность атрибута i имеет распределение отличное от нормального.

Под генеральной совокупностью понимается множество значений, из которого была получена выборка. В рассматриваемом случае выборкой является исследуемый набор данных.

Вычислим критерий Лиллиефорса для каждого из атрибутов. Результат вычислений для данных акселерометра представлен наибольшими значениями и продемонстрирован в таблице 2.

Таблица 2 – Расчёт критерия Лиллиефорса

Атрибут	Критерий Лиллиефорса	pvalue
аксX	0.098	0.019
аксY	0.088	0.047
аксZ	0.121	0.002

Полученные значения критерия Лиллиефорса надо сравнить с критическим значениями. Для уровня значимости 0.05 и выборки размером 240 строк, критическое значение может быть рассчитано по формуле **Ошибка!** **Источник ссылки не найден.** и в численном выражении составляет 0.057.

$$\lambda = \frac{0,886}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

Для того, чтобы выборка могла считаться распределённой по нормальному закону, полученный критерий должен быть не больше критического [26], в противном случае гипотезу о нормальности распределения следует отвергнуть. Так как вычисленные значения критерия Лиллиефорса больше 0.057, то гипотеза о нормальности распределения отвергается. Поскольку рассчитанное значение *pvalue* оказалось меньше выбранного уровня значимости, то полученный результат может считаться статистически значимым. Значение *pvalue* показывает вероятность того, что нулевая гипотеза была ошибочно принята за истину, если на самом деле она была ложна.

Построенная гистограммы распределения показаний тока, гироскопа и акселерометра, представленная на рисунке 5, демонстрирует, что показания акселерометра более близки к нормальному закону распределения, чем другие атрибуты.

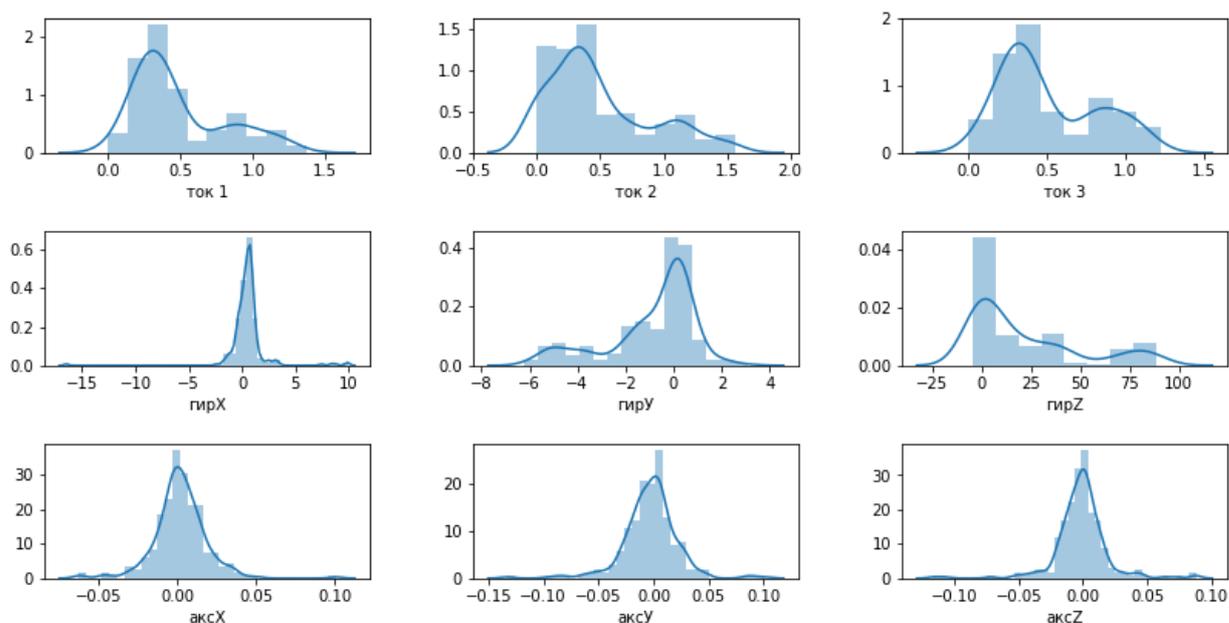


Рисунок 5 – Распределение значений тока, гироскопа и акселерометра

Таким образом, в результате проверки гипотезы о нормальности распределения данных было установлено следующее:

- ни один из атрибутов набора данных не соответствует нормальному закону распределения при уровне значимости 0.05
- распределение значений акселерометра близко к нормальному

2.2.2 Исследование корреляции показаний гироскопа

В результате исследования массива данных была обнаружена аномально высокая линейная корреляция между атрибутами *гирY* и *гирZ*. На рисунке 6 изображена карта корреляции признаков, демонстрирующая наличие аномалии. Для вычисления коэффициентов корреляции использовался метод Пирсона.

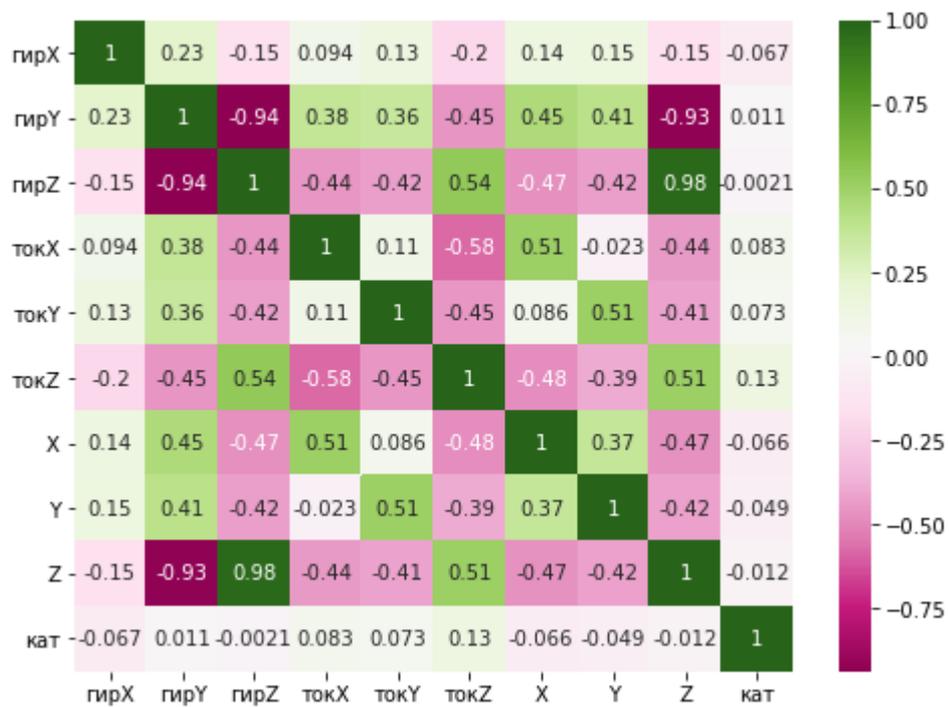


Рисунок 6 – Карта линейной корреляции признаков

На рисунке 7 изображены показания гироскопа вдоль осей X, Y и Z. Из рисунка видно, что значения гироскопа вдоль осей Y и Z различны.

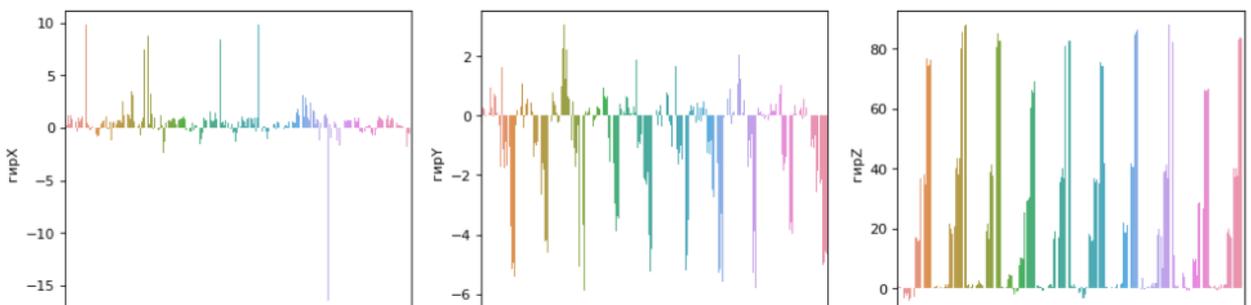


Рисунок 7 – Показания гироскопа вдоль осей X, Y и Z

Линейную зависимость между атрибутами *гирY* и *гирZ* можно продемонстрировать диаграммой рассеяния, изображённой на рисунке 8.

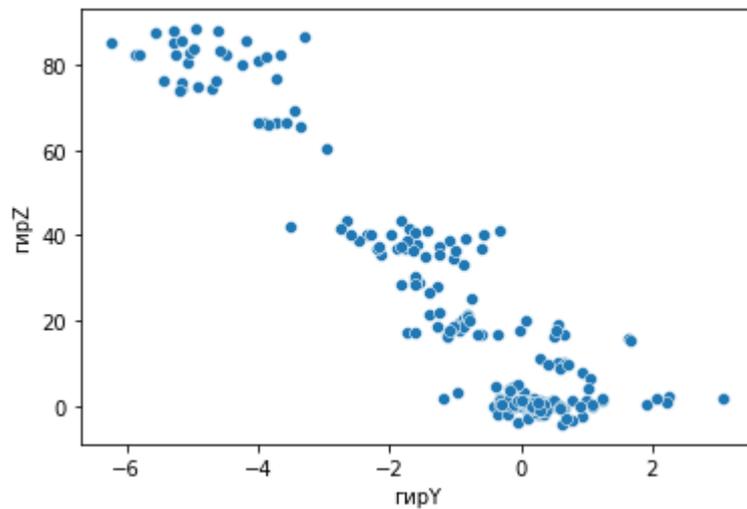


Рисунок 8 – Диаграмма рассеивания атрибутов *гирY* и *гирZ*

Рисунок 9 показывает, что возможно построить модель линейной регрессии для определения *гирZ* на основе *гирY* с относительной погрешностью в 6%.

```

from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import mean_absolute_error
from sklearn.metrics import median_absolute_error
from sklearn.metrics import mean_absolute_percentage_error

X = df['гирY'].values.reshape(-1, 1)
y = df['гирZ'].values.reshape(-1, 1)

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, train_size=0.7, random_state=0)

model = LinearRegression()
model.fit(X_train, y_train)
print(f'r2={model.score(X_test, y_test)}')
print(f'mean_absolute_error={mean_absolute_error(y_test, model.predict(X_test))}')
print(f'median_absolute_error={median_absolute_error(y_test, model.predict(X_test))}')
print(f'mean_absolute_percentage_error={mean_absolute_percentage_error(y_test, model.predict(X_test))}')

r2=0.88035336795545
mean_absolute_error=7.279554867014734
median_absolute_error=6.518697398068847
mean_absolute_percentage_error=5.8384240679519825

```

Рисунок 9 – Линейная регрессия для определения *гирZ* на основе *гирY*

Стоит отметить, что если убрать из рассмотрения некоторые измерения, то зависимость между атрибутами *гирX-гирY* и *гирX-гирZ* также будет похожа на линейную, что показано на рисунке 10.

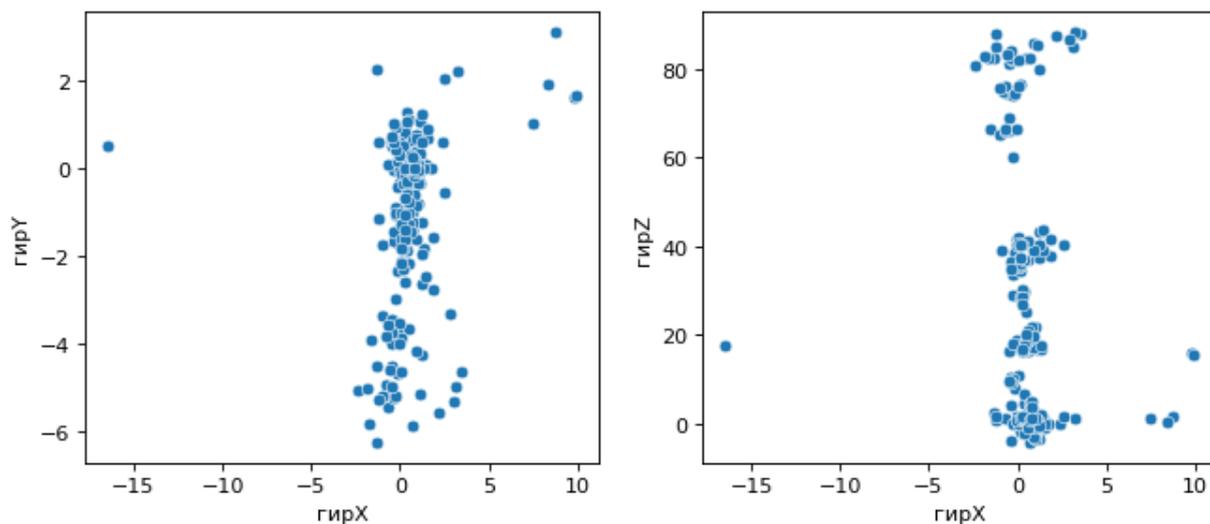


Рисунок 10 – Диаграмма рассеивания атрибутов *gyrX-gyrY* и *gyrX-gyrZ*

После удаления из массива данных строк, в которых показания гироскопа вдоль оси X по модулю превышают 5 (количество таких строк – 6), диаграммы рассеивания показаний гироскопа принимают вид как на рисунке 11. Полученные диаграммы не подтверждают гипотезу о линейной зависимости между атрибутами *gyrX-gyrY* и *gyrX-gyrZ*.

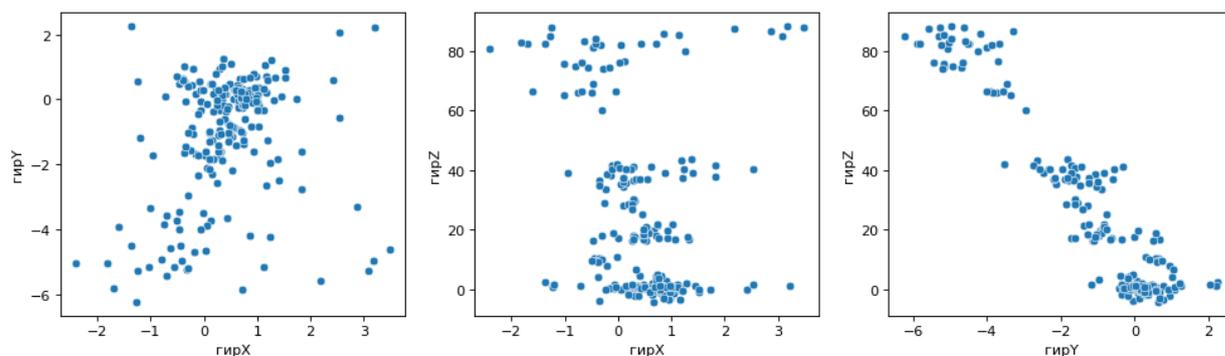


Рисунок 11 – Диаграммы рассеивания показаний гироскопа после удаления строк с экстремальными значениями атрибута *gyrX*

Карта линейной корреляции признаков после удаления строк с экстремальными значениями атрибута *gyrX* приняла вид как на рисунке 12. Корреляция между атрибутами *gyrX-gyrY* и *gyrX-gyrZ* не обнаружилась. Корреляция между атрибутами *gyrY-gyrZ* подтвердилась.

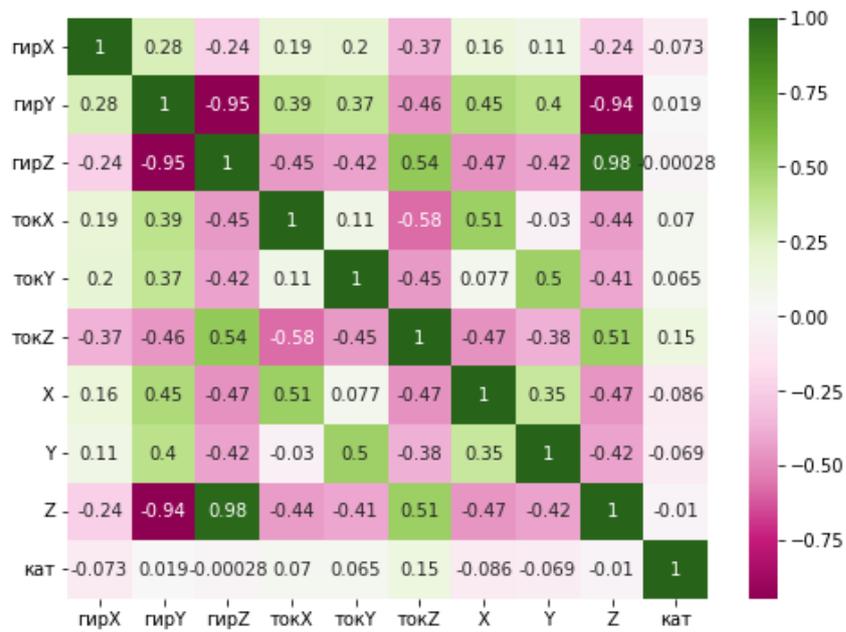


Рисунок 12 – Карта линейной корреляции признаков после удаления строк с экстремальными значениями атрибута *girX*

Таким образом, в результате анализа корреляции показаний гироскопа, были обнаружены:

- аномальные значения атрибута *girX* в количестве 6 штук
- аномально высокая линейная корреляция атрибутов *girY-girZ* в размере 95% по методу Пирсона

2.2.3 Исследований атрибута *скор.зад.X* на наличие выбросов

При помощи функции, показанной на рисунке 13, были построены графики фактической скорости робота вдоль заданной оси при заданных целевых скоростях.

```

def plot_experiment(exp, atr):
    plt.figure(figsize=(15, 4), dpi=80)
    ax = sns.barplot(y=df[df['эксперимент']==exp][atr],
                    x=df[df['эксперимент']==exp][atr].index,
                    hue=df[df['эксперимент']==exp]['кат'])
    for bar in ax.patches:
        newwidth=0.5
        x = bar.get_x()
        width = bar.get_width()
        centre = x+width/2.
        bar.set_x(centre-newwidth/2.)
        bar.set_width(newwidth)

plt.show()

```

Рисунок 13 – Функция построения графика фактической скорости работы вдоль заданной оси при заданных целевых скоростях

На рисунке 14 показана фактическая скорость вращения двигателей робота в пересчёте на ось X, при заданных скоростях [x=100, y=0, z=0]. Цветом обозначен тип поверхности. По нижней стороне графика отложен номер строки из массива данных. Строки с номерами 123 и 195 имеют аномально низкое значение скорости вдоль оси X.

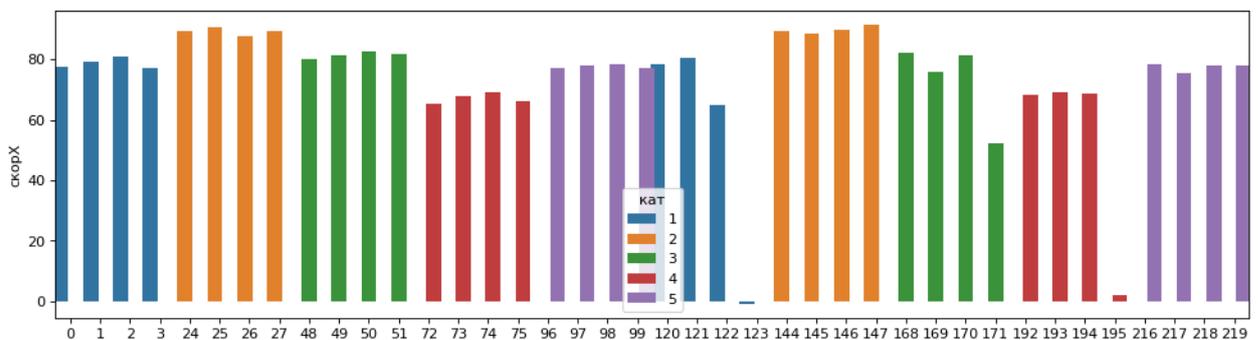


Рисунок 14 – Фактическая скорость вращения двигателей робота в пересчёте на ось X, при заданных скоростях [x=100, y=0, z=0]

На рисунке 15 показана фактическая скорость вращения двигателей робота в пересчёте на ось Y, при заданных скоростях [x=0, y=100, z=0]. Строки с номерами 127, 151, 174, 175 и 199 имеют аномально низкое значение скорости вдоль оси Y.

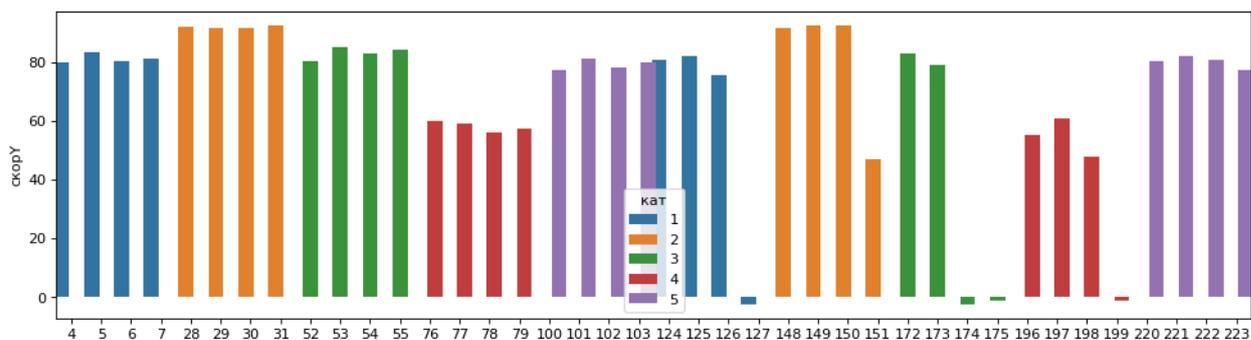


Рисунок 15 – Фактическая скорость вращения двигателей робота в пересчёте на ось Y, при заданных скоростях [x=0, y=100, z=0]

На рисунке 16 показана фактическая скорость вращения двигателей робота в пересчёте на ось X, при заданных скоростях [x=100, y=100, z=0]. Строки с номерами 131, 203, 227 имеют аномально низкое значение скорости вдоль оси X. Эти же строки имеют аномально низкое значение скорости вращения двигателей в пересчёте на ось Y.

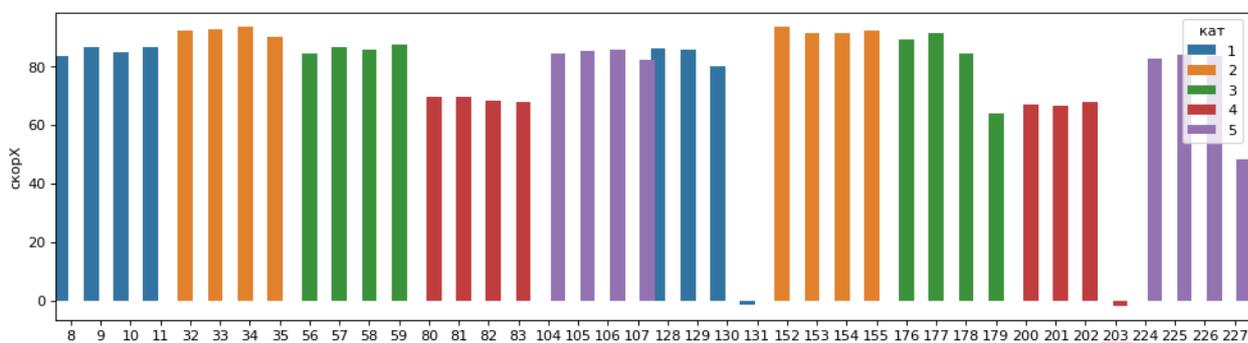


Рисунок 16 – Фактическая скорость вращения двигателей робота в пересчёте на ось X, при заданных скоростях [x=100, y=100, z=0]

Аналогичным образом было установлено, что строки с номерами 183, 207, 143 и 191 имеют аномально низкое значение скорости вращения двигателей в пересчёте на ось Z.

Итого обнаружено 14 строк с аномальным значением скорости вращения двигателей. Обозначенные строки могут быть обнаружены кодом, показанным на рисунке 17. Код выявляет строки, значения скорости вращения двигателя в

которых более чем на треть меньше среднего значения скорости вращения двигателя при заданных скоростях вращения двигателя и типе поверхности.

```
df_mean_speed = df[['скорX', 'скорY', 'скорZ', 'кат', 'эксперимент']].groupby(['кат', 'эксперимент']).mean()
outliers = {'X': [], 'Y': [], 'Z': []}
for cat in range(1,5+1):
    for exp in range(1,6+1):
        for atr in ['X', 'Y', 'Z']:
            out = df.loc[(df['кат'] == cat) &
                (df['эксперимент'] == exp) &
                (df[f'скор.зад.{atr}'] != 0) &
                (np.abs(df[f'скор{atr}']) <
                    np.abs(df_mean_speed.loc[(cat, exp), f'скор{atr}'])*2/3), [f'скорX', f'скор.зад.{atr}']]
            outliers[atr].extend(out.index.values)
outliers
{'X': [123, 131, 195, 203, 227],
'Y': [127, 131, 151, 174, 175, 199, 203, 227],
'Z': [143, 183, 191, 207]}
```

Рисунок 17 – Код для выявления строк с аномальным значением скорости вращения двигателей

На рисунке 18 изображены значения атрибута *энк2* для тех строк массива данных, в которых заданная скорость движения робота соответствует вектору $[x=0, y=100, z=0]$. Из рисунка видно, что аномально низкие значения скорости соответствуют аномально низким значениям показаний энкодера.

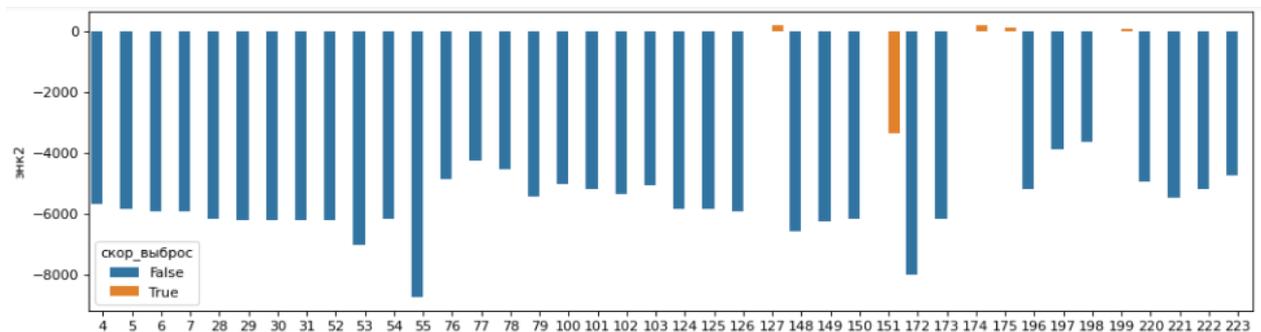


Рисунок 18 – Значения атрибута *энк2* для тех строк массива данных, в которых заданная скорость движения робота соответствует вектору $[x=0, y=100, z=0]$

Из рисунка 19 видно, что аномально низким значениям скорости соответствует аномально низкое значение тока.

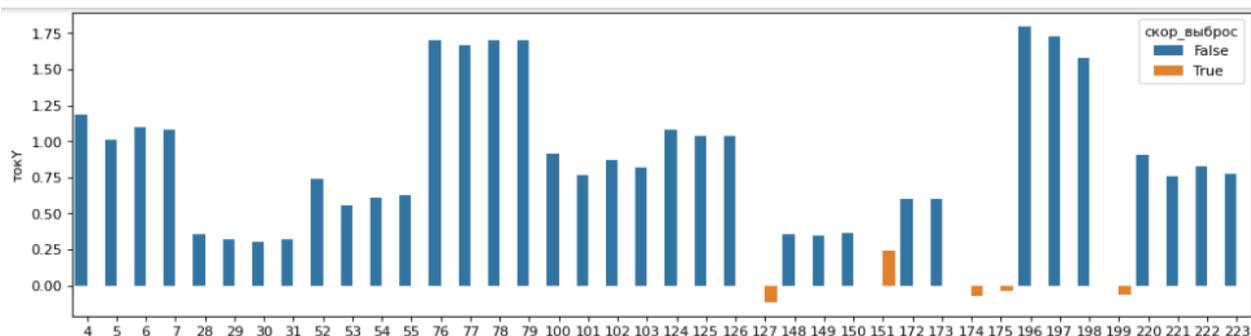


Рисунок 19 – Значения атрибута *токУ* для тех строк массива данных, в которых заданная скорость движения робота соответствует вектору $[x=0, y=100, z=0]$

Наиболее отчётливо выбросы наблюдаются на рисунке 20, на котором изображены значения атрибута *ск-зад/токУ* для тех строк массива данных, в которых заданная скорость движения робота соответствует вектору $[x=0, y=100, z=0]$.

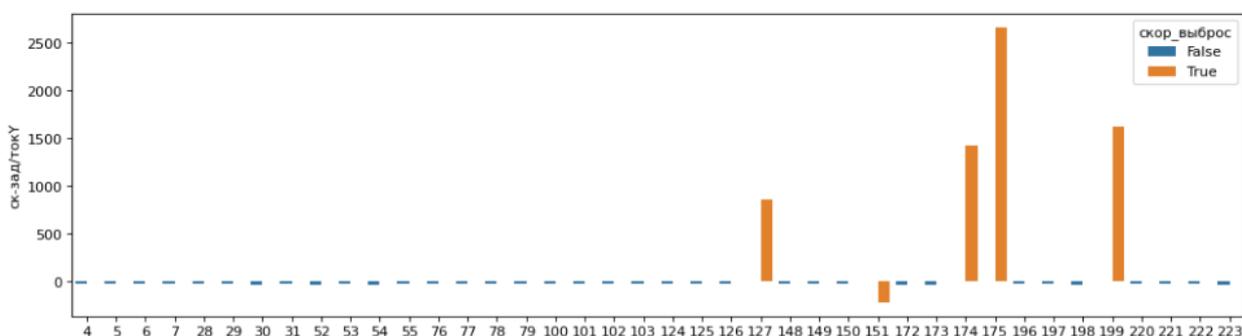


Рисунок 20 – Значения атрибута *ск-зад/токУ* для тех строк массива данных, в которых заданная скорость движения робота соответствует вектору $[x=0, y=100, z=0]$

Корреляция аномальных значений скорости с целевыми переменными присутствует, но неоднозначна. Так, на рисунке 21 изображены значения атрибута *X* для тех строк массива данных, в которых заданная скорость движения робота соответствует вектору $[x=100, y=100, z=0]$. Строка 131 имеет

аномально низкое значение атрибута X , в то время как строки 203 и 227 не выделяются из общего ряда.

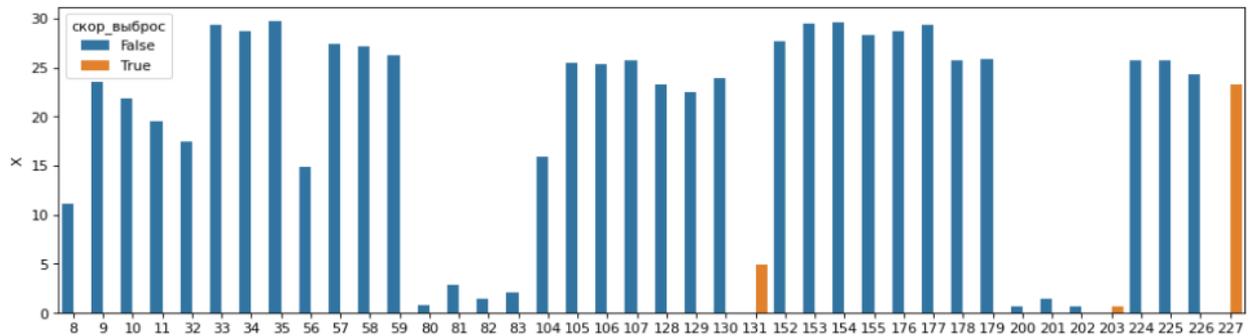


Рисунок 21 – Рзначения атрибута X для тех строк массива данных, в которых заданная скорость движения робота соответствует вектору $[x=100, y=100, z=0]$

Дополнительно, при анализе данных было замечено аномально высокое значение показаний энкодера в строке 169, что продемонстрировано на рисунке 22. На графике изображены строки, в которых заданная скорость движения робота соответствует вектору $[x=100, y=0, z=0]$.

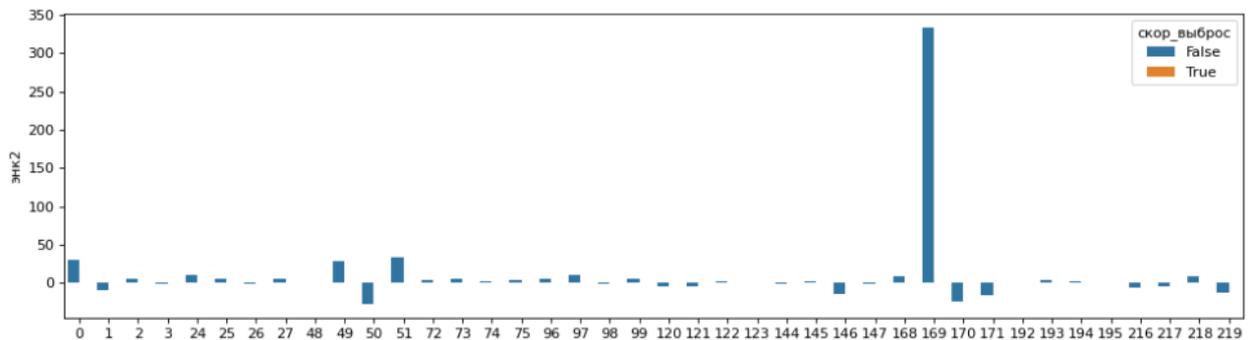


Рисунок 22 – Аномально высокое значение показаний энкодера в строке 169

Таким образом, было установлено следующее:

- Строки с номерами 123, 131, 195, 203, 227, 127, 131, 151, 174, 175, 199, 203, 227, 143, 183, 191, 207 имеют anomalно низкие значения скорости, энкодеров и токов

- Предположительно в строке 169 имеется anomalно высокое значение энкодера

2.2.4 Разделимость целевого атрибута по значениям акселерометра и суммы токов

На рисунке 23 показана диаграмма рассеивания корня среднеквадратичной суммы токов и вертикального ускорения. Цветом обозначена категория дорожной поверхности. Из рисунка видно, что категория поверхности №5, обозначенная зелёным цветом по корню среднеквадратичной суммы токов разделяется на 2 группы.

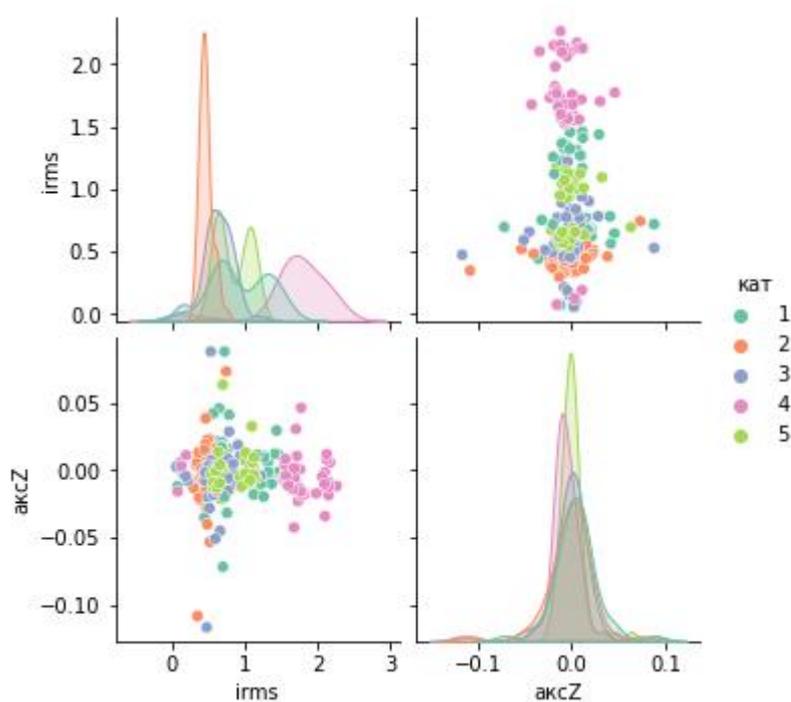


Рисунок 23 – Диаграмма рассеивания корня среднеквадратичной суммы токов и вертикального ускорения

Рисунок 24 показывает, что разделение суммы токов по категории №5 связано с различием в заданной целевой скорости. При вращательном

движении робота сумма токов принимает малое значение, при поступательном – большое.

```
df[(df['кат']==5) & (df['irms'] < 0.7)]
```

	скор.зад.X	скор.зад.Y	скор.зад.Z	эксперимент
108	0	0	24	4
109	0	0	24	4
110	0	0	24	4
111	0	0	24	4
113	0	0	48	5
114	0	0	48	5
115	0	0	48	5
116	0	0	96	6
117	0	0	96	6
118	0	0	96	6
119	0	0	96	6

Рисунок 24 – Заданные целевые скорости для категории поверхности №5 и много значения суммы токов

На рисунке 25 показана диаграмма рассеивания корня среднеквадратичной суммы токов и вертикального ускорения для категории поверхности №5. Цветом обозначен номер целевой скорости движения. Разделение данных на группы по целевой скорости очевидно. Аналогичная картина наблюдается для других категорий поверхности.

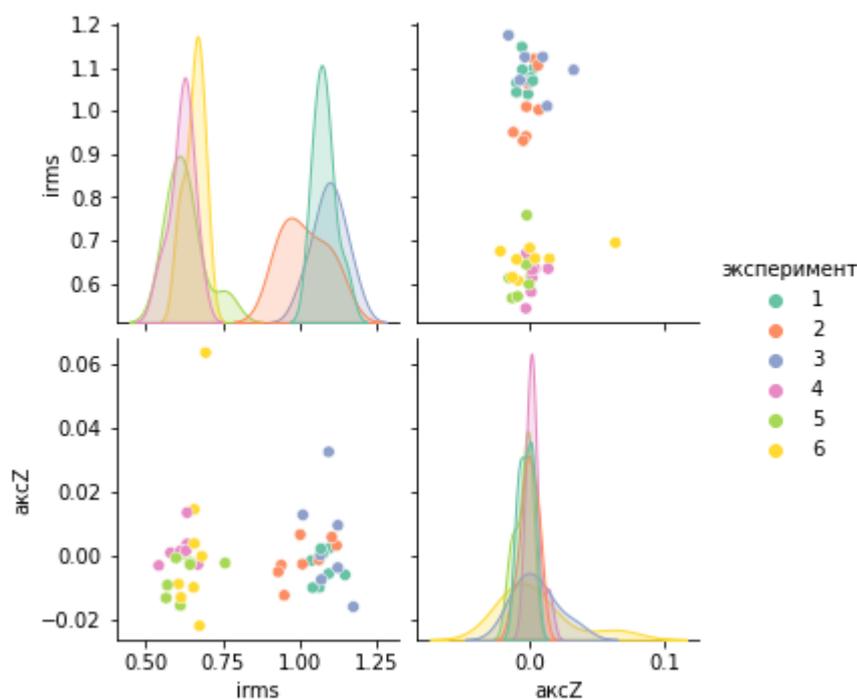


Рисунок 25 – Диаграмма рассеивания корня среднеквадратичной суммы токов и вертикального ускорения для категории поверхности №5

2.3 Разработка классификационной модели

2.3.1 Предобработка набора данных

Модель использует следующий набор признаков:

- Разность заданной скорости и скорости, рассчитанной по одометрии
- Значения акселерометра вдоль оси Z
- Сумма токов на двигателях
- Произведение силы тока двигателе на скорость его вращения

Строки с номерами 123, 131, 195, 203, 227, 127, 131, 151, 174, 175, 199, 203, 227, 143, 183, 191, 207 были исключены из набора данных как было предложено в 2.2.3.

Разделение набора данных на обучающую, тестовую и валидационную производилось в отношении 2:1:1. Разделение выполнено случайным образом с пропорциональным распределением целевой переменной между выборками.

Данные были нормализованы на среднее значение 0 и стандартное отклонение 1. Коэффициенты нормализации рассчитаны на основе обучающей выборки и применены к обучающей, тестовой и валидационной выборкам.

2.3.2 Случайный лес

Случайный лес содержит в себе 50 деревьев.

На рисунке 26 показан отчёт классификации. Модель хорошо распознаёт вторую и четвёртую категории поверхности. Общая точность модели составляет 76%.

	precision	recall	f1-score	support
1	0.60	0.50	0.55	6
2	0.86	1.00	0.92	6
3	1.00	0.60	0.75	5
4	1.00	1.00	1.00	6
5	0.50	0.67	0.57	6
accuracy			0.76	29
macro avg	0.79	0.75	0.76	29
weighted avg	0.78	0.76	0.76	29

Рисунок 26 – Отчёт классификации случайным лесом

На рисунке 27 изображена матрица ошибок классификации. Первая категория поверхности трудно отличима от пятой.

```
[[3 0 0 0 3]
 [0 6 0 0 0]
 [0 1 3 0 1]
 [0 0 0 6 0]
 [2 0 0 0 4]]
```

Рисунок 27 – Матрица ошибок классификации случайным лесом

2.3.3 SVM

Отчёт классификации SVM оказан на рисунке 28. Общая точность модели составила 66%.

	precision	recall	f1-score	support
1	0.60	0.50	0.55	6
2	0.57	0.67	0.62	6
3	0.75	0.60	0.67	5
4	1.00	1.00	1.00	6
5	0.43	0.50	0.46	6
accuracy			0.66	29
macro avg	0.67	0.65	0.66	29
weighted avg	0.67	0.66	0.66	29

Рисунок 28 – Отчёт классификации SVM

На рисунке 29 показана матрица ошибок классификации. В отличие от дерева решений, SVM путает первую и пятую категорию поверхности не только между собой, но и со второй категорией.

```
[[3 1 0 0 2]
 [0 4 1 0 1]
 [0 1 3 0 1]
 [0 0 0 6 0]
 [2 1 0 0 3]]
```

Рисунок 29 – Матрица ошибок лклассификации SVM

2.3.4 Нейронная сеть

Нейронная сеть состоит из следующих слоёв:

- Входной без функции активации (8 нейронов)
- Скрытый с функцией активации RELU (32 нейрона)
- Выходной с функцией активации Softmax (5 нейронов)

Модель прошла 150 эпох обучения и достигла точности в 72%. Кривая обучения показана на рисунке 30.

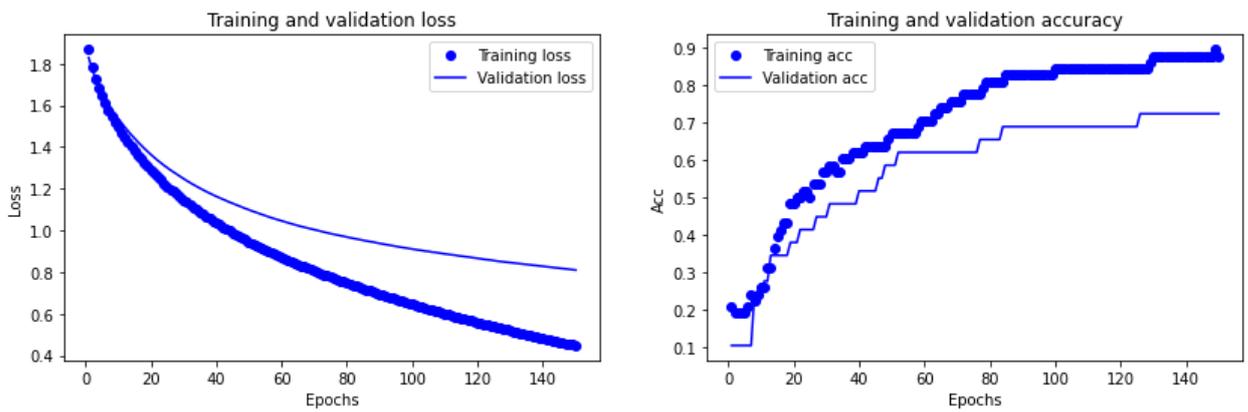


Рисунок 30 – Кривая обучения нейронной сети

На рисунке 31 продемонстрирован отчёт классификации дорожной поверхности нейронной сетью.

	precision	recall	f1-score	support
0	0.75	0.50	0.60	6
1	0.67	1.00	0.80	6
2	0.75	0.60	0.67	5
3	1.00	1.00	1.00	6
4	0.50	0.50	0.50	6
accuracy			0.72	29
macro avg	0.73	0.72	0.71	29
weighted avg	0.73	0.72	0.71	29

Рисунок 31 – Отчёт классификации нейронной сетью

Матрица ошибок классификации представлена на рисунке 32.

$$\begin{bmatrix} 3 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 3 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 3 \end{bmatrix}$$

Рисунок 32 – Матрица ошибок классификации нейронной сетью

2.3.5 Валидация модели

Модель на основе случайного леса как показавшая наилучший результат была проверена на тестовой выборке. Отчёт классификации представлен на рисунке 33. Точность модели составила 79%.

	precision	recall	f1-score	support
1	0.83	0.83	0.83	6
2	0.67	0.67	0.67	6
3	0.67	0.67	0.67	6
4	1.00	1.00	1.00	5
5	0.83	0.83	0.83	6
accuracy			0.79	29
macro avg	0.80	0.80	0.80	29
weighted avg	0.79	0.79	0.79	29

Рисунок 33 – Отчёт классификации на тестовой выборке

Матрица ошибок классификации представлена на рисунке 34.

[5 0 0 0 1]
[1 4 1 0 0]
[0 2 4 0 0]
[0 0 0 5 0]
[0 0 1 0 5]]

Рисунок 34 – Матрица ошибок классификации

Выводы по главе

Во второй главе был описан использованный при подготовке модели набор данных, проведён разведочный анализ данных и осуществлён выбор лучшей классификационной модели.

В ходе работы было построено 3 классификационные модели – случайный лес, SVM и нейронная сеть. Модель на основе случайного леса показала наибольшую точность классификации – 76%. Точность классификации была подтверждена проверкой модели на тестовой выборке.

Глава 3. Финансовый менеджмент

Введение

Целью научно-исследовательской работы является разработка модели классификации поверхности, по которой движется мобильный робот, на основе данных с внутренних датчиков робота, таких как акселерометр и датчик тока. Знание о категории дорожной поверхности может быть применено, например, чтобы снизить скорость движения при съезде робота с асфальта на пересеченную местность или чтобы составить карту местности, которая может быть использована при дальнейшем планировании траекторий движения.

Альтернативным вариантом классификации дорожной поверхности является использование в качестве источника данных камеры или микрофона. Недостатком использования камеры является зависимость от уровня освещения и отражающих свойств поверхности. Недостатком использования микрофона является вероятность наличия внешних посторонних шумов.

3.1 Предпроектный анализ

3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Сегментирование рынка представлено в таблице 3. Количеством плюсов в ячейках обозначена тенденция к использованию робототехники в производственном процессе.

Таблица 3 – Сегментирование рынка

		Отрасль		
		Сельское хозяйство	Горнодобывающая отрасль	Геодезия
Размер компании	Крупные	+++	+++	+++
	Средние	++	++	++
	Мелкие	+	+	+

Из карты сегментирования можно сделать вывод, что основной целевой аудиторией для разрабатываемого продукта являются крупные компании.

3.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Конкурентное решение 1 – Mining-Rox. Научное исследование, направленное на разработку автономного мобильного робота для использования в шахтах.

Конкурентное решение 2 – Omron. Коммерческая компания, производящая автономных мобильных роботов для использования в складских помещениях.

В таблице 4 представлен сравнительный анализ конкурентных технических решений.

Таблица 4 – Сравнительный анализ конкурентных решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,08	0,6	0,6	0,2	0,05	0,05	0,02
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,06	0,8	0,8	0,6	0,05	0,05	0,04
3. Помехоустойчивость	0,05	0,6	0,4	0,2	0,03	0,02	0,01
4. Энергоэкономичность	0,03	1	0,8	0,2	0,03	0,03	0,01
5. Надежность	0,04	0,8	1	0,8	0,04	0,04	0,04
6. Уровень шума	0,02	1	0,6	0,8	0,02	0,02	0,02
7. Безопасность	0,06	0,4	1	0,8	0,03	0,06	0,05
8. Потребность в ресурсах памяти	0,05	0,4	0,8	1	0,02	0,04	0,05
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,04	1	0,4	0,8	0,04	0,02	0,04
10. Простота эксплуатации	0,03	0,8	0,8	1	0,03	0,03	0,03
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,06	1	0,4	0,4	0,06	0,03	0,03
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,03	0,4	0,8	0,8	0,02	0,03	0,03
Экономические критерии оценки эффективности							

1. Конкурентоспособность продукта	0,07	0,8	0,4	1	0,06	0,03	0,07
2. Уровень проникновения на рынок	0,06	0,4	0,4	0,4	0,03	0,03	0,03
3. Цена	0,08	0,4	0,2	0,4	0,04	0,02	0,04
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,06	0,6	0,2	0,2	0,04	0,02	0,02
5. Послепродажное обслуживание	0,05	0,6	0,2	0,6	0,03	0,01	0,03
6. Финансирование научной разработки	0,03	0,8	1	0,4	0,03	0,03	0,02
7. Срок выхода на рынок	0,03	0,2	0,6	1	0,01	0,02	0,03
8. Наличие сертификации разработки	0,07	1	0,6	0,2	0,07	0,05	0,02
Итого	1				0,73	0,63	0,63

Исходя из полученных расчётов, можно сделать вывод что решение является конкурентоспособным.

3.1.3 SWOT-анализ

SWOT- анализ позволяет выявить сильные и слабые стороны решения. В таблице 5 представлен результат выполнения SWOT-анализа проектного решения.

Таблица 5 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С1. Помехоустойчивость С2. Низкая стоимость производства С3. Экологичность С4. Широкая сфера применения С5. Наличие бюджетного финансирования</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1. Слабый уровень знаний в сфере машинного обучения Сл2. Отсутствие договоренностей с потенциальными потребителями решения Сл3. Отсутствие договоренностей с потенциальными производителями решения Сл4. Отсутствие прототипа разработки Сл5. Отсутствие опыта коммерциализации решений</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Ограничение импорта конкурентных решений В3. Профессиональный научный коллектив ТПУ</p>	<p>В1С5 Производство решения на базе ТПУ В2С5 Внедрение решения на внутреннем рынке России В3С4 Получение междисциплинарных знаний</p>	<p>В1Сл3Сл4 Производство решения на базе ТПУ В2Сл2 Рост заинтересованности российских потребителей в финансировании решения В3Сл1 Получение знаний от преподавателей ТПУ</p>

В4. Участие в акселерационных программах В5. Участие в грантовых программах	В4В5С4 Расширение круга акселераторов и грантовых программ для участия В4В5С5 Надёжное финансирование	В4Сл1Сл5 Обучение на акселерационных программах В5Сл4 Финансирование разработки прототипа за счёт грантов
Угрозы: У1. Ограничение импорта материалов У2. Отсутствие спроса на разработку У3. Ограничения на экспорт технологии У4. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции У5. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства	У1С2 Можно закупить материалы заранее У2С4 Возможна смена сферы применения решения У3С2 Возможна поддержка решения по программе импортозамещения У5С2 Низкая зависимость от финансирования	У1Сл4 Производство прототипа из подручных материалов У2У3У5Сл2 Нужно конкретизировать потенциальных потребителей решения У4Сл3 Нужно искать сертифицированного производителя

Таким образом, основным преимуществом для развития решения являются использование научно-производственного потенциала г. Томска, а основным недостатком – непроработанность договоренностей с потенциальными заказчиками решения.

3.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

В таблице 6 представлена оценка готовности проекта к коммерциализации.

Таблица 6 – Оценка готовности проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического	3	3

	задела		
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	2	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	3
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	4
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	4
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	4
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	2
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	3
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	4
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	4
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	ИТОГО БАЛЛОВ	44	54

Исходя из полученных расчетов можно сделать вывод, что перспективность проекта – средняя, но имеется потенциал для повышения перспективности за счёт уровня имеющихся у разработчика знаний.

3.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Наиболее перспективными вариантами коммерциализации представляются передача ноу-хау и торговля патентными лицензиями,

поскольку разработчик решения не имеет опыта самостоятельной организации предприятий и не имеет крепких связей с людьми, имеющими такой опыт. Передача интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия и инжиниринг как самостоятельный вид коммерческих операций видится малоперспективным, поскольку на данном этапе отсутствует видение конкретных потребителей решения.

3.2 Инициация проекта

Заинтересованные стороны представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Заинтересованные стороны

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон от результатов проекта
Организации, выдающие грант на разработку	Разработанный классификатор может быть коммерциализирован
Научное сообщество	Разработанный классификатор представляет научную новизну

Цели проекта представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Цели проекта

Цели проекта:	Разработать классификатор дорожной поверхности на основе датчиков робота
Ожидаемые результаты проекта:	Разработан классификатор дорожной поверхности на основе датчиков робота
Критерии приемки результата проекта:	Классификатор поверхности работает с точностью не менее 70%
Требования к результату проекта:	Требование:
	Размер модели на диске не должен превышать 1ГБ
	Точность полученной модели должна быть не менее 70%
	Время, затрачиваемое на вычисление класса не должно превышать 1 секунду

Организационная структура проекта представлена в таблице 9.

Таблица 9 – Организационная структура проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудовые затраты, час.
1	Рыбаченко Иван Александрович, ТПУ, студент	Исполнитель	- Выполнение работ по проекту	1440
2	Кайда Анастасия Юрьевна, ТПУ, ассистент	Консультант	- Консультация по технической части проекта - Проверка отчётности	380
3	Губин Евгений Иванович, ТПУ, доцент	Руководитель	- Отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам - Координирует деятельность участников проекта	120
ИТОГО:				1920

Ограничения проекта представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	666351 рублей
3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	5 месяцев
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	01.01.2022
3.2.2. Дата завершения проекта	01.06.2022
3.3. Прочие ограничения и допущения*	Отсутствуют

Таким, образом проведено описание требований к проекту и его исполнители.

3.3 Планирование управления научно-техническим проектом

3.3.1 Иерархическая структура работ

Иерархическая структура работ представлена на рисунке 35.

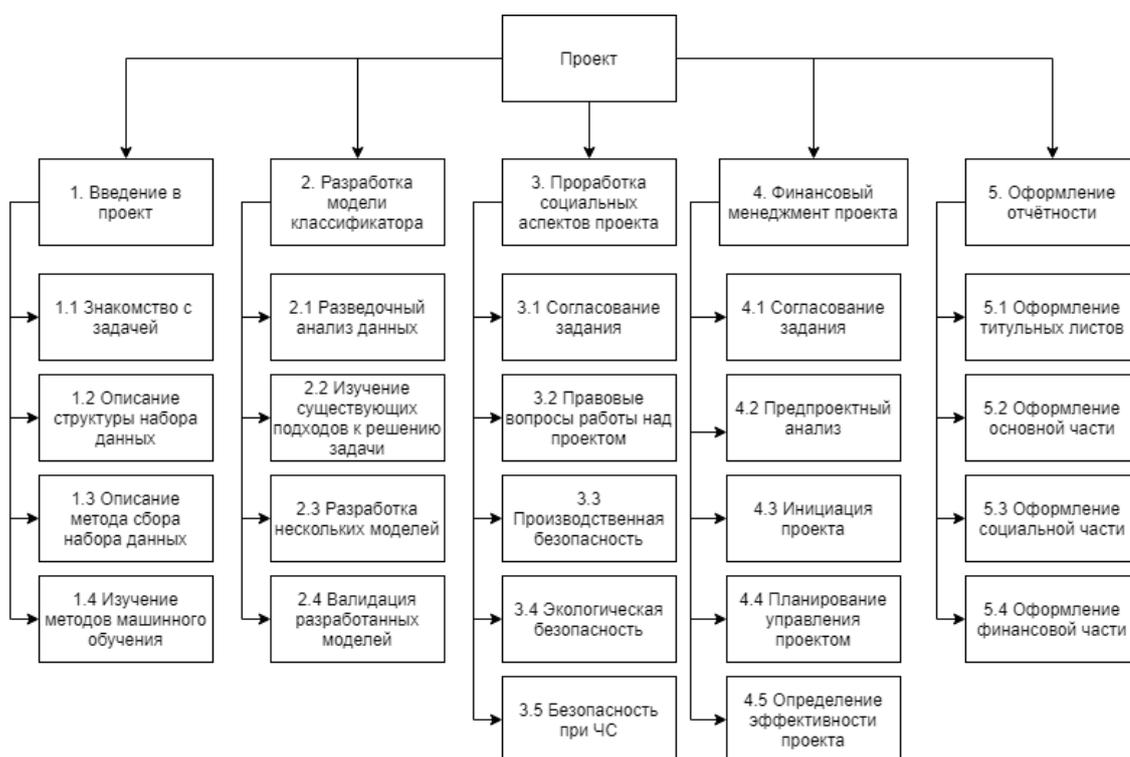


Рисунок 35 – Иерархическая структура работ

Контрольные события проекта приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Проверка готовности основной части дипломной работы	15.05.22	Отчёт о выполнении основной части дипломной работы
2	Проверка готовности дипломной работы	01.06.22	Полный отчёт дипломной работы

Календарный план проекта представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
---------------------	----------	-------------------	-------------------	----------------------	--

1.1	Знакомство с задачей	10	01.01.22	14.01.22	Рыбаченко И.А. Губин Е.И.
1.2	Описание структуры набора данных	10	15.01.22	28.01.22	Рыбаченко И.А.
1.3	Описание метода сбора данных	10	01.02.22	14.02.22	Рыбаченко И.А.
1.4	Изучение методов машинного обучения	30	01.01.22	14.02.22	Рыбаченко И.А. Кайда А.Ю.
2.1	Разведочный анализ данных	15	15.02.22	07.03.22	Рыбаченко И.А.
2.2	Изучение существующих подходов к решению задачи	15	08.03.22	30.03.22	Рыбаченко И.А.
2.3	Разработка нескольких моделей	10	01.04.22	14.04.22	Рыбаченко И.А.
2.4	Валидация моделей	10	15.04.22	28.04.22	Рыбаченко И.А. Кайда А.Ю.
3.1	Соласование задания по социальной ответственности	5	01.04.22	07.04.22	Рыбаченко И.А.
3.2	Правовые вопросы работы над проектом	5	08.04.22	14.04.22	Рыбаченко И.А.
3.3	Производственная безопасность	5	15.04.22	21.04.22	Рыбаченко И.А.
3.4	Экологическая безопасность	5	22.04.22	28.04.22	Рыбаченко И.А.

3.5	Безопасность при ЧС	5	01.05.22	07.15.22	Рыбаченко И.А.
4.1	Согласование задания по финансовому менеджменту	5	01.04.22	07.04.22	Рыбаченко И.А.
4.2	Предпроектный анализ	5	08.04.22	14.04.22	Рыбаченко И.А.
4.3	Инициация проекта	5	15.04.22	21.04.22	Рыбаченко И.А.
4.4	Планирование управления проектом	5	22.04.22	28.04.22	Рыбаченко И.А.
4.5	Определение эффективности проекта	5	01.05.22	07.15.22	Рыбаченко И.А.
5.1	Оформление титульных листов	5	01.05.22	07.05.22	Рыбаченко И.А. Губин Е.И.
5.2	Оформление основной части	5	08.05.22	14.05.22	Рыбаченко И.А. Кайда А.Ю.
5.3	Оформление социальной части	5	15.05.22	21.05.22	Рыбаченко И.А.
5.4	Оформление финансовой части	5	22.05.22	28.05.22	Рыбаченко И.А.

Диаграмма Гантта представлена на рисунке 36.

				Январь				Февраль				Март				Апрель				Май			
		Исполнители	Т	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.1	Знакомство с задачей	Инженер, Руководитель	10	■	■																		
1.2	Описание структуры набора данных	Инженер	10			■	■																
1.3	Описание метода сбора данных	Инженер	10					■	■														
1.4	Изучение методов машинного обучения	Инженер, Консультант	30	■	■	■	■	■	■														
2.1	Разведочный анализ данных	Инженер	15						■	■	■												
2.2	Изучение существующих подходов к решению задачи	Инженер	15									■	■	■									
2.3	Разработка нескольких моделей	Инженер	10												■	■							
2.4	Валидация моделей	Инженер, Консультант	10															■	■				
3.1	Согласование задания по социальной ответственности	Инженер	5													■							
3.2	Правовые вопросы работы над проектом	Инженер	5														■						
3.3	Производственная безопасность	Инженер	5															■					
3.4	Экологическая безопасность	Инженер	5																■				
3.5	Безопасность при ЧС	Инженер	5																	■			
4.1	Согласование задания по финансовому менеджменту	Инженер	5													■							
4.2	Предпроектный анализ	Инженер	5														■						
4.3	Инициация проекта	Инженер	5															■					
4.4	Планирование управления проектом	Инженер	5																■				
4.5	Определение эффективности проекта	Инженер	5																	■			
5.1	Оформление титульных листов	Инженер, Руководитель	5																		■		
5.2	Оформление основной части	Инженер, консультант	5																			■	
5.3	Оформление социальной части	Инженер	5																				■
5.4	Оформление финансовой части	Инженер	5																				■

Рисунок 36 – Диаграмма Гантта

3.3.2 Бюджет научного исследования

Стоимость спецоборудования для научных работ приведена в таблице 13.

Таблица 13 – Стоимость спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.	Срок полезного использования, лет	Амортизация на время выполнения проекта, тыс.руб.
1.	Ноутбук Apple Macbook Pro 14 Late 2021	1	290	290	4	30
2.	Робот Festo Robotino	1	170	170	5	8

Баланс рабочего времени сотрудников приведен в таблице 14.

Таблица 14 – Баланс рабочего времени сотрудников

Показатели рабочего времени	Руководитель Губин Е.И.	Консультант Кайда А.Ю.	Исполнитель Рыбаченко И.А.
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней			
- выходные дни	52	52	52
- праздничные дни	14	14	14
Потери рабочего времени			
- отпуск	48	48	48
- невыходы по болезни			
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251	251

Размер заработной платы рассчитывается по следующей формуле

$$Z_m = Z_6 \cdot (k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (2)$$

где Z_6 – базовый оклад, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент;

k_d – коэффициент доплат и надбавок;

k_p – районный коэффициент.

Расчет заработной платы представлен в таблице 15.

Таблица 15 – Расчёт заработной платы

Исполнители	Z_b , руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	37700	-	-	1,3	49010,0	2030,7	15	30460
Консультант	24364	-	-	1,3	31673,2	1312,3	45	59053
Исполнитель	19200	-	-	1,3	24960,0	1034,2	180	186156

Итоговая заработная плата исполнителей приведена в таблице 16.

Таблица 16 – Заработная плата исполнителей

Заработная плата	Руководитель	Консультант	Исполнитель
Основная зарплата	30460	59053	186156
Дополнительная зарплата	3046	5905	18615
Зарплата исполнителя	33506	64958	204711
Итого по статье $C_{зп}$	303175		

Отчисление во внебюджетные вычисляются как 27.1% от общей заработной платы и составляют 82160 рублей.

Расходы на командировки составляют 30317 рублей.

Накладные расходы составляют 212222 рубля.

Затрат на электроэнергию составляют $5,8 \cdot 72 = 417,6$ рублей

Сводная таблица затрат на проект представлена в таблице 17.

Таблица 17 – Группировка затрат по статьям

Статьи									
Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Научные и производственные командировки	Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями	Прочие прямые расходы	Накладные расходы	Итого плановая себестоимость
0	38000	275669	27566	82160	30317	0	417	212222	666351

3.3.3 Реестр рисков проекта

Реестр рисков приведен в таблице 18.

Таблица 18 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска
1	Болезнь исполнителя	Увеличение срока выполнения проекта	2	3	Средний	Найм нескольких исполнителей
2	Выход компьютера из строя	Дополнительные финансовые затраты, увеличение срока выполнения проекта	1	5	Низкий	Покупка более надежного компьютера, покупка нескольких компьютеров
3	Ограничение доступа к международной научной литературе	Снижение качества проработанности проекта	3	4	Высокий	Настройка VPN на компьютере, переезд за границу

Итого выявлено 3 риска.

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

В таблице 19 приведен расчет интегрального показателя ресурсоэффективности. За аналог 1 принят продукт компании Omron – робот для автоматизации перемещения грузов на складе. За аналог 2 принят робот, разрабатываемый в рамках проекта Mining-Rox, предназначенный для выполнения работ в шахтах закрытого типа.

Таблица 19 – Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	4	5	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	4	4	4
3. Помехоустойчивость	0,15	4	3	4
4. Энергосбережение	0,20	4	4	3
5. Надежность	0,25	4	4	4
6. Материалоемкость	0,15	5	4	4
ИТОГО	1			

$$I_{\text{п}}=4*0,1+4*0,15+4*0,15+4*0,2+4*0,25+5*0,15=4,15$$

$$\text{Аналог 1}=5*0,1+4*0,15+3*0,15+4*0,2+4*0,25+4*0,15=3,95$$

$$\text{Аналог 2}=4*0,1+4*0,15+4*0,15+3*0,2+4*0,25+4*0,15=3,2$$

Сравнительная эффективность разработки по отношению к аналогу 1 дана в таблице 20.

Таблица 20 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,9
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,95	4,1
3	Интегральный показатель эффективности	3,95	4,55
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,86	1

Интегральный показатель эффективности получился выше чем у аналога.

Выводы по главе

В главе, посвященной финансовому менеджменту и эффективности, был проведен предпроектный анализ, планирование сроков выполнения задач и их распределение между исполнителями, дана оценка бюджету проекта и

проведена оценка эффективности проекта. Анализ конкурентоспособности показал, что проект конкурентоспособен, так как имеет высокий индекс конкурентоспособности. Анализ показателей эффективности демонстрирует превосходство проекта над существующими аналогами.

Глава 4. Социальная ответственность

Введение

С ростом автономности робототехники растёт потребность в развитии автономных средств навигации. Определение категории поверхности лежащей под колесами робота может позволить повысить точность позиционирования автономного робота. Результатом работы является модель, определяющая категорию дорожной поверхности по данным с установленных на роботе датчиков. Социальная значимость работы заключается в повышении доли роботизированного труда по отношению к ручному труду.

Результаты работы могут применяться для модернизации роботов, действующих в сельскохозяйственной и горнодобывающей отраслях, а также в любых других областях, в которых возможно применение автономно движущихся роботов. На географическое положение робота ограничения не накладываются. Поскольку модель опирается только на автономные датчики робота, то остаётся безразличным движется робот внутри зданий или же в полевой, городской или лесной зоне.

Рабочая зона состоит из 2 помещений. В первом, лабораторном, проводятся практические эксперименты с участием робота, во втором, офисном, – обработка собранных данных и разработка модели. Проводимые эксперименты заключается в задании роботу траектории движения и наблюдении за ним.

Лабораторное помещение имеет площадь 24кв.м., 2 окна, содержит следующее оборудование: робот Festo Robotino габаритами 37x37x21см, экспериментальные дорожные поверхности различной фактуры, видеокамера.

Офисное помещение имеет площадь 12кв.м., 1 окно, оснащено столом, стулом и персональным компьютером.

4.1 Правовые и организационные вопросы безопасности

4.1.1 Правовые вопросы организации работы над проектным решением

Трудовые отношения между работодателем и работником регулируются с помощью законодательного акта "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020), что позволяет урегулировать вопросы, связанные с организацией труда, управлением трудом, заработной платой, трудовыми спорами и другие [27]. Ниже приведены его наиболее важные для соблюдения фрагменты:

- Нормальная продолжительность рабочего времени не должна превышать 40 часов в неделю. Порядок исчисления нормы рабочего времени на определенные календарные периоды (месяц, квартал, год) в зависимости от установленной продолжительности рабочего времени в неделю определяется федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере труда.

- В течение рабочего дня (смены) работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается. Правилами внутреннего трудового распорядка или трудовым договором может быть предусмотрено, что указанный перерыв может не предоставляться работнику, если установленная для него продолжительность ежедневной работы (смены) не превышает четырех часов (в ред. Федерального закона от 18.06.2017 N 125-ФЗ).

- Всем работникам предоставляются выходные дни (еженедельный непрерывный отдых).

Использование персональных данных сотрудников регламентируется Федеральным законом «О персональных данных» от 27.07.2006 N 152-ФЗ [28]. Основные положения заключаются в следующем

- обработка персональных данных осуществляется с согласия субъекта персональных данных на обработку его персональных данных;
- обработка персональных данных должна ограничиваться достижением конкретных, заранее определенных и законных целей;
- обработке подлежат только персональные данные, которые отвечают целям их обработки.

4.1.2 Организация рабочей зоны

При организации рабочей зоны очень важно учитывать факторы: которые могут повлиять на здоровье сотрудника. Поскольку разработка проектного решения осуществляется преимущественно сидя, то при компоновке рабочей зоны стоит учитывать требования, представленные в ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» [29]. Среди наиболее важных требований, описанных в стандарте имеются следующие:

1. Конструкцией производственного оборудования и рабочего места должно быть обеспечено оптимальное положение работающего, которое достигается регулированием высоты рабочей поверхности, сиденья и пространства для ног. Согласно стандарту, высота рабочей поверхности при работе за компьютером для работника-мужчины должна составлять 680мм, а высота сиденья 430мм. В рассматриваемой работе высота рабочего стола фиксирована и составляет 690 мм, а для достижения оптимального положения работника используется регулировка высоты сиденья.

2. При работе двумя руками органы управления размещают с таким расчетом, чтобы не было перекрещивания рук. В данном случае используется 2 органа управления – клавиатура и мышь, перекрещивания рук рабочего не наблюдается.

Значительную часть выполняемой работы составляет взаимодействие с компьютером посредством клавиатуры и монитора, поэтому при компоновке рабочего пространства также стоит учитывать требования, описанные в ГОСТ Р ИСО 9241-1-2007 «Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов» [30]. Также стандарт регламентирует рекомендуемое положение рабочего:

1) бедра расположены приблизительно в горизонтальной позиции, а ноги от колена до ступни - в вертикальной позиции; высота сиденья должна равняться длине голени пользователя до подколенной области или быть немного меньше;

2) плечо расположено вертикально, предплечье - горизонтально;

3) работа не требует сгибаний или разгибаний запястий;

4) позвоночник расположен вертикально;

5) ступня составляет угол в 90° по отношению к подколенной части ноги;

6) скручивание верхней части туловища отсутствует;

7) линия зрения заключена между горизонталью и 60° ниже горизонтали

Таким образом, при компоновке рабочей зоны были учтено, что работы выполняются сидя и имеется активное взаимодействие с видеодисплейным терминалом. Для сохранения здоровья работника были приняты меры по регулировке рабочего места и выполнены рекомендации о положении работника при работе сидя.

4.2 Производственная безопасность

4.2.1 Вредные и опасные факторы производства

В соответствии с классификацией, представленной в ГОСТ 12.0.003 - 2015 [31], были выявлены вредные и опасные факторы производства. Выявленные вредные и опасные факторы и нормативные документы их регламентирующие представлены в таблице 21.

Таблица 21 – Вредные и опасные производственные факторы

Факторы	Нормативные документы
1. Умственное перенапряжение	ГОСТ Р ИСО 10075-1-2019 «Эргономические принципы обеспечения адекватности умственной нагрузки» [32] МР 2.2.9.2311-07 «Состояние здоровья работающих в связи с состоянием производственной среды. Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности. Методические рекомендации» [33]
2. Повышенная пульсация светового потока	СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [34]
3. Отсутствие или недостаток необходимого естественного освещения	
4. Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения	
5. Повышенный уровень шума	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ «Шум» [35] ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ «Средства и методы защиты от шума» [36] СП 51.13330.2011 «Защита от шума» [37]
6. Движущиеся твёрдые объекты, наносящие удар по телу работающего	ГОСТ 12.4.011-89 «Средства защиты работающих» [38]

4.2.2 Умственное перенапряжение

Умственное перенапряжение является следствием умственного стресса. Источниками умственного перенапряжения при разработке проектного решения могут стать любые внешние источники, влияющие на умственное перенапряжение. Умственное перенапряжение имеет как положительные эффекты, например, обучение и повышение квалификации, так и негативные [32]. Негативное влияние умственного перенапряжения на работника выражается в появлении усталости и снижении бдительности. Длительное умственное перенапряжение может привести к эмоциональному выгоранию. Для снижения негативного влияния умственного перенапряжения на сотрудника могут быть приняты следующие меры [33]:

- Включение в распорядок дня индивидуальных сеансов "психологической разгрузки"

- Сеансы функциональной музыки
- Организация рабочей смены путем чередования работ с использованием ПЭВМ и без него
- Организация режимов труда и отдыха

4.2.3 Повышенная пульсация светового потока

Работа за персональным компьютером относится к зрительным работам высокой точности, III разряд, наименьший размер объекта различения составляет от 0,30 до 0,50мм. Проблемы с освещением могут привести к ухудшению зрения сотрудника или к повышению утомляемости.

Источником повышенной пульсации светового потока может стать неисправный монитор компьютера или лампа искусственного освещения. Согласно СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [34] коэффициент пульсации не должен превышать 10%. При необходимости коэффициент пульсации может быть снижен за счет применения источников света со специальными устройствами питания (светодиодов, работающих на постоянном токе, люминесцентных ламп с электронными пускорегулирующими устройствами), а также включения соседних разрядных источников света в три фазы питающего напряжения.

4.2.4 Отсутствие или недостаток необходимого естественного освещения

Недостаток естественного освещения может возникать из-за недостаточного количества окон в помещении или из-за замороженности оконного проёма. Коэффициент естественного освещения регламентируется в СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [34] и для зрительных работ III разряда должен быть не менее 3%. Чтобы избежать недостатка естественного освещения могут быть приняты следующие меры:

- Своевременная чистка стекол в светопроемах
- Ремонт помещения с целью изменения расположения окон

- Смена помещения на более освещённое

4.2.5 Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения

Из-за недостаточной мощности осветительных приборов или их неправильного расположения может возникнуть недостаток искусственного значения. Согласно СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение», [34] освещенность на рабочей поверхности от системы общего искусственного освещения должна составлять 400-600 лк. Для устранения проблем с недостатком искусственного освещения могут быть приняты следующие меры:

- установка более мощных ламп;
- установка большего количества ламп;
- изменения расположения ламп.

4.2.6 Повышенный уровень шума

Разработка проектного решения включает в себя проведение экспериментов с использованием мобильного робота. Длительное воздействие повышенного производственного шума может привести к развитию профессиональной тугоухости, а кратковременное воздействие шума очень высокой интенсивности способно вызывать ощущение болезненного давления в ушах [35]. Предельно допустимый уровень звукового давления определяется в СП 51.13330.2011 «Защита от шума» [37] и при проведении лабораторных экспериментов составляет 75ДБ. Для снижения уровня шума могут быть приняты следующие меры [36]:

- Использование наушников
- Установка шумопоглощающих перегородок

Замеры уровня шума в рабочей зоне при проведении экспериментов показывают, что уровень шума составляет 40ДБ и не превышает нормы.

4.2.7 Движущиеся твёрдые объекты, наносящие удар по телу работающего

Лабораторные эксперименты проводятся с использованием мобильного робота Festo Robotino. Масса робота составляет 20кг, максимальная скорость 10 км/ч. При неосторожном обращении возможно столкновение сотрудника с движущимся роботом. Классификация средств защиты от механических ударов приведена в ГОСТ 12.4.011-89 «Средства защиты работающих» [38]. В качестве коллективных средств защиты могут применены оградительные устройства или знаки безопасности. В качестве индивидуальных средств защиты – сапоги или наколенники.

4.2.8 Расчет уровня освещения

В соответствии с ГОСТ 24940-2016 [39] был проведён расчет освещенности рабочего помещения. Контрольные точки для проведения замеров размещают в центре помещения под светильниками, между светильниками и их рядами, а также у стен. На рисунке 37 представлена карта размещения контрольных точек.

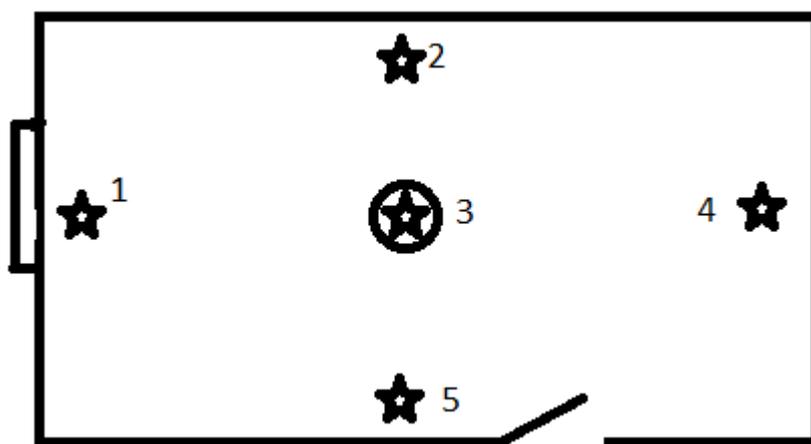


Рисунок 37 – Карта размещения контрольных точек

Измеренные значения освещённости приведены в таблице 22.

Таблица 22 – Уровень освещенности в контрольных точках

Номер контрольной точки	Уровень освещенности, лк
1	302
2	417
3	634
4	420
5	296

Среднее значения освещённости по всем контрольным точкам составляет 413лк, что больше нормативного значения и, следовательно, соответствует норме.

4.3 Экологическая безопасность

Поскольку уровень шума от мобильного робота не превышает допустимого уровня, то необходимость в принятии защитных мер по отношению к селитебной зоне не требуется.

Отдельному анализу с точки зрения безопасности стоит подвергнуть материалы, из которых изготовлен робот. Корпус робота изготовлен из пластика, а именно из поликарбоната. Изделия из поликарбоната в соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов [40] имеют код 43416111514 и относятся к 4 классу опасности, малоопасные отходы с низкой степенью негативного воздействия на окружающую среду, время восстановления после ущерба не менее 3 лет. Согласно СанПиН 1.2.3685-21 [41] предельно допустимая концентрация поликарбоната в воздухе рабочей зоны составляет 10мг/м³.

Робот содержит литий-ионную аккумуляторную батарею. Согласно СанПиН 1.2.3685-21 [41] лития относится к 1 классу опасности отходов и его предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны составляет 0,02мг/м³. Также в аккумуляторной батарее содержится алюминий, который

относится к 3 классу опасности отходов и его предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны составляет бмг/м³.

Для минимизации ущерба окружающей среде, вышедший из строя робот может быть найден и передан в утилизацию. Для того, чтобы робота можно было найти, он оснащен системой спутниковой навигации и способен передавать свои координаты через радио-канал.

4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Разработка проектного решения ведется в учебном заведении и одной из возможных чрезвычайных ситуаций является террористический акт. Террористический акт может представлять из себя как взрыв или стрельбу, так и захват заложников. В любой из ситуаций, главное не поддаваться панике и не провоцировать преступников.

Наиболее типичной чрезвычайной ситуацией при разработке проектного решения является пожар. Причиной пожара могут стать неисправности в электропроводке или короткое замыкание внутри электротехники. Пожар может повлечь за собой ущерб имуществу, а также жизни и здоровью людей, находящихся в помещении.

Согласно классификации представленной в Федеральном законе от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 30.04.2021) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" [42] возможный пожар может быть определен как пожар класса А – пожар твердых горючих веществ и материалов. В качестве первичных средств пожаротушения могут быть использованы переносные огнетушители и покрывала для изоляции очага возгорания.

Чтобы снизить ущерб в случае возникновения пожара, могут быть применены следующие меры:

- пожарные выходы должны быть свободны;

- люди, находящиеся в помещении должны быть ознакомлены с планом эвакуации и техникой противопожарной безопасности;

- помещение должно быть оборудовано первичными средствами пожаротушения.

Выводы по главе

В разделе, посвященном социальной ответственности были рассмотрены вопросы обеспечения безопасности работников и исследовано влияние разработки на окружающую среду. В результате работы отмечено следующее:

- Значения выявленных факторов в рабочей зоне соответствует нормам.
- По уровню энергозатрат организма согласно СанПиН 1.2.3685-21 [41] работа относится к категории Ia – ряд профессий на предприятиях точного приборо- и машиностроения, на часовом, швейном производствах, в сфере управления.
- С точки зрения пожарной опасности рабочему помещению присвоена категория Д – пониженная пожароопасность.
- Поскольку оборудование на объекте используется исключительно для исследований, разработок и испытаний новой продукции и процессов, а также отсутствуют выбросы загрязняющих веществ в воздух, сброс загрязняющих веществ в сточные воды, то объект, оказывающий негативное воздействие на окружающую среду, может быть отнесен к объектам IV категории согласно постановлению Правительства от 31 декабря 2020 года N 2398 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий» [43].

Заключение

В ходе работы был проведён обзор предметной области, который показал классификацию систем навигации, осветил принципы работы основных датчиков, используемых при решении задачи автономной навигации и проиллюстрировал тенденции в существующих методах решения задачи классификации дорожной поверхности.

В работе было дано описание используемого набора данных, в том числе перечисление его атрибутов, изложение методики, которой он был получен, и разведочный анализ. Разведочный анализ показал, что некоторые строки набора данных можно считать выбросами и исключить.

В ходе работы было построено 3 классификационные модели – SVM, случайный лес и нейронная сеть с одним скрытым слоем. Проведено сравнение моделей по таким показателям как *accuracy*, *precision* и *f1-score*.

Результатом работы является модель классификации дорожной поверхности на основе значений датчиков тока, акселерометра, одометрии и информации о заданной целевой скорости движения робота. Модель основана на алгоритме случайного леса. Точность модели составляет 76%.

Список литературы

1. Белоногов, А. В. Анализ и выбор систем навигации робота для позиционирования в условиях замкнутого пространства / А. В. Белоногов // Технические науки: проблемы и перспективы: Материалы IV Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 20–23 июля 2016 года. – Санкт-Петербург: Свое издательство, 2016. – С. 40-42.

2. Мальцев, А. В. Разработка системы навигации учебного мобильного робота / А. В. Мальцев // Политехнический молодежный журнал. – 2019. – № 10(39). – С. 7. – DOI 10.18698/2541-8009-2019-10-541.

3. Усенко, К. Ю. Существующие решения задачи навигации для мобильных outdoor роботов в экстремальных условиях / К. Ю. Усенко // Молодежь и современные информационные технологии : Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 03–07 декабря 2018 года / Томский политехнический университет. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С. 352-353.

4. Акселерометр. Виды и типы. Работа и применение. Особенности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electrosam.ru/glavnaja/slabotochnye-seti/oborudovanie/akselerometr/>, свободный (дата обращения: 14.10.2020).

5. MEMS: микроэлектромеханические системы, часть 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dnews.ru/600098>, свободный (дата обращения: 16.10.2020).

6. Максюшин Г.В. Учёт погрешностей МЭМС-акселерометра при его моделировании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ptsj.ru/articles/437/437.pdf>, свободный (дата обращения: 14.10.2020).

7. Как это работает: гироскоп [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://trashbox.ru/topics/41482/kak-eto-rabotaet-giroskop>, свободный (дата обращения: 14.10.2020) – Загл. с экрана.

8. Гироскопы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pandia.ru/text/78/612/21127-7.php>, свободный (дата обращения: 14.10.2020) – Загл. с экрана.

9. Мусалимов В.М. Расчёт надёжности упругих элементов микроэлектромеханических гироскопов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/908.pdf>, свободный (дата обращения: 14.10.2020).

10. Назначение и виды энкодеров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tehprivod.su/poleznaya-informatsiya/naznachenie-i-vidy-enskoderov.html>, свободный (дата обращения: 17.10.2020).

11. Энкодеры. Виды и работа. Особенности и применение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electrosam.ru/glavnaja/slabotochnye-seti/oborudovanie/enkodery/>, свободный (дата обращения: 17.10.2020).

12. Датчик тока: принцип действия и сфера применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://brshop.ru/hitrosti/kak-rabotaet-datchik-toka.html>, свободный (дата обращения: 28.02.2022).

13. Extraction of Speed-Independent Vibration Features for Terrain Classification in Lugged-Wheel Rovers [Electronic resource] / F. Lv [et al.] // 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). — 2018. — Available from: <https://doi.org/10.1109/robio.2018.8665151>.

14. Wang, M. Adaptive online terrain classification method for mobile robot based on vibration signals [Electronic resource] / M. Wang, L. Ye, X. Sun // International Journal of Advanced Robotic Systems. — 2021. — Vol. 18, № 6. —

P. 172988142110620. — Available from: <https://doi.org/10.1177/17298814211062035>.

15. Dupont, E. The identification of terrains for mobile robots using eigenspace and neural network methods [Электронный ресурс] / E. Dupont, R. Roberts, C. Moore // 2006 Florida Conference on Recent Advances in Robotics. — 2006. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/228357712_The_identification_of_terrains_for_mobile_robots_using_eigenspace_and_neural_network_methods.

16. Zhao, K. A New Terrain Classification Framework Using Proprioceptive Sensors for Mobile Robots [Electronic resource] / K. Zhao, M. Dong, L. Gu // Mathematical Problems in Engineering. — 2017. — Vol. 2017. — P. 1-14. — Available from: <https://doi.org/10.1155/2017/3938502>.

17. Supervised Terrain Classification with Adaptive Unsupervised Terrain Assessment [Electronic resource] / A. Kurup [et al.] // SAE Technical Paper Series. — 2021. — Available from: <https://doi.org/10.4271/2021-01-0250>.

18. Terrain Classification Using Neural Network Based on Inertial Sensors for Wheeled Robot [Electronic resource] / A. Skoczylas [et al.] // Recent Challenges in Intelligent Information and Database Systems. — 2021. — P. 429-440. — Available from: https://doi.org/10.1007/978-981-16-1685-3_35.

19. Bai, C. Three-Dimensional Vibration-Based Terrain Classification for Mobile Robots [Electronic resource] / C. Bai, J. Guo, H. Zheng // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — P. 63485-63492. — Available from: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2916480>.

20. Deep Multi-Layer Perception Based Terrain Classification for Planetary Exploration Rovers [Electronic resource] / C. Bai [et al.] // Sensors. — 2019. — Vol. 19, № 14. — P. 3102. — Available from: <https://doi.org/10.3390/s19143102>.

21. Szadkowski, R. J. Terrain Classification with Crawling Robot Using Long Short-Term Memory Network [Electronic resource] / R. J. Szadkowski, J. Drchal, J. Faigl // Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2018. — 2018. — P. 771-780. — Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01424-7_75.

22. Recurrent and convolutional neural networks for deep terrain classification by autonomous robots [Electronic resource] / F. Vulpi [et al.] // Journal of Terramechanics. — 2021. — Vol. 96. — P. 119-131. — Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.12.002>.

23. Valada, A. Deep spatiotemporal models for robust proprioceptive terrain classification [Electronic resource] / A. Valada, W. Burgard // The International Journal of Robotics Research. — 2017. — Vol. 36, № 13-14. — P. 1521-1539. — Available from: <https://doi.org/10.1177/0278364917727062>.

24. Andrakhanov, A. Navigation learning system for mobile robot in heterogeneous environment: Inductive modeling approach [Electronic resource] / A. Andrakhanov, A. Belyaev // 2017 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). — 2017. — Available from: <https://doi.org/10.1109/stc-csit.2017.8098846>.

25. Проверка на нормальность [Электронный ресурс]. URL: <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf> (дата обращения: 29.12.2020).

26. Критерий Лиллиефорса [Электронный ресурс]. URL: wiki.org.ru/wiki/Критерий_Лиллиефорса (дата обращения: 29.12.2020).

27. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 25.02.2022) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901807664> (дата обращения: 04.06.2022).

28. Федеральный закон от 27 июля 2006 года N 152-ФЗ "О персональных данных" (ред. от 07.02.2021) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901807664> (дата обращения: 04.06.2022).

29. ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200003913> (дата обращения: 24.05.2022).

30. ГОСТ Р ИСО 9241-1-2007 «Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200066538> (дата обращения: 24.05.2022).

31. ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200136071> (дата обращения: 24.05.2022).

32. ГОСТ Р ИСО 10075-1-2019 «Эргономические принципы обеспечения адекватности умственной нагрузки» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200167488> (дата обращения: 25.05.2022).

33. МР 2.2.9.2311-07 «Состояние здоровья работающих в связи с состоянием производственной среды. Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности. Методические рекомендации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/mr-2292311-07-229-sostojanie-zdorovja-rabotaiushchikh-v/> (дата обращения: 25.05.2022).

34. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения: 25.05.2022).

35. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ «Шум» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200118606> (дата обращения: 25.05.2022).

36. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ «Средства и методы защиты от шума» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/5200292> (дата обращения: 25.05.2022).

37. СП 51.13330.2011 «Защита от шума» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200084097> (дата обращения: 25.05.2022).

38. ГОСТ 12.4.011-89 «Средства защиты работающих» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200000277> (дата обращения: 25.05.2022).

39. ГОСТ 24940-2016 «Методы измерения освещенности» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200140599> (дата обращения: 25.05.2022).

40. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 N 242 (ред. от 04.10.2021) "Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_218071/ (дата обращения: 04.06.2022)

41. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/400274954> (дата обращения: 04.06.2022).

42. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 25.05.2022).

43. Постановление Правительства от 31 декабря 2020 года N 2398 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573292854> (дата обращения: 05.06.2022).

44. Ojeda, L., Borenstein, J., Witus, G. and Karlsen, R. (2006). Terrain characterization and classification with a mobile robot. *Journal of Field Robotics*, 23(2), pp.103–122.

45. Learning-Based Terrain Identification With Proprioceptive Sensors for Mobile Robots [Electronic resource] / R. Zeng [et al.] // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2021. — Vol. 68, № 9. — P. 8433-8443. — Available from: <https://doi.org/10.1109/tie.2020.3013798>.

46. Gonzales R, and Iagnemma K. (2018). DeepTerramechanics: Terrain Classification and Slip Estimation for Ground Robots via Deep Learning

47. Frequency-Temporal Disagreement Adaptation for Robotic Terrain Classification via Vibration in a Dynamic Environment [Electronic resource] / C. Cheng [et al.] // *Sensors*. — 2020. — Vol. 20, № 22. — P. 6550. — Available from: <https://doi.org/10.3390/s20226550>.

48. Weiss, C. Vibration-based Terrain Classification Using Support Vector Machines [Electronic resource] / C. Weiss, H. Frohlich, A. Zell // 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. — 2006. — Available from: <https://doi.org/10.1109/iros.2006.282076>.

49. Sadhukhan, D. Terrain estimation using internal sensors [Электронный ресурс] / D. Sadhukhan, C. Moore, E. Collins // Series on robotics and manufacturing. — 2004. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/247713737_Terrain_estimation_using_internal_sensors/related.

Приложение А
Базовые атрибуты набора данных

Таблица 23 – Базовые атрибуты набора данных

№	Атрибут	Описание	Формат данных	Единица измерения
1	ток 1	Сила тока на первом двигателе робота.	Вещественное число	Ампер
2	ток 2	Сила тока на втором двигателе робота.	Вещественное число	Ампер
3	ток 3	Сила тока на третьем двигателе робота.	Вещественное число	Ампер
4	гирХ	Скорость вращения робота вокруг оси Х по данным гироскопа.	Вещественное число	Градус/сек
5	гирУ	Скорость вращения робота вокруг оси У по данным гироскопа.	Вещественное число	Градус/сек
6	гирZ	Скорость вращения робота вокруг оси Z по данным гироскопа.	Вещественное число	Градус/сек
7	аксХ	Ускорение робота относительно оси Х по данным акселерометра.	Вещественное число	Метр/сек ²
8	аксУ	Ускорение робота относительно оси У по данным акселерометра.	Вещественное число	Метр/сек ²
9	аксZ	Ускорение робота относительно оси Z по данным акселерометра.	Вещественное число	Метр/сек ²

10	скор1	Скорость вращения первого двигателя.	Вещественное число	Об/мин
11	скор2	Скорость вращения второго двигателя.	Вещественное число	Об/мин
12	скор3	Скорость вращения третьего двигателя.	Вещественное число	Об/мин
13	энк1	Показания энкодера с первого двигателя. Характеризует совершённое двигателем число оборотов.	Целое число	Тик
14	энк2	Показания энкодера со второго двигателя. Характеризует совершённое двигателем число оборотов.	Целое число	Тик
15	энк3	Показания энкодера с третьего двигателя. Характеризует совершённое двигателем число оборотов.	Целое число	Тик

Приложение Б
Кинематические атрибуты набора данных

Таблица 24 – Кинематические атрибуты набора данных

№	Атрибут	Описание
1	ток X	Сила тока на двигателях, влияющая на движение робота вдоль оси X.
2	ток Y	Сила тока на двигателях, влияющая на движение робота вдоль оси Y.
3	ток Z	Сила тока на двигателях, влияющая на вращение робота вокруг оси Z.
4	ток об. X	Величина, обратная значению атрибута «ток X»
5	ток об. Y	Величина, обратная значению атрибута «ток Y»
6	ток об. Z	Величина, обратная значению атрибута «ток Z»
7	сумма T	Сумма токов на всех двигателях
8	скор. X	Скорость движения робота вдоль оси X в его локальной системе координат. Является теоретической величиной и может не соответствовать реальной скорости движения робота.
9	скор. Y	Скорость движения робота вдоль оси Y в его локальной системе координат. Является теоретической величиной и может не соответствовать реальной скорости движения робота.
10	скор. Z	Скорость вращения робота вокруг оси Z в его локальной системе координат. Является теоретической величиной и может не соответствовать реальной скорости вращения робота.
11	обр. ск. X	Величина, обратная значению атрибута «скор. X»
12	обр. ск. Y	Величина, обратная значению атрибута «скор. Y»
13	обр. ск. Z	Величина, обратная значению атрибута «скор. Z»

Приложение В

Террамеханические атрибуты набора данных

Таблица 25 – Террамеханические атрибуты набора данных

№	Атрибут	Описание
1	ск/токX	Отношение атрибута «скор. X» к атрибуту «ток X». Характеризует сопротивление, оказываемое вращению двигателя поверхностью.
2	ск/токУ	Отношение атрибута «скор. Y» к атрибуту «ток Y». Характеризует сопротивление, оказываемое вращению двигателя поверхностью.
3	ск/токZ	Отношение атрибута «скор. Z» к атрибуту «ток Z». Характеризует сопротивление, оказываемое вращению двигателя поверхностью.
4	ск-зад/токX	Характеризует сопротивление, оказываемое вращению двигателя поверхностью.
5	ск-зад/токУ	Характеризует сопротивление, оказываемое вращению двигателя поверхностью.
6	ск-зад/токZ	Характеризует сопротивление, оказываемое вращению двигателя поверхностью.
7	гир/ток	Характеризует сопротивление, оказываемое вращению двигателя поверхностью.
8	гир-зад/ток	Характеризует сопротивление, оказываемое вращению двигателя поверхностью.

Приложение Г
Целевые атрибуты набора данных

Таблица 26 – Целевые атрибуты набора данных

№	Атрибут	Описание	Формат данных	Единица измерения
1	X	Реальная координата робота по оси X.	Вещественное число	Миллиметр
2	Y	Реальная координата робота по оси Y.	Вещественное число	Миллиметр
3	Z	Реальный угол поворота робота вокруг оси Z.	Вещественное число	Градус
4	кат	Тип поверхности, по которой движется робот.	Целое число	–

**Приложение Д
(справочное)**

Terrain classification using proprioceptive data

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ПМОИ1	Рыбаченко Иван Александрович		20.06.2022

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ	Губин Евгений Иванович	к.ф.м.н.		20.06.2022

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ	Степура Светлана Николаевна	к.ф.н.		20.06.2022

1.1 Classification of navigation systems

Depending on the source of information, there are 4 groups of navigation systems [1]:

- 1) Global. A navigation system based on interaction with a satellite system.
- 2) Personal. A system that predicts position of a robot part, for example, a manipulator.
- 3) Autonomous. A navigation system based on sensors installed directly in robot.
- 4) Local. A navigation system based on interaction with beacons installed in the traffic area.

There is a simpler classification based on the location of the position computing unit [2]:

- 1) Passive. The robot receives information about its position from the outside in a ready-made form.
- 2) Active. The robot calculates its position independently.

This work is devoted to an active autonomous navigation system. There are 4 groups of sensors that can produce information for the system [3]:

- 1) Wheel sensors (encoder, current sensors)
- 2) Distance sensors (radar, lidar)
- 3) Inertial sensors (gyroscope, accelerometer)
- 4) Video/audio sensors (camera, microphone)

In this paper, wheel and inertial sensors are used as sources of information.

1.2 Sensors for autonomous navigation

1.2.1 Accelerometer

An accelerometer is a device that measures the projection of apparent acceleration (the difference between the true acceleration of an object and

gravitational acceleration). Accelerometers can be mechanical, electronic, piezoelectric and thermal [4]. The most popular are microelectromechanical accelerometers (MEMS accelerometers).

In a simplified form, the accelerometer based on the capacitor principle has a structure shown in figure 38 [5]. The movable part of the system is a classic weight on suspensions. In the presence of acceleration, the weight shifts relative to the stationary part of the accelerometer. The capacitor plate attached to the weight is displaced relative to the plate on the fixed part. The capacity changes, with a constant charge, the voltage changes – this change can be measured and the displacement of the weight can be calculated. Finally, knowing its mass and suspension parameters, it is easy to find the desired acceleration.

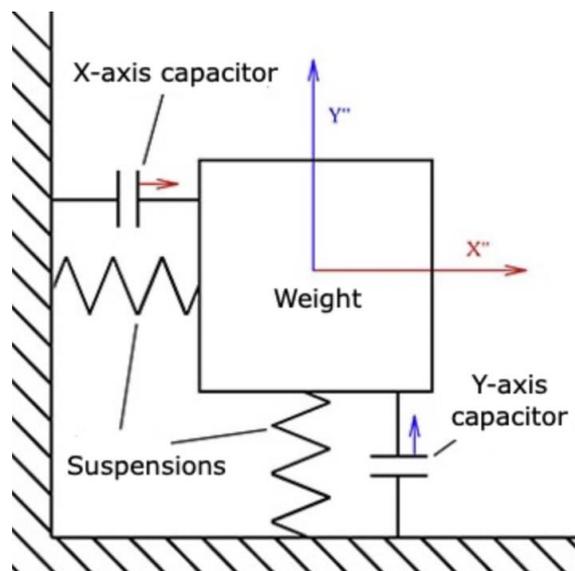


Figure 38. Structure of the accelerometer based on the capacitor principle

The structure of the MEMS accelerometer differs from the one described above, but it is based on the same principle.

The main reasons for the error of the MEMS accelerometer are [6]:

1. temperature change;
2. vibration effects;
3. cross acceleration;

4. internal accelerometer noises

The accelerometer may be subject to zero drift. The effect of zero drift is revealed in non-zero readings of the accelerometer while the actual acceleration is absent.

1.2.2 Gyroscope

A gyroscope is a device that measures the angle of inclination of an object to the earth's surface. Gyroscopes are divided into 2 types – optical and mechanical [7]. Microelectromechanical gyroscope is used in this work.

The simplest type of a gyroscope is a rotary gyroscope. The central part of a rotary-type mechanical gyroscope is a rotating rotor. The rotor is fixed in a system of several internal frames. The inner frames are connected in such a way that each of them can freely rotate around a certain axis. Figure 39 shows the internal structure of the gyroscope.

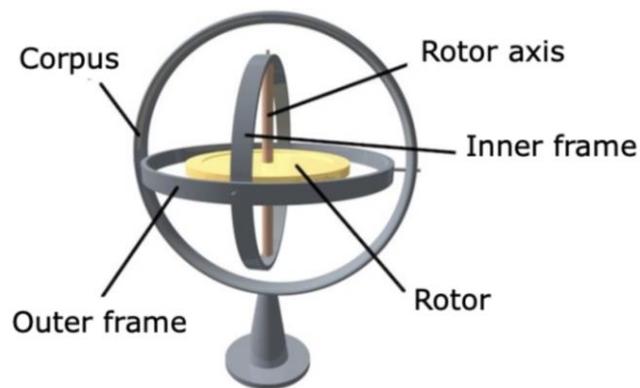


Figure 39. Internal structure of the gyroscope

The Coriolis force acts on the constantly rotating rotor, as a result, when the gyroscope rotates, the rotor retains its orientation in space. Maintaining the orientation of the rotor would be impossible without a system of internal frames that change the angles of inclination when the gyroscope rotates. Special sensors read the angles of inclination of the frames and allow you to judge the angles of inclination of the gyroscope itself.

The sources of gyroscope errors can be divided into 2 categories – having a mechanical and electronic nature [8]. Mechanical errors can be associated with a violation of the perpendicular axes of the gyroscope, a change in its natural frequency, as well as Brownian noise. As a consequence of mechanical errors, the gyroscope may drift, i.e. its axis of rotation may move away from its original position. Errors of electronic nature affect the process of taking readings from the gyroscope sensors and lead to noise in the gyroscope readings. Due to its inertial nature, in the absence of calibration, the gyroscope error accumulates over time [9].

The structure of the MEMS gyroscope is similar to the structure of the MEMS accelerometer.

1.2.3 Encoder

An encoder (angular displacement converter) is an electronic device that allows measuring various rotation parameters of a part with the necessary accuracy, as a rule, the shaft of an electric motor or gearbox [10].

The measured parameters can be: rotation speed, angular position relative to the zero mark, direction of rotation.

Encoders are divided into absolute and incremental ones [11]. The robot in question uses an incremental encoder.

With an absolute encoder, the entire rotation circle is divided into a certain number of sectors, most often of the same size. These sectors are numbered. During operation, the encoder outputs the number of the sector in which it is currently located. That is why it is called absolute. With this type of encoder, it is always possible to determine which angle relative to the zero sector the encoder is rotated at a particular moment. That is, when rotated, it outputs the values of the sector numbers, up to the maximum value. Then it goes back to zero.

The accuracy of the values given by the encoder largely depends on how well it is fixed to the shaft [11].

1.2.4 Current sensor

Current sensors are devices that determine the direct or alternating amperage in electrical circuits [12]. Their design includes a magnetic core with a gap and a compensation winding, a Hall sensor, as well as an electronic board that processes electrical signals. The main sensing element is the Hall sensor, which is fixed in the gap of the magnetic circuit and connected to the input of the amplifier.

The principle of operation is generally the same for all such devices. Under the influence of the measured current, a magnetic field arises, then, with the help of a Hall sensor, the corresponding voltage is generated. Then this voltage is amplified at the output and applied to the output winding.

1.3 Terrain classification problem

Knowledge of terrain type can be used to improve the accuracy of robot control, to plan the trajectory of the robot, or to build a terrain map.

When using an accelerometer in solving the problem of terrain classification, it is necessary to consider the dependence of its readings on the speed of movement of the robot. There are several approaches to creating a classifier of the road surface that does not depend on the speed of the robot:

- 1) Calculation of speed independent attributes [13]
- 2) A combination of several classifiers, each of which is tailored to its own range of robot movement speeds [14]
- 3) Expansion of the training sample to include various robot movement speeds [15]

1.4 Machine learning in terrain classification problem

1.4.1 Models

There are a lot of models that can handle classification task. Paper [16] compares classifiers based on Random Forest, SVM, K-Nearest Neighbors and Naive Bayes algorithms. The classifier based on SVM showed the highest accuracy.

SVM-based classifiers are the most common. However, modern works that use K-Nearest Neighbors algorithm [17] also demonstrate high accuracy.

An important place in solving the terrain classification problem is taken by neural networks. Paper [15] suggests using neural networks to predict the terrain category using manually prepared templates as shown in figure 40.

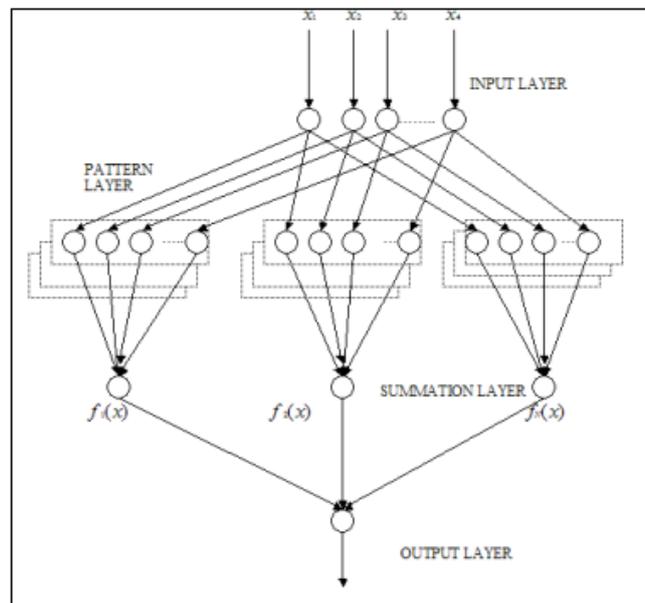


Figure 40. Template-based neural network

Paper [44] has the network structure shown on figure 41. There are 3 layers in network – input, hidden and output. All layers are fully connected to each other.

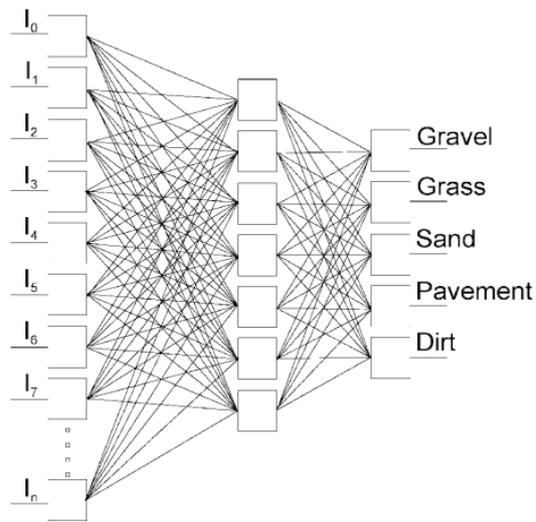


Figure 41. Neural network structure used in paper [44]

Research [18] has the network structure shown on figure 42. There are 2 hidden layers – one with SELU activation function and one with RELU activation function. Also there is a batch normalization layer that helps to reduce noise in input.

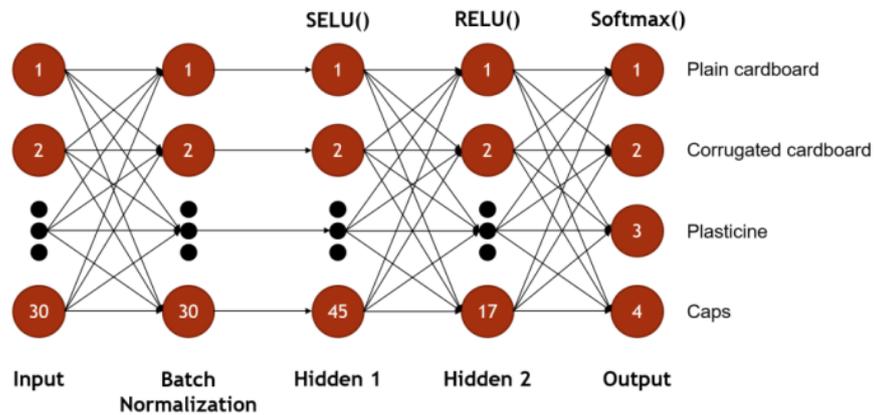


Figure 42. Neural network used in paper [18]

Paper [20] uses several hidden layers of different size and with RELU activation function. Formally, the neural network structure is shown on figure 43.

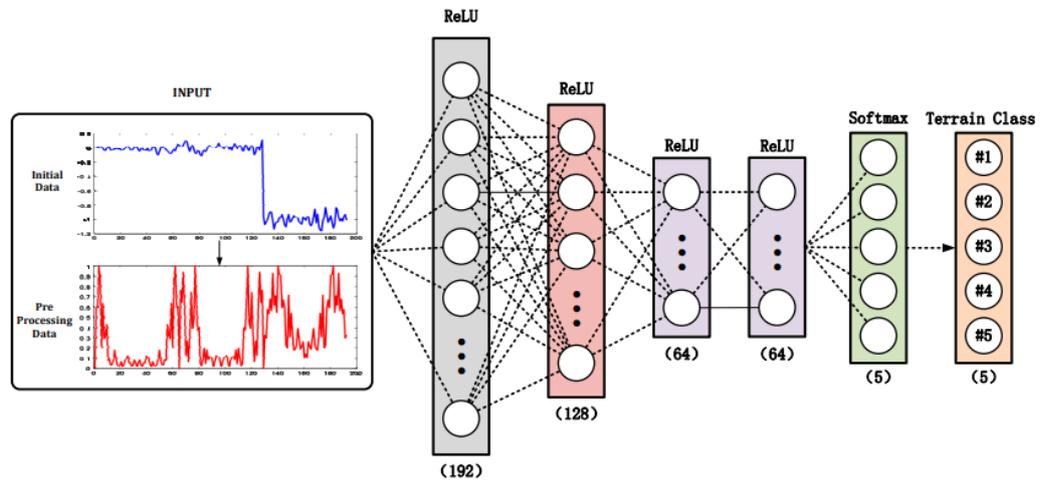


Figure 43. Neural network used in [20]

The work [21] considers data from sensors as a data stream and uses an ensemble of LSTM models for classification. The work is devoted to walking robots. The developed model is compared with SVM and demonstrates improve in accuracy.

Paper [22] adds a convolutional layer before the LSTM layer as shown in the figure 44.

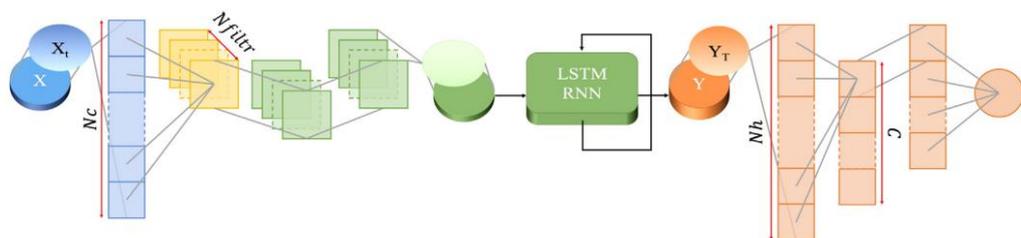


Figure 44. Neural network used in [22]

The work [45] uses several independent neural networks as shown in the figure 45. For each network, a confidence factor is predicted.

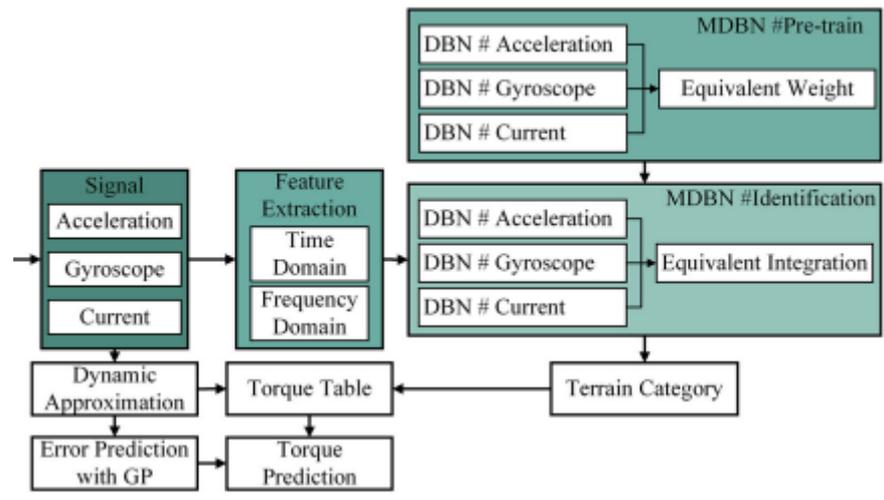


Figure 45. Neural network in work [45]

Work [23] uses complex convolutional network with LSTM layer as shown on figure 46. A microphone is used as a feature.

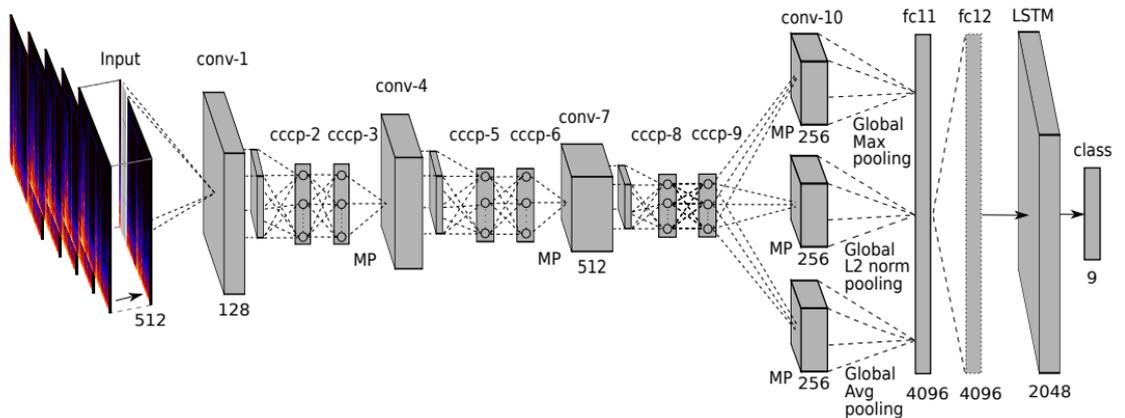


Figure 46. Convolutional network in paper [23]

Work [46] uses small convolutional network shown on figure 47 to determine wheel slip. There are only 2 pairs of convolutional layers followed by max pooling. Result of convolution then goes to dropout layer and finally to the set of interconnected dense layers.

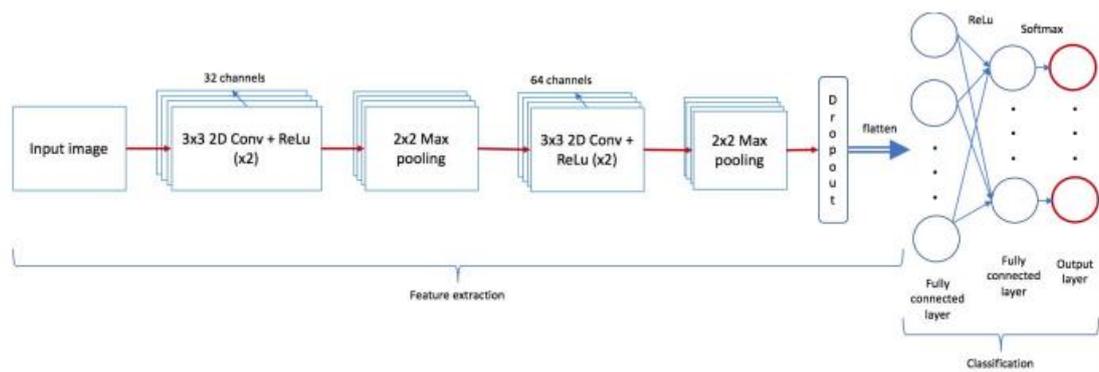


Figure 47. Convolutional network in paper [46]

So, neural networks have evolved a lot and it demonstrates that there is still a huge potential to improve them further.

1.4.2 Features

Readings from wheel sensors are rarely used in terrain classification papers, more often they are used to predict the coefficient of wheel slippage. The current values can be transferred from the time range to the frequency range. The gyroscope as a feature is also used not often. Gyroscope usually have 3 axes and in common all 3 axes of the gyroscope are used at once, less often the gyroscope use is limited to the X and Y axes.

Many papers use data obtained from the accelerometer in feature set. The accelerometer produces data in the format of acceleration amplitude versus time. In digital signal processing, the data is converted into a discrete form. The sampling rate varies from study to study. In [47], the sampling frequency is 100 Hz.

The data received from the accelerometer is divided into fragments. Fragments can either intersect [47] or not intersect [20]. In [20], the fragment width is 1 second. The number of measurements included in the fragment is determined by fragment duration and the selected sampling frequency.

To form a set of features, both all 3 axes of the accelerometer [18] and the Z axis separately [17] can be used. Both options occur with the same frequency.

By applying the Discrete Fourier Transform (DFT) to the accelerometer data, it can be converted from the time domain to the frequency domain. These forms of presentation of accelerometer data are used both separately [48] and together [45]. The Welch method can be applied to the frequency domain to obtain power spectral density (PSD) [17], while the obtained values are logarithmic.

An alternative to the discrete Fourier transform is the discrete wavelet transform (DWT) [14].

For each fragment, a set of features is formed independently. There are 2 approaches to creating a feature set:

- reduce fragment size to a fixed number of elements
- calculate the statistical characteristics of the fragment

To reduce the size of a fragment to a fixed number of elements, the following methods can be applied:

- leave the vector as it is [19]
- make a uniform selection of elements [48]
- apply PCA [15]
- perform feature selection [16]
- limit frequencies to a fixed range [49]

Statistical characteristics can be calculated for both the time domain and the frequency domain. The widest set of characteristics is presented in the study [45].

For a fragment expressed in the time domain, the statistical characteristics presented in Table 27 are the most often used.

Table 27 – The most common statistical characteristics of acceleration

Characteristic	Formula
Mean	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
Maximum	$\max(x)$
Standard Deviation	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
Kurtosis	$\frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2]^2}$
Minimum	$\min(x)$
Norm	$\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$
Root Mean Square	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$
Variance	$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$

So, accelerometer is the most common source of information for terrain classification. Data can be presented in time and frequency domain. To form a set of features, both the data itself and the statistical characteristics can be used.

1.5 Conclusion

In the first chapter, the classification of navigation systems was given, the internal structure of the most common sensors used in autonomous navigation was described, the features of the task of terrain classification surface were presented and the existing methods of solving the problem were described.

Improvement of the terrain classifier is possible through changing the set of features or improving the model. Combining all the works on the terrain classification, the set of features is quite wide and does not undergo significant changes. The main improvements are possible in the issue of selecting features from a wide range.

Among the models used, SVM is the most common. The use of a neural network is gaining popularity. The model based on a neural network is being actively improved, which indicates the prospects of development in this direction.