

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

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Информационно-измерительная система на базе манипулятора

УДК 681.518.3:621.865.8-529:621.3.013

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8EM02	Кургинов Я.О.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. каф. – руководитель ОАР на правах кафедры ИШИТР	Филипас А.А	к.т.н., доцент		

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

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШИП	Аникина Е.А.	к.э.н., доцент		

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Социальная ответственность»

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

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. каф. – руководитель ОАР на правах кафедры ИШИТР	Филипас А.А.	к.т.н., доцент		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
<b>УК(У)-1</b>	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач;
<b>УК(У)-2</b>	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла;
<b>УК(У)-3</b>	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели;
<b>УК(У)-4</b>	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия;
<b>УК(У)-5</b>	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия;
<b>УК(У)-6</b>	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
<b>ОПК(У)-1</b>	Способностью представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики;
<b>ОПК(У)-2</b>	Владением в полной мере основным физико-математическим аппаратом, необходимым для описания и исследования разрабатываемых систем и устройств;
<b>ОПК(У)-3</b>	Владением современными информационными технологиями, готовностью применять современные и специализированные средства автоматизированного проектирования и машинной графики при проектировании систем и их отдельных модулей, знать и соблюдать основные требования информационной безопасности;
<b>ОПК(У)-4</b>	Готовностью собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по тематике исследования, использовать достижения отечественной и зарубежной науки, техники и технологии в своей профессиональной деятельности;
<b>ОПК(У)-5</b>	Способностью использовать методы современной экономической теории при оценке эффективности разрабатываемых и исследуемых систем и устройств, а также результатов своей профессиональной деятельности;
<b>ОПК(У)-6</b>	Готовностью пользоваться основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий.

<b>Профессиональные компетенции</b>	
<b>ПК(У)-1</b>	Способностью составлять математические модели мехатронных и робототехнических систем, их подсистем, включая исполнительные, информационно-сенсорные и управляющие модули, с применением методов формальной логики, методов конечных автоматов, сетей Петри, методов искусственного интеллекта, нечеткой логики, генетических алгоритмов, искусственных нейронных и нейро-нечетких сетей;
<b>ПК(У)-2</b>	Способностью использовать имеющиеся программные пакеты и, при необходимости, разрабатывать новое программное обеспечение, необходимое для обработки информации и управления в мехатронных и робототехнических системах, а также для их проектирования;
<b>ПК(У)-3</b>	Способностью разрабатывать экспериментальные макеты управляющих, информационных и исполнительных модулей мехатронных и робототехнических систем и проводить их исследование с применением современных информационных технологий;
<b>ПК(У)-4</b>	Способностью осуществлять анализ научно-технической информации, обобщать отечественный и зарубежный опыт в области мехатроники и робототехники, средств автоматизации и управления, проводить патентный поиск;
<b>ПК(У)-5</b>	Способностью разрабатывать методики проведения экспериментов и проводить эксперименты на действующих макетах и образцах мехатронных и робототехнических систем и их подсистем, обрабатывать результаты с применением современных информационных технологий и технических средств;
<b>ПК(У)-6</b>	Готовностью к составлению аналитических обзоров и научно-технических отчетов по результатам выполненной работы, в подготовке публикаций по результатам исследований и разработок;
<b>ПК(У)-7</b>	Способностью внедрять на практике результаты исследований и разработок, выполненных индивидуально и в составе группы исполнителей, обеспечивать защиту прав на объекты интеллектуальной собственности;
<b>ПК(У)-8</b>	Готовностью к руководству и участию в подготовке технико-экономического обоснования проектов создания мехатронных и робототехнических систем, их подсистем и отдельных модулей;
<b>ПК(У)-9</b>	Способностью к подготовке технического задания на проектирование мехатронных и робототехнических систем их подсистем и отдельных устройств с использованием стандартных исполнительных и управляющих устройств, средств автоматизации, измерительной и вычислительной техники, а также новых устройств и подсистем;

<b>ПК(У)-10</b>	Способностью участвовать в разработке конструкторской и проектной документации мехатронных и робототехнических систем в соответствии с имеющимися стандартами и техническими условиями;
<b>ПК(У)-11</b>	Готовностью разрабатывать методику проведения экспериментальных исследований и испытаний мехатронной или робототехнической системы, способностью участвовать в проведении таких испытаний и обработке их результатов;
<b>ПК-12</b>	Способностью организовывать работу малых групп исполнителей;
<b>ПК-13</b>	Готовностью разрабатывать техническую документацию (графики работ, инструкции, планы, сметы) по утвержденным формам;
<b>ПК-14</b>	Готовностью применять методы профилактики производственного травматизма, профессиональных заболеваний, предотвращения экологических нарушений;
<b>ПК-15</b>	Способностью проводить наладку, регулировку и настройку мехатронных и робототехнических систем различного назначения;
<b>ПК-16</b>	Готовностью выполнять отладку программно-аппаратных комплексов и их сопряжение с техническими объектами в составе мехатронных и робототехнических систем;
<b>ПК-17</b>	Готовностью к участию в проведении испытаний и сдаче в эксплуатацию опытных образцов мехатронных и робототехнических систем;
<b>ПК-18</b>	Готовностью к участию в разработке программ регламентных испытаний, поверке и оценке состояния мехатронных и робототехнических систем различного назначения, а также их отдельных подсистем;
<b>ПК-19</b>	Способностью провести профилактический контроль технического состояния и функциональную диагностику мехатронных и робототехнических систем различного назначения, а также их отдельных подсистем;
<b>ПК-20</b>	Способностью составить инструкции по эксплуатации мехатронных и робото-технических систем и их аппаратно-программных средств;
<b>ПК-21</b>	Готовностью к составлению заявок на оборудование и комплектующие, к участию в подготовке технической документации на ремонт оборудования;
<b>Дополнительные профессиональные компетенции</b>	
<b>ДПК(У)-12</b>	Готовность к решению задач научно-педагогической деятельности в области профессионального образования, планированию и проведению учебных занятий и разработке учебно-методических пособий и указаний;



<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>-Проведение патентного поиска существующий решений;</p> <p>-разработка инструментов синхронизации;</p> <p>-разработка методик калибровки комплекса;</p> <p>-разработка программного обеспечения для управления комплексом;</p> <p>-проведение экспериментов с установкой.</p>
--	--

<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	-
--	---

<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
---	--

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Федоренко Ольга Юрьевна, д.м.н., профессор
Концепция стартап-проекта	Аникина Екатерина Алексеевна, к.э.н., доцент

<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>
--

Патентный поиск
-----------------

Описание функций программного интерфейса
--

Калибровка систем координат
-----------------------------

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

**Задание выдал руководитель:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8EM02	Кургинов Ярослав Олегович		16.02.2022

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

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники

Направление подготовки – 15.04.06 «Мехатроника и робототехника»

Уровень образования – Магистратура

Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

Период выполнения – Весенний семестр 2021 /2022 учебного года

Форма представления работы:

<b>Магистерская диссертация</b>
---------------------------------

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

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	6.06.2022
--	-----------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
27.05.2022 г.	<i>Основная часть ВКР</i>	60
30.05.2022 г.	<i>Раздел «Социальная ответственность»</i>	20
30.05.2022 г.	<i>Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»</i>	20

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. каф. – руководитель ОАР на правах кафедры ИШИТР	Филипас А.А.	К.Т.Н., доцент		16.02.2022

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. каф. – руководитель ОАР на правах кафедры ИШИТР	Филипас А.А.	К.Т.Н., доцент		16.02.2022

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8ЕМ02	Кургинов Ярослав Олегович

<b>Школа</b>	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	<b>Направление</b>	15.04.06 Мехатроника и робототехника
<b>Уровень образования</b>	Магистр		

<b>Перечень вопросов, подлежащих разработке:</b>	
<i>Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР (функциональное назначение, основные потребительские качества)</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Введение в предметную область</li> <li>2. Описание проблемы конечного потребителя, которую решает продукт</li> <li>3. Выполнение какой НИОКР привело к разработке</li> <li>4. Описание продукта: функциональное назначение, основные потребительские качества</li> </ol>
<i>Способы защиты интеллектуальной собственности</i>	Описать стратегию защиты интеллектуальной собственности
<i>Объем и емкость рынка</i>	Для идеи стартапа посчитать рынок одним из двух способов: снизу вверх или сверху вниз. Определить два показателя: 1) SAM (сколько заработают конкуренты вместе с вами); 2) SOM (сколько заработаете только вы)
<i>Современное состояние и перспективы отрасли, к которой принадлежит представленный в ВКР продукт</i>	Необходимо провести анализ современного состояния и перспектив рынка технологий искусственного интеллекта, отразив мировую и российскую практику
<i>Себестоимость продукта</i>	Рассчитать себестоимость 1 ед. изделия: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Расчет материальных затрат</li> <li>2. Расходы на заработную плату персонала (исполнителей)</li> <li>3. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)</li> <li>4. Накладные расходы</li> <li>5. Расчет себестоимости, цены и ожидаемой прибыли</li> </ol>
<i>Конкурентные преимущества создаваемого продукта</i>	Необходимо сделать список прямых конкурентов и товаров-заменителей. Заполнить таблицы по конкурентам. Составить карту позиционирования. Сформулировать свое конкурентное преимущество. Найти на его основе наиболее выгодное позиционирование
<i>Сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными и мировыми аналогами</i>	Провести сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными и мировыми аналогами
<i>Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта</i>	Выделить три сегмента потребителей для продукта. В каждом из сегментов составить портрет потребителя. По каждому портрету: проверить характеристики портрета; что является источником потребности в продукте; сформулировать возможные решения. При работе над каждым из портретов нужно провести не менее трех потребительских интервью
<i>Бизнес-модель проекта</i>	Описать бизнес-модель проекта: заполнить шаблон «Карта бизнес-модели»; проверить гипотезы, сделать интервью с потребителями; обновить бизнес-модель



	проекта по результатам проверки гипотез
<i>Производственный план</i>	Необходимо рассмотреть все вопросы, связанные с производственными помещениями, их расположением, с оборудованием и персоналом, а также уделить внимание планируемому привлечению субподрядчиков. Следует кратко пояснить, как организована система выпуска товаров и как осуществляется контроль над производственными процессами. Определить и аргументировать выбор фирмой того или иного производственного процесса и оборудования.
<i>План продаж</i>	Составить план продаж на год с момента начала реализации проекта
<b>Перечень графического материала:</b>	
<i>При необходимости представить эскизные графические материалы (например, бизнес-модель)</i>	Карта бизнес-модели; Расчет себестоимости цены и ожидаемой прибыли; Конкуренция на рынке; Конкурентоспособность продукции (услуг); Анализ конкурентов и ответ компании

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

Задание выдал консультант по разделу «Концепция стартап-проекта» (со-руководитель ВКР):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ШИП	Аникина Екатерина Алексеевна	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ02	Кургинов Ярослав Олегович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b> 8EM02		<b>ФИО</b> Кургинов Ярослав Олегович	
<b>Школа</b>	Инженерная школа информационных технологий и робототехники	<b>Отделение (НОЦ)</b>	Отделение автоматизации и робототехники
<b>Уровень образования</b>	магистратура	<b>Направление/специальность</b>	15.04.06 «Мехатроника и робототехника»

Тема ВКР:

<b>Информационно-измерительная система на базе манипулятора</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</li> </ul>	<p><i>Объект исследования:</i> процесс автоматизированного измерения пространственных магнитных полей</p> <p><i>Область применения:</i> измерительная техника, робототехника</p> <p><i>Рабочая зона:</i> лаборатория, производственное помещение</p> <p><i>Размеры помещения:</i> 10x10 м</p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> робот-манипулятор, измерительный прибор тесламетр-веберметр, набор измерительных щупов, ЭВМ, контроллер робота.</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> Автоматизированное измерение магнитных полей тесламетром-веберметром, позиционируемым роботом-манипулятором, с передачей результатов в ЭВМ с целью накопления, визуализации и дальнейшего использования (например, для диагностики магнитных систем).</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021);</p> <p>СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания;</p> <p>ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. Перечень опасных и вредных факторов;</p> <p>СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95;</p> <p>ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования;</p> <p>ГОСТ 21889-76 Система «человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования;</p>

	<p>ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ).  Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов;  ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ).  Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление;  ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования;  ГОСТ 12.2.072-98. Роботы промышленные. Роботизированные технологические комплексы. Требования безопасности и методы испытаний;  ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны;  МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности»</p>
<p><b>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</li> <li>– Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора</li> </ul>	<p><b>Вредные факторы</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Неподвижные колющие части твердых объектов;</li> <li>2. Движущиеся твердые объекты, наносящие удар по телу рабочего;</li> <li>3. Факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды;</li> <li>4. Вредные факторы, связанные с электрическим током;</li> <li>5. Недостаток естественного и искусственного освещения;</li> <li>6. Монотонность труда, вызывающая монотонию.</li> <li>7. Длительное сосредоточенное наблюдение:</li> </ol> <p><b>Опасные факторы</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Движущиеся твердые объекты, наносящие удар по телу рабочего:</li> </ol> <p><b>Средства коллективной защиты</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Устройства защитного заземления;</li> <li>2. Оградительные средства защиты от механических факторов</li> </ol> <p><b>Расчет:</b> расчет системы искусственного освещения.</p>
<p><b>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения</b></p>	<p>Воздействие на селитебную зону: <u>не выявлено</u>  Воздействие на литосферу: сброс твердых отходов производства механических и полупроводниковых комплектующих  Воздействие на гидросферу: утечка жидких компонентов (например, смазочные материалы).</p>

	Воздействие на атмосферу <u>не выявлено</u>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях <u>при разработке проектного решения</u></b>	Возможные ЧС: аварии на электроэнергетических объектах, аварии на коммунальных системах жизнеобеспечения, пожары. Наиболее типичная ЧС: пожар.
<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	

**Задание выдал консультант:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ02	Кургинов Ярослав Олегович		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 154 страницы, 39 рисунков, 37 таблиц, 44 источника литературы, 3 приложения.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, промышленный манипулятор, магнитное поле, программный интерфейс, калибровка, оптимизация, сумма Минковского, вычислительная геометрия, постоянный магнит, электромагнит.

Объектом исследования является автоматизированный процесс измерения пространственных магнитных полей.

Цель работы – разработка алгоритмов и программного обеспечения информационно-измерительного комплекса на базе промышленного манипулятора для исследования пространственных магнитных полей и проведение экспериментов по исследованию магнитных полей тестовых образцов.

В процессе исследования проводились: теоретический анализ проблемы, практическая апробация предложенных алгоритмов, экспериментальное исследование магнитных полей тестовых образцов.

В результате исследования был разработан инструмент синхронизации измерительного процесса и процесса позиционирования, предложены алгоритмы калибровки систем координат работа и ошибок монтажа чувствительного элемента в корпус измерительного щупа, предложен алгоритм генерации точек измерения, гарантирующий отсутствие столкновений измерительного щупа с объектом измерения при допущении об ортогональности проводимых измерений. С помощью предлагаемого комплекса была проведена серия экспериментального исследования пространственных магнитных полей постоянных магнитов и катушки электромагнита.

Предлагаемый комплекс может применяться при экспериментальном исследовании внешних магнитных полей электромеханических и электромагнитных устройств с целью выявления источников

неисправностей, сбора данных для построения имитационных моделей исследуемых систем.

В будущем планируется повысить степень автоматизации работ, выполняемых на установке, проведение междисциплинарных исследований в области робототехники, измерительной техники и электротехники.

## Оглавление

Введение.....	18
1 Патентный поиск.....	21
2 Основная часть .....	29
2.1 Инструменты синхронизации .....	29
2.1.1 Анализ протокола.....	30
2.1.2 Описание функций программного интерфейса .....	39
2.2 Калибровка систем координат .....	41
2.2.1 Прямая задача кинематики.....	41
2.2.2 Обратная кинематика.....	43
2.2.3 Калибровка рабочей точки инструмента .....	52
2.2.4 Калибровка базы.....	54
2.2.5 Практическая апробация алгоритма калибровки инструмента и базы.....	58
2.2.6 Калибровка ошибок монтажа датчика .....	61
2.3 Программное обеспечение комплекса и эксперименты .....	65
2.3.1 Программное обеспечение управления измерительным процессом .....	65
2.3.2 Визуализация магнитного поля .....	69
2.3.3 Генерация измерительных точек.....	74
2.3.4 Экспериментальное исследование магнитного поля .....	79
3 Концепция стартап-проекта .....	83
3.1 Описание продукта как результата НИР .....	83
3.1.1 Введение в предметную область .....	83
3.1.2 Описание проблемы, которую решает продукт .....	84

3.1.3	Выполнение какой НИОКР привело к разработке .....	84
3.1.4	Описание продукта: функциональное назначение, основные потребительские качества .....	85
3.2	Интеллектуальная собственность.....	85
3.3	Объем и емкость рынка .....	85
3.4	Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли .....	89
3.5	Планируемая стоимость продукта.....	89
3.6	Конкурентные преимущества .....	92
3.7	Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта.....	98
3.8	Бизнес-модели проекта. Производственный план и план продаж.....	99
3.9	Производственный план.....	100
3.10	План продаж .....	101
3.11	Стратегия продвижения продукта на рынок .....	102
4	Социальная ответственность .....	103
4.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	104
4.2	Производственная безопасность .....	105
4.3	Экологическая безопасность.....	113
4.4	Безопасность в ЧС.....	114
	Вывод по разделу .....	116
	Заключение .....	117
	Список публикаций.....	118
	Список использованных источников .....	119
	Приложение А (Обязательное) Раздел на иностранном языке .....	123
	Приложение Б (Обязательное) Экспериментальные данные для калибровки инструмента и базы.....	142



Приложение В (Обязательное) Экспериментальные данные измерения магнитного поля .....	145
--	-----

## Введение

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка и реализация информационно-измерительного комплекса на базе промышленного манипулятора для регистрации трехмерных магнитных полей.

В рамках данной ВКР автором разрабатывалось программное обеспечение для управления манипулятором и управления процессом измерения, разрабатывались способы калибровки робототехнической системы, проводилось экспериментальное исследование пространственного распределения магнитных постоянных магнитов.

При проектировании электрических машин (двигателей, генераторов, соленоидных клапанов) необходимо проводить измерения магнитных полей с целью оценки состояния магнитной подсистемы образцов на соответствие полученных в ходе изготовления характеристик заявленным при проектировании. Также в таких областях науки, как материаловедение и электромеханика, необходимо проводить исследование магнитных свойств новых сплавов и материалов, а также магнитных свойств новых конструкций элементов электрических машин. Для проведения их экспериментального исследования необходимо проводить измерения вектора магнитной индукции в различных, заранее на заданных, областях пространства вокруг изделий. Ручное измерение магнитного поля обладает малой точностью и низкой скоростью проведения, поэтому возникает необходимость разработки систем измерения с автоматическим позиционированием и запуском процесса измерения.

На текущий момент известны устройства [1-6], позволяющие проводить измерения магнитного поля в пространстве вокруг исследуемого объекта, но они обладают рядом недостатков, таких как, малая область достижимости, малая гибкость в изменении области измерения, невозможность применения одновременно к постоянным и переменным магнитным полям. Эти проблемы могут быть решены с использованием

промышленного манипулятора с шестью степенями свободы, способного гарантировать высокую точность позиционирования и повторяемости эксперимента, обеспечить широкую область достижимости, ввиду наличия большого количества степеней свободы и гибкость в применении различных измерительных устройств.

Объектом исследования является автоматизация измерений и научного эксперимента.

Предметом исследования является автоматизация измерения магнитного поля с применением робота-манипулятора.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов для контроля качества характеристик постоянных магнитов, контроля качества исполнения роторов синхронных машин и генераторов, в состав которых входят постоянные магниты, контроля качества изготовления электрических машин в целом. Возможности применения информационно-измерительной системы для автоматизации эксперимента по определению параметров магнитных материалов в ходе их испытаний, параметров новых конструкций элементов электрических машин.

В качестве робота-манипулятора в данной работе использовался робот фирмы KUKA KR6 R900 sixx со следующими характеристиками [7]:

- количество степеней свободы - 6;
- радиус рабочей зоны - 901 мм;
- максимальная приведенная нагрузка на фланец робота – 6 кг;
- повторяемость позиционирования  $\pm 0.03$  мм;
- контроллер KR C4.

В качестве устройства управления измерение выступает тесламетр-веберметр универсальный «ТПУ-2В» [8] со следующими характеристиками:

- диапазон измеряемых значений – от 10 мкТл до 10 Тл;
- тип измеряемого поля: постоянное, переменное, импульсное;

- время интегрирования от 0.1 до 25.6 с;
- частотный диапазон от 5 до 5000 Гц.

В комплекте с оборудованием поставляется программное обеспечение «ТПУ-2В», позволяющее проводить конфигурирование измерительного прибора. Компьютер подключается к устройству по USB 2.0. В комплект поставки также входит 3 щупа, для измерения продольного и поперечного магнитного поля.

## 1 Патентный поиск

С помощью Федерального института промышленной собственности по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (ФИПС) был проведен патентный поиск, в ходе которого было найдено 6 близких по тематике патентов.

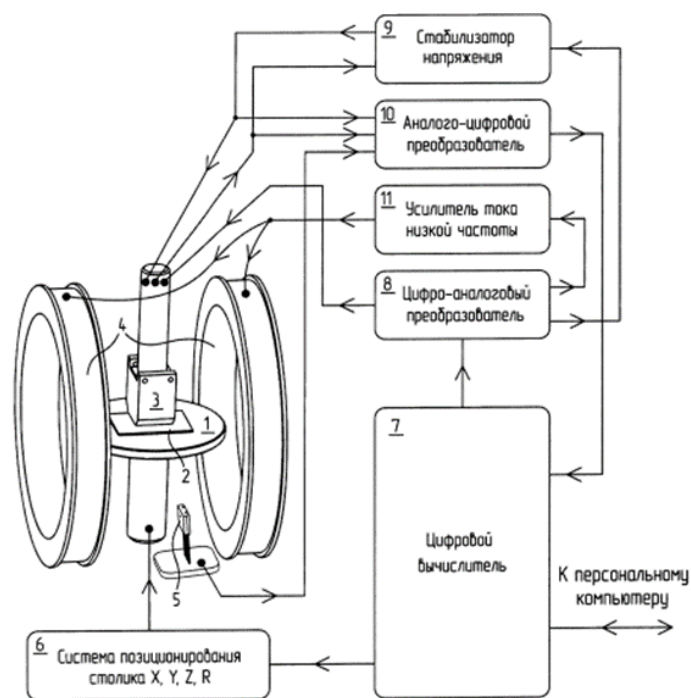
1) Автоматизированный комплекс снятия остаточной магнитной индукции ферромагнитных изделий [1].

Предлагаемая полезная модель относится к области размагничивания ферромагнитных материалов и изделий и может быть использована для снятия остаточной магнитной индукции труб и сортового проката в производственных линиях металлургических заводов.

Однако в состав модели включен блок измерения остаточного магнитного поля изделия. Блок представляет собой набор из четырех датчиков, смещенных друг относительно друга на угол 90 градусов. Датчики снабжены устройством вертикального позиционирования. Изделия, проходящие процедуру измерения магнитного поля, передвигаются через измерительное устройство в горизонтальной плоскости. Таким образом данная полезная модель обладает двумя степенями свободы для измерения магнитного поля, что мало для построения пространственной картины поля.

2) Сканирующий спектрометр ферромагнитного резонанса. [2]

Изобретение относится к измерительной технике и предназначено для неразрушающего контроля качества и однородности магнитных пленок путем регистрации спектров ферромагнитного резонанса с малых участков исследуемых образцов (рисунок 1).



1 – измерительный столик; 2 – исследуемый образец; 3 – СВЧ головка;  
 4 – кольца Гельмгольца; 5 – датчик Холла; 6 – система  
 позиционирования; 7 – цифровой вычислитель; 8 – цифро-аналоговый  
 преобразователь (ЦАП); 9 – стабилизатор напряжения; 10 – аналого-  
 цифровой преобразователь (АЦП); 11 – усилитель тока

Рисунок 1 – Сканирующий спектрометр ферромагнитного резонанса [2]

Устройство включает в себя измерительные кольца Гельмгольца, систему позиционирования объекта и персональный компьютер. Система позиционирования обеспечивает позиционирование объекта в четырех координатах —  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $R$ , где  $R$  – угол вращения по оси  $Z$ . Система обладает необходимым количеством степеней свободы для построения трехмерной картины магнитного поля, при замене катушек Гельмгольца на датчик Холла, однако в силу конструктивных особенностей исполнения, система будет плохо работать с невыпуклым и полыми объектами.

3) Аппаратный комплекс для генерации магнитных полей, их регистрации и визуализации [3]

Заявляемый аппаратный комплекс относится к разделу устройств, предназначенных для измерения переменных магнитных и электрических

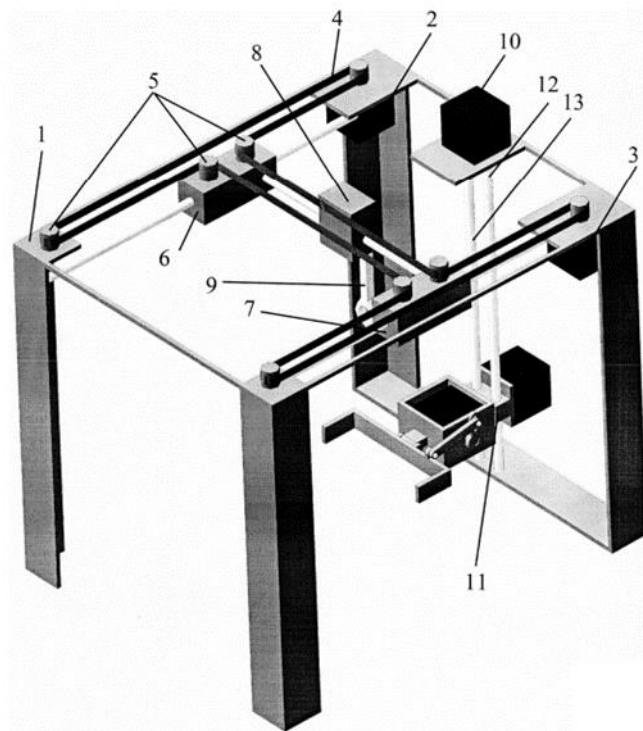
величин, в частности напряженности магнитного поля, для оценки вклада тока смещения в магнитное поле между обкладками конденсатора, измерения разности потенциалов электромагнитных полей в зависимости от частоты колебаний контура, а также формирования электрических сигналов.

Данный комплекс снабжен устройством измерения переменного магнитного поля «пояс Роговского», однако существенным ограничением является применимость данного устройства только для плоских конденсаторов. Помимо этого, предлагаемое устройство не обладает техническими приспособлениями для анализа магнитного поля, только для визуализации, что обусловлено применением микроконтроллера, обладающего низкими вычислительными мощностями по сравнению с персональным компьютером.

4) Сканер ближнего электрического поля для двухсторонних и многослойных печатных плат. [4]

Изобретение относится к измерительной технике, представляет собой устройство для сканирования ближнего электрического или магнитного поля источников электромагнитного излучения и может быть использовано при автоматическом измерении напряженности полей для решения задач обеспечения электромагнитной совместимости при проектировании, диагностике, тестировании и испытании как отдельных печатных узлов, так электронных устройств и приборов в целом (рисунок 2).

Система представляет собой двух координатный портал сформированный элементами 1-7, позиционирующий каретку 8 с закрепленным на ней чувствительным элементом 9 в плоскости XOY. Позиционирование измеряемого объекта осуществляется с помощью механической передачи, составленной из элементов 10-13.



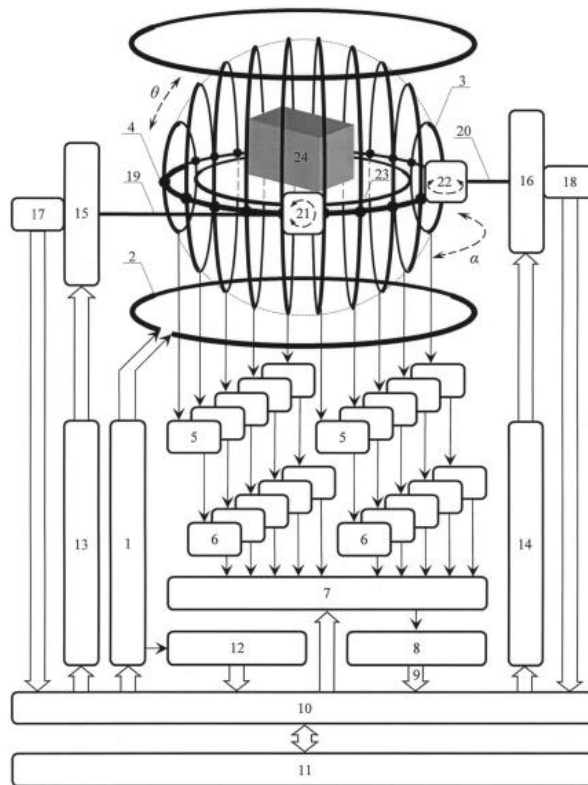
1 – корпус сканера; 2, 3 – двигатели системы позиционирования;  
 4 – приводной ремень, 5 – натяжные ролики; 6, 7 – каретки продольного горизонтального перемещения; 8 – каретка поперечного горизонтального перемещения; 9 – пробник ближнего электромагнитного поля; 10 – датчик расстояния; 11 – двигатель вертикального перемещения;  
 12, 13 – направляющие; 14 – П-образный зажим; 15 – двигатель пространственного вращения

Рисунок 2 – Сканер ближнего электрического поля для двухсторонних и многослойных плат [4]

5) Устройство для неразрушающей дифференциальной векторной трехмерной магнитоскопии [5].

Изобретение относится к информационно-измерительной технике, представляет собой устройство для измерения магнитных полей и может быть использовано для неразрушающего контроля внутренней структуры ферромагнитных объектов (рисунок 3).





1 – генератор периодического тока; 2 – источник однородного магнитного поля; 3 – круглые измерительные контура; 4 – раздвижной каркас; 5 – аналоговые интеграторы; 6 – усилители; 7 – коммутатор; 8 – одноканальный АЦП; 9 – шина данных; 10 – интерфейс; 11 – ЭВМ; 12 – формирователь импульсов синхронизации; 13, 14 – драйверы управления шаговыми двигателями; 15, 16 – шаговые двигатели; 19, 20 – винтовая передача; 21 – наклонный механизм; 22 – поворотный механизм; 23 – предметный столик; 24 – ферромагнитное изделие

Рисунок 3 – Устройство для неразрушающей дифференциальной векторной трехмерной магнитоскопии [5]

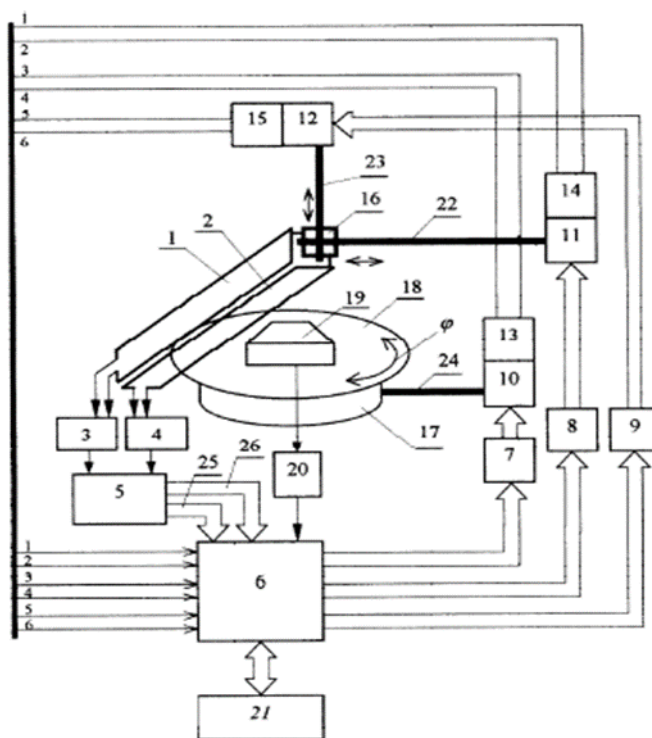
Измерительные контуры представляют собой кольца 1-4, индуктивно связанные друг с другом. Позиционирование колец осуществляется с помощью двух шаговых приводов 13-22 — зенитного и азимутального наклона. Кольца сконструированы так, чтобы огибать окружность, описанную вокруг измеряемого объекта 24, расположенного на столе 23. Съём показаний осуществляется информационной системой 5-10, синхронизация осуществляется блоком

синхронизации 12, управляет процессом ЭВМ 11. Недостатком данной системы является невозможность измерения полей, находящихся внутри и за пределами сферической поверхности, описываемой датчиками.

б) Устройство для измерения периодических магнитных полей и получения их распределений в пространстве и во времени [6].

Изобретение относится к информационно-измерительной технике, в частности к магнитометрии, и может быть использовано для измерения характеристик динамических магнитных полей, а также для получения распределений магнитных полей в пространстве и во времени и визуализации их изображений с использованием процедуры вычислительной томографии (рисунок 4).

Данное устройство снабжено системой позиционирования по двум координатам в пространстве (элементы 1-15):  $X$ ,  $Y$  и поворотным столом 18, которая обеспечивает возможность измерения полей в пространстве. Магнитное поле объекта 19 измеряется контурами 1 и 2, подключенными через усилители 3 и 4 к АЦП 5. Устройство снабжено блоком синхронизации 20, управляется посредством ЭВМ 21 через интерфейсный модуль 6. Недостаток данной системы такой же, как и системы (2) – с помощью такой системы невозможно измерение внутри полых объектов, таких как статор электрической машины, а также объектов невыпуклой формы. Помимо этого, применение данной системы возможно только для переменных полей.



1, 2 – измерительные контуры; 3, 4 – усилители; 5 – АЦП; 7-9 – блоки управления шаговыми двигателями; 10-12 – шаговые двигатели; 12-15 – концевые выключатели; 16 – механизм двухкоординатного позиционирования; 17 – вращающийся механизм; 18 – поворотный стол; 19 – источник магнитного поля; 20 – формирователь импульса синхронизации; 21 – ЭВМ; 22, 23 – направляющие; 25, 26 – выходные шины АЦП.

Рисунок 4 – Устройство для измерения периодических магнитных полей и получения их распределения в пространстве и во времени

Описанные выше системы так или иначе автоматизированы, в зависимости от области применения обладают необходимым количеством степеней свободы, однако их недостаточно для измерения объектов вогнутых форм, некоторые типы систем не способны измерять трехмерное магнитное поле в принципе. Однако можно уловить тенденцию к тому, что автоматизированные устройства содержат в себе три основных составляющие:

- механическую подсистему позиционирования, на которую установлен чувствительный элемент;
- устройство управления измерением;

- устройство синхронизации выборок измерения.

## **2 Основная часть**

### **2.1 Инструменты синхронизации**

## **2.2 Калибровка систем координат**

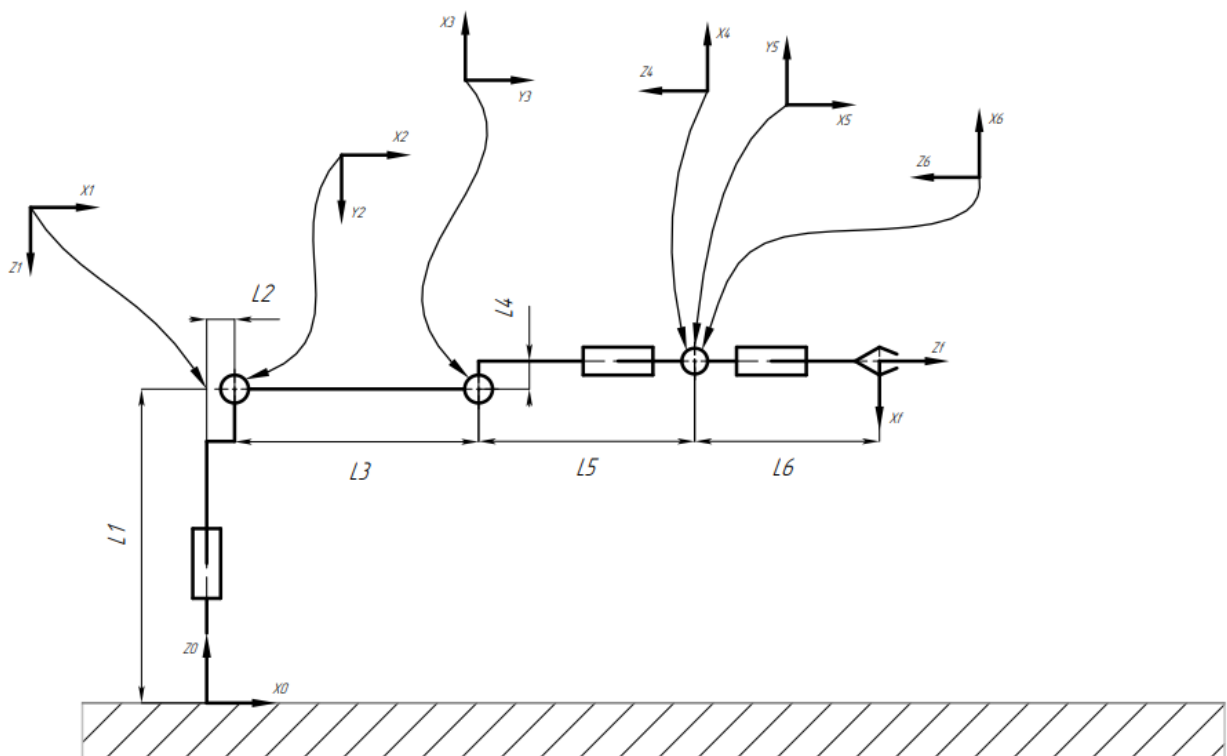
Робот-манипулятор является последовательным кинематическим механизмом. Углы поворота его исполнительных механизмов однозначно преобразуются в положение его рабочего органа в декартовой системе координат. Такое преобразование называют прямой задачей кинематики. В то же время робот в базовой комплектации поставляется без инструмента, и под решением прямой задачи кинематики понимается определение положения в пространстве системы координат, связанной с фланцем робота. Положение системы координат, связанной с инструментом, вычисляется с помощью однородной матрицы преобразования, нахождение которой называют калибровкой инструмента.

В то же время прямая задача кинематики решается в глобальной системе координат робота, связанной с его основанием. В ряде задач удобно пользоваться локальной системой координат связанной, например, с постаментом, где располагается магнит. Для того чтобы пересчитать координаты целевых точек, заданных в локальной системе в координаты в глобальной системе необходимо знать пространственное положение локальной системы координат в глобальной. Процедура вычисления положения локальной системы координат в глобальной называется калибровкой базы. Данная глава посвящена вопросам калибровки инструмента, в данном случае измерительного щупа, монтируемого на фланец робота, и базы, представляющую собой постамент, на котором находится магнит.

### **2.2.1 Прямая задача кинематики**

Как было сказано ранее, для перехода из конфигурационного пространства робота (пространства заданного углами поворота его сочленений) в декартово пространство и обратно, необходимо получить кинематические уравнения робота.

Кинематическая схема манипулятора представлена на рисунке 7.



$L_1$ - $L_6$  – длины звеньев,  $x_i, y_i, z_i$  – направления осей  $i$ -й системы координат

Рисунок 7 – Кинематическая схема манипулятора

Для кинематической схемы на рисунке 7 составим таблицу параметров Денавита-Хартенберга [14] (таблица 11).

Таблица 11 – Параметры Деневита-Хартенберга

Звено	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	180	0	$-L_1$	$\theta_1$
2	90	$L_2$	0	$\theta_2$
3	0	$L_3$	0	$-90 + \theta_3$
4	90	$L_4$	$-L_5$	$\theta_4$
5	90	0	0	$\theta_5$
6	-90	0	0	$\theta_6$
f	180	0	$L_6$	180

Матрицы преобразования от звена к звену запишутся следующим образом (1) и (2) [14]:

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_{i-1}) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_{i-1}) \cdot \sin(\theta_i) & a_{i-1} \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_{i-1}) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_{i-1}) \cdot \cos(\theta_i) & a_{i-1} \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$T_0^f = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_2^3 \cdot T_3^4 \cdot T_4^5 \cdot T_5^6 \cdot T_6^f \quad (2)$$

### 2.2.2 Обратная кинематика

Разобьем задачу нахождения решения обратной задачи кинематики на две части: по положению и по ориентации. За позиционирование рабочего органа в большей степени отвечают первые три оси, за ориентацию рабочего органа манипулятора отвечают последние три оси. Последовательно найдем углы 1-3 и 4-6 отталкиваясь от желаемого положения и ориентации рабочего органа. Далее в разделе дополнительные решения обратной задачи кинематики будем обозначать штрихом над соответствующей координатой.

Кинематическая схема для расчета углов 1-3 приведена на рисунке 8. Воспользуемся геометрическим подходом.

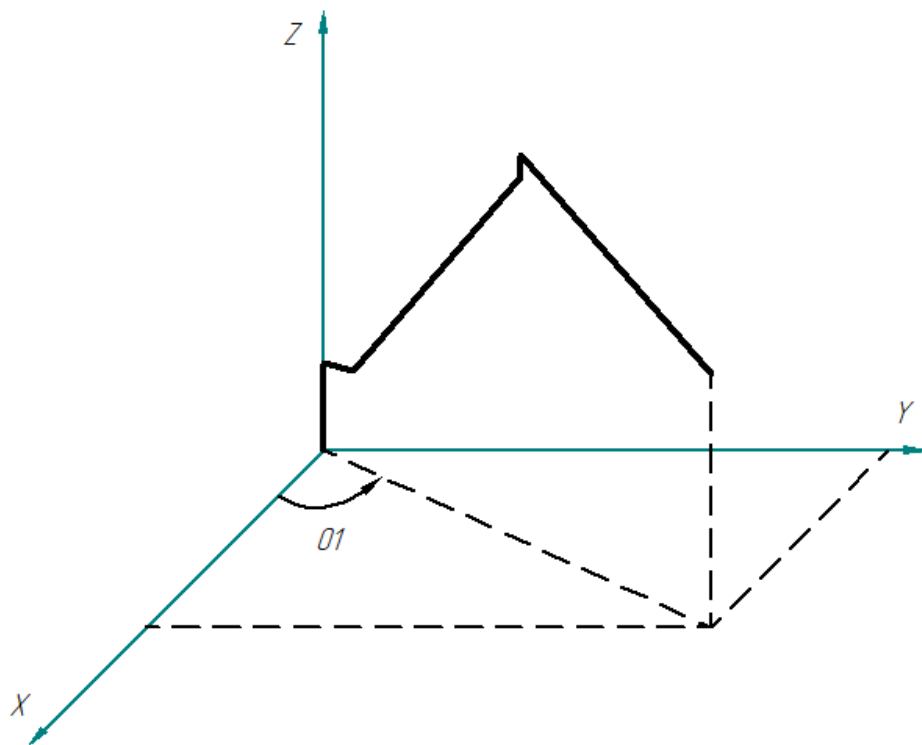


Рисунок 8 – Схема для расчета углов  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$



Угол  $\theta_1$  найдём, используя соотношение (3):

$$\begin{aligned} \theta_1 &= -\operatorname{arctg} 2(y, x), \\ \theta_1^* &= \theta_1 + 180^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

Далее необходимо повернуть систему координат, чтобы рассматривать манипулятор на плоскости (4):

$$\begin{cases} x' = x \cdot \cos(-\theta_1) + y \cdot \sin(-\theta_1) \\ z' = z \end{cases} \quad (4)$$

Ввиду геометрии манипулятора необходимо рассмотреть два случая его положения в плоскости (рисунки 9 и 10).

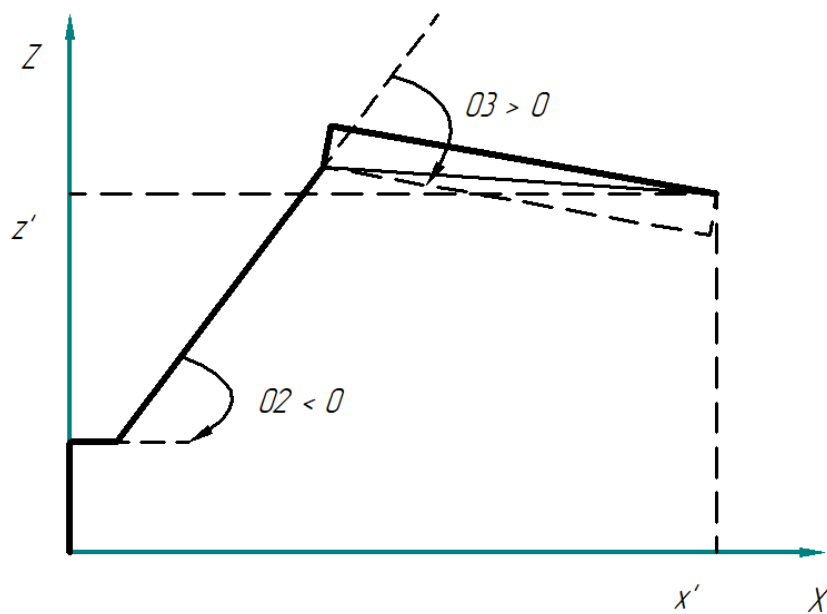


Рисунок 9 – Плоский манипулятор в конфигурации  $\theta_1 \in [-90; 90]$

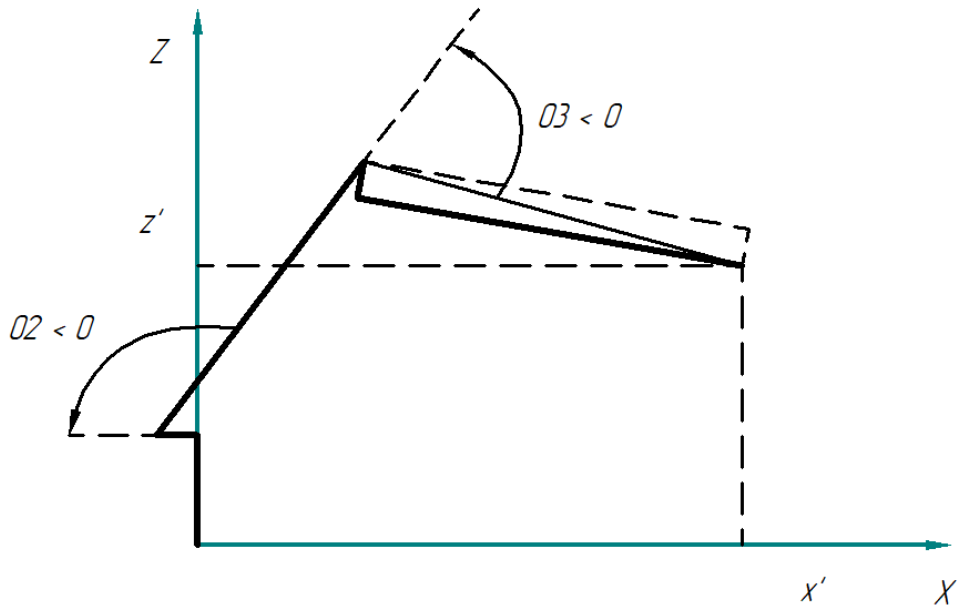


Рисунок 10 – Робот в конфигурации  $\theta_1 \in [90; -90]$

Для  $\theta_1 \in [-90; 90]$  перенесем систему координат в точку отсчета угла  $\theta_2$  (рисунок 3) используя соотношения (5):

$$\begin{cases} x'' = x' - L_2 \\ z'' = z' - L_1 \end{cases} \quad (5)$$

Для  $\theta_1 \in [90; -90]$  система координат переносится в точку отсчета угла  $\theta_2$  (рисунок 11) следующим образом (6):

$$\begin{cases} x'' = x' + L_2 \\ z'' = z' - L_1 \end{cases} \quad (6)$$

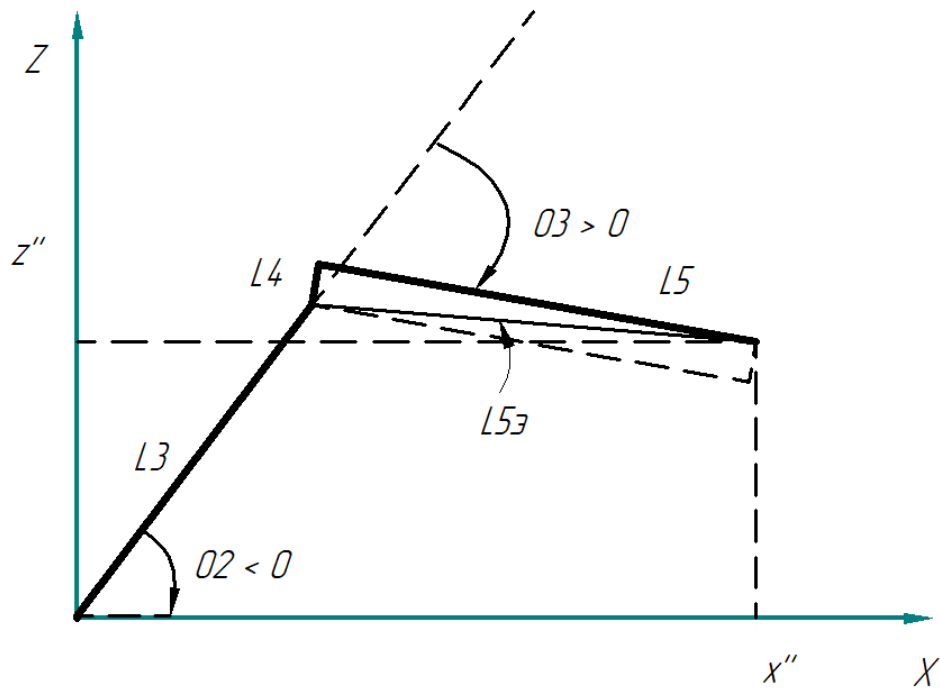


Рисунок 11 – Новая система координат

Введем переменные  $\tilde{\theta}_3$  и  $L_5^e$  (рисунок 6), используя следующие соотношения (7):

$$L_5^e = \sqrt{L_5^2 + L_4^2},$$

$$\tilde{\theta}_3 = \theta_3 - \arctan\left(\frac{L_4}{L_5}\right)$$
(7)

С помощью замены (7) можно рассматривать схему на рисунке 6 как простейший плоский манипулятор (рисунок 12).

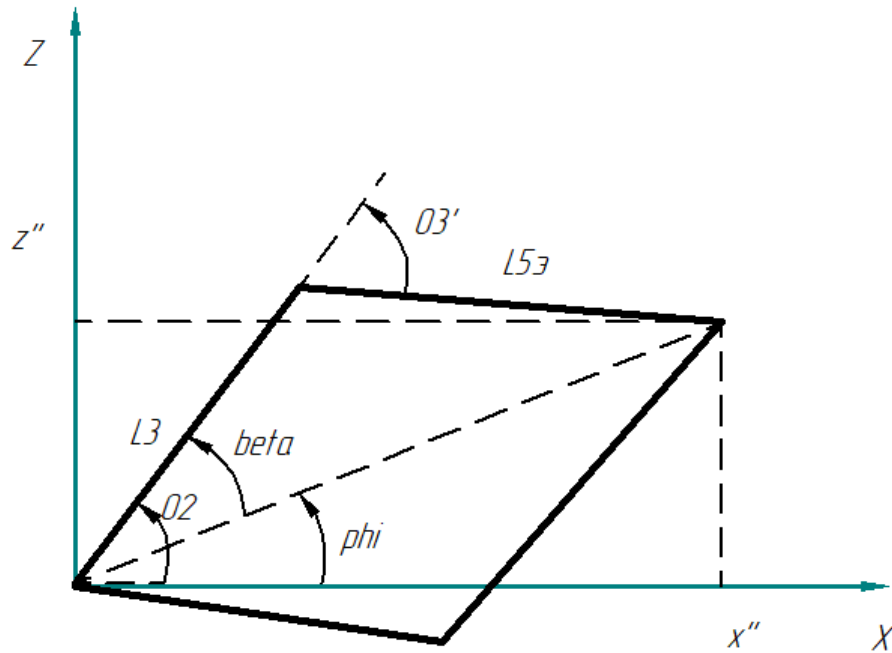


Рисунок 12 – Схема для расчета углов второго и третьего сочленения

Применяя теорему синусов к схеме на рисунке 12 вычислим угол поворота третьего сочленения (8).

$$x''^2 + z''^2 = L_3^2 + L_5^2 - 2 \cdot L_3 \cdot L_5 \cos(180 - \tilde{\theta}_3) = L_3^2 + L_5^2 + 2 \cdot L_3 \cdot L_5 \cos(\tilde{\theta}_3),$$

$$\tilde{\theta}_3 = \arccos\left(\frac{x''^2 + z''^2 - L_3^2 - L_5^2}{2L_3L_5}\right),$$

$$\tilde{\theta}_3' = -\theta_3',$$

(8)

$$\left. \begin{aligned} \theta_3 &= \theta_3' + \arctan\left(\frac{L_4}{L_5}\right) \\ \tilde{\theta}_3 &= \tilde{\theta}_3' + \arctan\left(\frac{L_4}{L_5}\right) \end{aligned} \right\}, \theta_1 \in [-180; 180]$$

Далее вводя вспомогательные углы  $\beta$  и  $\varphi$  (рисунок 12) рассчитаем угол поворота второго сочленения (9):

$$\begin{aligned}
\varphi &= \arctan 2(x'', z''), \\
L_5^{e2} &= L_3^2 + x''^2 + z''^2 - 2 \cdot L_3^2 \cdot (x'' + z'') \cos(\beta), \\
\beta &= \arccos \left( \frac{L_3^2 + x''^2 + z''^2 - L_5^{e2}}{2 \cdot L_3^2 \cdot (x'' + z'')} \right), \\
\left. \begin{aligned} \theta_2 &= -(\varphi + \beta), \theta_3 = \theta_3' + \arctan \left( \frac{L_4}{L_5} \right) \\ \theta_2 &= -(\varphi - \beta), \theta_3 = -\theta_3' + \arctan \left( \frac{L_4}{L_5} \right) \end{aligned} \right\}, \theta_1 \in [-90; 90], \\
\left. \begin{aligned} \theta_2 &= -180 + (\varphi + \beta), \theta_3 = -\theta_3' + \arctan \left( \frac{L_4}{L_5} \right) \\ \theta_2 &= -180 + (\varphi - \beta), \theta_3 = \theta_3' + \arctan \left( \frac{L_4}{L_5} \right) \end{aligned} \right\}, \theta_1 \in [90; -90]
\end{aligned} \tag{9}$$

Рассчитаем углы поворота 4-6 сочленений. Угловое положение и преобразования координат можно записать с помощью углов Эйлера и матриц поворота (10):

$$\begin{aligned}
R_Z(\alpha) &= \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\
R_Y(\beta) &= \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix}, \\
R_{X''}(\gamma) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{pmatrix}, \\
R_{Z''}(\gamma) &= \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{10}$$

Ориентация, описываемая с помощью углов Эйлера, задается с помощью трех последовательных поворотов вокруг различных осей координат в пространстве. При это могут быть как неподвижные оси, так и вращающиеся. При этом для манипулятора необходимо пользоваться последовательностью поворотов ZYX для задания целевой точки в

пространстве, так как именно такой подход использует производитель. В то же время для решения обратной задачи кинематики удобно использовать последовательность поворотов  $ZYZ$ , так как именно такую последовательность осуществляют последние три оси манипулятора.

Для того чтобы получить решение обратной задачи кинематики необходимо получить соотношения для вычисления углов Эйлера  $ZYZ$  из углов Эйлера  $ZYX$ . Для того, чтобы это сделать, нужно сначала преобразовать входные углы в матрицу ориентации целевой системы координат (11):

$$\begin{aligned}
 R_Z \cdot R_{Y'} &= \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix} = \\
 &= \begin{pmatrix} c(\alpha)c(\beta) & -s(\alpha) & c(\alpha)s(\beta) \\ s(\alpha)c(\beta) & c(\alpha) & s(\alpha)s(\beta) \\ -s(\beta) & 0 & c(\beta) \end{pmatrix}, \\
 R_Z \cdot R_{Y'} \cdot R_{X''} &= \begin{pmatrix} c(\alpha)c(\beta) & -s(\alpha) & c(\alpha)s(\beta) \\ s(\alpha)c(\beta) & c(\alpha) & s(\alpha)s(\beta) \\ -s(\beta) & 0 & c(\beta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{pmatrix} = \\
 &= \begin{pmatrix} c(\alpha)c(\beta) & -s(\alpha)c(\gamma)+c(\alpha)s(\beta)s(\gamma) & s(\alpha)s(\gamma)+c(\alpha)s(\beta)c(\gamma) \\ s(\alpha)s(\beta) & c(\alpha)c(\gamma)+s(\alpha)s(\beta)s(\gamma) & -c(\alpha)s(\gamma)+s(\alpha)s(\beta)c(\gamma) \\ -s(\beta) & c(\beta)s(\gamma) & c(\beta)c(\gamma) \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Теперь необходимо найти такое же выражение для последовательности поворотов  $ZYZ$  (12):

$$\begin{aligned}
R_Z \cdot R_Y \cdot R_{Z'} &= \begin{pmatrix} c(\alpha)c(\beta) & -s(\alpha) & c(\alpha)s(\beta) \\ s(\alpha)c(\beta) & c(\alpha) & s(\alpha)s(\beta) \\ -s(\beta) & 0 & c(\beta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\
&= \begin{pmatrix} c(\alpha)c(\beta)c(\gamma) - s(\alpha)s(\gamma) & -c(\alpha)c(\beta)s(\gamma) - s(\alpha)c(\gamma) & c(\alpha)s(\beta) \\ s(\alpha)c(\beta)c(\gamma) + c(\alpha)s(\gamma) & -s(\alpha)c(\beta)s(\gamma) + c(\alpha)c(\gamma) & s(\alpha)s(\beta) \\ -s(\beta)c(\gamma) & s(\beta)s(\gamma) & c(\beta) \end{pmatrix} \quad (12)
\end{aligned}$$

Теперь непосредственно перейдем к расчету углов  $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ . Для этого желаемую ориентацию, заданную однородной матрицей  $T_6^*$ , записанную в неподвижной системы координат и характеризующую желаемые положение и ориентацию рабочего органа манипулятора, представит в координатах  $X_4Y_4Z_4$ .

Координаты  $X_4Y_4Z_4$  можно получить из неподвижной системы координат осуществив последовательность поворотов  $R_z(-\theta_1) \cdot R_y(-90 + \theta_1 + \theta_2)$ . Тогда связь координат в системе  $X_4Y_4Z_4$  и неподвижной системе координат будет иметь следующий вид (13):

$$\begin{aligned}
T_6^* &= \begin{pmatrix} R_z(-\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_y(-90 + \theta_2 + \theta_3) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} T_6^{X_4Y_4Z_4}, \\
T_6^{X_4Y_4Z_4} &= \begin{pmatrix} R_y(90 - \theta_2 - \theta_3) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_z(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} T_6^* \quad (13)
\end{aligned}$$

Примем  $R^* = T_6^{X_4Y_4Z_4}_{i=1..3, j=1..3}$  за матрицу ориентации полученную в результате последовательности поворотов  $R_{ZYZ'}$  и, воспользовавшись соотношением (14) найдем значения углов Эйлера (15).

$$\begin{aligned}
R_{ZYZ'} &= \begin{pmatrix} \tilde{r}_{11} & \tilde{r}_{12} & \tilde{r}_{13} \\ \tilde{r}_{21} & \tilde{r}_{22} & \tilde{r}_{23} \\ \tilde{r}_{31} & \tilde{r}_{32} & \tilde{r}_{33} \end{pmatrix} = \\
&= \begin{pmatrix} c(\alpha)c(\beta)c(\gamma) - s(\alpha)s(\gamma) & -c(\alpha)c(\beta)s(\gamma) - s(\alpha)c(\gamma) & c(\alpha)s(\beta) \\ s(\alpha)c(\beta)c(\gamma) + c(\alpha)s(\gamma) & -s(\alpha)c(\beta)s(\gamma) + c(\alpha)c(\gamma) & s(\alpha)s(\beta) \\ -s(\beta)c(\gamma) & s(\beta)s(\gamma) & c(\beta) \end{pmatrix}, \quad (14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\cos(\beta) &= \tilde{r}_{33}, \\
\beta &= \arccos(\tilde{r}_{33}) = \theta_5, \\
\frac{\tilde{r}_{23}}{\tilde{r}_{13}} &= \frac{\sin(\alpha)\sin(\beta)}{\cos(\alpha)\sin(\beta)} = \tan(\alpha), \\
\alpha &= \arctan 2\left(\frac{\tilde{r}_{23}}{\sin(\beta)}, \frac{\tilde{r}_{13}}{\sin(\beta)}\right) = \theta_4, \beta \neq 0, 180, \\
-\frac{\tilde{r}_{32}}{\tilde{r}_{31}} &= \frac{\sin(\beta)\sin(\gamma)}{\sin(\beta)\cos(\gamma)} = \tan(\gamma), \\
\gamma &= \arctan 2\left(\frac{\tilde{r}_{32}}{\sin(\beta)}, \frac{-\tilde{r}_{31}}{\sin(\beta)}\right) = \theta_6, \beta \neq 0, 180, \\
\theta'_5 &= -\theta_5, \\
\theta'_4 &= 180 + \theta_4, \\
\theta'_6 &= 180 + \theta_6
\end{aligned} \tag{15}$$

Как видно, решение не существует при углах  $\beta = 0$  и  $\beta = 180$  – это точки сингулярности манипулятора. При таких значениях углов существует бесконечное множество ее решений. Для того чтобы зафиксировать некоторые решения из этого множества необходимо зафиксировать значение  $\theta_4$  (16) и (17):

$$\left. \begin{aligned}
\tilde{r}_{12} &= -\cos(\alpha)\sin(\gamma) - \sin(\alpha)\cos(\gamma) = -\sin(\alpha + \gamma) \\
\tilde{r}_{22} &= -\sin(\alpha)\sin(\gamma) + \cos(\alpha)\cos(\gamma) = \cos(\alpha + \gamma) \\
\frac{-\tilde{r}_{12}}{\tilde{r}_{22}} &= \tan(\alpha + \gamma) \\
\alpha &= 0 = \theta_4 \\
\gamma &= \arctan 2(-\tilde{r}_{12}, \tilde{r}_{22}) = \theta_6
\end{aligned} \right\}, \beta = 0, \tag{16}$$

$$\left. \begin{aligned}
\tilde{r}_{12} &= \cos(\alpha)\sin(\gamma) + \sin(\alpha)\cos(\gamma) = \sin(\gamma - \alpha) \\
\tilde{r}_{22} &= \sin(\alpha)\sin(\gamma) + \cos(\alpha)\cos(\gamma) = \cos(\gamma - \alpha) \\
\frac{\tilde{r}_{12}}{\tilde{r}_{22}} &= \tan(\gamma - \alpha) \\
\alpha &= 0 = \theta_4 \\
\gamma &= \arctan 2(\tilde{r}_{12}, \tilde{r}_{22}) = \theta_6
\end{aligned} \right\}, \beta = 180 \tag{17}$$



### 2.2.3 Калибровка рабочей точки инструмента

Для калибровки рабочей точки манипулятора (TCP – Tool Central Point) предусмотрен ряд стандартных алгоритмов в программном обеспечении робота. Проблема данных методов в том, что они не масштабируются на большее количество измерений. В то же время при нахождении центральной точки внутри твердого объекта (чувствительный элемент монтируется внутри щупа) невозможно напрямую измерить центральную точку инструмента. Косвенные измерения ее положения менее точны и снизить погрешность измерения можно путем повышения числа опытов. Таким образом необходимо создать алгоритм, который позволит повышать точность калибровки рабочей точки инструмента путем увеличения числа измерений.

Процедура калибровки заключается в том, что рабочая точка щупа приводится в одну и ту же точку пространства с различной ориентацией, где замеряется положение фланца робота. В виду того, что щуп жестко закреплен на фланце робота, а его рабочая точка во всех положениях находится в одном месте, фланец робота всегда находится на поверхности некоторой сферы неизвестного радиуса, центр которой и будет являться рабочей точкой инструмента. Таким образом, зная координаты фланца робота на всех измерениях можно определить центр этой сферы и ее радиус, воспользовавшись методом наименьших квадратов, применительно к следующему функционалу качества (18):

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[ (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 - R^2 \right]^2, \quad (18)$$

где  $x_i, y_i, z_i$  - координаты фланца робота в каждом измерении;

$x_0, y_0, z_0, R$  - координаты центра сферы и ее радиус;

$n$  - количество измерений.

Решением данной задачи являются следующие соотношения (19):

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b, \quad (19)$$

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[ (x_i - x_0)^2 - (y_i - y_0)^2 - (z_i - z_0)^2 \right]}{n}},$$

где матрицы  $A$  и  $b$  имеют следующий вид (20):

$$A = 2 \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i (x_i - \bar{x}) & \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \bar{y}) & \sum_{i=1}^n x_i (z_i - \bar{z}) \\ \sum_{i=1}^n y_i (x_i - \bar{x}) & \sum_{i=1}^n y_i (y_i - \bar{y}) & \sum_{i=1}^n y_i (z_i - \bar{z}) \\ \sum_{i=1}^n z_i (x_i - \bar{x}) & \sum_{i=1}^n z_i (y_i - \bar{y}) & \sum_{i=1}^n z_i (z_i - \bar{z}) \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$b = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)(x_i - \bar{x}) \\ \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)(y_i - \bar{y}) \\ \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)(z_i - \bar{z}) \end{bmatrix},$$

где величины  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  и  $\bar{z}$  - среднее значение переменных  $x$ ,  $y$  и  $z$ , вычисляемые по формулам (21):

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \\ \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \\ \bar{z} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \end{aligned} \quad (21)$$

Однородная матрица перехода, описывающая положение шупа в пространстве имеет следующий вид (22):

$$T_0^{tool} = T_0^f T_f^{tool}, \quad (22)$$

где  $T_0^f$  - решение прямой задачи кинематики робота;

$T_f^{tool}$  - однородная матрица перехода между системой координат фланца робота и системой координат шупа, имеющая форму (23).

$$T_f^{tool} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_t \\ 0 & 1 & 0 & y_t \\ 0 & 0 & 1 & z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

где  $x_t, y_t$  и  $z_t$  - координаты рабочей точки инструмента в системе координат фланца робота. Эти координаты удовлетворяют следующему уравнению (24):

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{bmatrix} + R_0^f \cdot \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix}, \quad (24)$$

где  $x'_1, y'_1$  и  $z'_1$  - координаты проекции первой измеренной точки на сферу, вычисляемые по следующим формулам (25):

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{bmatrix} = \frac{R}{\|V\|} V, \quad (25)$$

$$V = \begin{bmatrix} x_0 - x_1 \\ y_0 - y_1 \\ z_0 - z_1 \end{bmatrix}$$

Решение уравнения (24) относительно  $x_t, y_t$  и  $z_t$  будет результатом калибровки рабочей точки измерительного инструмента.

#### 2.2.4 Калибровка базы

Для калибровки системы координат предлагается воспользоваться электроконтактным способом. Суть способа заключается в следующем:

- постамент, на котором располагается измеряемый объект, снабжается контактными проводящими пластинами, на которые подается напряжение;

- к фланцу робота манипулятора крепится щуп с токопроводящим стержнем внутри. Стержень снабжается пружиной, для того чтобы избежать деформации при контакте щупа с пластинами;

- токопроводящий стержень подключается к модулям дискретного ввода/вывода контроллера робота;

- осуществляется калибровка щупа с целью определения его рабочей точки;
- осуществляется измерение положения в пространстве токопроводящих пластин с помощью щупа;
- на основании геометрии постамента и пластин вычисляется положение локальной системы координат измеряемого объекта.

Постамент, на котором находится измеряемый объект (в данной работе – постоянный магнит) приведен на рисунке 13. На поверхности постамента расположены медные пластины, к которым подводится напряжение 24 вольта. Пластины на постаменте ортогонально ориентированы и принадлежат плоскостям  $OXY$ ,  $OYZ$ ,  $OXZ$  локальной системы координат постамента.

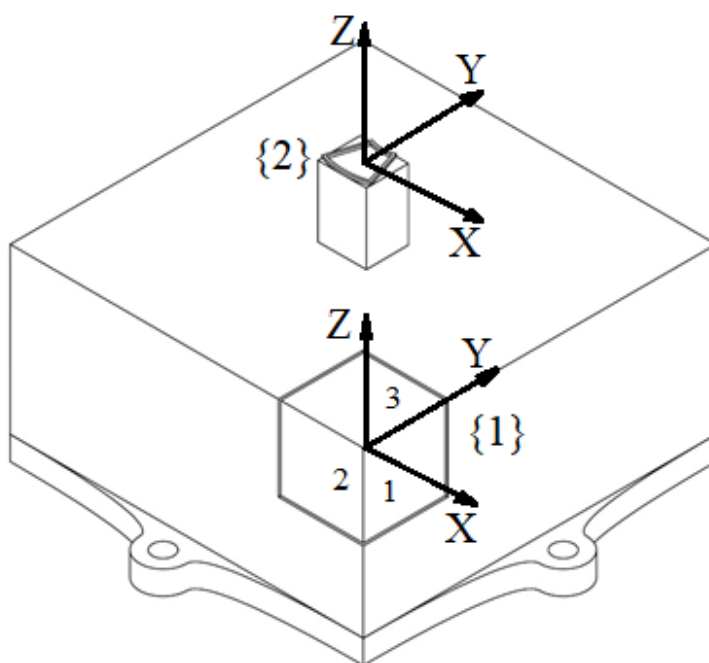


Рисунок 13 – Постамент с контактными пластинами

Измерительный щуп с токоведущим стержнем представлен на рисунке 14.

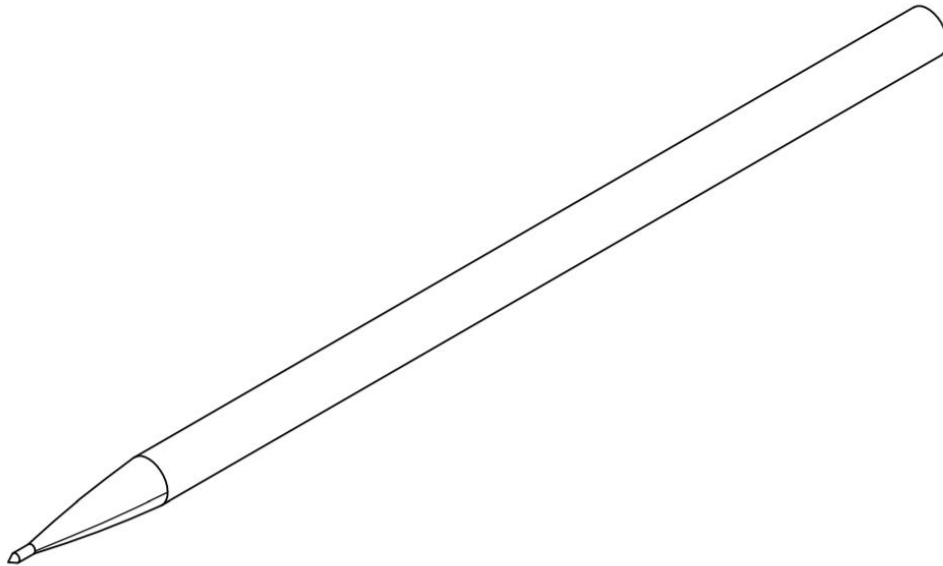


Рисунок 14 – Щуп с токоведущим стержнем

Теперь с помощью откалиброванного щупа необходимо измерить положение контактных пластин в пространстве. Последовательно для каждой пластины проводится серия измерений в разных точках. Для этого на минимальной скорости щуп подводится к пластине до достижения контакта. При замыкании электрической цепи на дискретный вход манипулятора подается сигнал логической единицы. По приходу фронта сигнала срабатывает прерывание, в обработчике которого происходит отправка текущего положения рабочей точки щупа (точки контакта с пластиной) на ЭВМ. Все точки аккумулируются в памяти ЭВМ и далее обрабатываются.

Для определения положения локальной системы координат постаментов, необходимо определить положение пластин по экспериментальным данным. Положение пластин будет описываться тремя уравнениями плоскостей, в которых они находятся. Уравнения пластин получим, решая задачу нелинейного программирования [15-17] со следующим функционалом.

Уравнения пластин получим, решая задачу нелинейного программирования [15-17] с функционалом качества (26) и ограничениями (27).

$$\alpha = [A_1, B_1, C_1, A_2, B_1, C_2, A_3, B_3, C_3],$$

$$J(\alpha) = \sum_{i=1}^m (A_1 x_i + B_1 y_i + C_1 z_i + D_0)^2 + \sum_{i=1}^m (A_1 x_i + B_1 y_i + C_1 z_i + D_0)^2 + \sum_{i=1}^k (A_3 x_i + B_3 y_i + C_3 z_i + D_0)^2, \quad (26)$$

где  $\alpha$  – вектор переменных задачи;

$m, n, k$  – количество измеренных точек на поверхности пластин;

$D_0$  – некоторая константа.

$$\begin{aligned} g_1 &= A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2 = 0, \\ g_2 &= A_2 A_3 + B_2 B_3 + C_2 C_3 = 0, \\ g_3 &= A_1 A_3 + B_1 B_3 + C_1 C_3 = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

Пересечение трех плоскостей является центром системы координат  $\{1\}$  (рисунок 13). Направление оси X примем сонаправленным с нормалью к пластине 1, ось Y – к пластине 2, Z – к пластине 3. Переход к системе координат 2 задается матрица перехода (28):

$$T_{\{1\}}^{\{2\}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_2 \\ 0 & 1 & 0 & y_2 \\ 0 & 0 & 1 & z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

где  $x_2, y_2, z_2$  – положение центра системы координат 2 в системе координат 1.

Положение робота в глобальной системе координат соответствующее положению робота в системе координат измеряемого объекта можно вычислить по формуле (29):

$$T = (T_{\{0\}}^{\{1\}} T_{\{1\}}^{\{2\}})^{-1} \quad (29)$$

## 2.2.5 Практическая апробация алгоритма калибровки инструмента и базы

В результате измерений положения фланца робота при калибровке щупа представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Положение фланца при калибровке инструмента

X, мм	Y, мм	Z, мм	A, град	B, град	C, град
739.17	-272.07	130.101	-179.997	1.03133	179.999
727.425	-268.086	173.616	-177.969	24.7842	-170.435
709.275	-203.852	134.866	-141.672	5.86347	-147.815
667.184	-365.032	185.118	111.652	29.9669	166.367
608.212	-272.875	234.881	-5.55203	83.6021	-26.2834
524.958	-321.047	147.039	19.4345	8.64885	160.864
542.018	-208.025	103.262	-43.2731	-13.6129	163.942
562.485	-363.668	162.059	49.2785	17.046	167.665
695.434	-237.875	202.711	-153.645	46.9074	-117.034
622.238	-391.384	133.157	83.7615	2.77562	-176.084

Параметры рассчитанной сферы:  $R=112.5968$  мм,  $\{x_0, y_0, z_0\} = \{626.8321, -279.4130, 123.9480\}$  мм. На рисунке 15 представлен график рассчитанной сферы и расположение экспериментальных точек на ней.

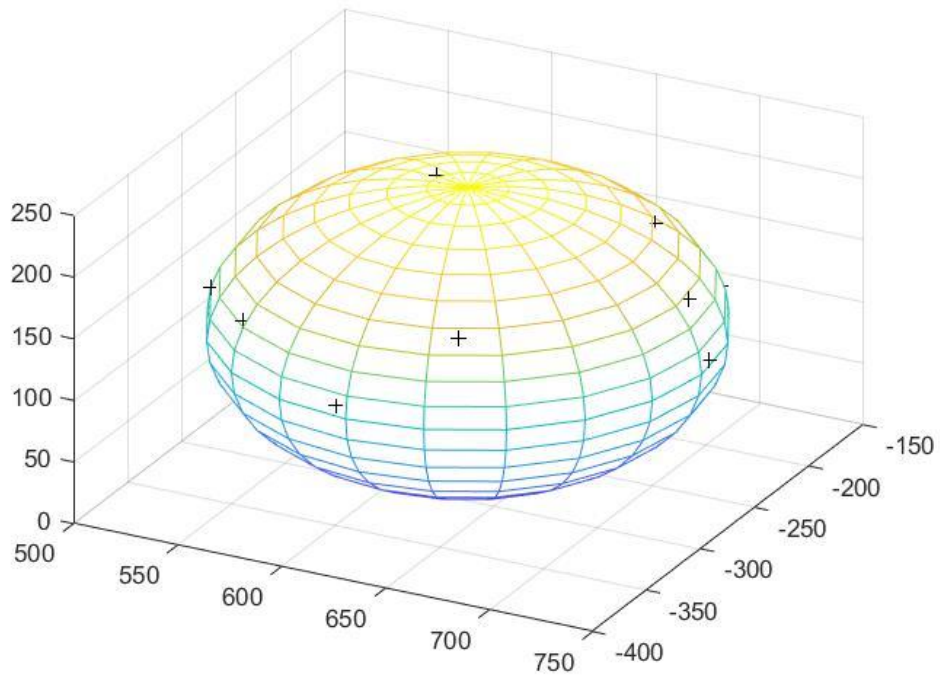


Рисунок 15 – Результат расчета сферы

Матрица перехода от фланца к координатам инструмента имеет следующий вид (30):

$$T_f^{tool} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 112.2824 \\ 0 & 1 & 0 & -7.3275 \\ 0 & 0 & 1 & 4.1242 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Для каждого эксперимента рассчитаем новое положение рабочей точки щупа с учетом матрицы перехода (таблица 13).

Таблица 13 – Положение рабочей точки инструмента

№ измерения	X, мм	Y, мм	Z, мм
1	626.9804	-279.403	123.9563
2	627.0227	-279.562	123.9602
3	626.8285	-279.735	123.8058
4	626.6356	-279.555	124.0646
5	627.0732	-279.474	124.0715
6	626.8921	-279.174	123.9274



Продолжение таблицы 13 – Положение рабочей точки инструмента

7	626.545	-279.5	123.867
8	626.6908	-279.456	123.796
9	626.7631	-279.713	123.8951
10	626.859	-279.246	124.1098

В таблице 14 представлены значения стандартного отклонения координат, рассчитанные по формулам (31) [18]:

$$\begin{aligned}
 S_x &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{m(m-1)}}, \\
 S_y &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n(n-1)}}, \\
 S_z &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (z_i - \bar{z})^2}{k(k-1)}}
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

Таблица 14 – Стандартное отклонение координат щупа

Координата	X, мм	Y, мм	Z, мм
Отклонение	0.0544	0.0610	0.0347

Откалиброванным щупом проведем измерения положения контактных пластин. Измеренные положения представлены в таблицах Б.1 – Б.3 в приложении Б.

На рисунке 16 представлен результат решения задачи оптимизации по определению положения пластин.

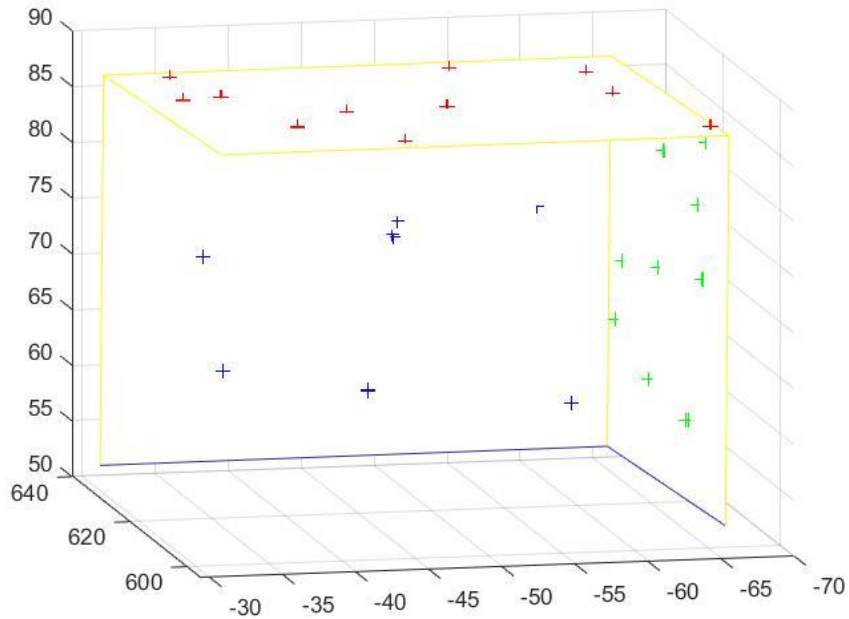


Рисунок 16 – Результат определения положения пластин

Результирующая матрица, описывающая систему координат  $\{1\}$  имеет следующий вид (32):

$$T_{\{0\}}^{\{1\}} = \begin{bmatrix} 0.9993 & -0.0361 & -0.0036 & 631.3152 \\ 0.0361 & 0.9993 & -0.0064 & -64.5215 \\ 0.0038 & 0.0062 & 1.0000 & 87.7777 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Рассчитаем отклонение плоскости от измеренных точек. Для этого найдем среднее значение и стандартное отклонение расстояния от экспериментальных точек до соответствующих им плоскостей (таблица 15).

Таблица 15 – Среднее значение и стандартное отклонение расстояния от экспериментальных точек до плоскости

Плоскость	XOY	XOZ	YOZ
Среднее, мм	0.1005	0.0718	0.0632
Стандартное отклонение, мм	0.0681	0.06	0.0336

### 2.2.6 Калибровка ошибок монтажа датчика

Калибровка инструмента, приведенная выше, не подразумевает калибровку ошибок внутри самого датчика. Ошибки смещения нуля,

относительно геометрического центра и ошибка углового наклона оси также должна быть откалибрована. Опишем процедуру калибровки ошибки угла наклона. Для этого зададимся следующей моделью измерения (33):

$$B^* = Z^T \cdot R^T \cdot B + \xi, \quad (33)$$

где  $B^*$  - результат измерения магнитной индукции;

$Z$  – направление нормали к плоскости датчика в системе координат фланца робота;

$R$  – матрица поворота, описывающая ориентацию фланца робота в глобальной системе координат;

$B$  – вектор магнитной индукции выраженный в глобальных координатах робота;

$\xi$  - случайная составляющая измерений.

Для калибровки ошибок углового положения датчика необходимо найти вектор  $Z$ . Однако, уравнение содержит две неизвестные величины:  $Z$  и  $B$ , так как для того чтобы измерить  $B$  необходим уже откалиброванный датчик, или источник магнитного поля с известным направлением и модулем вектора магнитной индукции. Такими свойствами обладает дипольный магнит, т.е. магнит, создающий однородное магнитное поле. Однако получить дипольный магнит с однородным полем менее трудоемкая задача, чем получить такой же магнит с заданным модулем вектора магнитной индукции. Поэтому целесообразно использовать дипольный магнит с заранее неизвестным направлением и модулем магнитной индукции, но с однородным магнитным полем в зазоре, а вектор  $B$  принять неизвестным и включить в следующую задачу оптимизации (34):

$$J = \sum_{i=1}^n \left( Z^T \cdot R_i^T \cdot B - B_i^* \right)^2 \xrightarrow{Z, B} \min, \quad (34)$$

при ограничении на норму вектора  $Z$  (35):

$$g = \sqrt{Z^T \cdot Z} - 1 = 0 \quad (35)$$

Результатом решения задачи оптимизации (34) – (35) будет являться направление оси  $Z$  в системе координат фланца робота и вектор  $B$  в глобальной системе координат.

Проведем вычислительный эксперимент для проверки гипотезы. Зададим некоторые, априори неизвестные, направление оси  $Z$  и значение вектора  $B$  (таблица 16). Сгенерируем серию измерений с различным положением измерительного щупа в пространстве и зашумим их случайной величиной с математическим ожиданием равным 0, и среднеквадратичным отклонением равным относительной погрешности измерения прибора (таблица 17). Результат решения задачи оптимизации представлен в таблице 18. Следует отметить, что задача имеет два решения с противоположными знаками, выбирать нужный исходя из положения полюсов магнита.

Таблица 16 – Заданные значения  $Z$  и  $B$

$Z$	$B$ , мТл
$[0.9129 \ 0.3651 \ 0.1826]^T$	$[300 \ 25 \ -117]^T$

Таблица 17 – Сгенерированные данные измерений

$B$ , мТл	$B$ , мТл
32.9860	-74.4998
-94.4196	-288.9625
83.8789	157.0434
107.1083	105.5592
-69.9279	-25.8928

Таблица 18 – Результат решения задачи оптимизации

$Z$	$B$ , мТл
$[0.9128 \ 0.3665 \ 0.1802]^T$	$[299.6236 \ 24.7777 \ -116.8563]^T$

Таким образом отклонение вычисленного направления оси датчика составляет (36):

$$\varphi_e = \arccos(Z^T \cdot Z_e) = 0.0028 \text{ рад} \quad (36)$$

Далее следует откалибровать ошибки смещения нуля датчика. Для калибровки необходимо использование постоянного магнита с неоднородным полем, имеющим максимум в оси намагничивания. Предлагается следующая процедура выполнения калибровки:

- зафиксировать направление измерительной оси датчика  $Z$ ;
- найти максимальное значение модуля вектора магнитной индукции  $B_{\max}$  ;
- зафиксировать пространственное положение датчика  $\{X_{\max}, Y_{\max}, Z_{\max}\}$  ;
- изменить направление измерительной оси датчика на противоположное  $-Z$ ;
- выполнить поиск значения модуля вектора магнитной индукции, имеющего минимальное отклонение от величины  $\Delta B_{\min} = (B_{\max} + B) \rightarrow \min$  ;
- зафиксировать значения пространственного положения датчика  $\{X_{\min}, Y_{\min}, Z_{\min}\}$  ;
- вычислить ошибки смещения нуля по формулам (37):

$$\begin{aligned} X_e &= \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2}, \\ Y_e &= \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{2}, \\ Z_e &= \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{2} \end{aligned} \quad (37)$$

Для поиска минимальных и максимальных значений предлагается использовать методы оптимизации нулевого порядка, например, методом Хука-Дживса [19].

## 2.3 Программное обеспечение комплекса и эксперименты

### 2.3.1 Программное обеспечение управления измерительным процессом

Для управления измерительным процессом было реализовано оконное приложение с использованием библиотеки Qt [20]. Графический интерфейс программы представлен на рисунке 17.

Данный интерфейс можно разделить на три части:

- управление измерительным прибором;
- управление сервером синхронизации;
- отображение результатов последнего измерения.

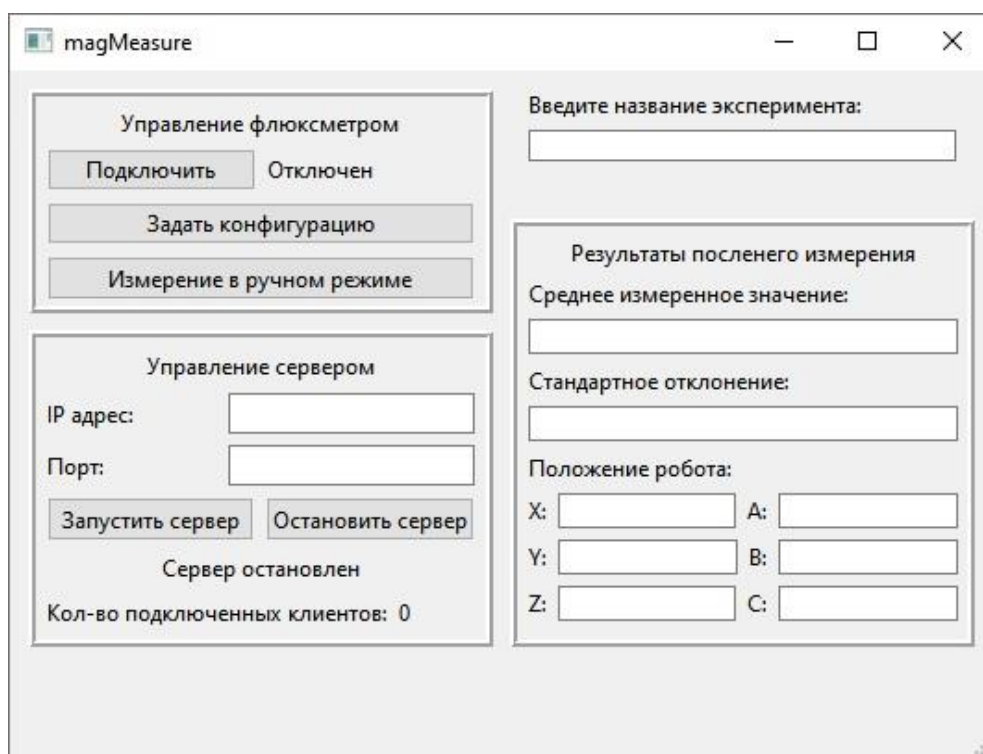


Рисунок 17 – Графический интерфейс пользователя

Интерфейс управления тесламетром позволяет подключать прибор к компьютеру, задавать конфигурацию устройства и запускать измерения в ручном режиме.

При нажатии на кнопку задать конфигурацию открывается диалоговое окно (рисунок 18), на котором пользователь выбирает желаемые настройки прибора.

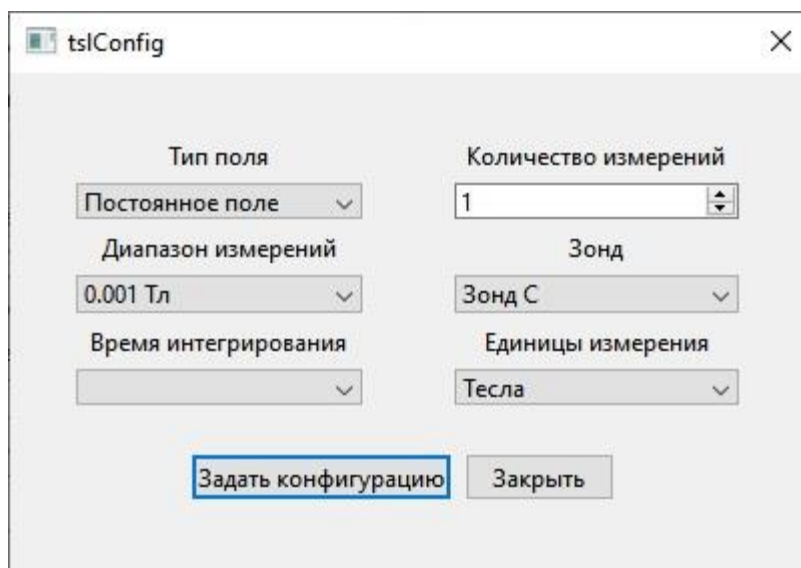


Рисунок 18 – Окно конфигурации измерительного прибора

На рисунке 19 представлен результат ручного измерения магнитного поля.

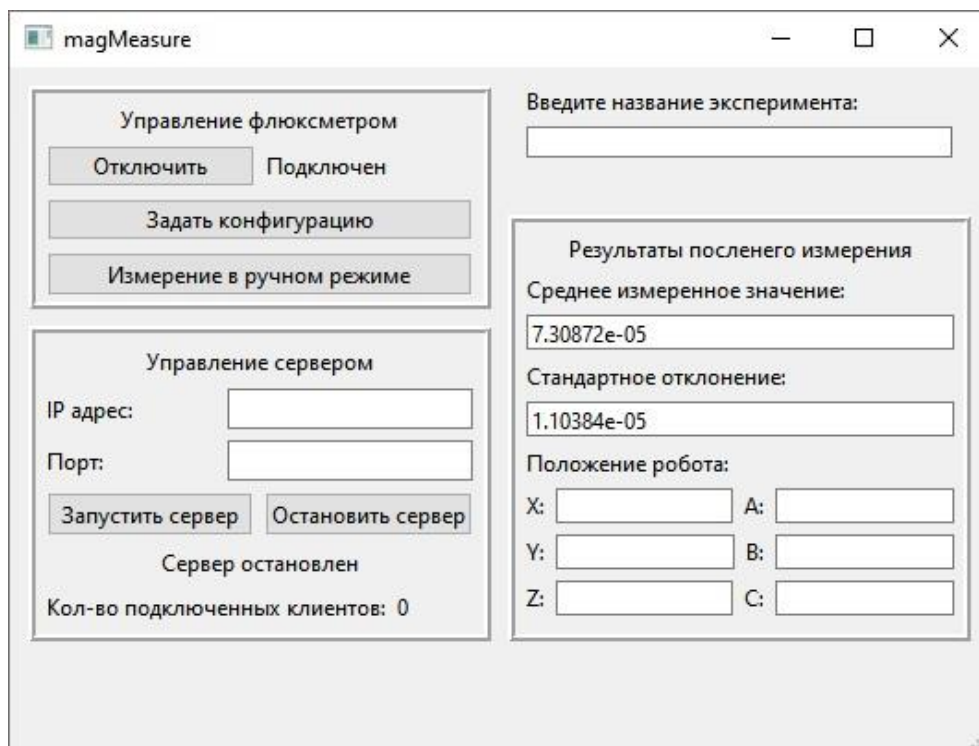


Рисунок 19 – Результат выполнения функции «Измерение в ручном режиме»

Вторая часть интерфейса отвечает за управление TCP сервером, отвечающий за прием данных текущего положения робота-манипулятора и

синхронизацию измерения и позиционирования. Управление сервером позволяет задавать настройки IP адреса и порта, который слушает сервер, запускать и останавливать сервер. Также элементами индикации являются состояние сервера (запущен/остановлен) и количество подключенных клиентов. На рисунке 20 представлен пример конфигурации сервера на связь с роботом KUKA.

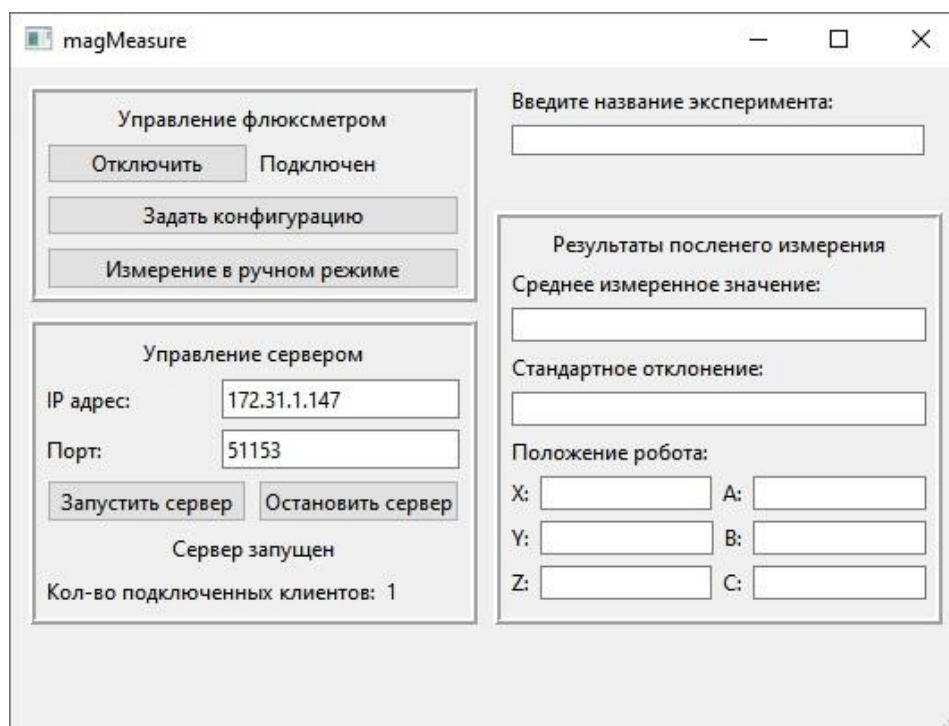


Рисунок 20 – Пример конфигурации сервера

Часть отображения результатов измерения содержит индикацию последней позиции, в которой было проведено измерение, и его результат – среднее значение амплитуды вектора магнитной индукции и стандартное отклонение. В случае если измерение проводится в ручном режиме, отображаются только значения измеренных величин (рисунок 3), если измерения проводятся в автоматическом режиме, то отображают все величины (рисунок 21).



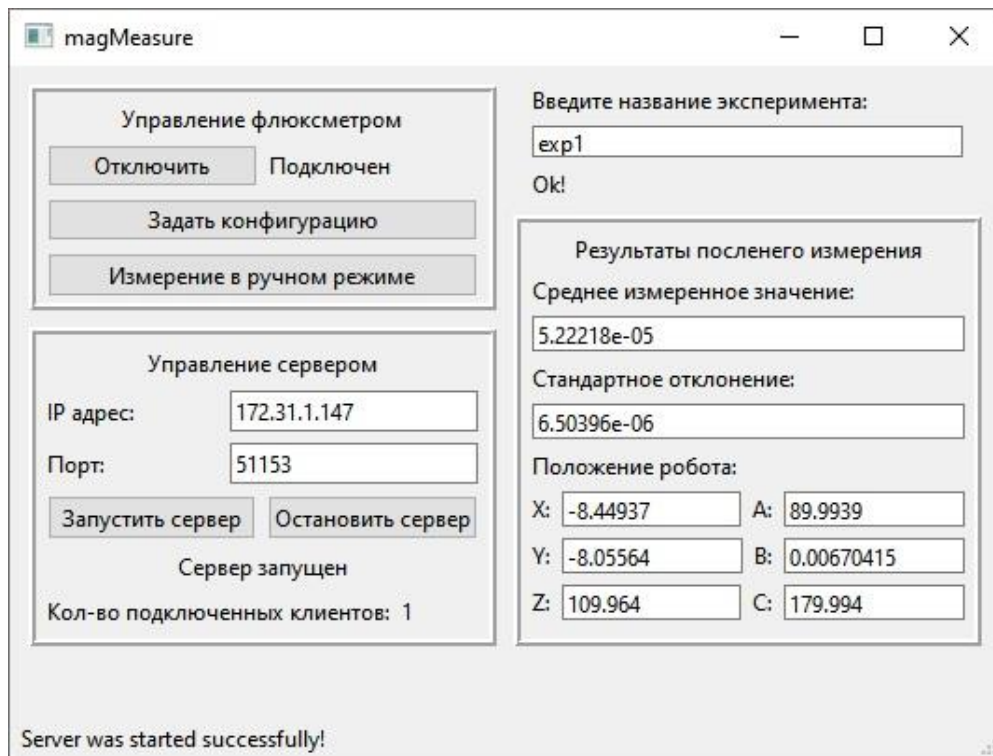


Рисунок 21 - Индикация последнего проведенного измерения

Также интерфейс пользователя позволяет задавать имя для нового эксперимента и выполнять проверку на существование эксперимента с введенным названием (рисунок 22).

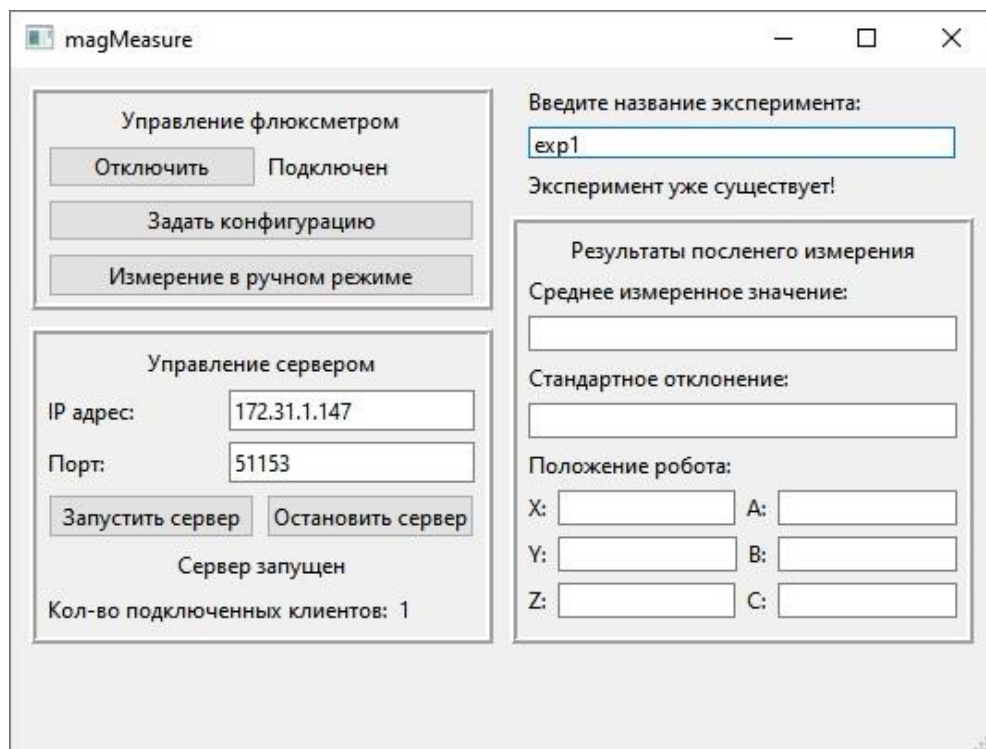


Рисунок 22 – Вывод сообщения о существовании эксперимента

### 2.3.2 Визуализация магнитного поля

Проводить предварительный анализ результатов эксперимента удобно с использованием визуального отображения векторов магнитного поля. Рисование векторного поля можно разделить на 3 этапа:

- рисование координатной сетки;
- рисование линии вектора;
- рисование стрелки в направлении вектора.

Координатная сетка представляет собой три квадрата являющиеся плоскостями  $XOY$ ,  $XOZ$ ,  $YOZ$ . Каждая плоскость разбивается на сетку, количество узлов, которой задается пользователем. С помощью процедуры альфа-смешивания линии сетки делаются полупрозрачными, в то время как главные оси системы координат рисуются непрозрачными черными линиями (рисунок 23).

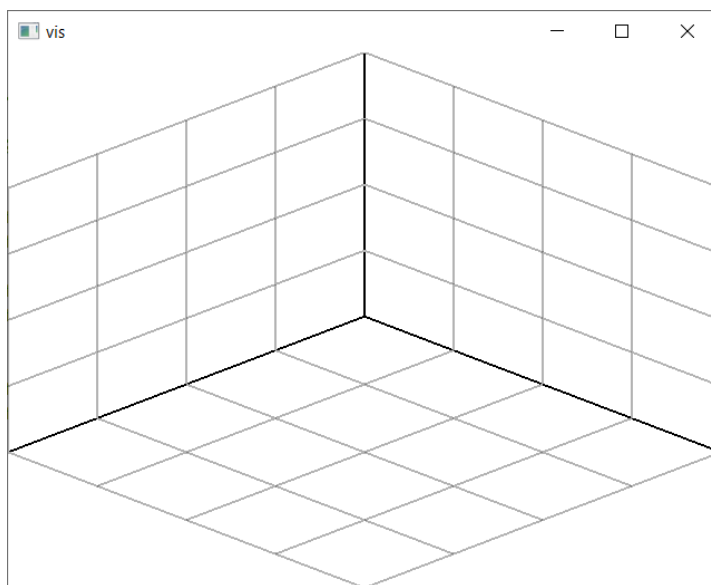


Рисунок 23 – Координатная сетка

Для обеспечения возможности поворачивать сетку, на сигналы «Drag and Drop» от левой клавиши мыши были созданы обработчики событий, инкрементирующие или декрементирующие углы поворота системы координат вокруг осей  $Y$  и  $Z$ . Однако для того, чтобы вся область системы координат входила в размеры окна, необходимо пересчитывать область видимости камеры в соответствии с изменяющимися размерами и

положением системы координат. Для того чтобы при вращении системы координат, область видимости перестраивалась соответствующим образом, необходимо вычислять ее границы по следующим формулам (38):

$$\begin{aligned} x_{\min} &= \min \{ X \}, \\ y_{\min} &= \min \{ Y \}, \\ x_{\max} &= \max \{ X \}, \\ y_{\max} &= \max \{ Y \}, \end{aligned} \quad (38)$$

где  $x_{\min}, y_{\min}, x_{\max}, y_{\max}$  – расчетные границы сцены,

$X$  и  $Y$  – множества, задающиеся следующим образом (39):

$$\begin{aligned} X &= \{ OX_1, OY_1, OZ_1, (OX + OY)_1, (OX + OZ)_1, (OY + OZ)_1 \}, \\ Y &= \{ OX_3, OY_3, OZ_3, (OX + OY)_3, (OX + OZ)_3, (OY + OZ)_3 \}, \end{aligned} \quad (39)$$

где нижний индекс  $i$  означает  $i$ -й элемент вектора.

Вектора  $OX, OY$  и  $OZ$ , а также их суммы представлены на рисунке 24.

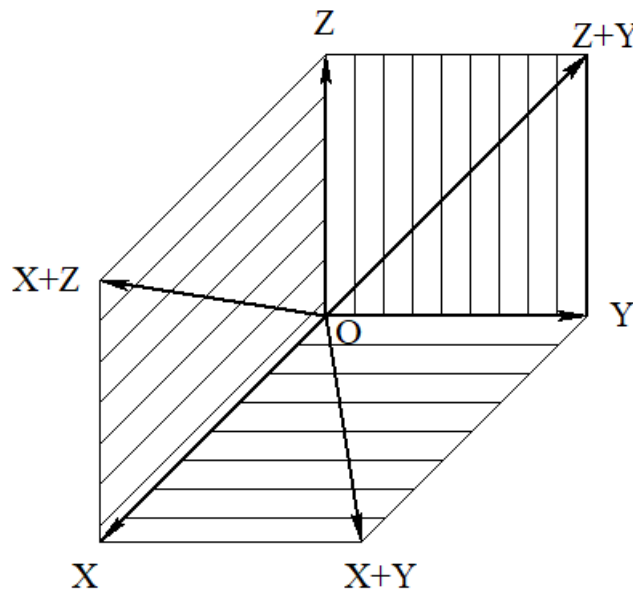
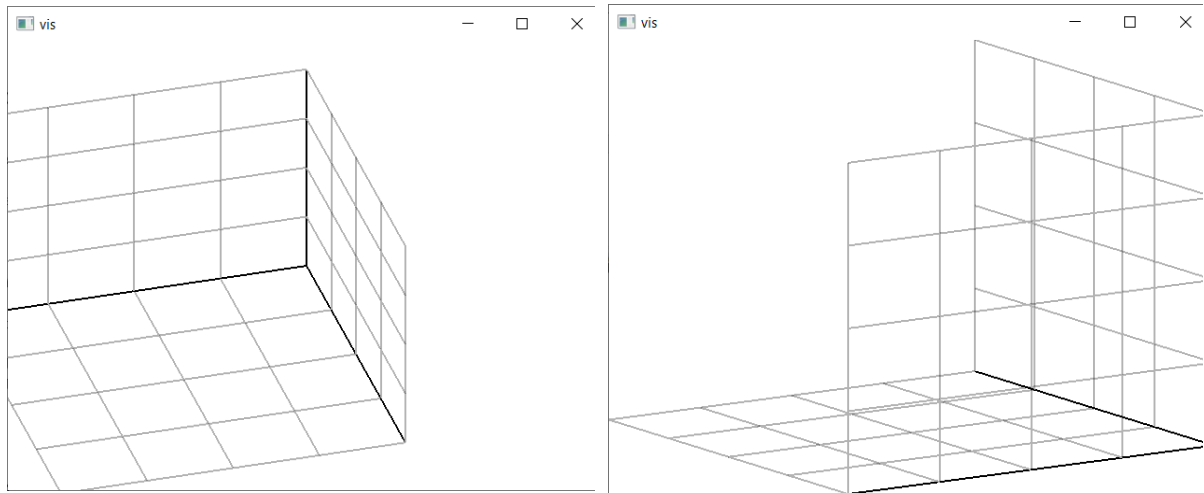


Рисунок 24 – Направления векторов, участвующих в расчете размеров сцены

Результат операции изменения сцены приведен на рисунке 25.



а)

б)

а) без пересчета размера сцены; б) с пересчетом размера сцены

Рисунок 25 – Результат изменения положения системы координат

Исходными данными при построении векторов являются точка их начала и координаты направления вектора. Для того чтобы отрисовать векторное поле необходимо его нормализовать, чтобы оно поместилось в область построения. Для проведения нормализации используется следующая формула (40):

$$\tilde{q}_n^i = \frac{(q^i - q^{\min})}{q^{\max} - q^{\min}} \cdot f = (q^i - b) \cdot a \cdot f, \quad (40)$$

где  $b$  – коэффициент смещения;

$a$  – нормализующий множитель;

$f$  – масштабирующий множитель.

Масштабирующий множитель  $f$  зависит от размеров отрисовываемой системы координат и задается как константа при создании сетки, величины  $a$  и  $b$  необходимо вычислить, как минимальное значение множества  $q$ , задающегося следующим образом (41):

$$q_n = \left\{ Pos_n^j, (Pos + Dir)_n^j \right\}, j = 1..k, \quad (41)$$

где  $n$  – порядковый номер компоненты вектора;

$k$  – количество векторов, которые необходимо отрисовать.

Таким образом для каждой из координат начала и конца вектора ищется минимальное и максимальное значения, которые далее используются при расчете смещения и нормализующего множителя.

Нормализованные вектора могут быть отрисованы на координатной сетке (рисунок 26).

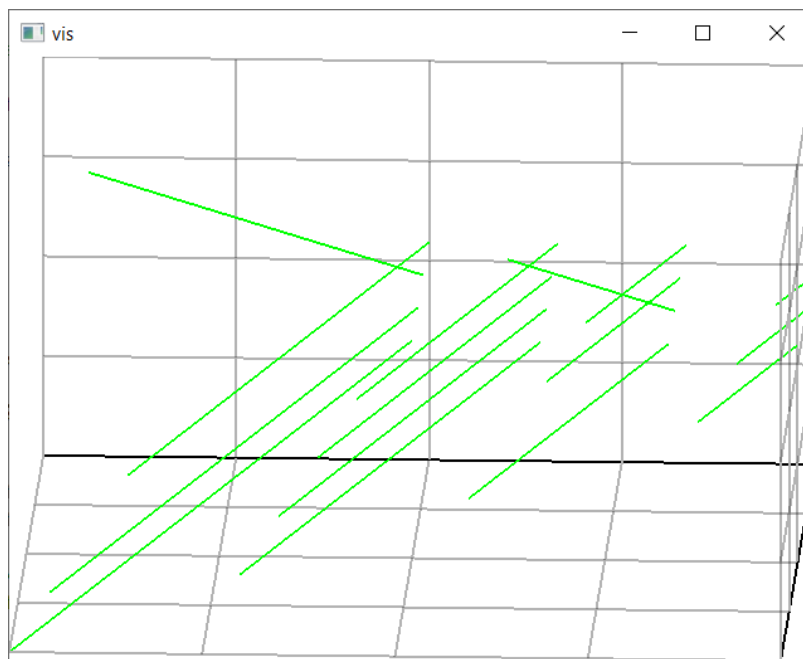


Рисунок 26 – Отрисовка нормализованных линий векторов

Далее необходимо отрисовать стрелки, чтобы обозначить направление вектора. Для отрисовки стрелок необходимо рассчитать координаты точек А и В (рисунок 27).

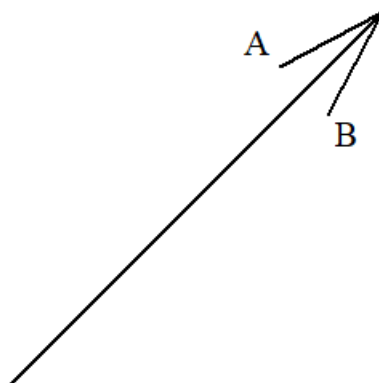


Рисунок 27 – Форма рисуемой стрелки

Так как точки А и В отражены относительно прямой, направляющей для которой служит исходных вектор, необходимо найти нормаль к нему,

на которой будут лежать точки А и В. Определим нормаль следующим образом (42):

$$n = \left\{ x_{\tilde{l}}, y_{\tilde{l}}, -\frac{x_{\tilde{l}}^2 + y_{\tilde{l}}^2}{z_{\tilde{l}}} \right\}, \quad (41)$$

где  $x_{\tilde{l}}, y_{\tilde{l}}, z_{\tilde{l}}$  – координаты нормированного исходного вектора  $l$ , для которого строится стрелка (42):

$$\tilde{l} = \frac{l}{\|l\|} \quad (42)$$

Таким образом координаты точек А и В определяются следующим образом (43):

$$\begin{aligned} A &= 0.8 \cdot l + 0.05 \cdot \frac{\|l\|}{\|n\|} \cdot n, \\ B &= 0.8 \cdot l - 0.05 \cdot \frac{\|l\|}{\|n\|} \cdot n \end{aligned} \quad (43)$$

Результат построения стрелки представлен на рисунке 28.

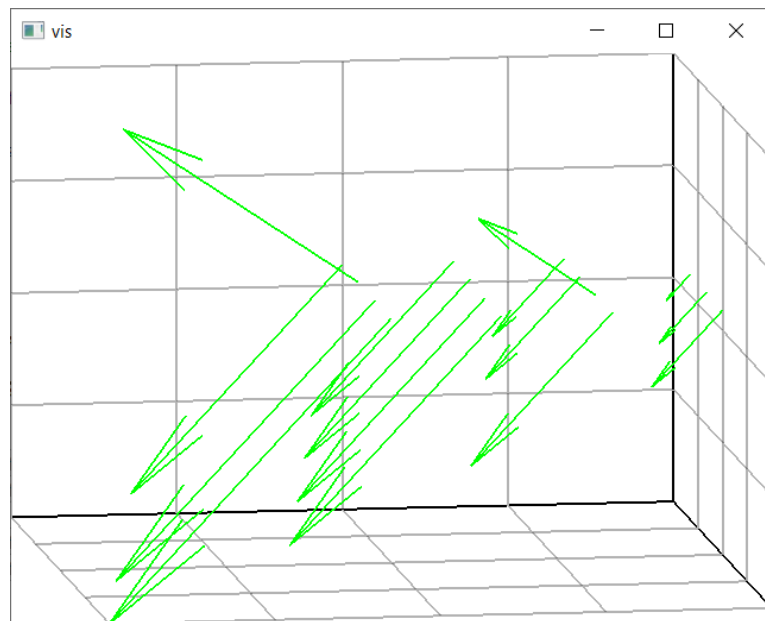


Рисунок 28 – Отрисовка стрелок

Для подпрограммы отрисовки графика векторного поля было составлено дерево вызова процедур, представленное на рисунке 29.



Рисунок 29 – Дерево вызова процедур программы визуализации

### 2.3.3 Генерация измерительных точек

Задание измерительных точек возможно производить вручную. Однако, при таком способе задания с ростом количества точек повышается временные затраты и вероятность ошибок ввода, что влечет за собой повышение времени исследования. Так же ручное задание точек не может гарантировать их достижимость роботом, ввиду конечных геометрических размеров измерительного щупа. Целесообразным является разработка и имплементация алгоритма автоматизированной генерации измерительных точек, который будет способен гарантировать отсутствие столкновения измерительного щупа с измеряемым объектом.

В качестве исходных данных для алгоритма выступают:

- 3D модель объекта измерения **A** (сюда же включаются крепежные приспособления, при необходимости);

- 3D модель геометрических размеров щупа в зоне крепления чувствительного элемента **B**;

- 3D модель желаемой области, где планируется провести измерения **C**;

- описание локальных систем координат каждой 3D модели;

- шаги дискретизации  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ .

Допущения, которые были сделаны при разработке алгоритма:

- объект измерений представляет собой выпуклое твердое тело;

- измерения проводятся в ортогональных проекциях.

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 25. Алгоритм состоит из нескольких этапов:

1) Вычисление запретной области вокруг объекта измерения, где обязательно будут происходить коллизии **D**. Выполняется с помощью аппарата сумм Минковского (44):

$$\mathbf{D} = \mathbf{A} \oplus \mathbf{B} \quad (44)$$

Ввиду предположения об ортогональности проводимых измерений, с целью минимизации потребления вычислительных ресурсов, модель щупа принимается в форме куба.

2) Вычисление подобласти  $\tilde{\mathbf{C}} \subseteq \mathbf{C}$  свободной от коллизий. Находится путем Булева вычитания из модели желаемой области измерений результата суммы Минковского (45):

$$\tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{C} \setminus \mathbf{D} \quad (45)$$

3) Разбиение области  $\tilde{\mathbf{C}}$  на точки с заданным шагом  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ . Данный этап предполагает построение минимально описанного параллелепипеда  $P(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}, x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$  вокруг области  $\tilde{\mathbf{C}}$ . Далее



этот параллелепипед разбивается на равномерную сетку, после чего полученные точки проверяются на принадлежность к исходной области  $\tilde{C}$ .

Блок-схема алгоритма генерации точек представлена на рисунке 30.

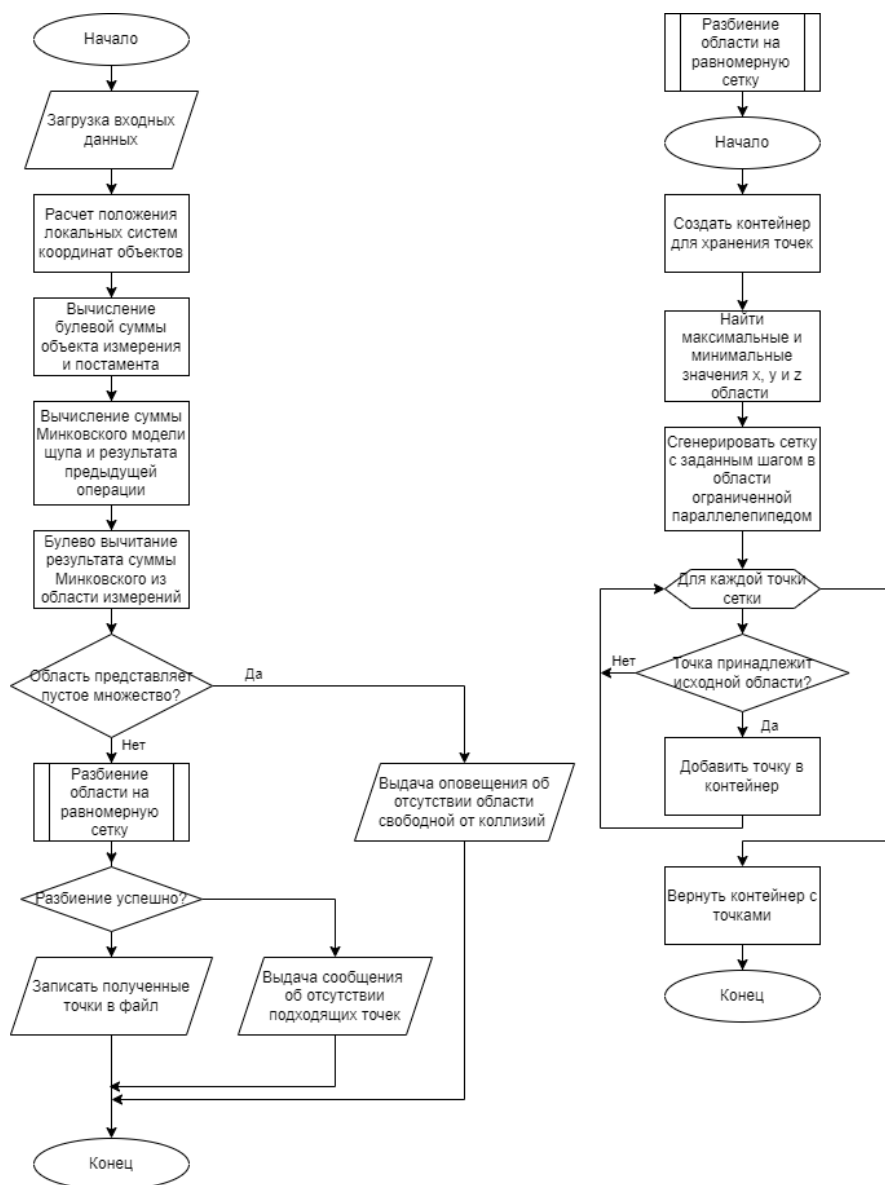
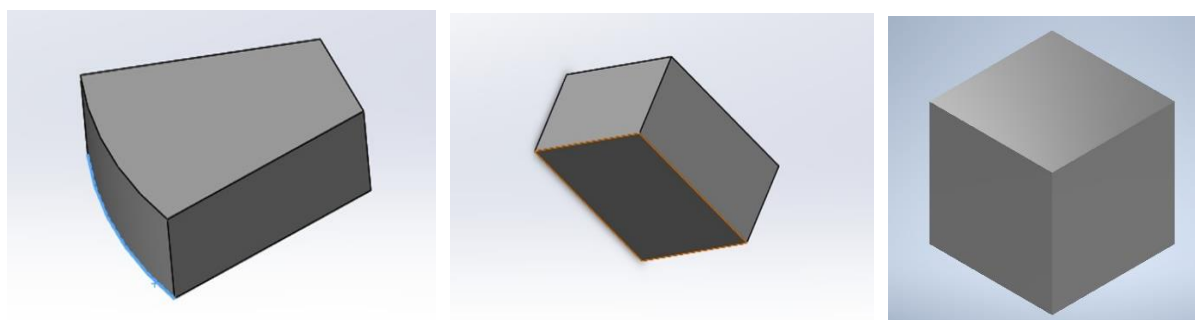


Рисунок 30 – Блок-схема алгоритма генерации точек измерения

Приведенный выше алгоритм был реализован на языке C++ с применением библиотеки вычислительной геометрии CGAL [21]. Полигональные модели входных данных: объекта измерения, желаемой области исследования и модели щупа представлены на рисунке 31. Результат работы этапов программы представлен на рисунке 32.



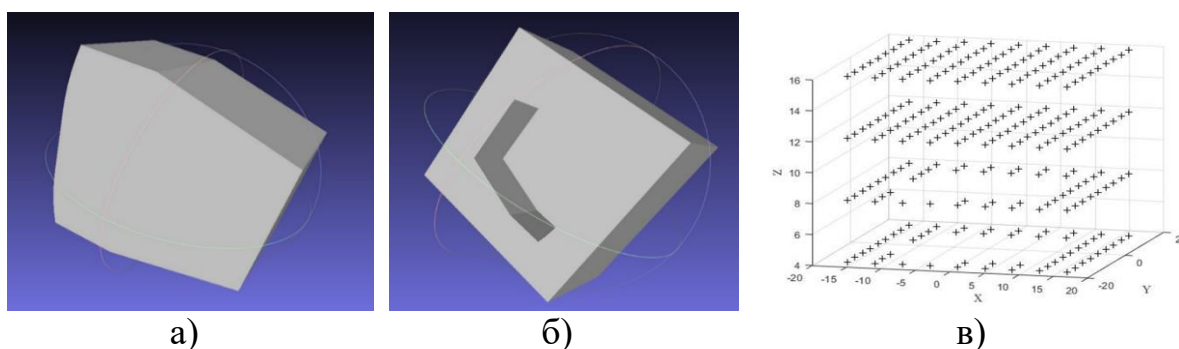
а)

б)

в)

а) объект измерения – область **A** (постоянный магнит); б) область исследования – область **C** (параллелепипед); в) модель щупа – область **B** (куб 8x8x8)

Рисунок 31 – Модели исходных данных



а)

б)

в)

а) вычисление суммы Минковского **D**; б) Булево вычитание  $\bar{A}$ ;  
в) разбиения области  $\bar{A}$  на точки

Рисунок 32 – Результаты работы алгоритма

Полученный набор точек необходимо последовательно обойти с помощью манипулятора для измерения вектора магнитной индукции. Ввиду предположения о выпуклости объекта измерений можно выполнить обход точек по схеме, представленной на рисунке 33. Данную последовательность обхода легко описать алгоритмически и выполнить автоматическую генерацию программного кода для работа манипулятора.

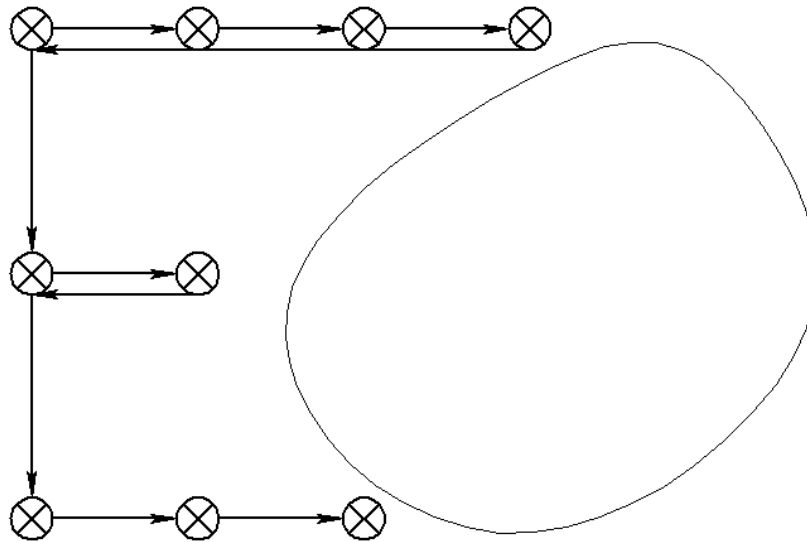


Рисунок 33 – Схема последовательного обхода измерительных точек

Допущения, принятые выше, не ограничивают жестко область применения данного алгоритма. В общем случае возможно три сценария его применения:

1) Объект измерения выпуклый. Алгоритм в данном случае применяется так как есть и полностью покрывает задачу генерации измерительных точек и пути их обхода роботом.

2) Объект измерения не является выпуклым, но область исследования лежит за пределами его выпуклой оболочки. В этом случае алгоритм необходимо дополнить процедурой вычисления выпуклой оболочки исходного объекта измерения. Дополненный алгоритм также полностью покрывает задачу.

3) Объект не является выпуклым и область исследования не лежит за пределами выпуклой оболочки. В данном случае алгоритм может использоваться для генерации точек измерения, но сгенерирована может быть лишь часть пути обода этих точек. В данном случае вычислительные затраты на генерацию пути сокращаются, так как обобщенные планировщики пути потребляют существенные вычислительные мощности. Для поиска пути обхода оставшихся точек необходимо воспользоваться планировщиками пути, например, Probabilistic Roadmap [22].

### 2.3.4 Экспериментальное исследование магнитного поля

Предложенное программное обеспечение использовалось для измерения магнитного поля, испускаемого постоянными магнитами и катушки. На рисунке 34 представлены результаты измерения магнитного поля постоянного магнита прямоугольной формы. На рисунке 35 представлены результаты исследования магнита, имеющего вид призмы с основанием в форме усеченного сектора окружности (рисунок 26а). На рисунках 36 и 37 представлены результаты исследования магнитного поля катушки электромагнита. Данные, используемые для построения графиков представлены в таблицах В.1-В.5 приложения В.

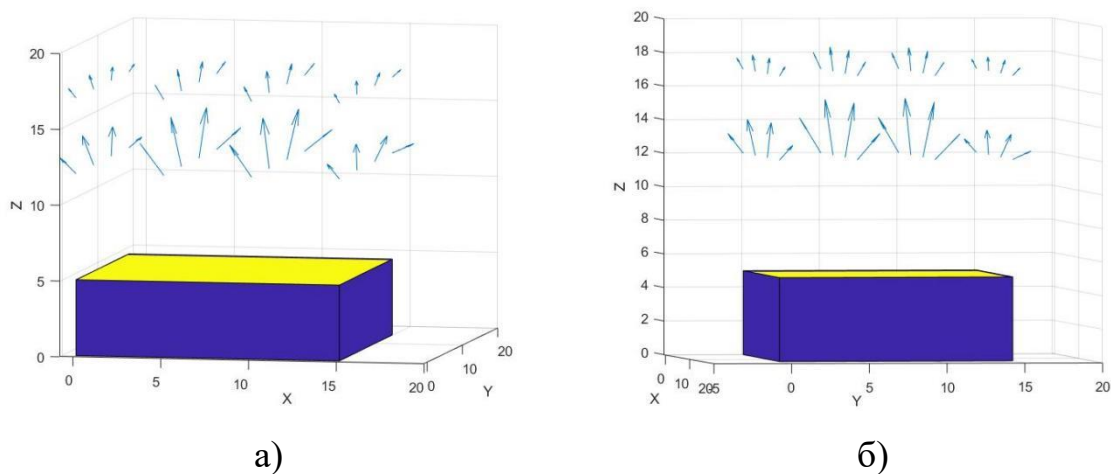
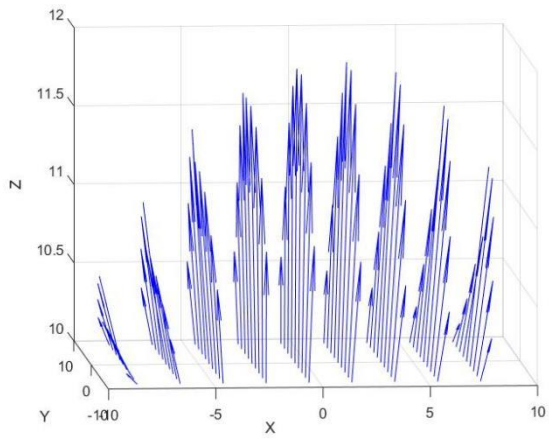
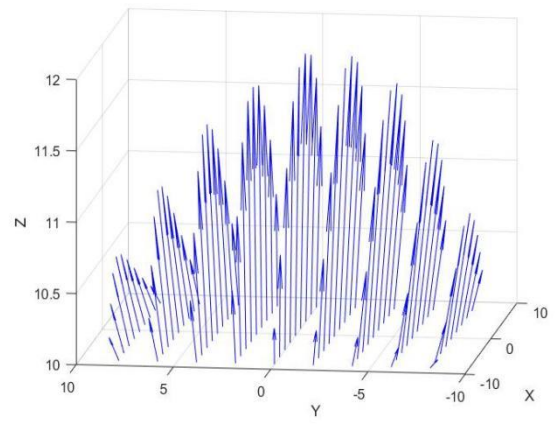


Рисунок 34 – Магнитное поле прямоугольного магнита (масштаб 1:20, единица измерения – миллитесла):



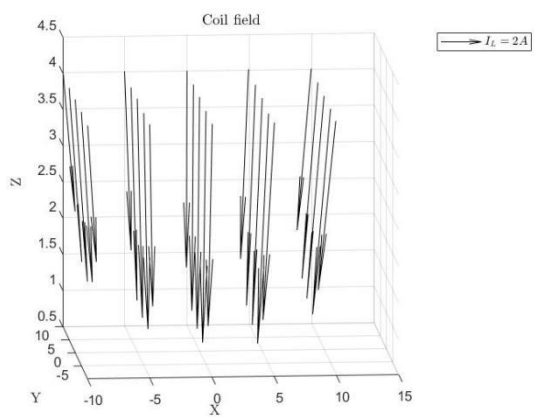
а)



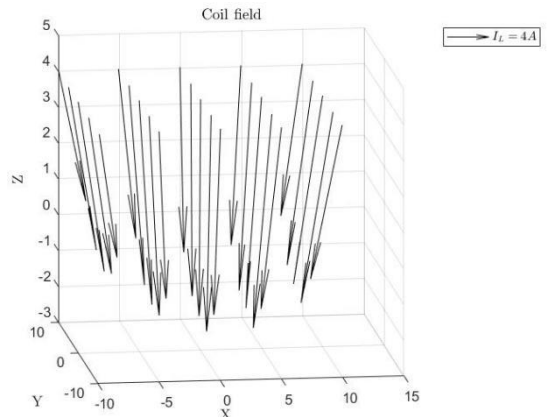
б)

а) вид спереди; б) вид сбоку

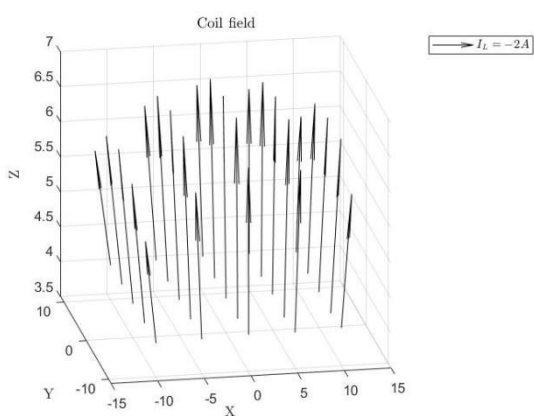
Рисунок 35 – Магнитное поле сегментного магнита (масштаб 1:100, единица измерения – миллитесла)



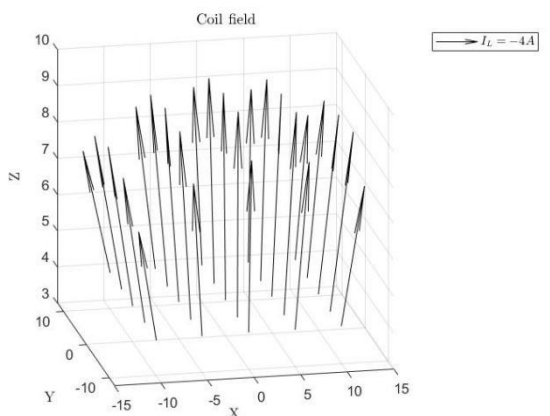
а)



б)



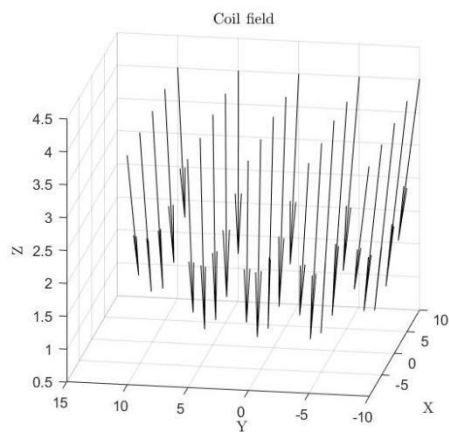
в)



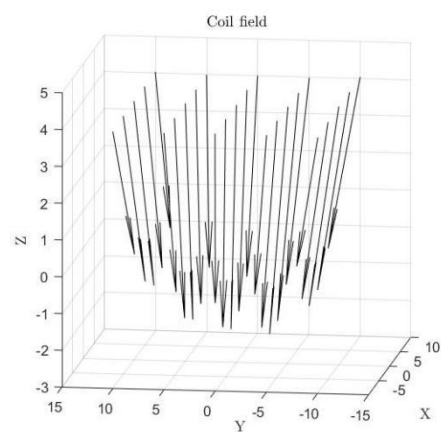
г)

а)  $I_L = 2 \text{ A}$ , б)  $I_L = 4 \text{ A}$ , в)  $I_L = -2 \text{ A}$ , г)  $I_L = -4 \text{ A}$

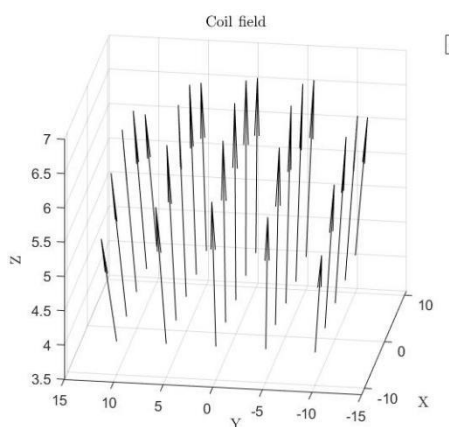
Рисунок 36 – Магнитное поле катушки электромагнита при различной силе тока тока (вид спереди, единица измерения – миллитесла)



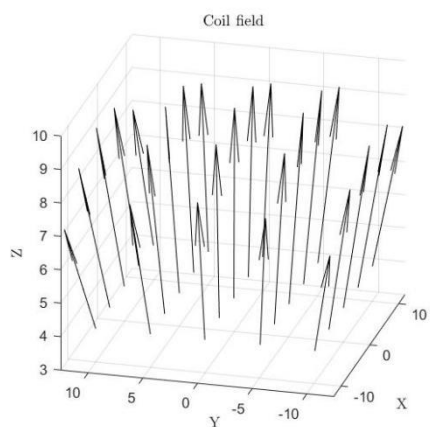
а)



б)



в)



г)

а)  $I_L = 2 \text{ A}$ , б)  $I_L = 4 \text{ A}$ , в)  $I_L = -2 \text{ A}$ , г)  $I_L = -4 \text{ A}$

Рисунок 37 – Магнитное поле катушки электромагнита при различной силе тока (вид сбоку, единица измерения – миллитесла)

### **3 Концепция стартап-проекта**

#### **3.1 Описание продукта как результата НИР**

##### **3.1.1 Введение в предметную область**

На этапах проектирования, производства и эксплуатации электромагнитных машин (двигателей, генераторов, клапанов) производится измерение магнитного состояния этих машин. Результаты измерения используются для выявления дефектов в машинах, оценки соответствия параметров машины расчетным.

Также при испытаниях электрических машин в серийном производстве используют их цифровые двойники для сокращения времени на такие испытания, как испытания на нагрев машины в различных режимах работы, испытания наработки на отказ. Качество построения цифровых двойников напрямую зависит от точности информации о магнитном состоянии компонентов электромагнитных машин, которые также получают посредством измерения.

На текущий момент известны ручной и автоматизированный метод измерения магнитных полей. Ручной метод заключается в позиционировании одного/нескольких измерительных элементов в зазор либо на корпус электрической машины. Автоматизированный метод заключается в применении систем позиционирования портального типа, которые помещают чувствительные элементы в нужные точки пространства вокруг машины.

Недостатки ручного позиционирования – низкая точность и скорость измерений. Недостатком систем портального типа является ограниченность области измерения. Недостатком обеих систем является отсутствие адаптированности к использованию данных для заключения о наличии/отсутствии дефектов, к локализации дефектов, к использованию «сырых» данных для моделирования электромеханических систем, оценки



соответствия заявленным при проектировании параметрам, полученным при производстве.

### **3.1.2 Описание проблемы, которую решает продукт**

Предлагаемый продукт призван решить следующие проблемы:

- расширить доступную для измерения магнитных полей область вокруг исследуемого объекта с сохранением точности, предлагаемой автоматизированными системами, путем применения робота-манипулятора с большим количеством степеней свободы;

- снизить затраты времени на обработку данных измерений и их передачу в математические пакеты, осуществляющие принятие решение о наличии дефектов и их локализации, а также программные пакеты для моделирования электромеханических систем и создания их цифровых двойников, путем применения программного обеспечения, входящего в состав программно-аппаратного комплекса.

### **3.1.3 Выполнение какой НИОКР привело к разработке**

Выполнения НИОКР по созданию программно-аппаратного комплекса автоматизации эксперимента по исследованию постоянных магнитных полей. Целью НИОКР является разработка программно-аппаратного обеспечения для проведения измерения магнитного поля твердых тел с возможностью гибкого задания областей измерения. В рамках выполнения НИОКР реализуются программные средства синхронизации измерительного процесса и процесса позиционирования, производится анализ погрешностей, вносимых элементами системы в измерительный процесс, разработка средств автоматизированного расчета траектории движения промышленного робота при обходе точек измерения.

### **3.1.4 Описание продукта: функциональное назначение, основные потребительские качества**

Программно-аппаратный комплекс предоставляет пользователю следующие услуги:

- возможность установки широкого ассортимента зарекомендовавшего себя измерительного оборудования;
- автоматизированное программирование промышленного манипулятора для позиционирования измерительного оборудования;
- среда визуализации результатов измерения;
- экспорт результатов измерения в формате, поддерживаемом программными пакетами инженерных расчетов;
- программную среду для настройки входных данных для моделирования, основанных на результатах эксперимента.

### **3.2 Интеллектуальная собственность**

В рамках защиты интеллектуальной собственности планируется оформление патента на способ повышения точности имитационного моделирования магнитного состояния электромеханических устройств, а также регистрация программного обеспечения для ЭВМ.

### **3.3 Объем и емкость рынка**

За общий объем рынка примем весь мировой рынок промышленной робототехники. Согласно информации журнала «ПЛАС» [23], со ссылкой на исследование The Boston Consulting Group к 2030 году мировой рынок промышленной робототехники будет составлять 40–50 млрд долларов США.

За доступный объем целевого рынка примем мировые компании по производству электротехнической продукции. Мировые компании-производители объединены в IMELCO (International Marketing Electrical Group) международную ассоциацию осуществляющую надзор в сфере

оборота электромеханических изделий. Согласно официальному сайту ассоциации [24] в ее состав входят 1068 организаций (исключая РФ). На территории Российской Федерации было найдено 53 завода [25], производящих электродвигатели и электрогенераторы постоянного и переменного тока, электромеханические устройства других типов (электромагнитные, электрические тормоза). В результате анализа активностей компаний на персональных сайтах и по отчетности компаний на сайте e-disclosure выявлено, что действующих из них 40 заводов. Список предприятий представлен в таблице 19.

Таблица 19 – Действующие заводы электромеханических изделий в РФ

№	Название	№	Название
1	ОАО Электромашина	21	ОАО Сибэлектромотор
2	ООО Воронежский электроремонтный завод	22	НП ЗАО Электромаш
3	ЗАО Росэнергомаш	23	ОАО Серпуховский электромеханический завод
4	Электротяжмаш	24	ООО свободинский электромеханический завод
5	ОАО Силовые машины	25	ОАО Сарапульский электрогенераторный завод
6	ОАО Могилевский завод Электродвигатель	26	ОАО Ржевский краностроительный завод
7	ОАО Карпинский электромашиностроительный завод	27	ОАО Псковский электромашиностроительный завод
8	ОАО ГМС Бытовые насосы	28	ОДО Первомайцкий электромеханический завод имени К. Маркса

Продолжение таблицы 19 – Действующие заводы электромеханических изделий в РФ

№	Название	№	Название
9	ЗАО РУСЭЛПРОМ-электромаш	29	ОАО НПО Татэлектромаш
10	ОАО Ленинградский электромашиностроительный завод	30	ЗАО Мосэлектромаш
11	ОАО НИПТИЭМ	31	ОАО Московский электромеханический завод имени Ильича
12	ООО Русэлпром-СЭЗ	32	ОАО Машиноапарат
13	НПО Сфера	33	ОАО Электрокомплекс
14	ООО Ярославский завод Красный маяк	34	ОАО Уралэлектро
15	СООО Завод НОДВИГ	35	ООО Электротяжмаш-Привод
16	ООО Новочеркасский электровозостроительный завод	36	ЗАО НПО Энергия
17	ОАО Полесьеэлектромаш	37	ОАО Владимирский электромоторный завод
18	ОАО Электромашинный завод "ЛЕПСЕ"	38	ОАО Бранчинский электромеханический завод
19	ОАО Ярославский Электромашинны завод "ELDIN"	39	ОАО Армавирский электромеханический завод
20	ПАО Электромашина	40	ЗАО Краснамотор

В ходе поиска конкурентов был выявлен прямой конкурент предлагаемой продукции. Бельгийская компания MAGSAM. Однако ввиду того, что компания специализируется на постоянных магнитах, а большинство рассматриваемых компании производят комплексные изделия

на данной нише конкуренция с MAGSAM маловероятна. Так как помимо MAGSAM не было обнаружено конкурентов, предлагающих готовую продукцию, предполагается что на текущий момент заводами используются ручные измерительные приборы, а если есть автоматизированные линии, то они выполнены «под ключ» инжиниринговыми компаниями, занимающимися роботизацией и не специализирующимися на электромеханике. Ручными средствами измерения пользуются ввиду их дешевизны при малых объемах производства. Предполагая, что крупнейшие предприятия используют автоматизированные средства и заинтересованы в новом функционале, либо амортизации. Оценим, что к числу крупнейших, по принципу Парето, принадлежит 20 % компаний, примем потенциальных рынок равный  $0,2 * 1108 = 221$  предприятие. При планируемой средней цене продажи 30 млн, объем рынка составит 6,63 млрд рублей.

На основании экспертной оценки сотрудниками стартапа, время ввода в эксплуатацию робототехнической системы составляет порядка 6–8 месяцев с момента заключения договора до момента его закрытия. При этом продукт проходит несколько стадий, таких как проектирование ячейки, закупка оборудования, сборка системы, доработка программного обеспечения, пусконаладочные работы. На разных этапах проекта задачи выполняются разными специалистами, при этом работы не могут выполняться параллельно. Таким образом принято в подсчетах, что каждый специалист задействован в проекте не более половины времени его выполнения и за год компания может вводить в эксплуатацию до 4 комплексов. Соответственно объем обслуживаемого рынка в год составляет 4 завода, или 120 млн рублей. Со временем объем внедрения может быть повышен ввиду накопления опыта внедрения и некоторого объема готовых технологий, а также расширения штата специалистов.

### **3.4 Анализ современного состояния и перспектив развития отрасли**

Согласно информации с официального сайта концерна «Русэлпром» [26], ведущего производителя электродвигателей и генераторов в России, ВВП РФ обладает высоким показателем энергоемкости, т.к. электрические машины, являющиеся основными исполнительными механизмами на предприятиях, обладают низкими показателями энергоэффективности. По подсчетам концерна, потребление электроэнергии такими предприятиями можно снизить на треть, путем повышения КПД электродвигателей. Соответственно компания ставит разработку энергоэффективного электропривода на первое место в списке направлений развития машиностроения.

Согласно Росстат [27] внутренние затраты на исследования энергоэффективности, энергосбережения и ядерной энергетики, как приоритетного направления науки и техники страны, составили 125 млрд рублей в 2020 году (см. внутренние затраты на исследования по приоритетным направлениям науки и технологий).

Таким образом, можно судить о стремлении как частных компаний, так и государства к разработке энергоэффективных технологий, в том числе и повышении эффективности электрических машин. Повышение энергоэффективности требует проведения НИОКР, направленных на совершенствование конструкций электродвигателей и генераторов, уточнения технологических параметров производства и предполагают, как активное применение моделирования, так и экспериментальное исследование, необходимое для подтверждения и корректировки расчетов.

### **3.5 Планируемая стоимость продукта**

Материальные затраты на 1 комплекс представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Материальные затраты, руб.

Наименование	Количество	Стоимость одного изделия	Итоговая стоимость
Робот-манипулятор	1	1000000	1000000
Измерительный прибор	1	1000000	1000000
Персональный компьютер	1	100000	100000
Поворотный стол (опционально)	1	2500000	2500000
Шкаф автоматизации	1	600000	600000
Световые барьеры	4	75000	300000
Металлоконструкции и крепежные изделия	1	300000	300000
Итого			14800000

Расчет затрат на заработную плату представлен в таблице 21.

Таблица 21 – Затраты на заработную плату, руб.

Сотрудник	Оклад в месяц	ФОТ в месяц	НДФЛ	Заработная плата	ФОТ в год	ФОТ за один комплекс
Руководитель	80000	80000	69600	10400	960000	240000
Инженер-робототехник	60000	60000	7800	52200	720000	180000
Программист	70000	70000	9100	60900	840000	210000
Инженер-электромеханик	60000	60000	7800	52200	720000	180000
Инженер по автоматизации	50000	50000	6500	43500	600000	150000
Итого					3840000	960000

Расчет социальных выплат приведен в таблице 22

Таблица 22 – Затраты на социальные выплаты, руб.

Сотрудник	ФОТ в месяц	ПФР	ФСС	ФФОМС	В месяц	В год	За один комплекс
Руководитель	80000	17600	2320	4080	24000	288000	72000
Инженер- робототехник	60000	13200	1740	3060	18000	216000	54000
Программист	70000	15400	2030	3570	21000	252000	63000
Инженер- электромеханик	60000	13200	1740	3060	18000	216000	54000
Инженер по автоматизации	50000	11000	1450	2550	15000	180000	45000
Итого						1152000	288000

Расчет затрат на амортизацию приведен в таблице 23.

Таблица 23 – Затраты на амортизацию, руб.

Оборудование	Стоимость	Количество	Срок службы, лет	Амортизация в год	Амортизация на 1 комплекс
Персональный компьютер	100000	5	4	125000	31250
Ноутбук	100000	1	4	25000	6250
Итого				150000	37500

В накладных расходах следует учесть затраты на аренду помещения, оплату коммунальных услуг. Затраты на финансовую деятельность компании: содержание банковского счета, затраты на ведение бухгалтерии, траты на канцелярские принадлежности, транспортные расходы, оплата счетов за средства коммуникации, оплата доменного имени и почтового сервера, непредвиденные расходы. Примем накладные расходы в размере 10% от общих затрат. Таким образом расчет себестоимости изделия приведен в таблице 24.



Таблица 24 – Себестоимость, руб.

Материальные затраты на один комплекс	14800000
Заработная плата	960000
Социальные выплаты	288000
Амортизация	37500
Накладные расходы	1611300
Себестоимость	17 696 800

Предприятие планирует получать прибыль в размере 20% от себестоимости, и уплачивать НДС в размере 20%. Расчет стоимости продажи комплекса представлен в таблице 25.

Таблица 25 – Стоимость продажи, руб.

Себестоимость	17696800
Планируемая прибыль	3539360
НДС	4247232
Итоговая цена комплекса	25483392

### 3.6 Конкурентные преимущества

При производстве электромеханических систем производятся приемо-сдаточные мероприятия. При проектировании двигателей и выпуске тестовых образцов необходимо исследовать их характеристики. Измерительный процесс – это кропотливый труд, занимающий много времени. При этом процесс не допускает ошибок – некорректные измерения чреваты браком. Если современное состояние рынка измерительной техники позволяет минимизировать ошибки измерения магнитного поля, то ошибки позиционирования и ошибки экспорта данных в приложения для анализа магнитного состояния систем производятся вручную и не застрахованы от человеческого фактора.

Ключевыми потребительскими качествами, которые предлагает продукт является автоматическое позиционирование измерительного щупа с высокой точность ( $\pm 0,09$  мм) и высокая повторяемость измерений

( $\pm 0,03$  мм). Возможность проведения визуального анализа магнитного поля с помощью встроенных средств визуализации результатов измерения. Удобный интерфейс экспорта измеренных данных в системы математических расчетов магнитного состояния измеряемых объектов. Высокая достижимость области измерения вокруг объекта.

На текущий момент на предприятиях применяются как автоматизированные, так и ручные измерительные приборы для контроля качества продукции. На рынке был найден ряд приборов ручного измерения магнитного поля (Тесламетр), предлагающие в том числе удаленный запуск и управление процессом измерения. Было найдено одно решение для автоматизированного измерения магнитных полей – компания MAGSAM. Также был найден ряд аналогичных систем контроля и измерений (таблица 26), выполняющих схожие задачи: системы ультразвукового, лазерного контроля качества. Несмотря на различия в способе контроля, компании имеют опыт во внедрении аналогичных систем в реальные производства, предусматривающий, во многом, решение принципиально схожих задач.

Таблица 26 – Конкуренты и аналоги

Конкуренты (кто)	Их предложения	Ваши предложения
ООО ЗЭТ	Ручные измерительные приборы, позволяющие в том числе запускать измерения удаленно	Роботизированный комплекс для измерения магнитных полей. С полностью автоматическим запуском измерительного процесса и сохранением/экспортом результатов
I-DEAL Technologies	Роботизированные и автоматизированные системы ультразвукового контроля качества	Специализированное ПО для контроля магнитного состояния электротехнических изделий

Продолжение таблицы 26 – Конкуренты и аналоги

Конкуренты (кто)	Их предложения	Ваши предложения
CUBE-R	Роботизированный лазерный контроль геометрии	Специализированное ПО для контроля магнитного состояния электротехнических изделий
MAGCAM	Автоматизированные системы измерения магнитного поля портального типа и ПО для анализа магнитного поля постоянных магнитов	Роботизированный комплекс на базе промышленного манипулятора имеющий расширенную область измерения, ПО позволяющее анализировать не только постоянные магниты, но и комплексные магнитные системы, например двигатели в собранном состоянии

Сравнительная оценка аналогов и конкурентов представлена в таблице 27.

Таблица 27 – Конкурентоспособность продукции и услуг

Сравниваемые показатели	Сравнительная оценка с продукцией фирм-конкурентов (наша продукция: «+» - лучше; «0» - такая же; «-» - хуже)			
	1 продукт: ООО ЗЭТ	2 продукт: I-DEAL	3 продукт: CUBE-R	4 продукт: MAGCAM
1. Степень автоматизации позиционирования	-	0	0	0
2. Величина области измерения вокруг объектов	0	0	0	-
3. Интерфейс отображения результатов измерения магнитного поля	0	-	-	+

Продолжение таблицы 27 – Конкурентоспособность продукции и услуг

Сравниваемые показатели	Сравнительная оценка с продукцией фирм-конкурентов (наша продукция: «+» - лучше; «0» - такая же; «-» - хуже)			
	1 продукт: ООО ЗЭТ		1 продукт: ООО ЗЭТ	
4. Экспорт данных в программы для расчетов	-	-	-	0
5. Широкая номенклатура измеряемых изделий	+	-	-	-

Анализ конкурентов и ответ компании представлен в таблице 28.

Таблица 28 – Анализ конкурентов и ответ компании

Конкурент	Преимущества/недостатки		Важность для потребителя	Наш ответ
ООО ЗЭТ	Преимущества	Широкий ассортимент продукции	3	Возможен монтаж широкого ассортимента измерительных приборов
		Большой опыт в производстве измерительной техники	4	Гарантии на работу оборудования
	Недостатки	Ручное позиционирование	5	Роботизированное позиционирование
		Неудобный интерфейс экспорта данных	3	Предоставление возможности выбора интерфейса
I-DEAL	Преимущества	Многолетний опыт внедрения роботизированных систем контроля качества	4	Предоставление гарантии на работу оборудования
	Недостатки	Отсутствие компетенций в области электромеханики	5	В команду проекта входит кандидат наук в области электромеханики
CUBE-R	Преимущества	Многолетний опыт внедрения роботизированных систем контроля качества	4	Предоставление гарантии на работу оборудования

Продолжение таблицы 28 – Анализ конкурентов и ответ компании

Конкурент	Преимущества/недостатки		Важность для потребителя	Наш ответ
CUBE-R	Недостатки	Отсутствие компетенций в области электромеханики	5	В команду проекта входит кандидат наук в области электромеханики
MAGSAM	Преимущества	Готовый продукт с большим набором функционала для измерения поля постоянных магнитов	4	Сфокусировать назначение комплекса на анализе многокомпонентных и сложных систем
		Высокая скорость измерения	5	Применение схожих по аналогичных измерительных приборов с большим количеством датчиков
	Недостатки	Узкая специализация компании	4	Сфокусировать назначение комплекса на направления, где конкуренты проигрывают
		Измерение выпуклых объектом	2	Применение робота-манипулятора

Преимуществом главного конкурента – MAGSAM – является большой опыт и высокие компетенции в области измерения магнитных полей. Конкурировать с этой компанией в поставке оборудования для анализа магнитного состояния постоянных магнитов не представляется возможным. Однако, ввиду узости области применения продуктов компании, возможно сфокусировать внимание на других областях, например, на анализе комплексных систем, например, электромеханических устройств изделий в собранном состоянии. Также недостатком компании является использование систем позиционирования портального типа, что не накладывает ограничений при анализе плоских магнитов, однако существенно уменьшает допустимую область измерения при исследовании объектов более сложной конфигурации. Основным преимуществом других конкурентов является большой опыт в интегрировании роботизированных измерительных систем. Для повышения конкурентоспособности и

привлекательности для клиентов рациональным будет предложение дополнительной гарантии на поставляемые системы.

Составим карту позиционирования приняв за оси параметры «Стоимость» и «Степень автоматизации» (рисунок 38).

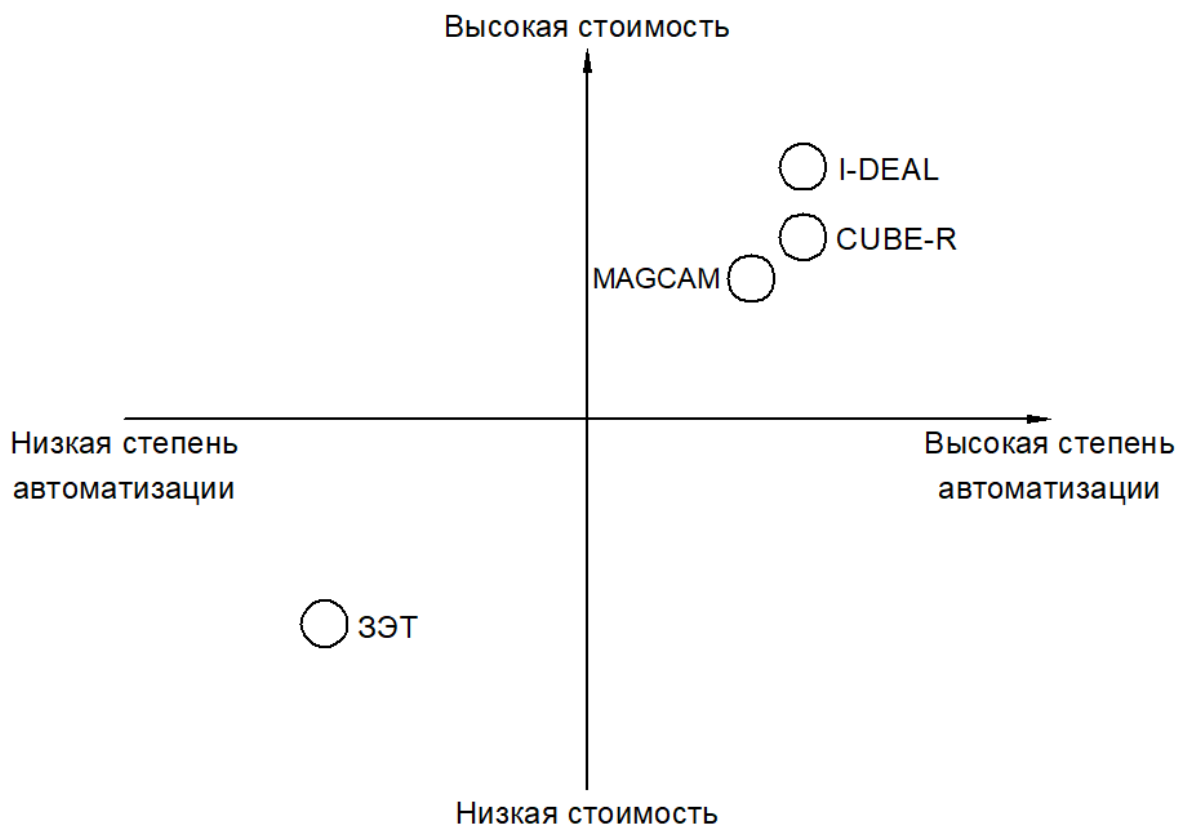


Рисунок 38 – Карта позиционирования

Как видно на рынке представлены системы бюджетные, но с ручным измерением, а также дорогостоящие, но автоматизированные системы. Это объясняется тем, что основное ценообразование в наличии промышленного робота, либо системы позиционирования, а также системы автоматического управления измерительным процессом и процессом синхронизации, систем обработки результатов измерения. Как видно на графике представлены две пустые ниши – «Низкая стоимость-высокая степень автоматизации» и «Низкая степень автоматизации – высокая цена». Очевидно второй вариант непривлекателен для потребителей, т.к. он получает те же характеристики, что можно получить за меньшие деньги. Первый вариант наиболее привлекателен для потребителя, однако ввиду того, что автоматизация

требует разработки соответствующего программного обеспечения и наличия дорогостоящей системы позиционирования, данный вариант практически не достижим.

Компания предполагает позиционироваться на нише «Высокая стоимость – высокая степень автоматизации». На нишевом рынке компания планирует конкурировать за счет своих компетенций в области электромеханики и наличием готового программного обеспечения специализированного под область эксплуатации с комплексными объектами измерения.

### **3.7 Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта**

Было выделено два потребительских сегмента: заводы производители и конструкторские бюро, входящие в их состав и выполняющие НИОКР в области электромеханики.

Завод изготовитель занимается полным циклом изготовления магнитной подсистемы электрических машин. Выполняет операции по компоновке обмоток, по набору роторов с постоянными магнитами.

Компания поставляет свою продукцию потребителям, которые требуют от нее высокого качества. Например, нефтяные компании, эксплуатирующие ее в районах крайнего севера, оборонная промышленность, судоходная и авиастроительная промышленность.

Типичным днем работы предприятия является серийный выпуск продукции, требующей прохождения приемо-сдаточных работ. После завершения этапа сборки магнитной подсистемы изделия, оно отправляется в зону контроля качества. Изделие проверяется на соответствие ручным измерительным прибором, при соответствии параметров допустимому диапазону, пропускается дальше, иначе отбраковывается. При этом измерения занимают много времени и требуют неоднократного проведения ввиду того, что оператор допускает ошибки при позиционировании.

Вторым сегментом является конструкторские бюро, осуществляющие выполнение НИОКР в области электромеханики.

Коллектив проводит разработку нового двигателя. Выполняет расчеты в математическом пакете моделирования и передает технологическую документацию на производство для изготовления опытного образца. Изготовленное изделие проходит испытание магнитной подсистемы в статическом и динамическом режиме. Проведение испытаний занимает много времени, так как измерения проводятся вручную. В случае ошибок проектирования их выявление занимает еще большее время, так как для локализации ошибок необходимо провести несколько итераций вычислительного эксперимента, который необходимо подкрепить измерениями. После исправления ошибок проектирования итерация изготовления опытного образца продолжается. Помимо ошибок проектирования возможно использование некачественного сырья, либо брак изготовления.

Для ускорения работы испытаний новых образцов предлагается использовать роботизированный измерительный комплекс, позволяющий сократить время на планирование и организацию эксперимента и обладающее удобным программным модулем экспорта данных, которые далее можно использовать при параметрической перестройке модели. В результате можно сократить временные затраты на испытания новой продукции и исключить влияние некачественного сырья и брака сборки на процесс разработки.

### **3.8 Бизнес-модели проекта. Производственный план и план продаж**

Составим бизнес-модель по Остервальдеру (таблица 29).



Таблица 29 – Бизнес модель по Остервальдеру

<i>Ключевые партнеры</i> Стратегическое сотрудничество со следующими партнерами: Поставщики робота, измерительных приборов, комплектующих. компании, которым готовый продукт проекта необходим для исследовательских целей;	<i>Ключевые виды деятельности</i> <b>Производство.</b> Разработка измерительного комплекса, интеграция в производство заказчика, наладка оборудования. <b>Разрешение проблем.</b> Предоставление программного пакета для упрощения моделирования магнитных систем путем параметрической перенастройки модели на основании экспериментальных данных	<i>Ценностные предложения</i> 1. Сократить время на контроль качества изготавливаемых изделий. 2. Увеличить повторяемость контроля качества 3. Автоматизировать процесс испытаний новой продукции. 4. Снизить издержки проектирования и брака при изготовлении. 5. Получить данные для построения цифровых двойников систем.	<i>Взаимоотношения с клиентами</i> 1. Постоянная техническая и консультационная поддержка клиентов; 2. Обратная связь; 3. Участие в конференциях и выставках.	<i>Потребительские сегменты</i> 1. Заводы, занимающиеся производством магнитных подсистем для электромеханических изделий; 2. Конструкторские бюро, занимающиеся НИОКР в области электромеханики
	<i>Ключевые ресурсы</i> Персонал: - Разработка новых способов интеграции моделей и эксперимента - Разработка программного обеспечения		<i>Каналы сбыта</i> 1. Прямые поставки; 2. Участие в грантах и целевых программах;	
<i>Структура издержек</i> Фиксированные издержки - заработная плата работникам, налоги, аренда, комплектующие. Переменные издержки – расходные материалы.		<i>Потоки поступления доходов</i> Продажа продукта		

### 3.9 Производственный план

Производственное помещение должно быть разделено на два сектора, испытательное помещение, в котором располагается робототехническая ячейка и измерительное оборудование. Помещение должно удовлетворять законодательным актам в сфере безопасности эксплуатации промышленных робототехнических комплексов. В помещении также должно быть предусмотрена кран-балка для подъема тяжелых составляющих комплекса (робот-манипулятор) и воротами для ввоза компонентов и отгрузки готового решения.

Второе помещение является офисным, в нем сотрудники выполняют работы по разработке программного обеспечения и конструкторской документации.

Оборудование офисного помещения состоит из персональных компьютеров, офисной мебели, оргтехники. В оборудование испытательного помещения входит электроизмерительный инструмент (осциллограф, мультиметр), монтажные инструменты, автоматизированное рабочее место оператора комплекса, защитные барьеры.

Работы по производству продукта организованы следующим образом:

- проводится закупка комплектующих: робота, измерительного оборудования, элементов шкафа управления, компонентов рабочего места оператора;
- выполняется проектирование рабочей зоны манипулятора под требования заказчика;
- проводится адаптация алгоритмов работы комплекса под задачи и номенклатуру заказчика;
- проводится сборка элементов комплекса в единую систему;
- проводится тестирование работоспособности комплекса;
- проводится приемка комплекса;
- проводятся пусконаладочные работы на производстве заказчика.

### **3.10 План продаж**

После окончания этапа НИОКР, в первый год запуска производства планируется продажа продукта «Информационно-измерительный комплекс на базе манипулятора». План продаж на 5 лет представлен в таблице 30.

Таблица 30 – План продаж

	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Продукт	Информационно-измерительный комплекс				
Количество	1	2	4	4	4

Цена, млн руб.	25.5	25.5	28	28	32
Выручка от П1, млн руб.	25.5	51	112	112	128

Согласно плану продаж, во время первого года планируется продать 1 единицу продукта. После его успешного внедрения ожидается увеличение продаж. Таким образом к окончанию третьего года планируется повышение цены до 28 млн рублей и продажа 4 единиц продукта, к окончанию пятого года – повышение цены до 32 млн рублей.

### **3.11 Стратегия продвижения продукта на рынок**

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

Наша цель – доказать, что предлагаемый комплекс позволит снизить издержки на испытания новой продукции компаний, повысить качество исполнения текущей линейки продукции.

Можно выделить следующие способы продвижения продукта:

- прямые продажи;
- участие в тематических выставках и конференциях.

При прямых продажах планируется проводить презентацию основных возможностей комплекса, его программного обеспечения. Выставки и конференции могут быть как узконаправленные, так и широкого профиля. Участие будет способствовать узнаваемости компании на рынке, поиску связей и знакомств с игроками рынка, поиску возможностей для роста продукта компании и открытию новых перспективных отраслей применения.

#### 4 Социальная ответственность

В рамках данной ВКР проводится разработка информационно-измерительного комплекса для регистрации пространственных магнитных полей на базе промышленного робота манипулятора. Данная разработка будет применяться конструкторскими бюро, проектирующими электрические машины для анализа магнитных подсистем их изделий на стадии проектной разработки и серийного выпуска, а также для диагностики и выявления неполадок устройств, отработавших некоторое время.

Размер рабочего помещения для предлагаемого комплекса должен составлять не менее 15 квадратных метров, что продиктовано необходимостью разместить там следующее оборудование:

- промышленный робот-манипулятор с соответствующем ему шкафом управления;
- измерительный прибор, осуществляющий регистрацию магнитного поля;
- автоматизированное рабочее место оператора робототехнического комплекса;
- измеряемый объект (электрическую машину);
- систему энергопитания электрического объекта;
- набор расходных материалов (крепежные изделия, провода и др.).

В рамках эксплуатации предлагаемого комплекса предполагается следующие рабочие процессы:

- установка и фиксация в рабочей зоне манипулятора объекта измерения;
- подача электропитания на исследуемый объект (при необходимости);
- монтаж навесного оборудования на фланец робот-манипулятора (чувствительный элемент измерительного прибора);
- операции калибровки робота;

- выполнение работ по программированию движений робота на персональном компьютере и пульте управления роботом;

- выполнение анализа и сбора результатов измерений на персональном компьютере.

#### **4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Работы, выполняемые при разработке проектного решения, относятся к категории Па [28]. При этом основные выполняемые работы проводились на автоматизированном рабочем месте оператора и в рабочей области робота-манипулятора. Работа с ЭВМ должна отвечать ряду требований стандартов, в то же время робот-манипулятор является опасным производственным механизмом и нахождение в его рабочей зоне также должно удовлетворять требованиям безопасности.

Для работников указанной категории труда продолжительность работ, согласно [29] устанавливается в размере 40 часов в неделю. При этом работа на роботизированном комплексе предполагает наличие у работника квалификации оператора робототехнического комплекса или соответствующего образования. Права и обязанности работника и работодателя, по подготовке и дополнительному профессиональному образованию также закреплены в трудовом кодексе [29].

Работа с промышленным роботом должна проводиться с учетом требования [30]. Для недопустимости нахождения человека в рабочей зоне манипулятора ячейка оборудована барьерами, ограничивающими рабочую зону. Во время обслуживания робота и его оснастки, а также калибровки его оборудования робот переводится в соответствующий режим функционирования на пониженных порядка 10 раз скоростях, переключение режимов блокируется с помощью ключа. Пульт оператора оборудован устройством останова, блокирующим передвижения робота вне зависимости от того, в каком режиме функционирования он находится на данный момент. В соответствии с требованиями данного стандарта, пульт

управления роботом и контроллер робота вынесены за пределы рабочей зоны.

Исполнительные органы манипулятора являются двигателями переменного тока, при этом части корпуса представляют собой стальные детали. Напряжение питания используемых промышленных роботов составляет 230 В и 380 В. Согласно [31] устройства с напряжением питания 230 Вольт допускается не заземлять, ввиду отсутствия опасных и особо опасных условий эксплуатации, устройствам напряжением 380 Вольт необходимо заземление, выполненное согласно приведенному стандарту.

Рабочее место оператора должно удовлетворять требованиям эргономики [32]. Так как высота рабочей поверхности стола является нерегулируемой, необходимо оснастить рабочее место стулом с возможностью регулирования высоты сиденья и подставкой для ног, чтобы обеспечить возможность работы для человека с меньшим ростом. Высота стола и диапазон регулирования высоты кресел необходимо определить с помощью номограмм, представленных в стандарте. Кресло оператора должно удовлетворять требованиям [33]. Высоту рабочей поверхности, с учетом специфики работы (печатание на клавиатуре, легкие сборочные работы) необходимо принять равным 655 мм. Размещение монитор компьютера, как средства отображения информации, должно находиться в пределах горизонтальной и вертикальной зон зрительного наблюдения.

#### **4.2 Производственная безопасность**

Вредные и опасные факторы, действие которых возможно при разработке проектного решения представлены в таблице 31.

Таблица 31 – Возможные вредные и опасные производственные факторы на рабочем месте при проектировании решения

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015 [34])	Нормативные документы
Вредные факторы, связанные с неподвижные колющими частями твердых объектов;	ГОСТ 12.2.072-98. Роботы промышленные. Роботизированные технологические комплексы. Требования безопасности и методы испытаний [30].
Вредные и опасные факторы, связанные с движущимися твердыми объектами, наносящими удар по телу рабочего	ГОСТ 12.2.072-98. Роботы промышленные. Роботизированные технологические комплексы. Требования безопасности и методы испытаний [30].
Вредные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды	ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [28].
Вредные факторы, связанные с электрическим током	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [35].
Вредные факторы, связанные с недостатком естественного и искусственного освещения	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [36]

Продолжение таблицы 31 – Возможные вредные и опасные производственные факторы на рабочем месте при проектировании решения

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015 [34])	Нормативные документы
Монотонность труда, вызывающая монотонию	МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности» [37]
Длительное сосредоточенное наблюдение	МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности» [37]

Наличие неподвижных колющих предметов на рабочем месте работника при проектировании решения обусловлено необходимостью калибровки робота, соответственно, непосредственное взаимодействие с ними также осуществляется в процессе калибровки. При взаимодействии с этим фактором возможно получение колющих травм на теле работника. Для минимизации опасности данного фактора необходимо ограничить доступ работника к этим предметам, в момент, когда они не используются, например, фиксация калибровочных элементов внутри рабочей области робота, которое согласно [30] должно быть ограждено, или перенос их в шкаф после использования.

Опасный и вредный фактор, связанный с движущимися частями механизмов непосредственно обусловлен использованием промышленного манипулятора, осуществляющего позиционирование щупа на высоких скоростях в автономном режиме. Столкновение с манипулятором чревато легкими и тяжелыми травмами и смертью. Для минимизации опасности для



оператора робототехнического комплекса при разработке решения, рабочая область манипулятора ограждается защитными барьерами, которые, согласно [30] должны выдерживать весь диапазон нагрузок, исходящих от робота. Работа внутри барьеров разрешается только при существенно пониженных скоростях работы робота в ручном режиме, либо при полном останове робота устройством с фиксацией своего состояния (аварийной кнопкой, механический ключ).

Микроклимат характеризуется тремя показателями в теплое и холодное время года: температура, относительная влажность и скорость потока воздуха. Категория работ при проектировании решения – Па [28]. Показатели, соответствующие данной категории приведены в таблицах 32 и 33.

Таблица 32 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений [28]

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

Таблица 33 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений [28]

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

Несоблюдение параметров микроклимата может приводить к быстрой утомляемости, повышению уровня потоотделения и артериального давления, слабость, нарушение координации. Помещение, в котором осуществлялась разработка проекта, оборудовано системой климат контроля с возможностью выбора температуры и скорости потока воздуха для поддержания оптимальных, или близких к оптимальным параметрам микроклимата.

Вредные факторы, связанные с электрическим током, возникают ввиду того, что робот приводится в движение с помощью электродвигателей переменного тока, а элементы робота и ограждающих барьеров выполнены из металлических токопроводящих материалов. Действие электрического тока оказывает термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие. Согласно [35], допустимые нормы напряжения и тока, воздействующими на человека приведены в таблице 34. Согласно [32] для защиты человека от поражения электрическим током необходимо применять устройства защитного заземления. Роботы, используемые при разработке проектного решения оборудованы устройством защитного заземления.

Таблица 34 – Предельно допустимые значения напряжения и тока прикосновения при нормальном режиме работы установки

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

Возникновение опасных и вредных факторов, связанных с недостатком естественного и искусственного освещения может быть связано с неправильным проектированием систем освещенности и выходом их из строя. При недостатке освещения работники склонны к быстрому

утомлению, мигрени, бессоннице. Плохое освещение негативно влияет на зрительный аппарат.

Освещение бывает естественное, искусственное и комбинированное. Нормируемые показатели освещенности [36] для IV разряда работ (средней точности), подразряда работ «в» приведены в таблицах 35-36.

Таблица 35 – Требования к искусственному освещению промышленных помещений

Искусственное освещение				
Освещенность, лк			Сочетание нормируемых величин объединенного показателя UGR и коэффициента пульсации	
При комбинированном освещении		При системе общего освещения	UGR, не более	
Всего	В том числе от общего		не более	К <sub>п</sub> , %, не более
400	200	200	25	20

Таблица 36 – Требования к естественному и совмещенному освещению промышленных помещений

Естественное освещение		Совмещенное освещение	
КЕО, е <sub>н</sub> , %			
При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении
4.0	1.5	2.4	0.9

Проведем расчет равномерного искусственного освещения горизонтальной поверхности рабочего места оператора робототехнического комплекса методом коэффициента светового потока.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 37.

Таблица 37 – Исходные данные для расчета освещения

Площадь помещения $S$ , м <sup>2</sup>	Ширина $A$ , м	Длина $B$ , м	Высота $H$ , м	Высота раб. поверхности $h_{pn}$ , м
15	4	3,75	4	0,75

В качестве светильника выберем люминесцентную лампу ОД - 2-30. Примем длину подвеса  $h_c$  равной 0.5 м и рассчитаем высоту подвеса по формуле (46):

$$h_n = H - h_c = 4 - 0.5 = 3.5 \text{ м} \quad (46)$$

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

Определим расчетную высоту (47):

$$h = h_n - h_{pn} = 3.5 - 0.75 = 2.75 \text{ м} \quad (47)$$

Согласно данным для расчета производственных факторов параметр оптимальности расположения светильников  $\lambda$  равен 1.4. Рассчитаем расстояние между рядами светильников  $L$  и расстояние от крайнего ряда до стены  $l$  (48):

$$L = \lambda \cdot h = 1.4 \cdot 2.75 = 3.85 \text{ м},$$

$$l = \frac{L}{3} = 1.28 \text{ м} \quad (48)$$

Примем расстояние между светильниками равным 0.5 м. и рассчитаем общее число ламп. Для этого найдем количество рядов  $n_{\text{ряд}}$  и количество светильников в ряду  $n_{\text{сг}}$  (49):

$$n_{ряд} = \frac{\left(B - \frac{2L}{3}\right)}{L} + 1 = \frac{\left(3.75 - \frac{2 \cdot 3.85}{3}\right)}{3.85} + 1 \approx 2,$$

$$n_{св} = \frac{\left(A - \frac{2L}{3}\right)}{l_{св} + 0.5} = \frac{\left(4 - \frac{2 \cdot 3.85}{3}\right)}{0.93 + 0.5} \approx 2,$$
(49)

где  $l_{св}$  - длина светильника, равная, согласно данным для расчета производственных факторов, 0.93 м. Рассчитаем количество светильников (50):

$$N = n_{св} \cdot n_{ряд} = 4$$
(50)

Рассчитаем индекс помещения (51):

$$i = \frac{S}{h(A+B)} = \frac{15}{2.75 \cdot (4+3.75)} \approx 0.7$$
(51)

Стены помещения оклеены светлыми обоями, потолок – светлое пробочное дерево. Тогда коэффициенты отражения стен и потолка будут соответственно равны 30 и 50 %. Исходя из индекса помещения, коэффициентов отражения стен и потолка, а также типа лампочки по табличным данным был определен коэффициент использования светового потока  $\eta = 0.38$ . Так как в помещение происходит малое выделение пыли, то коэффициент запаса примем  $K_z = 1.5$ . Нормативную освещенность, согласно таблице 4, примем  $E_n = 200$  лк. Рассчитаем световой поток (52):

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{N_l \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 15 \cdot 1.5 \cdot 1.1}{8 \cdot 0.38} \approx 1628 \text{ лм},$$
(52)

где  $Z = 1.1$  - коэффициент неравномерности освещения люминесцентной лампы;

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

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

Проведем проверку полученных значений потока (53):

$$\frac{\Phi_n - \Phi}{\Phi_n} \cdot 100\% = \frac{1650 - 1628}{1650} \approx 1\%$$
(53)

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

Проведем расчет мощности системы освещения (54):

$$P = N_l \cdot p_l = 8 \cdot 30 = 240 \text{ Вт}, \quad (54)$$

где  $p_l$  – мощность одной лампы в светильнике.

Монотонная работа, а также длительное сосредоточенное наблюдение возникает во время отладки программы движения манипулятора, когда оператор должен следить за правильностью ее выполнения и контролировать столкновение робота с препятствиями. Это ведет к снижению работоспособности вследствие монотонии, а также перенапряжению зрительных анализаторов. Для того чтобы это избежать необходимо делать периодические перерывы через 2, 4 и 6 часов после начала работы, сопровождающиеся физической активностью, отдыхом, психологической разгрузкой [37].

### **4.3 Экологическая безопасность**

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

Воздействие на литосферу могут оказывать сброс твердых отходов производства металлических и полупроводниковых элементов, входящих в состав робота, ЭВМ, измерительного прибора. Для минимизации воздействия на литосферу твердых отходов необходимо их утилизировать в соответствии с [38].

В случае попадания жидких компонентов разрабатываемого решения, например, смазочных материалов, покрасочных материалов, в сточные воды, необходимо проверить их концентрацию, и если она не удовлетворяет ПДК [39] провести их предварительную очистку, прежде чем они попадут в поверхностные водоемы [40].

#### 4.4 Безопасность в ЧС

При разработке проектного решения возможны следующие ЧС: аварии на электроэнергетических объектах, на коммунальных системах обеспечения, пожары.

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

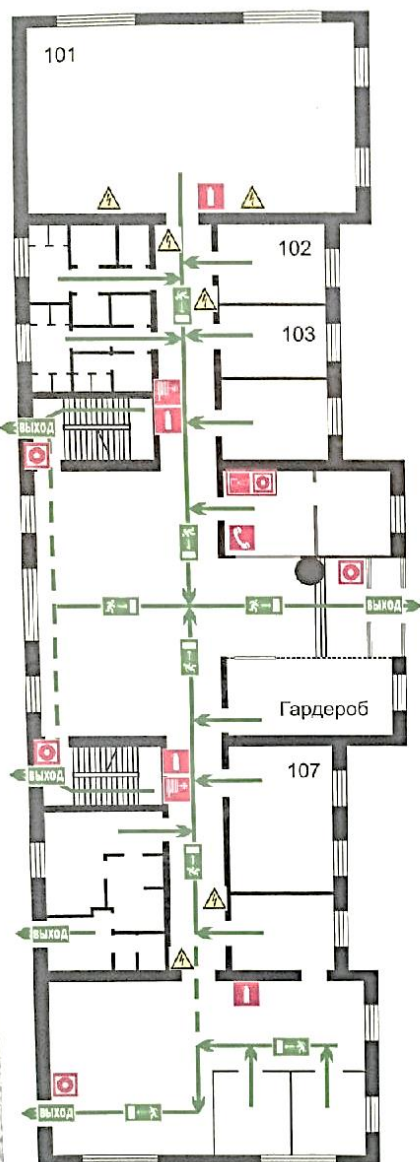
- возгорание электрической проводки, в следствие короткого замыкания и нарушения условий эксплуатации;
- возгорание приборов, в следствие неисправности электронных подсистем;
- возгорание аккумуляторных батарей, которыми снабжается робот, вследствие короткого замыкания.

Для предотвращения возгорания, согласно стандарту [41], необходимо обеспечить электрические цепи, которые могут привести к возгоранию, устройствами защитного отключения. Для предотвращения перегрузки, необходимо соблюдать номинальные требования к работе приборов.

Согласно требованиям к противопожарной защите [41], помещение оборудовано автоматическими средствами пожарной сигнализации, средствами пожаротушения (огнетушитель), средства акустического оповещения сотрудников. Также для организации управления движением людей к путям эвакуации, в помещениях установлены схема пути эвакуации (план эвакуации помещения в котором проводилась разработка представлен на рисунке 39), эвакуационные выходы оборудованы светящейся табличкой «Выход».

## ПЛАН ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ И ДРУГИХ ЧС из помещений научного парка, пр. Ленина, 2, стр. 33 - 1 этаж

Утверждаю  
Начальник УЭО  
ФГАОУ ВО НИ ТПУ  
П. Н. Ковылин



340 НИИ и ИТН "Пермь-Т" в. Томск, ул. Железныя, 29, тел. 66-99-01  
Лицензия № 6-010109 от 07 июля 2013 г. МЧС России

- ### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ
- огнетушитель 101-107 - номера помещений
  - направление движения телефон
  - эвакуационный выход пожарный кран
  - кнопка включения пожарной автоматики
  - Вы находитесь здесь блок АУПС
  - путь к эвакуационному выходу
  - путь к аварийному выходу эл.щит

#### Действия при пожаре

Сохранять спокойствие!

- 1 Сообщить по телефону - адрес объекта  
 - место возникновения пожара  
**01, сотовый 101** - свою фамилию
- 2 Эвакуировать людей - ориентироваться по знакам направления движения  
 - взять с собой пострадавших
- 3 По возможности принять меры по тушению пожара - использовать средства противопожарной защиты  
 - при необходимости обесточить помещения

#### Действия при ЧС

Сохранять спокойствие!

- 1 Сообщить по телефону - адрес объекта  
 - что случилось **112** - имеются ли пострадавшие  
 - свою фамилию - предотвратить развитие аварии
- 2 Локализовать аварию - использовать средства защиты  
 - обозначить место аварии
- 3 Эвакуировать людей - оказать помощь пострадавшим  
 - ориентироваться по знакам - взять с собой пострадавших

Изготовлено согласно ТУСТ Р 12.1.143-2009, ТУСТ 12.4.036-2015  
200-25-1440-Ж3 ноябрь 2018 года

Рисунок 39 – План эвакуации помещения

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



## **Вывод по разделу**

Рабочее место оператора робототехнической системы удовлетворяет нормируемым показателям безопасности труда.

Согласно ПУЭ [42] помещение относится к классу «безопасных», так как влажность воздуха в помещении лежит в пределах 40-65%, помещение хорошо проветриваемо и температура в нем поддерживается системой климат контроля, источников токопроводящей пыли в помещениях не выявлено, коэффициент заполнения металлическими проводниками менее 20%, полы сделаны из материалов, не проводящих электрический ток. Группа электробезопасности оператора робототехнического комплекса должна быть не ниже III (работа с электротехническим оборудованием напряжением ниже 1000 В).

Категория тяжести труда при проектировании решения – Па (средней тяжести).

Согласно [43] категория пожароопасности составляет ВЗ, ввиду того, что горючие вещества, входящие в контакт с окислителями, могут только гореть, не взрываться, а удельная пожарная нагрузка лежит в диапазоне 181-1400.

Согласно [44] объект следует отнести к IV категории по воздействию на окружающую среду.

## Заключение

В рамках данной работы был предложен роботизированный комплекс для измерения пространственных магнитных полей. Для организации синхронизации каналов позиционирования и измерения был исследован протокол взаимодействия между измерительным устройством и персональным компьютером, предложена блок-схема алгоритма синхронизации.

Для повышения точностных качеств измерительного комплекса были предложены алгоритмы калибровки инструмента и базы робота, ошибок монтажа чувствительного элемента. Ошибка калибровки инструмента не превысила 0.07 мм, ошибка калибровки – 0.1 мм. Ошибка калибровки углового смещения составила 0.0018 рад.

Предложен алгоритм генерации измерительных точек, позволяющий гарантировать отсутствие коллизий измерительного щупа и измеряемого объекта. В предположении о выпуклости объекта измерения предложен быстрый алгоритм генерации пути робота для обхода измерительных точек. Предложены варианты использования алгоритма для невыпуклых объектов.

Управление измерительным комплексом было реализовано с применением языка программирования C++ и библиотеки Qt в виде оконного приложения. Работоспособность комплекса продемонстрирована на примере измерения магнитного поля двух постоянных магнитов и магнитного поля катушки электромагнита.

## Список публикаций

1) Кургинов, Я. О. РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ / Я. О. Кургинов, А. А. Филипас, Н. А. Колобашкин. — Текст : непосредственный // "АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РОБОТОТЕХНИКИ": тезисы докладов I Всероссийской конференции. — Москва : Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2021. — С. 35-37.

2) Кургинов, Я. О. АЛГОРИТМ ГЕНЕРАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТОЧЕК В ЗАДАЧЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ / Я. О. Кургинов, А. А. Филипас. — Текст : непосредственный // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 21–25 марта 2022 г.). — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2022. — С. 273-275.

## Список использованных источников

- 1) Автоматизированный комплекс снятия остаточной магнитной индукции ферромагнитных изделий [Текст]: пат. 113609 Рос. Федерации: МПК H01F 13/00.
- 2) Сканирующий спектрометр ферромагнитного резонанса [Текст]: пат. 2747100 Рос. Федерации: МПК G01R 33/05.
- 3) Аппаратный комплекс для генерации магнитных полей, их регистрации и визуализации [Текст]: пат. 193094 Рос. Федерации: МПК G01R 33/02, G09B 23/06.
- 4) Сканер ближнего электрического поля для двухсторонних и многослойных печатных плат [Текст]: пат. 2604113 Рос. Федерации: МПК G01R 1/04.
- 5) Устройство для неразрушающей дифференциальной векторной трехмерной магнитоскопии [Текст]: пат. 2548405 Рос. Федерации: МПК G01N 27/83.
- 6) Устройство для измерения периодических магнитных полей и получения их распределений в пространстве и во времени [Текст]: пат. 2174235 Рос. Федерации: МПК G01R 33/02.
- 7) KUKA KR6 R900 sixx. Datasheet. [Электронный ресурс]: режим доступа: [xpert.kuka.com](http://xpert.kuka.com), свободный (дата обращения: 12.05.2022)
- 8) ТПКЛ.411171.010РЭ. Тесламетр-веберметр универсальный «ТПУ-2В» [Текст]: Руководство по эксплуатации / ООО «ЗЭТ» – 24.04.2015 г. – 75 с.
- 9) FT232HPQ – FTDI [Электронный ресурс], режим доступа: <https://ftdichip.com/products/ft232hp/>, свободный (дата обращения: 12.05.2022).
- 10) VCP Drivers – FTDI [Электронный ресурс], режим доступа: <https://ftdichip.com/drivers/vcp-drivers/>, свободный (дата обращения: 12.05.2022).

- 11) D2XX Drivers – FTDI [Электронный ресурс], режим доступа: <https://ftdichip.com/drivers/d2xx-drivers/>, свободный (дата обращения: 12.05.2022).
- 12) USBPcap [Электронный ресурс], режим доступа: <https://desowin.org/usbpcap/>, свободный (дата обращения: 12.05.2022).
- 13) Wireshark · Go deep. [Электронный ресурс], режим доступа: <https://www.wireshark.org/>, свободный (дата обращения: 12.05.2022).
- 14) Джон Крейг. Введение в робототехнику. Механика и управление. – Институт компьютерных наук, 2013 г. – 564 с.
- 15) Бородакий Ю.В., Загребаев А.М., Крицына Н.А., Кулябичев Ю.П., Шумилов Ю.Ю. Нелинейное программирование в современных задачах оптимизации М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 244 с.
- 16) Nonlinear optimization – Matlab & Simulink [Электронный ресурс], режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/optim/nonlinear-programming.html> (дата обращения: 12.05.2022).
- 17) Find minimum of constrained nonlinear multivariable function [Электронный ресурс], режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html> (дата обращения: 12.05.2022).
- 18) Рабинович С. Г. Погрешности измерений. — Л.: Энергия. 1978, — 262 с, ил.
- 19) Кочегурова, Е. А. Теория и методы оптимизации : учебное пособие для академического бакалавриата / Е. А. Кочегурова. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 133 с. — (Университеты России). — ISBN 978-5-534-10090-7. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/433832> (дата обращения: 18.05.2022).
- 20) Qt | Cross-platform software development for embedded & desktop [Электронный ресурс], режим доступа: <https://www.qt.io/>, свободный (дата обращения: 18.05.2022).

- 21) Peter Hachenberger. 3D Minkowski Sum of Polyhedra. In CGAL User and Reference Manual. CGAL Editorial Board, 5.4 edition, 2022.
- 22) Kavraki, L. E.; Svestka, P.; Latombe, J.-C.; Overmars, M. H. (1996), "Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12 (4): 566–580, doi:10.1109/70.508439, hdl:1874/17328
- 23) Рынок робототехники достигнет 160-260 миллиардов долларов [Электронный ресурс], режим доступа: <https://plusworld.ru/daily/tehnologii/rynok-robototekniki-dostignet-160-260-milliardov-dollarov/>, свободный (дата обращения 30.05.2022).
- 24) Members – IMELCO, the worldwide largest cooperation of independent electrical wholesalers [Электронный ресурс], режим доступа: <https://imelco.com/members>, свободный (дата обращения 30.05.2022).
- 25) Заводы производители электродвигателей [Электронный ресурс], режим доступа: <https://dvigatel.info/firms/index/1/0/6.html>, свободный (дата обращения 30.05.2022).
- 26) Развитие технологий – Русэлпром [Электронный ресурс], режим доступа: <https://www.ruselprom.ru/about/o-kontserne-ruselprom/razvitie-tekhnologi/>, свободный (дата обращения 30.05.2022).
- 27) Росстат – наука, инновации и технологии [Электронный ресурс], режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/statistics/science>, свободный (дата обращения 30.05.2022).
- 28) ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
- 29) Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021).
- 30) ГОСТ 12.2.072-98. Роботы промышленные. Роботизированные технологические комплексы. Требования безопасности и методы испытаний.

- 31) ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
- 32) ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
- 33) ГОСТ 21889-76 Система «человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования
- 34) ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. Перечень опасных и вредных факторов.
- 35) ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
- 36) СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*.
- 37) МР 2.2.9.2311 – 07 «Профилактика стрессового состояния работников при различных видах профессиональной деятельности»
- 38) ГОСТ Р 53692-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов.
- 39) СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
- 40) ГОСТ 17.1.3.13-86. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнений.
- 41) ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
- 42) Правила устройства электроустановок. Седьмое издание.
- 43) СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
- 44) Постановление правительства Российской Федерации «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий».

## Приложение А

(Обязательное)

Раздел на иностранном языке

Разделы 1, 2.1.1, 2.2

Patent Search, Measurement synchronization API, Robot frames calibration

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8EM02	Кургинов Ярослав Олегович		

Руководитель ВКР

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

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

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



## **Patent search**

With the help of the Federal Institute of Industrial Property a patent search was carried out during which 6 patents of similar fields were found.

1) Automated complex for removal of retained magnetization of ferromagnetic products [1].

The proposed utility model relates to the field of demagnetization of ferromagnetic materials and products and can be used to remove the retained magnetization of pipes and long products in the production lines of metallurgical plants.

However, the model includes a block for measuring the product's residual magnetic field. This block is a set of four sensors which are located relative to each other at an angle of 90 degrees. The sensors are equipped with a vertical positioning device. Products going through the procedure of measuring the magnetic field move through the measuring device in a horizontal plane. Thus, this utility model has two degrees of freedom for measuring the magnetic field, which is not enough to measure a spatial field.

2) Ferromagnetic resonance scanning spectrometer [2]

The invention relates to measuring technology and it is intended for non-destructive quality control and homogeneity of magnetic films by recording ferromagnetic resonance spectra from small areas of the samples under study.

The device includes Helmholtz coils, an object positioning system and a personal computer. The positioning system provides object positioning in four coordinates –  $X, Y, Z, R$ , where  $R$  is the rotation angle along the  $Z$  axis. The system has the necessary number of degrees of freedom to measure a three-dimensional magnetic field when replacing Helmholtz coils with a Hall sensor. But the system will not work well with non-convex and hollow objects.

3) Hardware complex for the generation of magnetic fields, their registration and visualization [3]

The proposed hardware complex belongs to the field of devices designed to measure variable magnetic and electrical quantities, in particular the magnetic

field strength, to assess the contribution of the bias current to the magnetic field between the capacitor plates, to measure the potential difference of electromagnetic fields depending on the oscillation frequency of the circuit, and also to build electrical signals.

This complex is equipped with a device for measuring the variable magnetic field "Rogovsky belt". However, a significant limitation is the applicability of this device only for flat capacitors. In addition, the proposed complex does not have technical devices for analyzing the magnetic field, only for visualizing, because of using a microcontroller with low computational power compared to a personal computer.

4) Near electric field scanner for two-sided and multilayer printed boards [4]

The invention relates to measurement technology. This is a device for scanning the near electric or magnetic field of electromagnetic radiation sources and it can be used for automatic field strength measurement to solve the problems of ensuring electromagnetic compatibility in the design, diagnostics and testing of both individual printed circuit assemblies and electronic devices in general.

The system is a three-coordinate portal positioning the measuring head in space.

5) Device for nondestructive differential vector three-dimensional magnetic particle inspection *непереводимо*[5]

The invention relates to field of measurement equipment. This is a device for measuring magnetic fields and it can be used for nondestructive control of the ferromagnetic objects internal structure.

The measuring devices are rings inductively connected to each other. The rings are positioned by two stepper drives – zenith and azimuth direction tilts. The rings are designed to move around the object to be measured. The disadvantage of this system is the impossibility to measure fields inside and outside the spherical surface covered by the sensors.

6) Gear measuring periodic magnetic fields and securing their distribution in space and time [6]

The invention relates to information and measurement technology, in particular to magnetometry, and it can be used to measure characteristics of dynamic magnetic fields, as well as to obtain distributions of magnetic fields in space and in time and to visualize their images using the procedure of computational tomography.

This device is equipped with a three-dimensional positioning system in coordinates  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  which provides the ability to measure spatial fields. The disadvantage of this system is the same as system (2) - it is impossible to measure inside hollow objects, such as stator of electric machine, as well as objects of non-convex shape. In addition, this system is applicable only for variable fields.

The systems described above are automated and have the application specific degrees of freedom number, but they are not enough to measure objects of complex and non-convex shapes, some types of systems are not able to measure three-dimensional magnetic field at all. However, it is possible to pick up the tendency that automated devices contain three main components:

- Mechanical positioning subsystem where the sensing element is mounted;
- Measurement control device;
- The device for synchronization of the measurement samples and positioning process.

### **Measurement synchronization API**

To synchronize the measurement process and the positioning of measurement probe it is proposed to use a software interface. Teslameter is connected to personal computer via USB interface, robot controller is connected using Ethernet. The application programming interface (API) was designed to deal with synchronization task. The API has the following methods and data structures:

- *tsl\_tpu\_2v* is a class that describes teslameter;

- `tsl_tpu_2v()` is a class constructor. It is set default settings to USB connection. It has no input arguments and does not return any values.
  - `void open()` is a class method that starts the connection with teslameter. It has no input arguments and does not return any values.
  - `void close()` is a class method that disconnects teslameter. It has no input arguments and does not return any values.
  - `void setConfig(tsl_onfig)` is a class method that sets the teslameter measurement configuration. It has one input argument of type “*tsl\_config*”, that contains configuration description. It does not return any values.
  - `tsl_config getConfig()` is a class method that returns current teslameter measurement configuration as a “*tsl\_config*” data structure. It has no input arguments and returns value of data type «*tsl\_config*» that contains configuration description.
  - `void startMeasure()` is a method that sends “start measurement” command to teslameter. It has no input attributes and does not return any values.
  - `vector<vector<float>> getMeasuredData()` is a class method that returns a measurement result stored in standard template library vector data structure. It has no input attributes and returns value of “`std::vector`” data type.
- API operates with the custom data type “*tsl\_config*”. “*tsl\_config*” is a data structure that contains teslameter measurement parameters description. It has the following instances:
- *fieldType* is an instance that contains information about field type: homogeneous, variable, ipmulse;
  - *range* is an instance that contains maximum possible range of field magnitude. It takes the values: 0.01, 0.1, 1, 10 Tl;
  - *integrationTime* is an instance that contains “integration time” parameter of homogeneous field measurement. It is ignored in other field type configuration.
  - *frequencyRange* is an instance that contains “frequency range” parameter of variable field measurement. It is ignored in other field type configuration.

- *pulseDuration* is an instance that contains “pulse duration” parameter of impulse field measurement type. It is ignored in other field type configuration.

- *numMeasure* is an instance that contains a number of measurement in one series;

- *zondType* is an instance that contains an information about type of measuring probe;

- *unit* is a variable that contains information about measurement units: Tesla, Ampere per meter.

### **Robot frames calibration**

The industrial manipulator is a sequential kinematic mechanism. Rotation angles of the actuators are unambiguously converted into its tool position in Cartesian space. Such transformation is called “forward kinematics”. At the same time, the robot in its basic configuration is supplied without a tool, and the forward kinematic problem is understood as position determination in the frame associated with the robot flange. Position of the frame associated with tool is calculated using a homogeneous transformation matrix, the process of searching such matrix is called “robot tool calibration”.

At the same time, the forward kinematics problem is solved in the global coordinate system of the robot associated with null frame. In some cases, it is convenient to use a local frame associated, for example, with a pedestal where the magnet is located. In order to recalculate the coordinates of target points specified in the local frame into coordinates in the global one, it is necessary to know the spatial position of the local frame in the global coordinates. The procedure of calculating position of the local frame in the global one is called “base calibration”. This chapter is devoted to calibration of the tool, in this case the measuring probe mounted on the robot's flange, and the base, which is a pedestal on which the magnet is located.

## Forward kinematics

To map configurational space of the robot to Cartesian space we need to deduce forward kinematics equations. Kinematic scheme of the robot is shown in Figure 1.

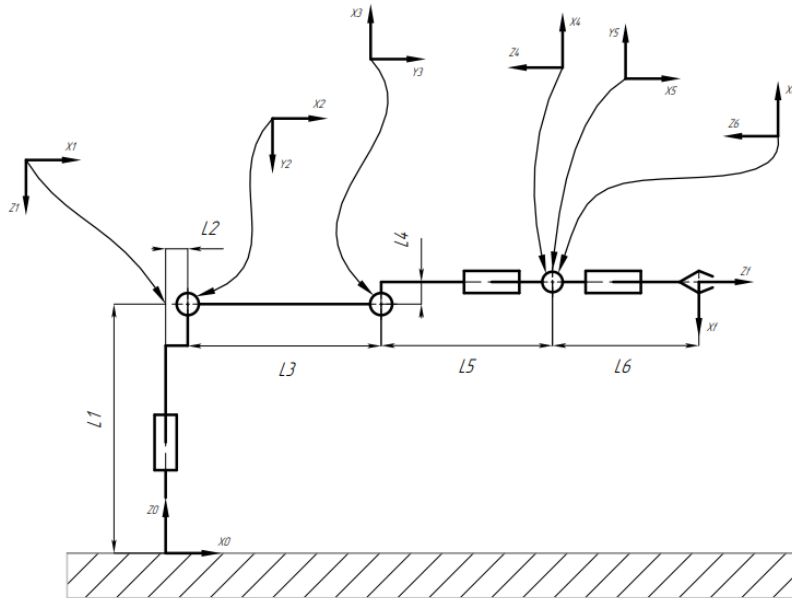


Figure 1 – Kinematic scheme of the robot

Denavit-Hartenberg parameters according to kinematic scheme are presented in Table 1.

Table 1 – Denavit-Hartenberg parameters

Axis	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	180	0	$-L_1$	$\theta_1$
2	90	$L_2$	0	$\theta_2$
3	0	$L_3$	0	$-90 + \theta_3$
4	90	$L_4$	$-L_5$	$\theta_4$
5	90	0	0	$\theta_5$
6	-90	0	0	$\theta_6$
f	180	0	$L_6$	180

Using the following homogenous matrix representation [14], we describe forward kinematics:

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_{i-1}) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_{i-1}) \cdot \sin(\theta_i) & a_{i-1} \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_{i-1}) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_{i-1}) \cdot \cos(\theta_i) & a_{i-1} \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_0^f = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_2^3 \cdot T_3^4 \cdot T_4^5 \cdot T_5^6 \cdot T_6^f$$

### **Tool central point calibration**

To calibrate the tool central point (TCP) a number of standard algorithms are provided in the robot software. The problem with these methods is that they are not scalable to larger amount of measurement points. At the same time, when the central point is inside a solid object (the sensing element is mounted inside the stylus), it is impossible to directly measure the center point of the tool. Indirect measurements of its position are less accurate, and the measurement error can be reduced by increasing the number of experiments. Thus, it is necessary to create an algorithm that will improve the accuracy of the calibration of the tool central point by increasing the number of measurements.

The calibration procedure is that the central point of the probe is brought to the same point in space with different tool orientations and the positions of the robot flange are measured. Due to the fact that the probe is fixed on the robot flange, and its central point is in one place in all positions, the robot flange is always located on the surface of some sphere with unknown radius, the center of which will be the working point of the tool. Thus, knowing the coordinates of the robot flange in all measurements, it is possible to estimate the center of this sphere and its radius, using the least squares method, in relation to the following cost function:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[ (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 - R^2 \right]^2$$

where  $x_i, y_i, z_i$  are coordinates of the robot flange in  $i$ -th measurement,  $x_0, y_0, z_0, R$  are coordinates of sphere center and its radius,  $n$  is an amount of measurements.

The solution of that problem is:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b$$

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[ (x_i - x_0)^2 - (y_i - y_0)^2 - (z_i - z_0)^2 \right]}{n}}$$

where matrices  $A$  and  $b$  have the following form:

$$A = 2 \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i (x_i - \bar{x}) & \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \bar{y}) & \sum_{i=1}^n x_i (z_i - \bar{z}) \\ \sum_{i=1}^n y_i (x_i - \bar{x}) & \sum_{i=1}^n y_i (y_i - \bar{y}) & \sum_{i=1}^n y_i (z_i - \bar{z}) \\ \sum_{i=1}^n z_i (x_i - \bar{x}) & \sum_{i=1}^n z_i (y_i - \bar{y}) & \sum_{i=1}^n z_i (z_i - \bar{z}) \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)(x_i - \bar{x}) \\ \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)(y_i - \bar{y}) \\ \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)(z_i - \bar{z}) \end{bmatrix}$$

where  $\bar{x}, \bar{y}$  and  $\bar{z}$  are mean values of  $x, y$  and  $z$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i$$

The homogeneous matrix describing the position of the probe in space has the following form:

$$T_0^{tool} = T_0^f T_f^{tool}$$



where  $T_0^f$  is a robot forward kinematics solution,  $T_f^{tool}$  is a homogeneous transition matrix between the frame of the robot flange and the probe frame:

$$T_f^{tool} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_t \\ 0 & 1 & 0 & y_t \\ 0 & 0 & 1 & z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

where  $x_t, y_t$  and  $z_t$  are TCP coordinates in robot flange frame. These coordinates satisfy the following equation:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{bmatrix} + R_0^f \cdot \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

where  $x_t, y_t$  and  $z_t$  are projection coordinates of the measured point to sphere surface, calculated by the formula:

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{bmatrix} = \frac{R}{\|V\|} V$$

$$V = \begin{bmatrix} x_0 - x_1 \\ y_0 - y_1 \\ z_0 - z_1 \end{bmatrix}$$

The solution of equation (1) with respect to  $x_t, y_t$  and  $z_t$  will be the result of TCP calibration.

### **Robot base calibration**

To calibrate the base frame, it is proposed to use the electrocontact method. The nature of the method is following:

- The pedestal, on which the measured object is located, is supplied with contact conductive plates, which are under voltage;
- A probe with a conductive rod inside is attached to the flange of the manipulator. The rod is supplied with a spring in order to avoid its deformation when the probe contacts the plates;

- The conductive rod is connected to the discrete input/output modules of the robot controller;
- The TCP of probe is calibrated in order to determine its operating point;
- The position in space of the conductive plates is measured using a probe;
- Based on the geometry of the pedestal and plates, the position of the pedestal local frame is calculated.

The pedestal on which the measured object (in this work – a permanent magnet) is located is shown in Figure 2. Voltage of 24 V is applied to contact plates which are located on the pedestal surface. The plates on the pedestal are orthogonally oriented and correspond to the OXY, OYZ, OXZ planes of the frame {1} (Figure 2) associated with the pedestal.

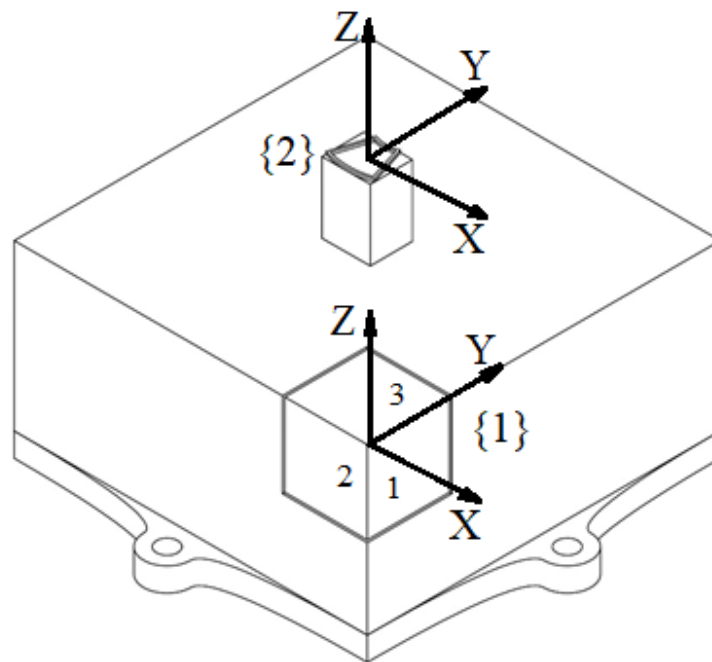


Figure 2 – Pedestal with contact plates 1,2,3

Measuring probe with a conductive rod is shown in Figure 3.

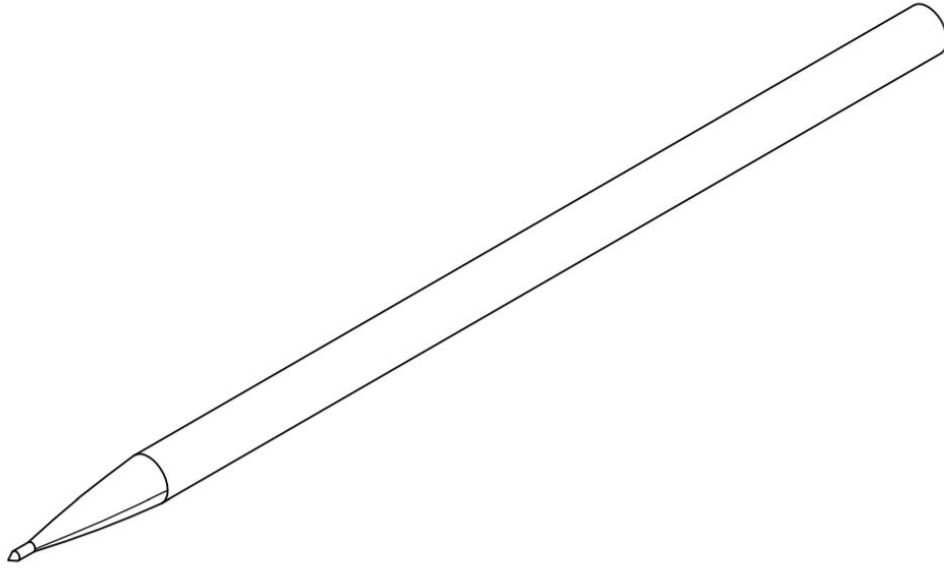


Figure 3 – Probe with conductive rod

Now, using a calibrated probe, it is necessary to measure the position of the contact plates in space. A number of measurements at different points is carried out sequentially for each plate. To do this, at minimum speed, the probe is brought to the plate until contact is reached. When the electrical circuit is closed and logical “one” signal is applied to the discrete input of the manipulator. When rising edge of signal is detected, an interrupt is triggered. In the interrupt callback function the current position of the probe TCP (point of contact with the plate) is sent to the computer. All points are accumulated in the computer memory and further processed.

To determine the position of the pedestal frame, it is necessary to determine the position of the plates according to the experimental data. The position of the plates will be described by three equations of the planes in which they are located. We obtain the plate equations by solving the constrained nonlinear programming problem [15-17] with the following cost function:

$$\begin{aligned}
 \alpha &= [A_1, B_1, C_1, A_2, B_1, C_2, A_3, B_3, C_3] \\
 J(\alpha) &= \sum_{i=1}^m (A_1 x_i + B_1 y_i + C_1 z_i + D_0)^2 + \sum_{i=1}^m (A_1 x_i + B_1 y_i + C_1 z_i + D_0)^2 + \\
 &\quad + \sum_{i=1}^k (A_3 x_i + B_3 y_i + C_3 z_i + D_0)^2
 \end{aligned}$$

with the following constrains:

$$\begin{aligned}g_1 &= A_1A_2 + B_1B_2 + C_1C_2 = 0 \\g_2 &= A_2A_3 + B_2B_3 + C_2C_3 = 0 \\g_3 &= A_1A_3 + B_1B_3 + C_1C_3 = 0\end{aligned}$$

where  $\alpha$  is a vector of problem parameters,  $m, n, k$  are an amount of measured points at plates 1, 2 and 3 respectively (Figure 2),  $D_0$  is some constant.

The intersection of the three planes is the center of the coordinate system {1} (Figure 2). The direction of the X axis is assumed to be collinear with the normal to plane 1, the Y axis to plane 2, Z to plane 3. The transition to coordinate system 2 is given by the transition matrix:

$$T_{\{1\}}^{\{2\}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_2 \\ 0 & 1 & 0 & y_2 \\ 0 & 0 & 1 & z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

where  $x_2, y_2, z_2$  is a position vector of frame {2} in frame {1}.

The position of the robot in the global frame corresponding to the position of the robot in frame of the measured object can be calculated by the formula:

$$T = \left( T_{\{0\}}^{\{1\}} T_{\{1\}}^{\{2\}} \right)^{-1}$$

### Experimental test of TCP and base calibration

Measured positions of the robot flange during probe calibration are presented in Table 2.

Table 2 – Measured position of robot flange

X, mm	Y, mm	Z, mm	A, deg	B, deg	C, deg
739.17	-272.07	130.101	-179.997	1.03133	179.999
727.425	-268.086	173.616	-177.969	24.7842	-170.435
709.275	-203.852	134.866	-141.672	5.86347	-147.815
667.184	-365.032	185.118	111.652	29.9669	166.367
608.212	-272.875	234.881	-5.55203	83.6021	-26.2834

X, mm	Y, mm	Z, mm	A, deg	B, deg	C, deg
524.958	-321.047	147.039	19.4345	8.64885	160.864
542.018	-208.025	103.262	-43.2731	-13.6129	163.942
562.485	-363.668	162.059	49.2785	17.046	167.665
695.434	-237.875	202.711	-153.645	46.9074	-117.034
622.238	-391.384	133.157	83.7615	2.77562	-176.084

Estimated sphere parameters are  $R=112.5968$ ,  $\{x_0, y_0, z_0\} = \{626.8321, -279.4130, 123.9480\}$ . Estimated sphere and experimental points are shown in Figure 4.

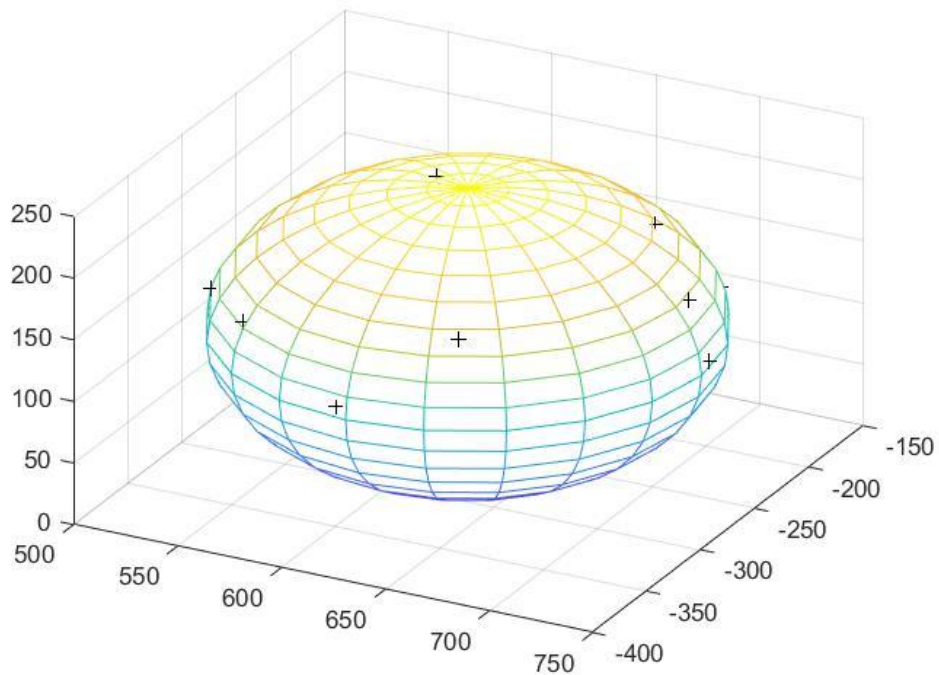


Figure 4 – Sphere estimation result

Homogenous transition matrix from flange frame to TCP is the following:

$$T_f^{tool} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 112.2824 \\ 0 & 1 & 0 & -7.3275 \\ 0 & 0 & 1 & 4.1242 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Now we calculate new positions of the robot flange (Table 3)

Table 3 – New position of robot flange

Measurement number	X, mm	Y, mm	Z, mm
1	626.9804	-279.403	123.9563
2	627.0227	-279.562	123.9602
3	626.8285	-279.735	123.8058
4	626.6356	-279.555	124.0646
5	627.0732	-279.474	124.0715
6	626.8921	-279.174	123.9274
7	626.545	-279.5	123.867
8	626.6908	-279.456	123.796
9	626.7631	-279.713	123.8951
10	626.859	-279.246	124.1098

Standard deviation (Table 4) is calculated using the following formulas [18]:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{m(m-1)}}$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n(n-1)}}$$

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (z_i - \bar{z})^2}{k(k-1)}}$$

Table 4 – Standard deviation of probe TCP position

Coordinate	X, mm	Y, mm	Z, mm
Standard deviation	0.0544	0.0610	0.0347

With a calibrated probe, we will measure the position of the contact plates. Measured positions are given in Tables A1, A2 and A3 (see Appendix A).

Figure 5 shows the result of solving the optimization problem to determine the position of the plates.

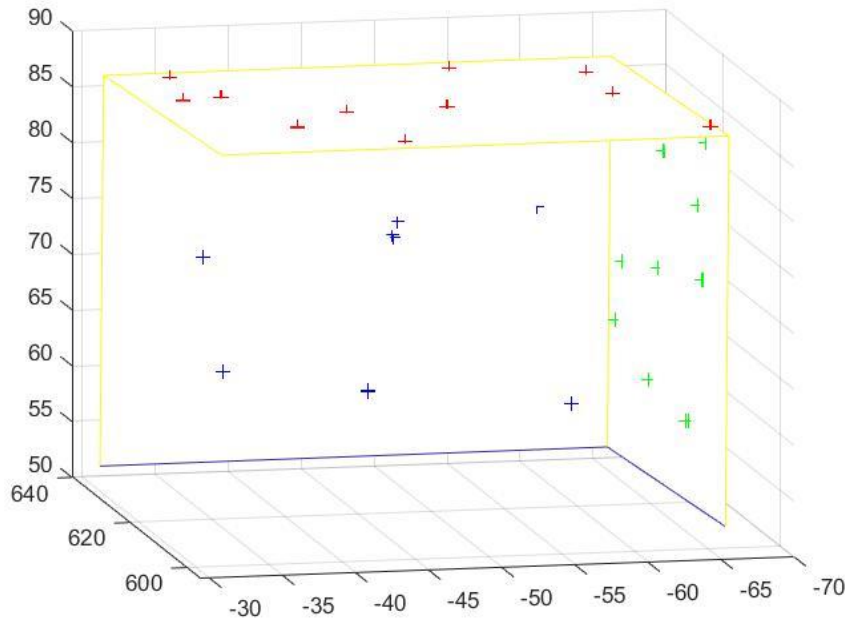


Figure 5 – Plates position estimation result

Then matrix, that describes frame {1} is the following:

$$T_{\{0\}}^{\{1\}} = \begin{bmatrix} 0.9993 & -0.0361 & -0.0036 & 631.3152 \\ 0.0361 & 0.9993 & -0.0064 & -64.5215 \\ 0.0038 & 0.0062 & 1.0000 & 87.7777 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Now let us calculate deviation of measured points from planes. To do this we calculate mean value and standard deviations of distances from every point to corresponding planes (Table 5).

Table 5 – Mean values and standard deviations of distances

Plate	XOY	XOZ	YOZ
Mean value, mm	0.1005	0.0718	0.0632
Standard deviation, mm	0.0681	0.06	0.0336

## Calibration of sensor mounting errors

The tool calibration given above does not imply calibration of errors within the sensor itself. Mounting offset errors relative to the geometric center and Hall sensor axis angle error must also be calibrated. Let us describe the procedure for calibrating the tilt angle error. To do this, we define the following measurement model:

$$B^* = Z^T \cdot R^T \cdot B + \xi$$

where  $B^*$  is a flux measurement,  $Z$  is a Hall sensor axis described in flange coordinates,  $R$  is a rotation matrix describing robot flange orientation in global frame,  $B$  is a flux vector described in global coordinates,  $\xi$  is a random measurement error.

To calibrate the errors in the angular position of the sensor, it is necessary to find the  $Z$  vector. However, the equation contains two unknown quantities:  $Z$  and  $B$ , since in order to measure  $B$  an already calibrated sensor is required or a magnetic field source with a known direction and the magnitude of the flux vector field. Dipole magnet has such properties. However, obtaining a dipole magnet with a uniform field is a less laborious task than obtaining the same magnet with a given magnitude and direction of vector field. So, the usage of a dipole magnet with an unknown field direction and magnitude, but with a uniform magnetic field in the gap is preferred. Then the vector  $B$  will be included in the following optimization problem:

$$J = \sum_{i=1}^n \left( Z^T \cdot R_i^T \cdot B - B_i^* \right)^2 \xrightarrow{Z, B} \min$$

constrained by the following function:

$$g = \sqrt{Z^T \cdot Z} - 1 = 0$$

The result of solving this optimization problem will be the direction of the  $Z$  axis in the robot flange frame and the vector  $B$  in the global coordinates.

Let us conduct a numerical experiment to test the hypothesis. Define some a priori unknown direction of the  $Z$  axis and the value of the vector  $B$  (Table 6).



Then generate a set of measurements with different positions of the probe and make them noisy with a random distributed values with an expected value equal to 0 and a standard deviation equal to the relative measurement error of the device (Table 7). The result of solving the optimization problem is presented in Table 8. It should be noted that the problem has two solutions with opposite signs, we need to choose the right one based on position of the dipole magnet poles.

Table 6 – Defined values of  $Z$  and  $B$

$Z$	$B, \text{ mTl}$
$[0.9129 \ 0.3651 \ 0.1826]^T$	$[300 \ 25 \ -117]^T$

Table 7 – Generated data

$B, \text{ mTl}$	$B, \text{ mTl}$
32.9860	-74.4998
-94.4196	-288.9625
83.8789	157.0434
107.1083	105.5592
-69.9279	-25.8928

Table 8 – Optimization problem solution

$Z$	$B, \text{ mTl}$
$[0.9128 \ 0.3665 \ 0.1802]^T$	$[299.6236 \ 24.7777 \ -116.8563]^T$

Calculated Hall sensor axis error is equal to  $\varphi_e = \text{acos}(Z^T \cdot Z_e) = 0.0028$  radian.

The next step is to calibrate the offset errors of the sensor. Calibration requires the usage of a permanent magnet with a non-uniform field that has a maximum at the magnetic axis. The following calibration procedure is suggested:

- set axis  $Z$  direction;
- find maximum magnitude of vector field  $B_{\text{max}}$  ;
- save sensor position  $\{X_{\text{max}}, Y_{\text{max}}, Z_{\text{max}}\}$  ;

- invert Z-axis direction;
- find minimum of the following sum:  $\Delta B_{\min} = (B_{\max} + B) \rightarrow \min$  ;
- save sensor position  $\{X_{\min}, Y_{\min}, Z_{\min}\}$  ;
- calculate errors using the following formulas:

$$X_e = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2}$$

$$Y_e = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{2}$$

$$Z_e = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{2}$$

It is proposed to use zero-order optimization techniques, such as Hook and Jeeves method [19] for  $B_{\max}$  and  $\Delta B_{\min}$  search.

## Conclusion

In this section, problems directly affecting the positioning accuracy of the robotic system in the task of measuring magnetic fields were considered. The algorithms for robot tool and base calibration and algorithms for calibrating the mounting errors of the sensor were proposed. The robot tool calibration error did not exceed 0.061 mm, the base calibration error did not exceed 0.1 mm, the sensor axis angular position calibration error was 0.0028 radians.

## Приложение Б

(Обязательное)

Экспериментальные данные для калибровки инструмента и базы

Таблица Б.1 – Измеренные точки на плоскости XOY

№ измерения	X, мм	Y, мм	Z, мм
1	630.263	-34.1298	85.4258
2	630.354	-34.2009	85.4007
3	630.711	-45.4639	83.6729
4	630.747	-45.4694	83.5813
5	631.38	-61.1114	82.528
6	631.475	-61.1546	82.5078
7	631.234	-59.4543	74.598
8	631.296	-59.4736	74.5251
9	630.774	-49.4602	72.5937
10	630.854	-49.481	72.3949
11	630.257	-36.4173	71.3466
12	630.347	-36.3808	71.3765
13	630.239	-37.7521	61.0898
14	630.331	-37.7734	60.981
15	630.62	-47.7258	58.7769
16	630.693	-47.7284	58.6875
17	631.226	-61.7761	56.774
18	631.305	-61.7669	56.7635
19	630.799	-49.7834	73.8094
20	630.894	-49.8161	73.8254

Таблица Б.2 – Измеренные точки на плоскости XOZ

№ измерения	X, мм	Y, мм	Z, мм
1	607.548	-65.1486	59.9163
2	607.511	-64.9849	59.9148
3	618.898	-64.6993	61.3676
4	618.838	-64.6599	61.3631
5	629.095	-64.4196	64.6328
6	629.105	-64.4208	64.6316
7	627.704	-64.5403	70.0967
8	627.732	-64.5514	70.0946
9	616.905	-64.9486	71.7559
10	616.907	-64.9042	71.7475
11	603.88	-65.4398	73.2025
12	603.894	-65.3581	73.1959
13	605.399	-65.4496	79.5846
14	605.393	-65.3922	79.5778
15	615.835	-65.1159	82.4558
16	615.752	-65.1168	82.453
17	603.567	-65.6256	85.6155
18	603.557	-65.5916	85.6149
19	625.161	-64.8764	85.616
20	625.178	-64.8892	85.6143

Таблица Б.3 – Измеренные точки на плоскости YOZ

№ измерения	X, мм	Y, мм	Z, мм
1	628.277	-33.7068	88.0095
2	628.33	-33.6938	87.9384
3	619.617	-35.5569	87.8423
4	619.642	-35.5344	87.7968
5	605.982	-38.1388	87.8099
6	606.051	-38.125	87.7764
7	598.27	-44.02	87.8129
8	598.249	-44.0121	87.7855
9	612.231	-49.5861	87.8086
10	612.263	-49.5666	87.7806
11	628.257	-52.8785	87.9307
12	624.767	-61.5353	87.8648
13	628.207	-52.8678	87.9186
14	624.791	-61.5201	87.8525
15	615.323	-61.5254	87.8173
16	615.389	-61.5228	87.8185
17	599.913	-65.2104	87.7308
18	600.065	-65.2113	87.7227
19	611.768	-42.6612	87.8086
20	611.819	-42.6441	87.795
21	618.893	-32.8501	87.8303
22	618.843	-32.8336	87.8219

## Приложение В

(Обязательное)

Экспериментальные данные измерения магнитного поля

Таблица В.1 – Экспериментальные данные измерения магнитного поля прямоугольного магнита

Положение X, мм	Положение Y, мм	Положение Z, мм	Индукция $B_x$ , мТл	Индукция $B_y$ , мТл	Индукция $B_z$ , мТл
-7.5	-7.5	12	-16.967	-19.27	25.705
-2.5	-7.5	12	-28.642	-6.777	46.859
2.5	-7.5	12	-29.817	9.993	45.379
7.5	-7.5	12	-19.893	22.107	18.882
-7.5	-2.5	12	-8.332	-29.317	46.163
-2.5	-2.5	12	-11.439	-9.602	73.384
2.5	-2.5	12	-10.905	14.462	71.832
7.5	-2.5	12	-7.799	33.43	34.466
-7.5	2.5	12	7.794	-30.311	46.794
-2.5	2.5	12	11.366	-9.934	75.264
2.5	2.5	12	11.986	14.231	73.234
7.5	2.5	12	8.939	34.037	33.903
-7.5	7.5	12	20.581	-20.703	18.583
-2.5	7.5	12	31.944	-7.339	33.365
2.5	7.5	12	32.732	9.95	31.171
7.5	7.5	12	22.661	22.527	11.457
-7.5	-7.5	17	-8.151	-7.84	14.71
-2.5	-7.5	17	-10.704	-2.263	21.625
2.5	-7.5	17	-10.72	4.621	20.774
7.5	-7.5	17	-8.177	9.261	12.268
-7.5	-2.5	17	-3.327	-10.505	21.893

Продолжение таблицы В.1 – Экспериментальные данные измерения магнитного поля прямоугольного магнита

-2.5	-2.5	17	-4.433	-3.669	32.135
2.5	-2.5	17	-4.293	6.086	30.731
7.5	-2.5	17	-3.189	12.404	18.543
-7.5	2.5	17	3.802	-10.699	21.285
-2.5	2.5	17	5.06	-3.69	30.964
2.5	2.5	17	5.205	6.063	29.663
7.5	2.5	17	4.074	12.493	17.946
-7.5	7.5	17	8.727	-8.206	12.635
-2.5	7.5	17	11.765	-2.91	18.649
2.5	7.5	17	11.819	4.595	17.706
7.5	7.5	17	9.179	9.335	10.399

Таблица Б.2 – Экспериментальные данные измерения сегментного магнита

Положение X, мм	Положение Y, мм	Положение Z, мм	Индукция $B_x$ , мТл	Индукция $B_y$ , мТл	Индукция $B_z$ , мТл
-8.5	-8	10	-54.482	-46.714	7.494
-6.5	-8	10	-52.767	-66.048	29.658
-4.5	-8	10	-33.705	-85.111	61.267
-2.5	-8	10	-5.782	-94.844	85.219
-0.5	-8	10	17.469	-95.631	88.586
1.5	-8	10	34.968	-89.015	78.2
3.5	-8	10	45.337	-77.79	62.566
5.5	-8	10	49.795	-62.855	45.413
7.5	-8	10	48.442	-47.748	27.962
-8.5	-6	10	-72.732	-48.695	15.79
-6.5	-6	10	-71.512	-68.366	48.813
-4.5	-6	10	-47.360	-87.796	92.839

Продолжение таблицы Б.2 – Экспериментальные данные измерения сегментного магнита

Положение X, мм	Положение Y, мм	Положение Z, мм	Индукция $B_x$ , мТл	Индукция $B_y$ , мТл	Индукция $B_z$ , мТл
-2.5	-6	10	-12.192	-99.857	129.174
-0.5	-6	10	18.006	-104.415	139.091
1.5	-6	10	42.358	-101.561	131.051
3.5	-6	10	59.803	-91.562	114.188
5.5	-6	10	69.159	-74.856	90.454
7.5	-6	10	69.068	-56.563	61.607
-8.5	-4	10	-87.157	-40.778	22.673
-6.5	-4	10	-85.877	-57.72	63.801
-4.5	-4	10	-59.161	-71.863	117.237
-2.5	-4	10	-20.433	-81.795	158.372
-0.5	-4	10	13.666	-88.305	173.409
1.5	-4	10	43.388	-89.822	172.591
3.5	-4	10	68.262	-85.285	159.258
5.5	-4	10	85.115	-72.529	135.467
7.5	-4	10	88.563	-55.115	99.214
-8.5	-2	10	-95.697	-27.982	26.804
-6.5	-2	10	-93.809	-37.994	71.979
-4.5	-2	10	-65.717	-46.591	126.916
-2.5	-2	10	-26.279	-51.955	168.326
-0.5	-2	10	9.231	-56.048	188.21
1.5	-2	10	41.174	-58.075	190.793
3.5	-2	10	70.828	-56.475	181.099
5.5	-2	10	93.606	-49.513	158.714
7.5	-2	10	100.864	-37.796	120.453
-8.5	0	10	-98.437	-12.264	27.848



Продолжение таблицы Б.2 – Экспериментальные данные измерения сегментного магнита

Положение X, мм	Положение Y, мм	Положение Z, мм	Индукция $B_x$ , мТл	Индукция $B_y$ , мТл	Индукция $B_z$ , мТл
-6.5	0	10	-95.807	-16.163	74.052
-4.5	0	10	-67.628	-18.455	129.348
-2.5	0	10	-28.819	-19.257	170.167
-0.5	0	10	7.175	-19.405	188.163
1.5	0	10	38.991	-19.072	191.977
3.5	0	10	69.522	-17.782	185.256
5.5	0	10	94.480	-14.618	163.524
7.5	0	10	102.957	-9.871	124.285
-8.5	2	10	-94.895	4.626	53.512
-6.5	2	10	-90.960	6.895	100.277
-4.5	2	10	-62.463	10.214	146.489
-2.5	2	10	-24.864	14.173	169.446
-0.5	2	10	8.530	17.853	173.548
1.5	2	10	39.015	20.54	168.775
3.5	2	10	66.672	21.906	149.114
5.5	2	10	87.795	21.296	119.474
7.5	2	10	94.136	18.472	76.301
-8.5	4	10	-84.492	21.778	45.376
-6.5	4	10	-81.235	30.696	87.803
-4.5	4	10	-55.086	39.86	125.385
-2.5	4	10	-20.027	48.577	145.128
-0.5	4	10	10.028	55.59	146.419
1.5	4	10	36.429	59.75	137.34
3.5	4	10	58.958	59.804	118.302
5.5	4	10	74.181	54.25	90.46

Продолжение таблицы Б.2 – Экспериментальные данные измерения сегментного магнита

7.5	4	10	77.409	43.564	55.455
-8.5	6	10	-68.155	36.192	32.063
-6.5	6	10	-65.356	51.782	63.818
-4.5	6	10	-43.541	66.98	92.387
-2.5	6	10	-14.413	79.265	105.191
-0.5	6	10	10.728	87.078	101.997
1.5	6	10	30.916	89.412	90.059
3.5	6	10	46.480	85.295	72.782
5.5	6	10	55.612	73.957	51.949
7.5	6	10	56.486	57.319	29.95
-8.5	8	10	-49.533	43.823	17.255
-6.5	8	10	-46.527	63.056	35.555
-4.5	8	10	-30.936	81.222	51.796
-2.5	8	10	-10.089	93.201	57.783
-0.5	8	10	8.174	98.064	53.971
1.5	8	10	21.964	95.688	44.946
3.5	8	10	31.977	87.081	33.813
5.5	8	10	37.437	72.88	21.82
7.5	8	10	37.987	56.067	11.017

Таблица Б.3 – Экспериментальные данные измерения катушки электромагнита ( $I_L = 2$  А)

Положение X, мм	Положение Y, мм	Положение Z, мм	Индукция $B_x$ , мТл	Индукция $B_y$ , мТл	Индукция $B_z$ , мТл
-10.0	-10.0	4.0	0.8334	1.3866	-1.9349
-5.0	-10.0	4.0	0.3972	1.5483	-2.5683
0.0	-10.0	4.0	-0.1763	1.6141	-2.8490

Продолжение таблицы Б.3 – Экспериментальные данные измерения катушки электромагнита ( $I_L = 2 \text{ A}$ )

Положение X, мм	Положение Y, мм	Положение Z, мм	Индукция $B_x$ , мТл	Индукция $B_y$ , мТл	Индукция $B_z$ , мТл
5.0	-10.0	4.0	-0.7604	1.5908	-2.7810
10.0	-10.0	4.0	-1.2566	1.4928	-2.3841
-10.0	-5.0	4.0	0.9677	0.9414	-2.3844
-5.0	-5.0	4.0	0.4397	1.0168	-3.0169
0.0	-5.0	4.0	-0.1700	1.0384	-3.2339
5.0	-5.0	4.0	-0.7738	1.0572	-3.2091
10.0	-5.0	4.0	-1.3405	1.0522	-2.8710
-10.0	0.0	4.0	1.0132	0.3456	-2.5289
-5.0	0.0	4.0	0.4541	0.3746	-3.0386
0.0	0.0	4.0	-0.1544	0.3942	-3.2100
5.0	0.0	4.0	-0.7536	0.4123	-3.1432
10.0	0.0	4.0	-1.3344	0.4279	-2.8070
-10.0	5.0	4.0	0.9866	-0.2626	-2.3927
-5.0	5.0	4.0	0.4510	-0.2734	-2.9306
0.0	5.0	4.0	-0.1524	-0.2559	-3.1081
5.0	5.0	4.0	-0.7457	-0.2573	-3.0358
10.0	5.0	4.0	-1.3029	-0.2565	-2.6956
-10.0	10.0	4.0	0.8722	-0.7764	-1.8765
-5.0	10.0	4.0	0.4345	-0.8647	-2.4379
0.0	10.0	4.0	-0.1414	-0.8975	-2.6790
5.0	10.0	4.0	-0.7291	-0.8910	-2.5835
10.0	10.0	4.0	-1.2161	-0.8513	-2.1929

Таблица Б.4 – Экспериментальные данные измерения катушки электромагнита ( $I_L = 4 \text{ A}$ )

Положение X, мм	Положение Y, мм	Положение Z, мм	Индукция $B_x$ , мТл	Индукция $B_y$ , мТл	Индукция $B_z$ , мТл
-10.0	-10.0	4.0	1.8455	2.4529	-3.6676
-5.0	-10.0	4.0	1.0226	2.7676	-4.9101
0.0	-10.0	4.0	-0.0856	2.8908	-5.4365
5.0	-10.0	4.0	-1.2075	2.8669	-5.2995
10.0	-10.0	4.0	-2.1572	2.6741	-4.5068
-10.0	-5.0	4.0	2.1141	1.5955	-4.5006
-5.0	-5.0	4.0	1.0901	1.7325	-5.7182
0.0	-5.0	4.0	-0.0789	1.7771	-6.1861
5.0	-5.0	4.0	-1.2249	1.7926	-6.1094
10.0	-5.0	4.0	-2.3197	1.7735	-5.4542
-10.0	0.0	4.0	2.1918	0.4335	-4.7849
-5.0	0.0	4.0	1.1252	0.4995	-5.7503
0.0	0.0	4.0	-0.0422	0.5200	-6.0912
5.0	0.0	4.0	-1.1857	0.5495	-5.9282
10.0	0.0	4.0	-2.2909	0.5733	-5.2828
-10.0	5.0	4.0	2.1413	-0.7479	-4.4903
-5.0	5.0	4.0	1.1323	-0.7572	-5.5155
0.0	5.0	4.0	-0.0161	-0.7418	-5.8657
5.0	5.0	4.0	-1.1488	-0.7383	-5.7306
10.0	5.0	4.0	-2.2178	-0.7291	-5.0593
-10.0	10.0	4.0	1.9226	-1.7221	-3.4775
-5.0	10.0	4.0	1.1040	-1.9172	-4.5710
0.0	10.0	4.0	0.0003	-1.9554	-4.9975
5.0	10.0	4.0	-1.1077	-1.9551	-4.8355

Продолжение таблицы Б.4 – Экспериментальные данные измерения катушки электромагнита ( $I_L = 4 \text{ A}$ )

Положение X, мм	Положение Y, мм	Положение Z, мм	Индукция $B_x$ , мТл	Индукция $B_y$ , мТл	Индукция $B_z$ , мТл
10.0	10.0	4.0	-2.0557	-1.8791	-4.0658

Таблица Б.5 – Экспериментальные данные измерения катушки электромагнита ( $I_L = -2 \text{ A}$ )

Положение X, мм	Положение Y, мм	Положение Z, мм	Индукция $B_x$ , мТл	Индукция $B_y$ , мТл	Индукция $B_z$ , мТл
-10.0	-10.0	4.0	-1.3549	-0.9347	1.5171
-5.0	-10.0	4.0	-0.9075	-1.1105	2.1649
0.0	-10.0	4.0	-0.3014	-1.1632	2.4539
5.0	-10.0	4.0	0.3214	-1.1739	2.3839
10.0	-10.0	4.0	0.8407	-1.0664	1.9654
-10.0	-5.0	4.0	-1.4763	-0.4959	2.0284
-5.0	-5.0	4.0	-0.9200	-0.5669	2.6518
0.0	-5.0	4.0	-0.2844	-0.5884	2.9075
5.0	-5.0	4.0	0.3497	-0.6101	2.8635
10.0	-5.0	4.0	0.9333	-0.5995	2.5193
-10.0	0.0	4.0	-1.5093	0.1080	2.2127
-5.0	0.0	4.0	-0.9303	0.0796	2.7118
0.0	0.0	4.0	-0.2921	0.0637	2.8908
5.0	0.0	4.0	0.3357	0.0460	2.8250
10.0	0.0	4.0	0.9398	0.0389	2.4854
-10.0	5.0	4.0	-1.4825	0.7457	2.0884
-5.0	5.0	4.0	-0.9283	0.7460	2.6149
0.0	5.0	4.0	-0.2903	0.7398	2.8106

Продолжение таблицы Б.5 – Экспериментальные данные измерения катушки электромагнита ( $I_L = -2 \text{ A}$ )

Положение X, мм	Положение Y, мм	Положение Z, мм	Индукция $B_x$ , мТл	Индукция $B_y$ , мТл	Индукция $B_z$ , мТл
5.0	5.0	4.0	0.3358	0.7537	2.7399
10.0	5.0	4.0	0.9259	0.7453	2.3832
-10.0	10.0	4.0	-1.3542	1.2811	1.5783
-5.0	10.0	4.0	-0.8933	1.3764	2.1412
0.0	10.0	4.0	-0.2851	1.3995	2.3752
5.0	10.0	4.0	0.3209	1.4013	2.2748
10.0	10.0	4.0	0.8432	1.3542	1.8601

Таблица Б.6 – Экспериментальные данные измерения катушки электромагнита ( $I_L = -4 \text{ A}$ )

Положение X, мм	Положение Y, мм	Положение Z, мм	Индукция $B_x$ , мТл	Индукция $B_y$ , мТл	Индукция $B_z$ , мТл
-10.0	-10.0	4.0	-2.3895	-2.0184	3.2143
-5.0	-10.0	4.0	-1.4873	-2.3317	4.4461
0.0	-10.0	4.0	-0.2923	-2.4474	4.9706
5.0	-10.0	4.0	0.9043	-2.4428	4.8398
10.0	-10.0	4.0	1.9349	-2.2638	4.0352
-10.0	-5.0	4.0	-2.6054	-1.1804	4.1431
-5.0	-5.0	4.0	-1.4936	-1.3180	5.3388
0.0	-5.0	4.0	-0.2594	-1.3709	5.8019
5.0	-5.0	4.0	0.9762	-1.4028	5.7185
10.0	-5.0	4.0	2.1308	-1.3798	5.0521
-10.0	0.0	4.0	-2.6406	-0.0284	4.4333
-5.0	0.0	4.0	-1.4996	-0.1035	5.3840
0.0	0.0	4.0	-0.2564	-0.1336	5.7312

Продолжение таблицы Б.6 – Экспериментальные данные измерения катушки электромагнита ( $I_L = -4 \text{ A}$ )

Положение X, мм	Положение Y, мм	Положение Z, мм	Индукция $B_x$ , мТл	Индукция $B_y$ , мТл	Индукция $B_z$ , мТл
5.0	0.0	4.0	0.9644	-0.1631	5.5942
10.0	0.0	4.0	2.1257	-0.1786	4.9325
-10.0	5.0	4.0	-2.6019	1.1947	4.1652
-5.0	5.0	4.0	-1.5059	1.2113	5.2004
0.0	5.0	4.0	-0.2675	1.2008	5.5635
5.0	5.0	4.0	0.9552	1.2047	5.4330
10.0	5.0	4.0	2.1013	1.1931	4.7446
-10.0	10.0	4.0	-2.3568	2.2554	3.1870
-5.0	10.0	4.0	-1.4650	2.4569	4.2688
0.0	10.0	4.0	-0.2756	2.4847	4.6943
5.0	10.0	4.0	0.9264	2.4970	4.5330
10.0	10.0	4.0	1.9432	2.3910	3.7459