

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

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>Разработка и реализация учебно-исследовательского стенда по отработке алгоритмов управления робототехническими устройствами при наличии неудерживающих связей</b>

УДК 681.865.8-529:004.42

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Е62	Кургинов Ярослав Олегович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филлипас Александр Александрович	к.т.н., доцент		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Зарницын Александр Юрьевич	-		

#### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

#### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

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

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

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

Форма представления работы:

Бакалаврская работа
---------------------

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

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

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

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

#### СОСТАВИЛ:

##### Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас Александр Александрович	К.Т.Н.		

##### Консультант (при наличии)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Зарницын Александр Юрьевич			

#### СОГЛАСОВАНО:

##### Руководитель ООП

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



<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>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Обзор и анализ существующих решений.</li> <li>2) Разработка структурной схемы.</li> <li>3) Разработка функциональной схемы.</li> <li>4) Разработка принципиальной электрической схемы подключения датчиков и исполнительных механизмов</li> <li>5) Разработка системы технического зрения</li> <li>6) Разработка графического интерфейса пользователя</li> <li>7) Вывод математической модели стенда.</li> <li>8) Разработка системы автоматического управления стендом.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Структурная схема, принципиальная схема, блок-схема алгоритма работы системы технического зрения</p>

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский Владимир Юрьевич, доцент ОСТН ШБИП, к.э.н.
Социальная ответственность	Матвиенко Владимир Владиславович, ассистент ООД ШБИП

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


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

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Зарницын Александр Юрьевич			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Е62	Кургинов Ярослав Олегович		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8Е62	Кургинов Ярослав Олегович

<b>Школа</b>	<b>ИШИТР</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОАР</b>
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.06 Мехатроника и Робототехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Использовать действующие ценники и договорные цены на потребленные материальные и информационные ресурсы, а также указанную в МУ величину тарифа на эл. энергию
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	—
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Действующие ставки единого социального налога и НДС (см. МУ, ставка дисконтирования $i=0.1$ )

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

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

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Оценка конкурентоспособности технических решений</li> <li>2. Матрица SWOT</li> <li>3. Альтернативы проведения НИ</li> <li>4. График проведения и бюджет НИ - <u>выполнить</u> Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ - <u>выполнить</u></li> </ol>
---

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	К. Э. Н.		25.02.2020

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8E62	Кургинов Ярослав Олегович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8Е62	Кургинову Ярославу Олеговичу

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

Тема ВКР:

<b>Разработка и реализация учебно-исследовательского стенда по отработке алгоритмов управления робототехническими устройствами при наличии неударяющих связей</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является лабораторный стенд. Областью применения стенда является проведение лабораторных и исследовательских работ.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <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>	ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования [1]. ГОСТ 21889-76. Система «человек – машина». Кресло человека оператора. Общие эргономические требования [2]. ГОСТ 23000-78. Система «человек – машина». Пульты управления. Общие эргономические требования [3]. ГОСТ EN 894-3-2012. Безопасность машин. Общие эргономические требования к оформлению индикаторов и органов управления [4].
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Микроклимат Уровень шума Отсутствие или недостаток естественного света Освещенность Перенапряжение анализаторов Повышенная напряженность электростатического поля
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Загрязнение литосферы твердыми отходами: бумагой, оргстеклом, электронными компонентами.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Наиболее вероятная ЧС - пожар Первичными средствами пожаротушения являются огнетушители и пожарный шланг. Так как в аудиториях много электронных приборов, огнетушители углекислотные.

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



**Задание выдал консультант:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Е62	Кургинов Ярослав Олегович		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 70 страниц, 21 рисунок, 13 таблиц, список используемых источников содержит 26 наименований.

Ключевые слова: уравнения Лагранжа 2-го рода, система управления, линейно-квадратичный регулятор, лабораторный стенд, неударживающие связи.

Цель работы – разработка программно-аппаратного обеспечения лабораторного стенда для отработки алгоритмов управления роботами при наличии неударживающих связей.

В процессе выполнения работы была разработана программно- аппаратная база для реализации алгоритмов управления стендом, была разработана система технического зрения для получения состояния стенда, разработан интерфейс пользователя для получения и сохранения информации со стенда. Была получена и проверена на адекватность математическая модель стенда, на ее основе синтезирована система автоматического управления. Полученная система управления была реализована и проверена в режимах стабилизации и слежения.

## Содержание

Введение.....	13
1 Программно-аппаратное обеспечение .....	14
1.1 Аналогии.....	14
1.2 Описание стенда .....	16
1.3 Описание аппаратной части .....	17
1.4 Структурная схема стенда .....	19
1.5 Принципиальная схема .....	20
1.6 Система технического зрения .....	21
1.7 Графический интерфейс .....	22
2 Математическая модель .....	23
2.1 Уравнения динамики.....	23
2.2 Кинематические уравнения .....	25
2.3 Проверка адекватности модели.....	28
3 Синтез линейно-квадратичного регулятора .....	33
3.1 Линеаризация математической модели системы .....	33
3.2 Дискретизация модели .....	36
3.3 Синтез регулятора .....	37
3.4 Проверка полученной системы управления в режиме слежения .....	42
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	46
4.1 Организация и планирование работ .....	46
4.2 Расчет продолжительности работ .....	47
4.3 Расчет сметы затрат на выполнение проекта.....	50
4.3.1 Расчет затрат на материалы .....	50
4.3.2 Затраты на заработную плату .....	50
4.3.3 Затраты на единый социальный налог .....	51
4.3.4 Расчет затрат на электроэнергию .....	51
4.3.5 Амортизационные расходы.....	52
4.3.6 Непосредственно учитываемые расходы .....	52
4.3.7 Расчет прочих расходов.....	53
4.3.8 Расчет общей себестоимости .....	53

4.3.9	Расчет прибыли .....	53
4.3.10	Расчет НДС .....	53
4.4	Оценка экономической эффективности проекта.....	54
4.5	Вывод по финансовому менеджменту, ресурсоэффективности и ресурсосбережению .....	54
5	Социальная ответственность .....	54
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	55
5.2	Производственная безопасность.....	55
5.2.1	Отклонения параметров микроклимата.....	57
5.2.2	Превышение уровня шума .....	58
5.2.3	Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	59
5.2.4	Поражение электрическим током.....	60
5.2.5	Повышенная напряженность электростатического поля.....	60
5.2.6	Перенапряжение анализаторов.....	60
5.3	Экологическая безопасность .....	61
5.3.1	Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду ....	61
5.3.2	Мероприятия по защите окружающей среды .....	62
5.4	Безопасность в ЧС .....	62
5.4.1	Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований .....	62
5.4.2	Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и средства пожаробезопасности .....	63
5.5	Вывод по разделу.....	63
	Заключение .....	64
	Conclusion.....	65
	Список литературы .....	66
	Приложение А (обязательное) Принципиальная схема подключения датчиков и исполнительных механизмов.....	69
	Приложение Б (обязательное) Блок-схема алгоритма работы системы технического зрения .....	70

## Введение

Работа целых классов роботов происходит в условиях неударивающих связей. К ним относятся шагающие роботы, роботы выполняющие операции переноса и манипулирования объектов без захвата. Для таких роботов потеря связи может привести к потере роботом устойчивости или выпадению объекта переноса и манипуляции. Все это обуславливает необходимость разработки алгоритмов управления такими роботами с учетом влияния неударивающих ограничений.

На данный момент решением проблем управления роботами в условиях неударивающих ограничений занимается ряд отечественных и зарубежных ученых. В работах представлены различные алгоритмы управления ими [1 - 5]. Дается математическое описание условий потери контактов [6]. Некоторые статьи рассматривают такие ограничения, как дискретную часть системы и разрабатывают алгоритмы управления для работы с гибридными системами [1]. Некоторые работы посвящены исследованию парадокса Пайнлива [7, 8] – возникающего при взаимодействии объекта с неударивающей связью небольших по амплитуде колебаний.

Можно выделить ряд недостатков в некоторых работах:

- в работах не учтено влияние на систему трения и не дано обоснование этому, что затрудняет определение области применимости подходов;

- в работах приведены результаты моделирования различных физических процессов и систем управления ими, но не приведены результаты валидации моделей и апробации алгоритмов на реальных системах. Не даются рекомендации по применению алгоритмов с учетом неоднородностей и неточностей в идентификации моделей.

- в ходе исследования пренебрегается внутренняя скрытая динамика объектов манипулирования и переноса.

- не существует математического описания парадокса Пайнлива. Однако даются рекомендации, основанные на теории бифуркаций, по определению

области возникновения парадокса и построению систем управления для поддержания состояния объекта управления в области пространства состояния, где парадокс не возникает.

Все вышеперечисленное обуславливает актуальность исследования проблем управления с неудерживающими связями и разработки стенда для решения вопросов, связанных со спецификой построения систем управления роботами, учитывающими неудерживающие ограничения.

Помимо исследовательской деятельности на предполагаемом стенде возможно проведение лабораторных работ по дисциплинам теория автоматического управления, моделирование механических систем, микропроцессорная техника, компьютерное зрение.

Цель работы: разработка стенда для исследования алгоритмов управления роботами в условиях неудерживающих связей.

Задачи:

- разработка математической модели стенда;
- разработка системы управления стендом;
- разработка системы компьютерного зрения для получения состояния объекта управления;
- реализация системы управления на реальном объекте для доказательства работоспособности стенда и валидации его математической модели;
- разработка графического интерфейса для передачи состояния объекта и записи полученных значений в файл.

## **1 Программно-аппаратное обеспечение**

### **1.1 Аналоги**

Можно выделить два основных аналога предлагаемого стенда:

- платформа Стюарта – Гью;
- система шарик – плоскость.

Платформа Стюарта – Гью (рисунок 1) представляет собой параллельный манипулятор с шестью степенями свободы. Если укомплектовать данную

платформу объектом манипулирования, она может быть использована в качестве стенда. Однако, в силу наличия шести степеней свободы, данная платформа избыточна по сравнению с системой шарик – плоскость.



Рисунок 1 – Платформа Стюарта – Гью

Система «шарик – плоскость» является прямым аналогом представляемого стенда. Однако, в ходе поиска доступных к продаже готовых стендов «шарик – плоскость» была найдена установка от компании Quanser [9] (рисунок 2), однако на запрос продажи компания не ответила. Стоит отметить, что существуют устройства «шарик - плоскость» сделанные радиолюбителями или студентами в рамках своих квалификационных работ, однако такие устройства единичны и не доступны к продаже.



Рисунок 2 – Стенд от компании Quanser

## 1.2 Описание стенда

Структура стенда представлена на рисунке 3. Стенд представляет собой подвижную плоскость Б, закрепленную на неподвижном основании А, посредством вертикальной стойки В. По плоскости может свободно перекатываться шарик Ж. Воздействовать на шарик напрямую нельзя. Для воздействия на шарик используется сила тяжести, действие которой зависит от углового положения плоскости. Для изменения углового положения плоскости используются двигатели Г1 и Г2, соединенные с плоскостью посредством дисков Д1 и Д2 и подвижных стержней Е1 и Е2. Для реализации алгоритмов управления требуется получение обратной связи о положении шарика, для этого используется видеокамера З, закрепленная над плоскостью.



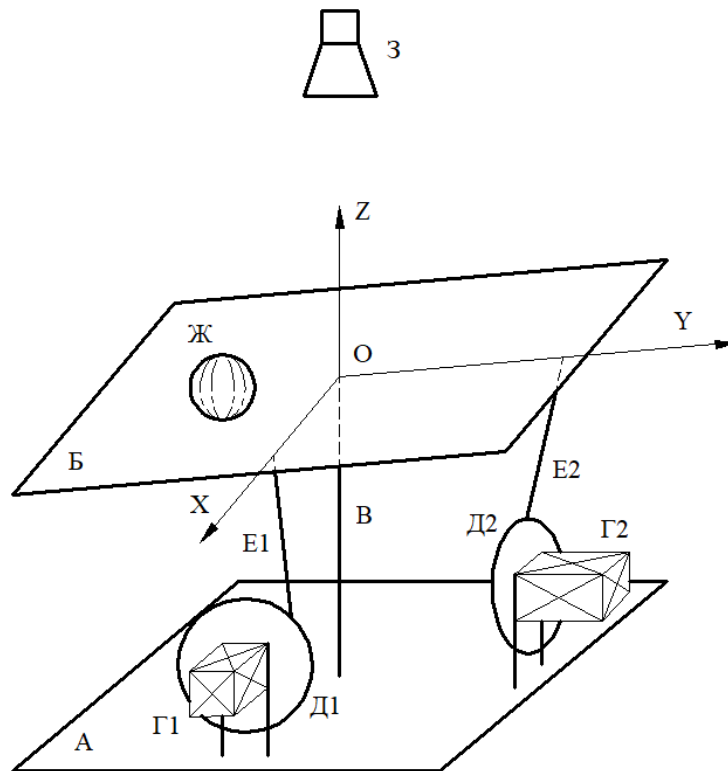


Рисунок 3 – Общая структура стенда

Следует отметить, что существуют возможности исполнения стенда с тензоподложкой и видеокамерой в качестве датчиков обратной связи. Тензоподложка является более точным и быстросредействующим датчиком обратной связи для определения положения шарика в случае данного стенда. Однако, далеко не всегда удастся установить тензоподложку на объект управления. Это обуславливает актуальность применения видеокамеры в данной разработке. Управление по видеокамере является более перспективным с точки зрения универсальности применимости к задачам управления с неударживающими связями.

### 1.3 Описание аппаратной части

Для реализации полученных законов управления необходимо настроить датчики обратной связи и реализовать алгоритм обработки информации с них, а также сконфигурировать микроконтроллер для управления исполнительными механизмами.

В качестве датчика обратной связи положения и скорости шарика используется видеокамера и алгоритм технического зрения. Для получения информации о положении валов двигателей используются энкодеры. Исполнительными механизмами являются комплектные шаговые приводы. Для считывания информации с энкодеров, а также для управления двигателями используется микроконтроллер STM32f303VCT6. Для корректного решения задачи стабилизации необходима калибровка углового положения плоскости, так как инкрементальный энкодер – датчик относительного положения вала. Для целей калибровки используется трехосевой гироскоп и трех осевой акселерометр. Характеристики всех комплектующих, используемых в стенде приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики комплектующих элементов

Комплектующие	Характеристики
Шаговые приводы Ezi – Step BT – 42L	Напряжение питания: 24 В Ток (вместе с драйвером): 1,6 А Разрешение: 10000 шаг/об (по умолчанию). Момент удержания: 0,42 Нм
Микроконтроллер STM32F303VCT6	Частота процессора: 72 МГц Логический уровень: 3,3 В Периферия: USART, Таймеры, ПДП, АЦП, ЦАП, USB 2.0, I2C, SPI.
Энкодер OMRON E6H-CWZ3E	Напряжение питания: 5 – 24 В Разрешение: 1500 импульс/об.
IMU MPU9250	Диапазон измерения акселерометра: $\pm 2, 4, 8, 16g$ Диапазон измерений гироскопа: $\pm 250, 500, 1000, 2500 \text{ } ^\circ/c$

Продолжение таблицы 1 - Характеристики комплектующих элементов

Комплектующие	Характеристики
Видеокамера	Разрешение: 8 Мп Частота работы: 30 кадр/с Возможность приближения изображения.

#### 1.4 Структурная схема стенда

Структурная схема разрабатываемого устройства представлена на рисунке 4. В качестве объекта управления выступает механическая система «шарик - плоскость». Снятое видеокамерой изображение отправляется в компьютер по интерфейсу USB 2.0, где системой технического зрения рассчитываются координаты шарика и скорость его движения. Далее по интерфейсу USART полученные данные передаются в управляющей контроллер, где производится расчет управляющих воздействий. Управляющие воздействия передаются на исполнительные механизмы посредством частотной модуляции прямоугольного сигнала. Исполнительные механизмы, механически соединенные с объектом управления, изменяют угол наклона плоскости, тем самым воздействуя на шарик. Информация о положении валов приводов считывается с помощью инкрементных энкодеров, сигнал которых передается в форме прямоугольных импульсов в контроллер и обрабатывается периферией управляющего контроллера.

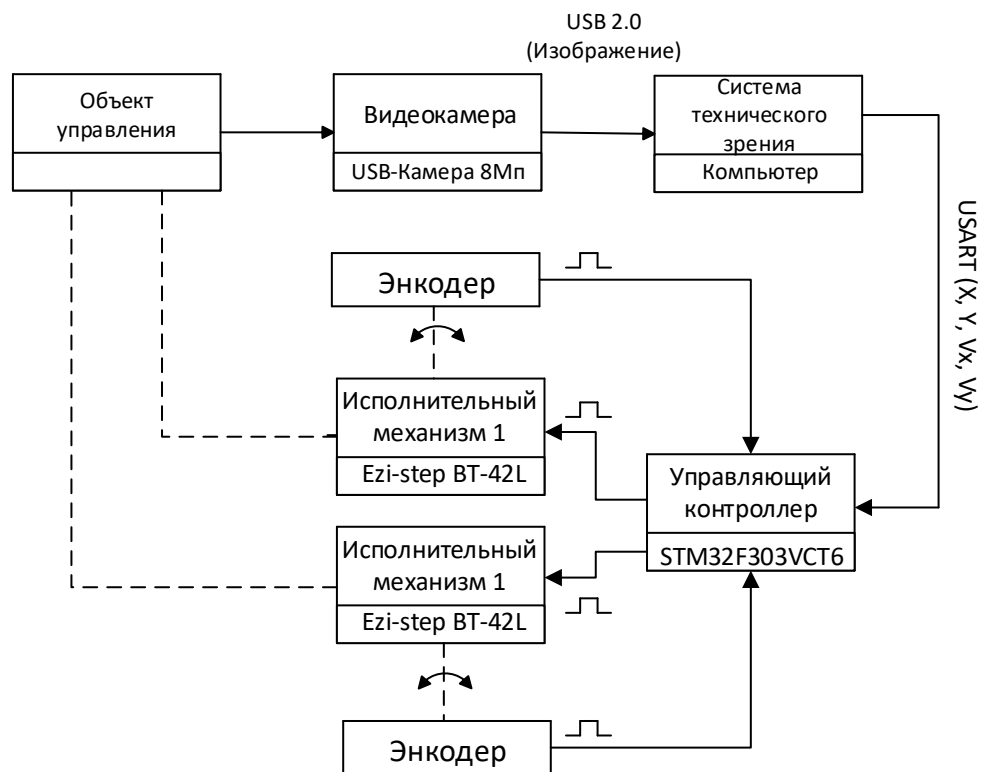


Рисунок 4 – Структурная схема разрабатываемой системы

## 1.5 Принципиальная схема

В приложении А представлена принципиальная электрическая схема подключения датчиков и исполнительных механизмов. Для подключения компьютера к контроллеру необходимо соединить информационную линию Tx со стороны компьютера и линию Rx со стороны контроллера, а также объединить нулевые точки, при этом питание интерфейса происходит со стороны компьютера. Подключение информационной линии возможно к выводам контроллера, которые могут быть использованы периферией устройства, номера данных выводов можно узнать в документации на контроллер [10].

Для работы энкодеров необходимо подать питание на соответствующие выводы. Согласно информационной пластинке на корпусе энкодеров, их напряжение питания составляет 5 Вольт, а контроллер оперирует логическом уровне 3.3 Вольта. Однако, выводы контроллера толерантны к напряжению 5 Вольт, что позволяет не прибегать к использованию преобразователей логических уровней для их согласования. Информационные линии энкодеров

также должны быть подключены к выводам, которые могут использоваться соответствующей периферией.

Передача данных между модулем инерциальных датчиков осуществляется посредством шины I2C, для работы которой необходимо подтянуть сигнальные линии к плюсу питания посредством резистора, однако на модуле уже встроен резистор номиналом 10 кОм. Следует отметить, что при подключении нескольких подобных модулей к одной шине, результирующее сопротивление будет падать, ввиду параллельности подключения подтягивающих резисторов, но так как в данной работе используется только один датчик, данный модуль может быть использован. Так же на аппаратном уровне чипа инерциальных датчиков предусмотрена возможность подключения двух датчиков на одну шину, при этом адрес чипа можно изменять, подавая на выход ADD логическую единицу или ноль. Для определенности подтянем выход ADD к логическому нулю [11].

Силовые схемы драйверов приводов питаются от напряжения 24 Вольта. Управление скоростью вращения двигателей осуществляется посредством частотной модуляции прямоугольного сигнала. При этом для вращения по часовой стрелке необходимо генерировать сигнал на выходе CW драйвера, иначе на выходе CCW, единовременная генерация сигналов на обоих каналах недопустима и приводит к срабатыванию защитного модуля драйвера [12]. Генерация прямоугольных импульсов осуществляется аппаратными ШИМ – генераторами контроллера, следовательно, подключение драйверов также возможно к выводам контроллера соединенным с соответствующей периферией.

## **1.6 Система технического зрения**

Блок – схема алгоритма работы технического зрения приведена в приложении Б.

Для нахождения шарика, в силу его геометрии, целесообразно использовать преобразование Хафа, которое заключается в нахождении на изображении контуров, удовлетворяющих уравнению окружности. Так как для нахождения

контуров изображения используется чувствительный к шумам оператор Кенни, необходимо предварительно провести фильтрацию изображения. Далее изображение преобразуется из базиса RGB в однотонное и подвергается преобразованию оператором Кенни. Полученные контуры подвергаются преобразованию Хафа. В случае, если в результате преобразования объект не найден, то алгоритм сохраняет его предыдущее местонахождение или нуль, в случае отсутствия предыдущих данных. Далее алгоритмом, путем численного дифференцирования находится скорость шарика и полученные данные отправляются на контроллер посредством COM – порта. Если пользователь не нажал клавишу выхода из алгоритма, то действие алгоритма повторяется.

## **1.7 Графический интерфейс**

Для удобства получения и анализа информации из управляющего контроллера, а также для сохранения информации, был реализован графический интерфейс пользователя, который представлен на рисунке 5.

Окно пользовательского интерфейса может быть разделено на 4 секции:

- секция управления COM – портом;
- секция области построения графической информации;
- секция управления областью построения;
- секция управления записью в файл.

В первой секции пользователь может задавать имя порта, и управлять его открытием и закрытием.

Во второй секции представлены четыре графических поля, где происходит построение графиков переданной из контроллера информации.

В третьей секции представлен интерфейс работы с полями графиков, представляющий собой кнопки для построения графикой, автоматическим изменением диапазонов отображения графиков, сбросом информации, отображенной на графиках, а также полями ввода новых диапазонов графиков для ручного изменения масштаба графиков.

В четвертой секции предусмотрена возможность задавать имя файла и управлять его открытием и закрытием.

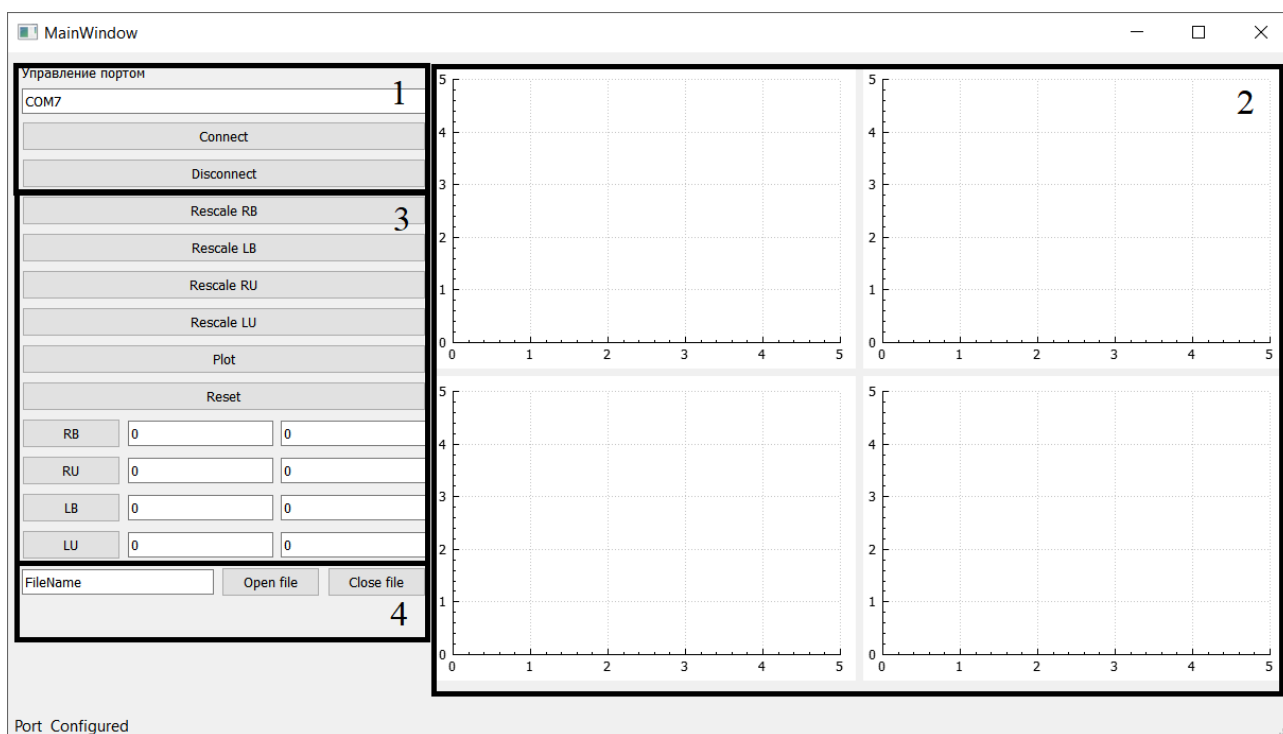


Рисунок 5 – Окно графического интерфейса

## 2 Математическая модель

Синтез системы управления удобно проводить с использованием математической модели объекта управления. Математическую модель можно разделить на две части: уравнения динамики и кинематические уравнения.

### 2.1 Уравнения динамики

Уравнения динамики получим с помощью уравнений Лагранжа 2 рода:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, i = \overline{1, n} \quad (1)$$

, где  $L$  – функция Лагранжа, определяемая, как разность кинетической и потенциальной энергии;

$\dot{q}_i$  – обобщенные скорости системы;

$q_i$  – обобщенные скорости и координаты системы;

$Q_i$  – обобщенные непотенциальные силы, действующие на систему;

$n$  – количество степеней свободы системы.

Кинетическая энергия системы складывается из энергии качения шарика  $E_K$ , энергии вращения плоскости  $E_{\Pi}$  и энергии вращения шарика, вызванное вращением плоскости  $E_{\text{ш}}$ :

$$T = 0.7m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{w^T \cdot J_{\Pi} \cdot w}{2} + \frac{w^T \cdot J_{\text{ш}} \cdot w}{2} = E_K + E_{\Pi} + E_{\text{ш}} \quad (2)$$

, где  $m$  – масса шарика, кг;

$\dot{x}$  и  $\dot{y}$  – скорости шарика в локальной системе координат, м/с;

$w$  – вектор угловых скоростей плоскости;

$J_{\text{ш}}$  – тензор инерции шарик;

$J_{\Pi}$  – тензор инерции плоскости.

$$E_{\text{ш}} = (\dot{\alpha} \quad \dot{\beta} \quad 0) \begin{pmatrix} 0.4mR^2 + my^2 & myx & 0 \\ mxy & 0.4mR^2 + mx^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4mR^2 + m(x^2 + y^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ 0 \end{pmatrix} = \\ = 0.4mR^2(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + \frac{m(y\dot{\alpha} + x\dot{\beta})^2}{2} \quad (3)$$

, где  $\dot{\alpha}$  и  $\dot{\beta}$  – угловые скорости плоскости по осям X и Y, рад/с.

$$E_{\Pi} = (\dot{\alpha} \quad \dot{\beta} \quad 0) \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{I_{xx}\dot{\alpha}^2}{2} + \frac{I_{yy}\dot{\beta}^2}{2} \quad (4)$$

, где  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$  и  $I_{zz}$  – главные моменты инерции плоскости относительно осей локальной системы координат, кг · м<sup>2</sup>.

Потенциальная энергия системы представляет собой потенциальную энергию шарика, так как центр масс плоскости неподвижен и находится в точке крепления плоскости к стойке, следовательно, его потенциальная энергия не меняется:

$$U = mg(-\sin\beta \cdot x - \sin\alpha \cdot y) \quad (5)$$

, где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;



$\alpha$  и  $\beta$  – углы поворота плоскости вокруг глобальной системы координат, рад.

Подставив (3) и (4) в (2) и найдя разность между (2) и (5), функцию Лагранжа можно записать следующим образом:

$$L = 0.7m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{I_{xx} \cdot \dot{\alpha}^2}{2} + \frac{I_{yy} \cdot \dot{\beta}^2}{2} + 0.4mR^2(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) + \\ + 0.5my^2\dot{\alpha}^2 + 0.5mx^2\dot{\beta}^2 + mxy\dot{\alpha}\dot{\beta} + \\ + mg(\sin\beta \cdot x + \sin\alpha \cdot y) \quad (6)$$

Подставляя (6) в уравнения (1), получим следующий набор дифференциальных уравнений, представляющих собой уравнения движения системы:

$$1.4m\ddot{x} - mg\sin\beta - mx\dot{\beta}^2 - my\dot{\alpha}\dot{\beta} = 0, \\ 1.4m\ddot{y} - mg\sin\alpha - my\dot{\alpha}^2 - mx\dot{\alpha}\dot{\beta} = 0, \\ I_{xx} \cdot \ddot{\alpha} + 0.8mR^2\ddot{\alpha} + 2my\dot{y}\dot{\alpha} + my^2\ddot{\alpha} + m\dot{x}y\dot{\beta} + mxy\ddot{\beta} + mxy\dot{\beta} - \\ - m \cdot g \cdot y \cdot \cos\alpha = M_x, \\ I_{yy} \cdot \ddot{\beta} + 0.8mR^2\ddot{\beta} + 2mx\dot{x}\dot{\beta} + mx^2\ddot{\beta} + m\dot{x}y\dot{\alpha} + mxy\ddot{\alpha} + mxy\dot{\alpha} - \\ - m \cdot g \cdot x \cdot \cos\beta = M_y$$

Так как исполнительными механизмами являются шаговые двигатели, удобно использовать первые два уравнения движения, а динамику углов поворота плоскости удобно получить из кинематических соотношений и динамики приводов, аппроксимированной апериодическим звеном первого порядка.

## 2.2 Кинематические уравнения

Уравнения кинематики получим, применяя геометрическое описание следующей схемы, изображенной на рисунке 6.

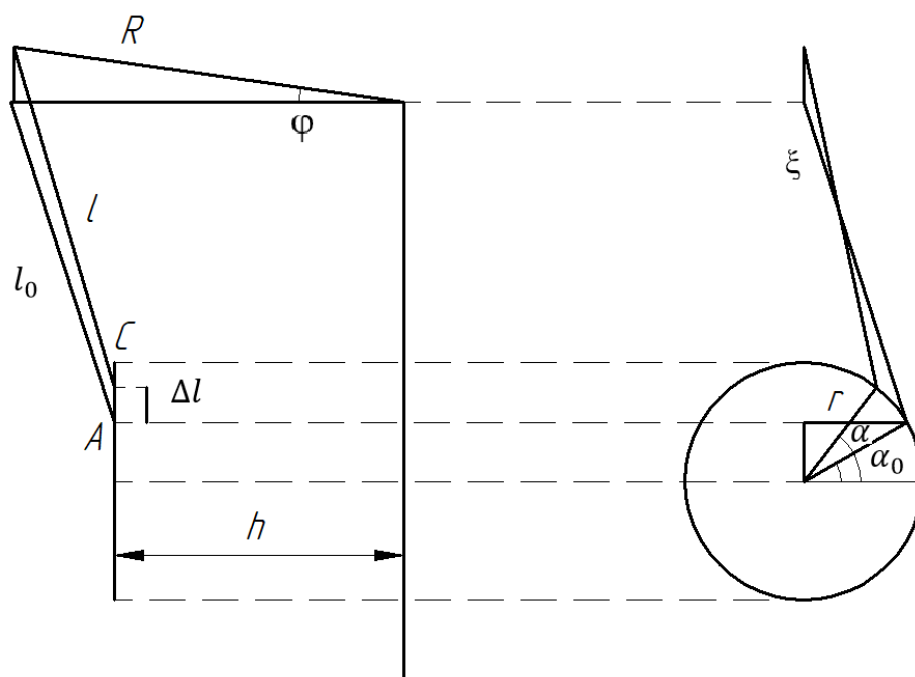


Рисунок 6 – Кинематическая схема станда

, где  $\alpha$  – угол поворота вала двигателя, рад;

$r$  – радиус диска, надетого на вал двигателя для передачи вращения стойке, м;

$\xi$  – длина подвижного стержня, соединяющей посредством шарнира плоскость и диск, м;

$h$  – расстояние от вала двигателя до центра плоскости, м;

$l$  – проекция  $\xi$  на фронтальную плоскость, м;

$\varphi$  – угол поворота плоскости, рад;

$\Delta l$  – отрезок на фронтальной проекции, которое проходит точка зацепления при повороте двигателя на угол  $\alpha - \alpha_0$ , м.

Все обозначения с нулевым индексом представляют аналогичные им величины, для которых угол наклона плоскости равен нулю. А и С – вспомогательные точки на фронтальной проекции, А – характеризует точку зацепления стойки с диском для угла поворота плоскости равном 0, точка С характеризует точку зацепления в общем случае.

Найдем координаты точки А:

$$A = -\sqrt{l_0^2 - (R - h)^2}$$

Найдем координаты точки С:

$$C = -\sqrt{l^2 - (R \cdot \cos\varphi - h)^2} + R \cdot \sin\varphi$$

Найдем  $\Delta l$ , так как А является константой, раскрывать ее не будем:

$$\Delta l = C - A = R \cdot \sin\varphi - \sqrt{l^2 - (R \cdot \cos\varphi - h)^2} - A$$

С другой стороны  $\Delta l$  можно выразить следующим образом:

$$\Delta l = r \cdot \sin\alpha - r \cdot \sin\alpha_0 \quad (7)$$

Примем:

$$\Delta l + A = -K \quad (8)$$

и перепишем предыдущее равенство следующим образом:

$$(R \cdot \sin\varphi + K) = \sqrt{l^2 - (R \cdot \cos\varphi - h)^2}$$

Возведем в квадрат:

$$(R \cdot \sin\varphi)^2 + 2R \cdot K \cdot \sin\varphi + K^2 = l^2 - (R \cdot \cos\varphi)^2 + 2R \cdot \cos\varphi \cdot h - h^2$$

Перенесем влево и преобразуем:

$$R^2 + 2R \cdot K \cdot \sin\varphi + K^2 - l^2 - 2R \cdot h \cdot \cos\varphi + h^2 = 0$$

Примем:

$$R^2 + K^2 - l^2 + h^2 = B,$$

$$2R \cdot K = S, \quad (9)$$

$$2R \cdot h = C$$

и перепишем предыдущее равенство:

$$S \cdot \sin\varphi - C \cdot \cos\varphi + B = 0$$

Перенесем косинус вправо, заменим его используя основное тригонометрическое тождество и возведем в квадрат:

$$(S \cdot \sin\varphi + B)^2 = C^2(1 - \sin^2\varphi)$$

Раскроем скобки и перенесем все влево:

$$(S \cdot \sin\varphi)^2 + 2S \cdot B \cdot \sin\varphi + B^2 - C^2 + (C \cdot \sin\varphi)^2 = 0,$$

$$(S^2 + C^2) \cdot \sin\varphi + 2S \cdot B \cdot \sin\varphi + (B^2 - C^2) = 0$$

Решим квадратное уравнение:

$$D = 4S^2 \cdot B^2 - 4(S^2 + C^2) \cdot (B^2 - C^2),$$
$$\sin\varphi = \frac{-2S \cdot B \pm 2\sqrt{S^2 \cdot B^2 - (S^2 + C^2)(B^2 - C^2)}}{2(S^2 + C^2)}$$

Приняв  $\varphi = 0$  и подставив в уравнение выше, найдем, что искомое уравнение имеет следующий вид:

$$\sin\varphi = \frac{-2S \cdot B + 2\sqrt{S^2 \cdot B^2 - (S^2 + C^2)(B^2 - C^2)}}{2(S^2 + C^2)}$$

Тогда угол поворота равен:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{-2S \cdot B + 2\sqrt{S^2 \cdot B^2 - (S^2 + C^2)(B^2 - C^2)}}{2(S^2 + C^2)}\right) \quad (10)$$

Уравнения 7-10 описывают кинематические соотношения угла поворота двигателя и угла поворота плоскости.

### 2.3 Проверка адекватности модели

Система, модель которой была получена, не устойчива, что затрудняет проверку валидацию модели. Для проведения валидации модели проведем синтез закона управления на модели и реализуем полученную систему управления на реальном объекте.

На основании следующих утверждений был проведен структурный синтез регулятора, структурная схема которого представлена на рисунке 7:

- частота работы камеры 30 fps, частота обработки кадров – 25 Гц. Моделирование показало, что такой частоты недостаточно для стабилизации системы. Для увеличения быстродействия системы воспользуемся системой подчиненного регулирования;

- данные, получаемые с камеры, зашумлены импульсными помехами, что затрудняет применение Д – части ПИД – регулятора, особенно для контура скорости, где дифференцирование происходит два раза;

- угол поворота плоскости, скорость и положение шарика имеют астатизм не ниже первого порядка, следовательно, применение И – составляющей регуляторов – нецелесообразно.

Система управления представляет собой подчиненное регулирование с последовательной коррекцией по положению, скорости шарика и угловому положению плоскости.

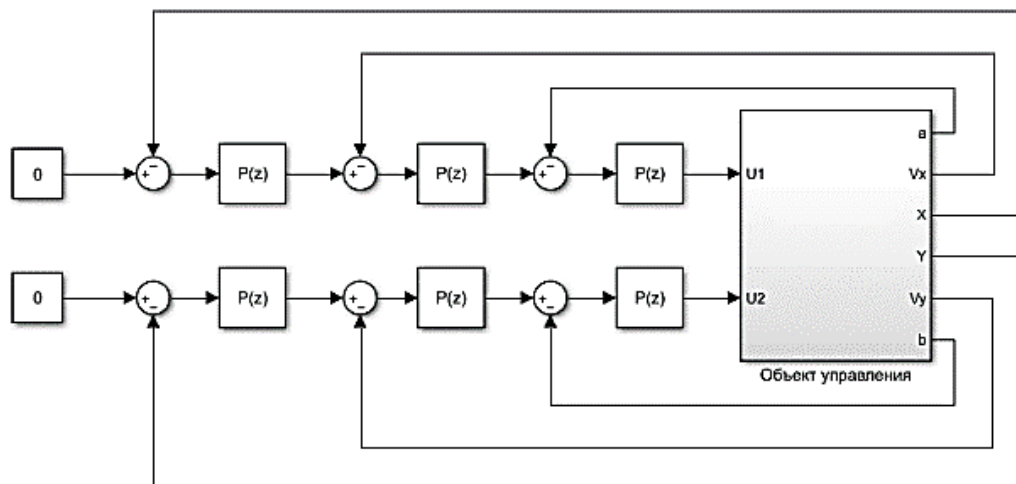


Рисунок 7 – Структурная схема регулятора

Результат моделирования системы управления представлен на рисунке 8. На данном графике представлен переходный процесс системы, при движении из начального, отклоненного от нуля, положения в нулевое.

В результате реализации системы управления и снятия экспериментальных данных со стенда, были получены переходные характеристики, представленные на рисунке 9.

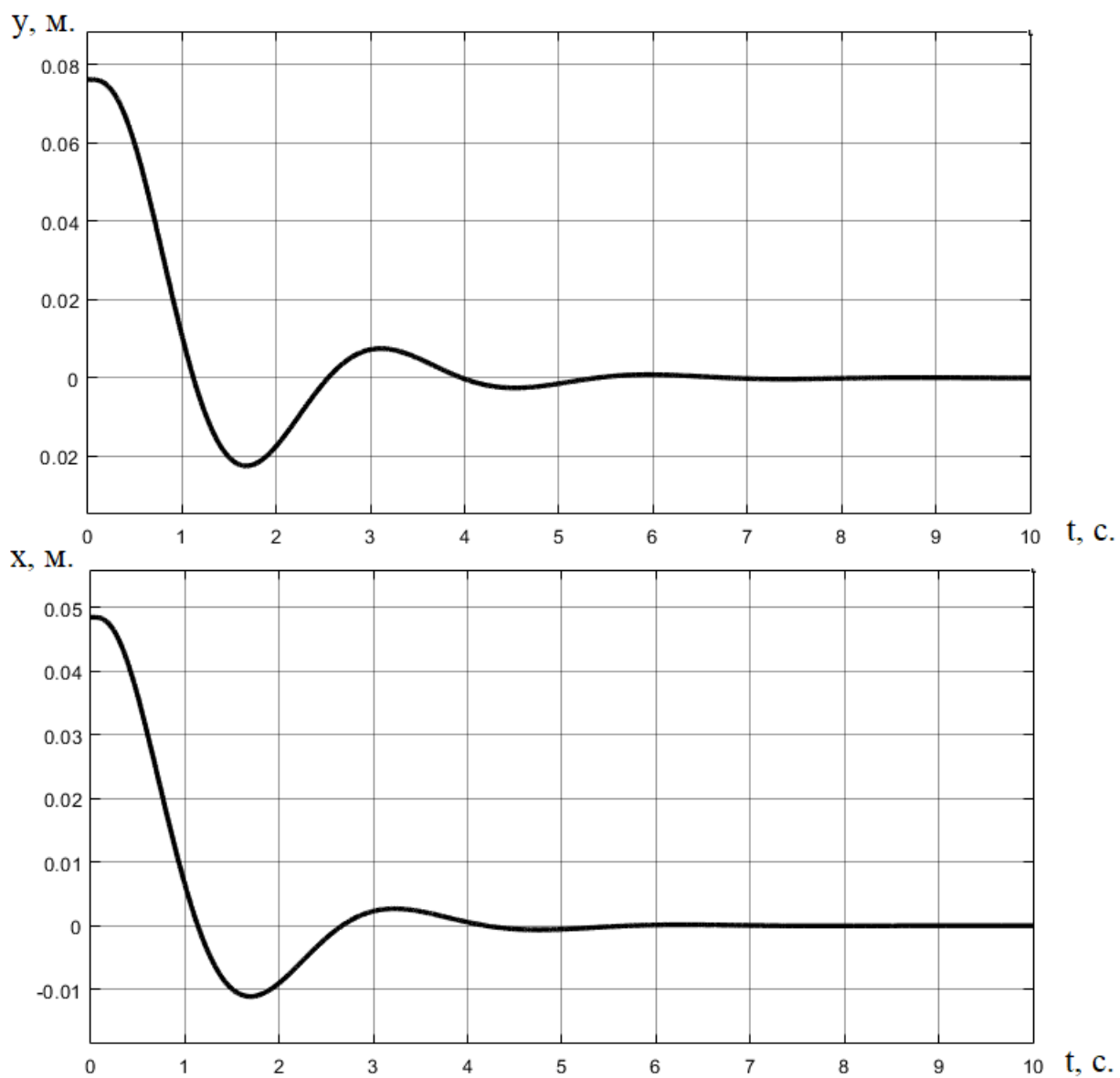


Рисунок 8 – Графики переходных процессов, снятые с модели (верхний – по координате  $y$ , нижний – по  $x$ )

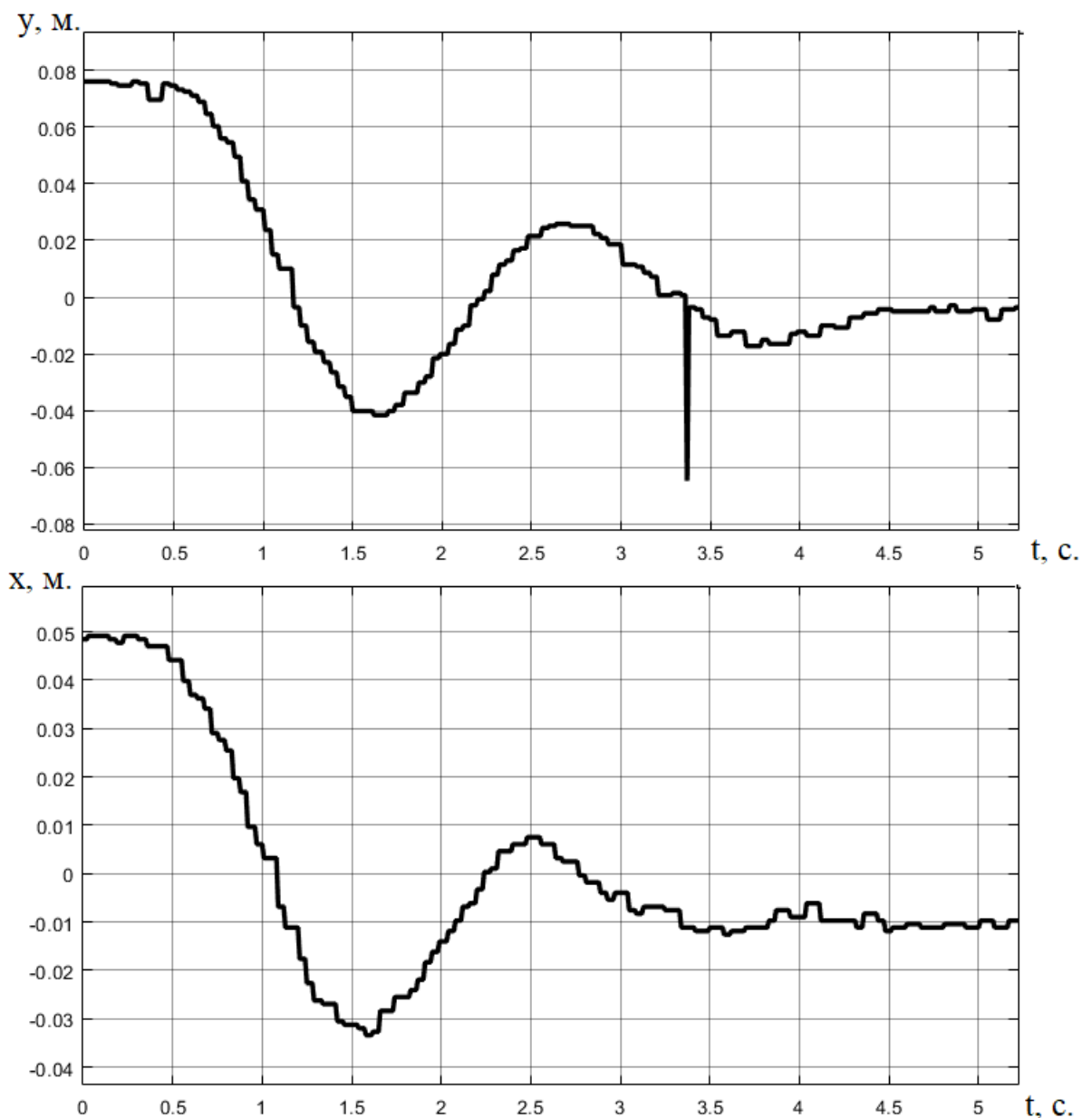


Рисунок 9 – Графики переходных процессов, полученные с реального объекта (верхний – по оси  $y$ , нижний – по оси  $x$ )

Из графиков на рисунке 9 видно наличие статической ошибки, что объясняется наличием трения качения, которое не учтено в модели. Так же можно заметить, что пики перерегулирования в реальной системе больше, чем в модели. Это можно объяснить тем, что запас устойчивости системы меньше, чем предполагаемый. В результате анализа системы были выявлены задержки в канале обратной связи, вызванные буферизацией изображения камерой, временем обработки изображения и временем передачи изображения из персонального компьютера в контроллер управления.

Внесем задержку и трение в модель системы и воспользуемся Simulink/Parameter Estimation для оценки этих величин.

На рисунке 10 представлены результаты оценки данных величин. Как видно математическая модель адекватна объекту управления.

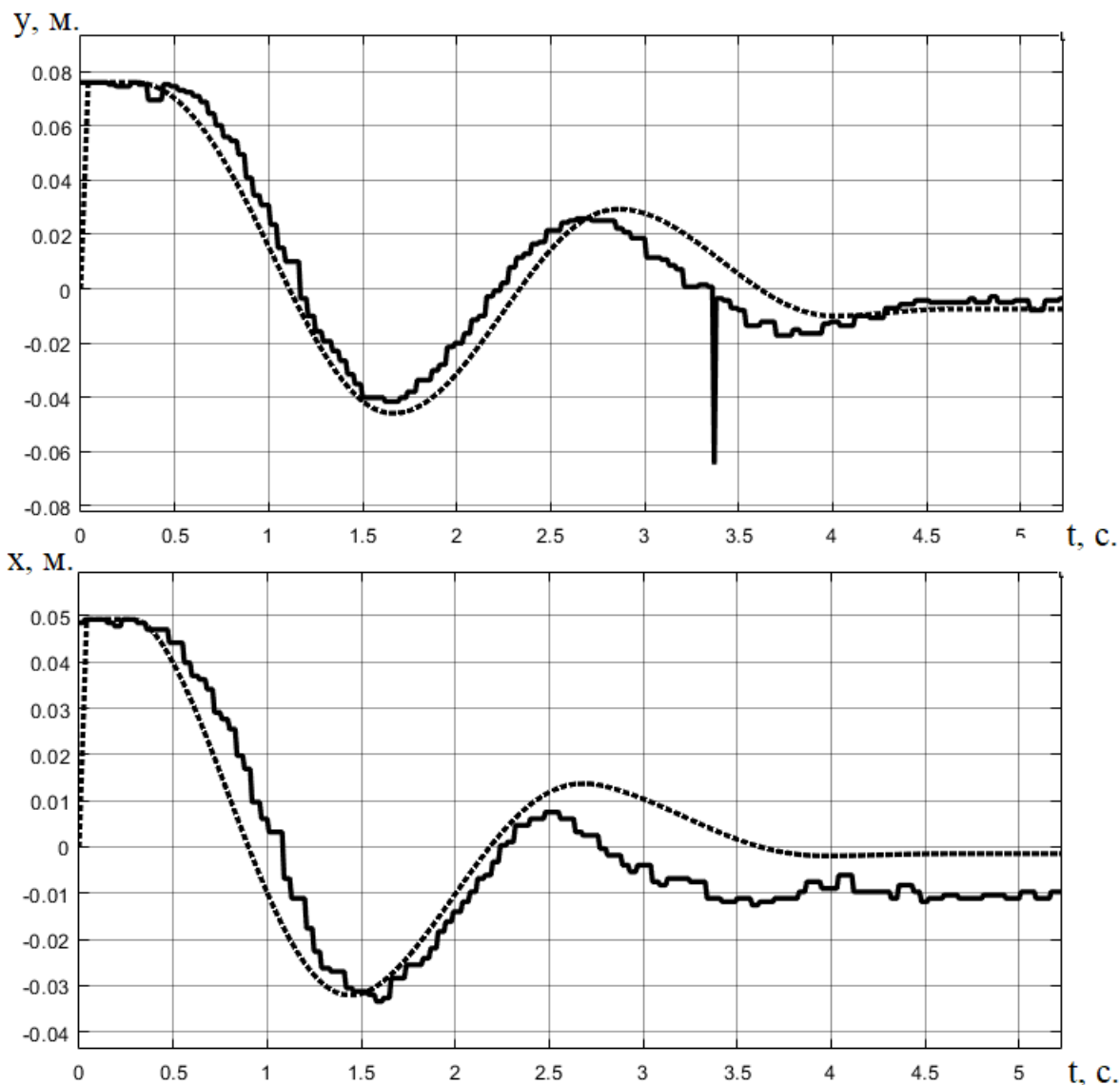


Рисунок 10 – Сравнительные графики переходных процессов реального объекта (сплошные линии) и модели (пунктирные линии) для координат  $x$  (нижний график) и  $y$  (верхний график)

Для оценки степени расхождения модели и реальной системы воспользуемся следующей формулой:

$$\delta_{x_i} = \left| 1 - \frac{\int_0^T |x_i| dt}{\int_0^T |\hat{x}_i| dt} \right| \cdot 100\%, x_i \in \{x1, x3\}$$



, где переменная с крышечкой обозначает соответствующую переменную состояния, снятую с реального объекта.

Для данной модели рассчитаны следующие показатели:

$$\delta_{x_1} = 7,4\%$$

$$\delta_{x_2} = 11,2\%$$

### 3 Синтез линейно-квадратичного регулятора

Для синтеза линейно-квадратичного регулятора необходимо линеаризовать систему в окрестности рабочей точки.

#### 3.1 Линеаризация математической модели системы

Еще раз перепишем математическую модель системы и линеаризуем ее.

$$1.4m\ddot{x} - mg\sin\beta - mx\dot{\beta}^2 - my\dot{\alpha}\dot{\beta} = 0,$$

$$1.4m\ddot{y} - mg\sin\alpha - my\dot{\alpha}^2 - mx\dot{\alpha}\dot{\beta} = 0,$$

$$\frac{\varphi(s)}{u1(s)} = \frac{k_\varphi}{s(T_\varphi s + 1)},$$

$$\frac{\psi(s)}{u2(s)} = \frac{k_\psi}{s(T_\psi s + 1)},$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{-2S \cdot B + 2\sqrt{S^2 \cdot B^2 - (S^2 + C^2)(B^2 - C^2)}}{2(S^2 + C^2)}\right), \quad (11)$$

$$R^2 + K^2 - l^2 + h^2 = B,$$

$$2R \cdot K = S,$$

$$2R \cdot h = C,$$

$$\Delta l + A = -K,$$

$$\Delta l = r \cdot \sin\alpha - r \cdot \sin\alpha_0$$

Для линеаризации математической модели переведем ее в форму Коши.

Для этого примем:

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T = [y \ \dot{y} \ x \ \dot{x} \ \varphi \ \dot{\varphi} \ \psi \ \dot{\psi}]^T$$

Тогда модель (11) можно записать следующим образом

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{1.4} (g \cdot \sin(\alpha(x_7)) + x_1 \cdot \alpha^2(x_7) \cdot x_8^2 + x_3 \cdot \alpha(x_7) \cdot \beta(x_5) \cdot x_6 \cdot x_8) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{1.4} (g \cdot \sin(\beta(x_5)) + x_3 \cdot \dot{\beta}^2(x_5) \cdot x_6^2 + x_1 \cdot \dot{\beta}(x_5) \cdot \dot{\alpha}(x_7) \cdot x_6 \cdot x_8) \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = -\frac{x_6}{T_\varphi} + \frac{u_2}{T_\varphi} \\ \dot{x}_7 = x_8 \\ \dot{x}_8 = -\frac{x_8}{T_\psi} + \frac{u_1}{T_\psi} \end{cases} \quad (12)$$

Линеаризацию будем проводить в окрестности рабочей точки:

$$X = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \varphi_0 \ 0 \ \psi_0 \ 0]^T$$

, где  $\varphi_0$  и  $\psi_0$ - углы поворота двигателей, соответствующие нулевому угловому положению плоскости, рад.

Разложив уравнения (12) в ряд Тейлора запишем линейную систему в отклонениях:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{1.4} g \cdot \dot{\alpha}(\psi_0) \cdot (x_7 - \psi_0) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{1.4} g \cdot \dot{\beta}(\varphi_0) (x_5 - \varphi_0) \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = -\frac{x_6}{T_\varphi} + \frac{u_2}{T_\varphi} \\ \dot{x}_7 = x_8 \\ \dot{x}_8 = -\frac{x_8}{T_\psi} + \frac{u_1}{T_\psi} \end{cases}$$

Для того чтобы записать эти уравнения в форме пространства состояний необходимо сместить систему фазовых координат, отняв из текущих вектор начальных условий.

После преобразования координат можно записать систему в форме пространства состояний:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{1.4}g \cdot \dot{\alpha}(\psi_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{1}{1.4}g \cdot \dot{\beta}(\varphi_0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_\varphi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_\psi} & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{T_\varphi} \\ 1 & 0 \\ \frac{1}{T_\psi} & 0 \end{pmatrix}$$

На рисунке 11 представлен графики сравнения линеаризованной модели (штриховая) и исходной нелинейной (сплошная). Из графика видно, что отличие незначительно.

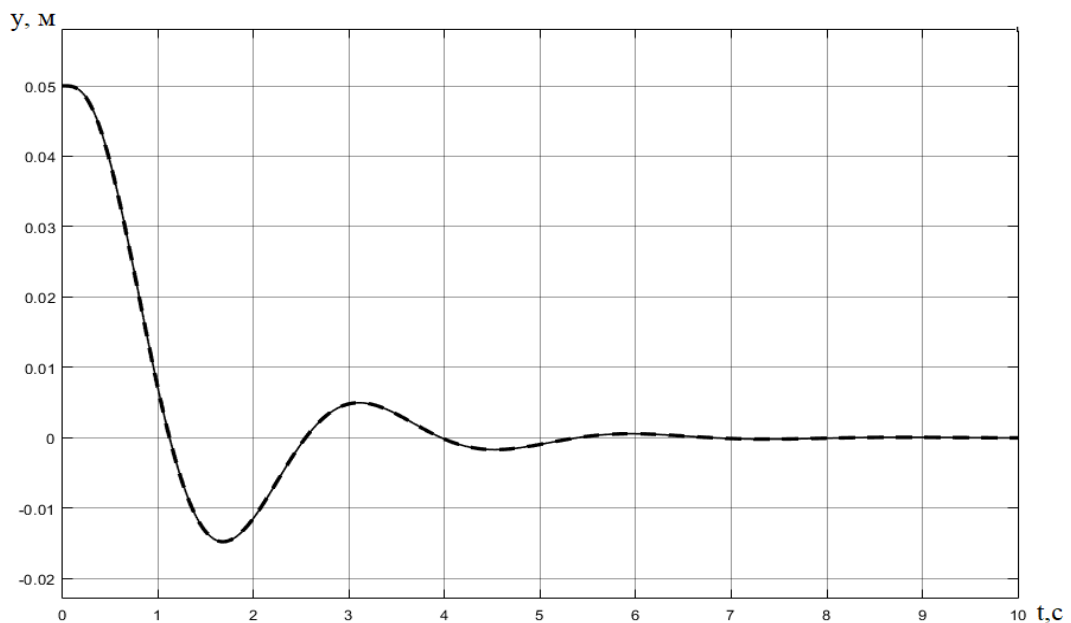


Рисунок 11 – Сравнительный график переходных процессов линеаризованной (штриховая линия) и нелинейной моделей (сплошная)

### 3.2 Дискретизация модели

Для реализации цифровой системы управления необходим дискретный регулятор. Дискретный регулятор может быть получен путем дискретизации непрерывного регулятора, рассчитанного с помощью методик синтеза непрерывных регуляторов, или с помощью методик синтеза дискретных регуляторов. В данной работе будет использован второй способ. Однако, для это необходимо дискретизировать систему.

В силу того, что частота получения сигнала обратной связи с камеры составляет 25 Гц, примем период дискретизации равным  $1/25 = 0.04$  с.

В [12] приведены три метода дискретизации непрерывных систем, записанных в форме пространств состояния:

- аналитический метод;
- метод Эйлера;
- метод Тастина.

Аналитический метод наиболее точен и не зависит от периода дискретизации, но несет под собой необходимость вычисления матричной экспоненты, что является ресурсоемкой процедурой. Однако, в силу того, что система работает в окрестности рабочей точки, где отклонения нелинейной системы и линеаризованной малозначительны, коэффициенты регулятора не будут пересчитываться в контроллере на каждой итерации работы системы управления. Следовательно, дискретизацию можно провести один раз в процессе синтеза и для дискретизации применим аналитический метод.

Матричную экспоненту посчитаем численно, разложив ее в ряд Маклорена и ограничившись пятым членом разложения. Тогда матрица состояния  $F$  и матрица управления  $G$  дискретной системы будут иметь следующий вид:

$$F = e^{AT} \approx \sum_{i=0}^5 \frac{A^i \cdot T^i}{i!},$$
$$G = A^{-1}(F - E)B \approx \sum_{i=1}^5 \frac{A^{i-1} \cdot T^i}{i!}$$

, где  $E$  – единичная матрица;

$T$  – период квантования, с.

На рисунке 12 представлены 2 графика, один (красный) – представляет собой выход с непрерывного объекта управления, другой (зеленый) – является выходом с дискретной системы. Из графиков видно, что полученная в результате дискретизации система полностью соответствует исходной.

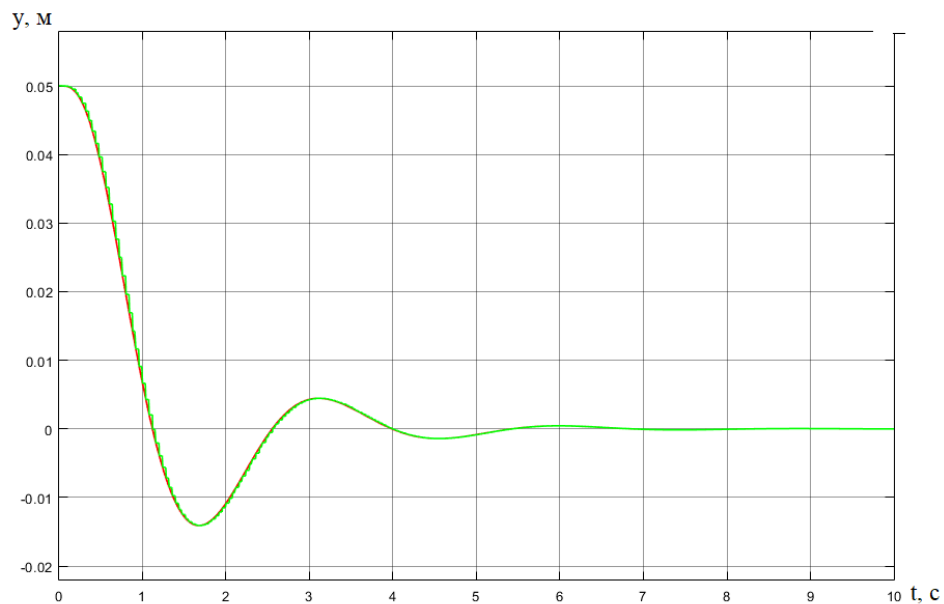


Рисунок 12 – Сравнительный график выходов непрерывной и дискретной моделей

### 3.3 Синтез регулятора

Линейно-квадратичный регулятор (LQR) [13] – это оптимальный регулятор состояния с линейной обратной связью, минимизирующий квадратичный критерий качества:

$$J = \int_0^{+\infty} (X^T Q X + u^T R u) dt$$

, где  $X$  – вектор состояния;

$u$  – вектор управляющих воздействий;

$Q$  и  $R$  – матрицы весовых коэффициентов.

Коэффициенты регулятора для линейной стационарной системы могут быть получены в результате решения алгебраического уравнения Риккати.

Необходимые показатели качества переходного процесса достигаются путем изменения весовых коэффициентов в подынтегральном выражении функционала. Для дискретных систем существует дискретный аналог непрерывного уравнения Риккати, а его метод его решения реализован в функции `dlqr` программного пакета Matlab.

Для настройки регулятора примем коэффициенты подынтегральной функции как единичные матрицы соответствующих размерностей. Полученный в результате переходный процесс можно представлен на рисунке 13.

Как было сказано ранее при изменении соответствующих коэффициентов подынтегральной функции можно добиться изменения показателей качества переходного процесса. Примем коэффициент  $Q$  равным  $100 * E$ , где  $E$  – единичная матрица, а  $R = 1 * E$ . Переходные процессы для данных настроек практически неразличимы. Это обосновывается тем, что выходная координата является пассивной, т.е. для нее не существует канала управления и она управляется косвенно, посредством изменения угла наклона плоскости. В то же время данный угол ограничен в пределах  $[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$ , что ограничивает максимальное быстродействие системы.

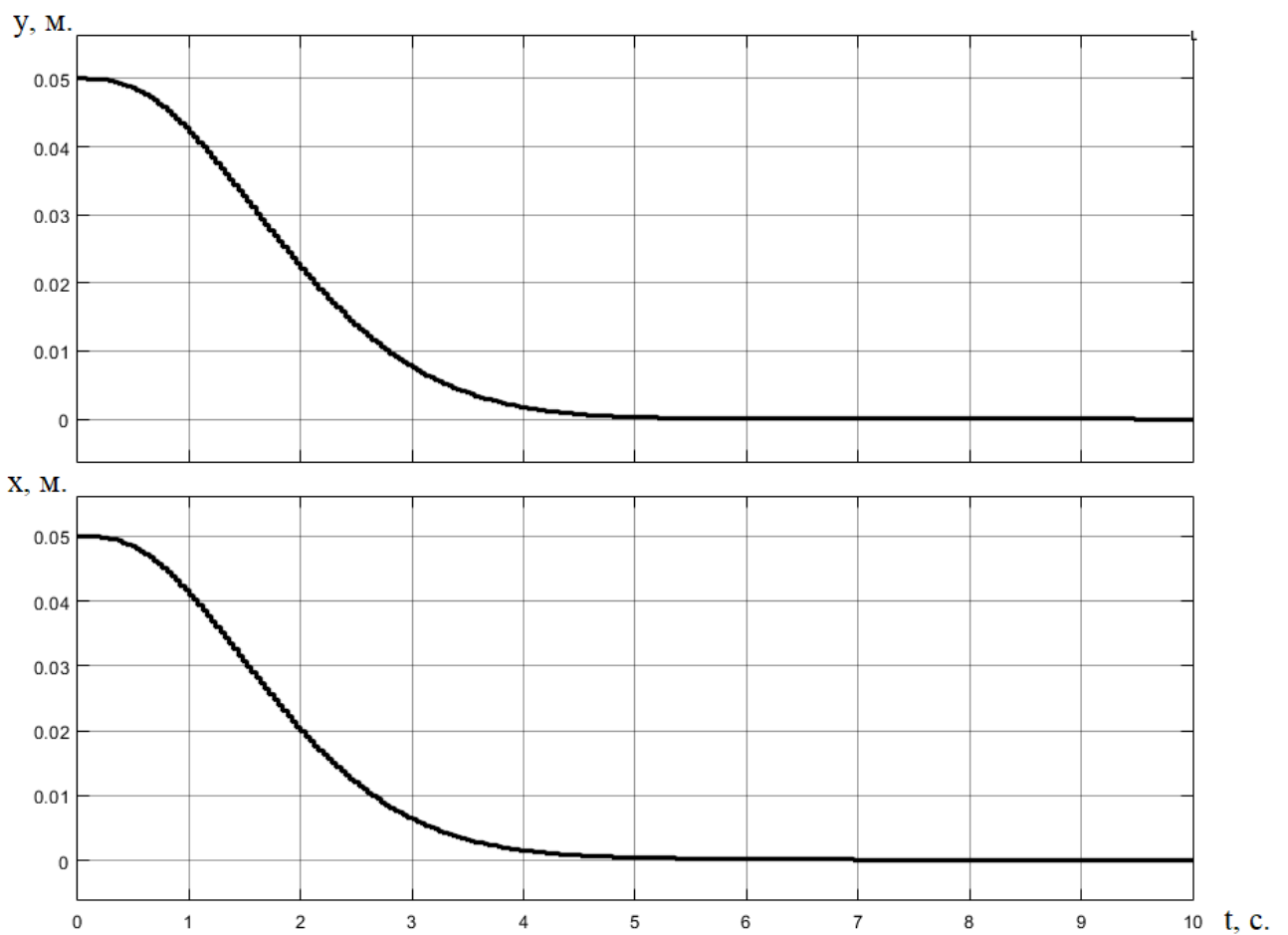


Рисунок 13 – Переходный процесс линейризованной системы с LQR

Подставим полученный регулятор в исходную нелинейную систему и построим переходный процесс (рисунок 14).

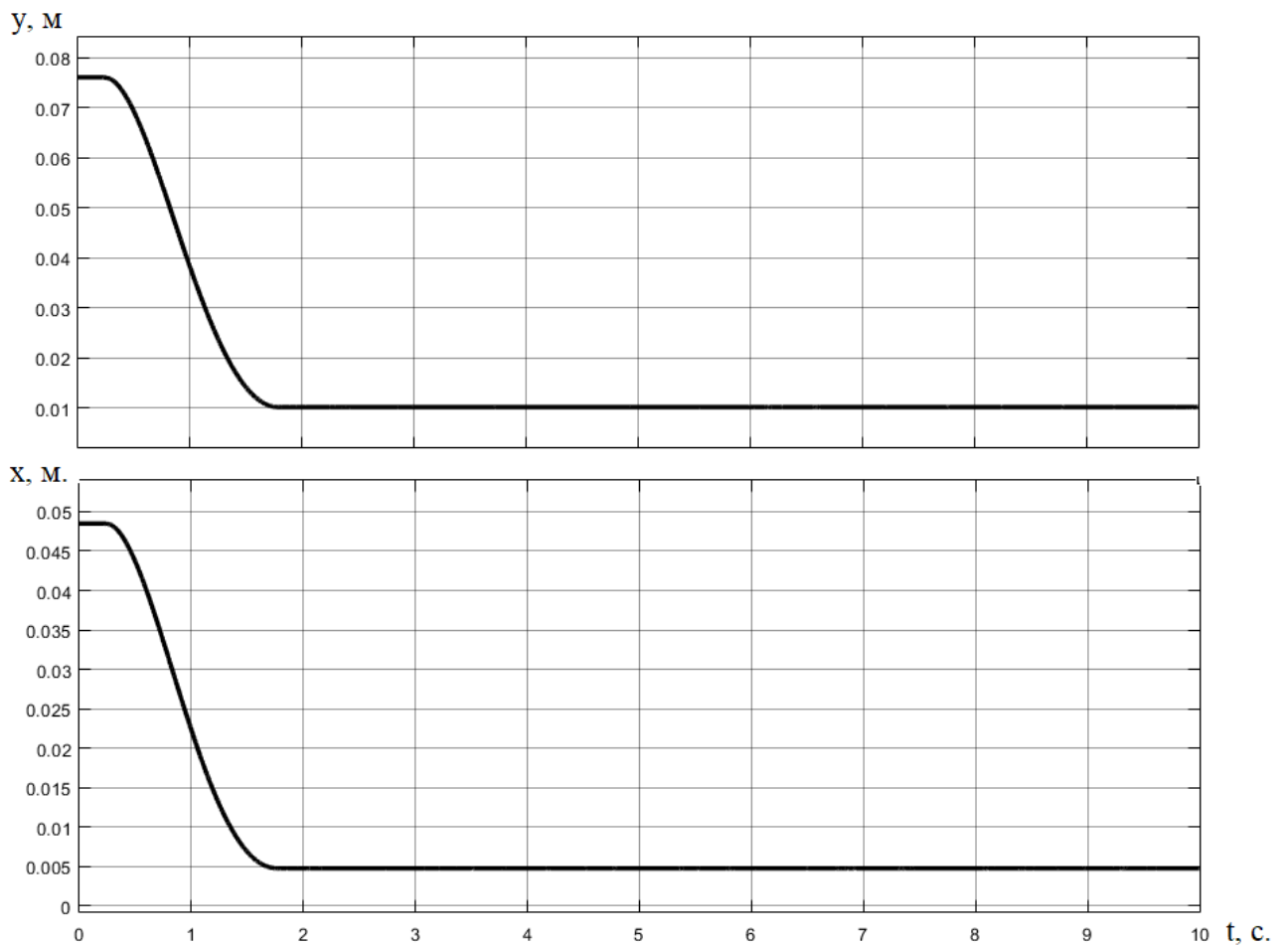


Рисунок 14 – Переходный процесс в исходной системе

Как видно, из-за воздействия трения переходный процесс затухает быстрее, однако оно же приводит к появлению статической ошибки. Для того, чтобы обеспечить лучшие статические характеристики расширим вектор состояния системы, добавив туда интегралы от координат:

$$\dot{x}_9 = x_1,$$

$$\dot{x}_{10} = x_3$$

Проведем настройку регулятора еще раз с единичными матрицами весовых коэффициентов. Работа такого регулятора на нелинейной системе показана на рисунке 15.



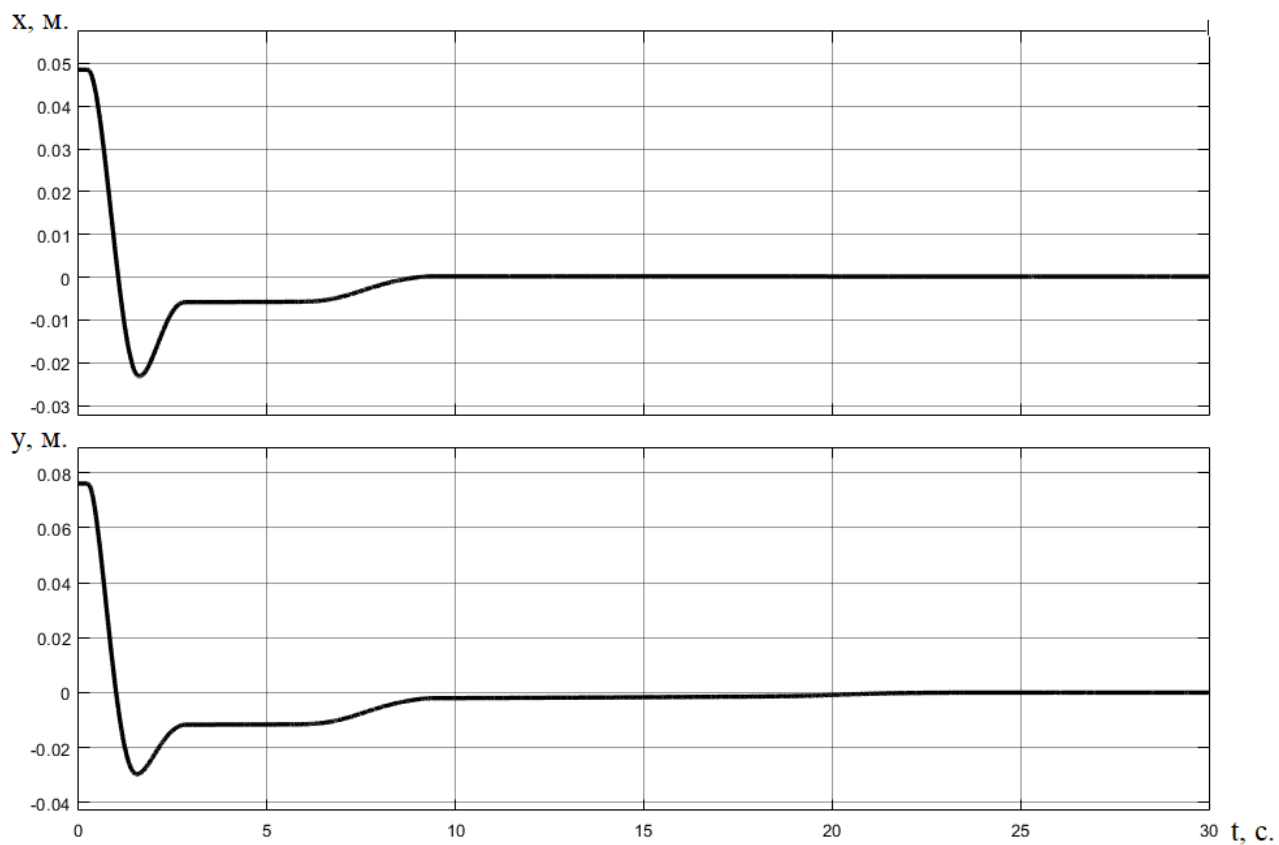


Рисунок 15 – Переходный процесс системы с расширенным вектором состояния

На рисунке 16 приведен график переходного процесса реальной системы управления с расширенным вектором состояния.

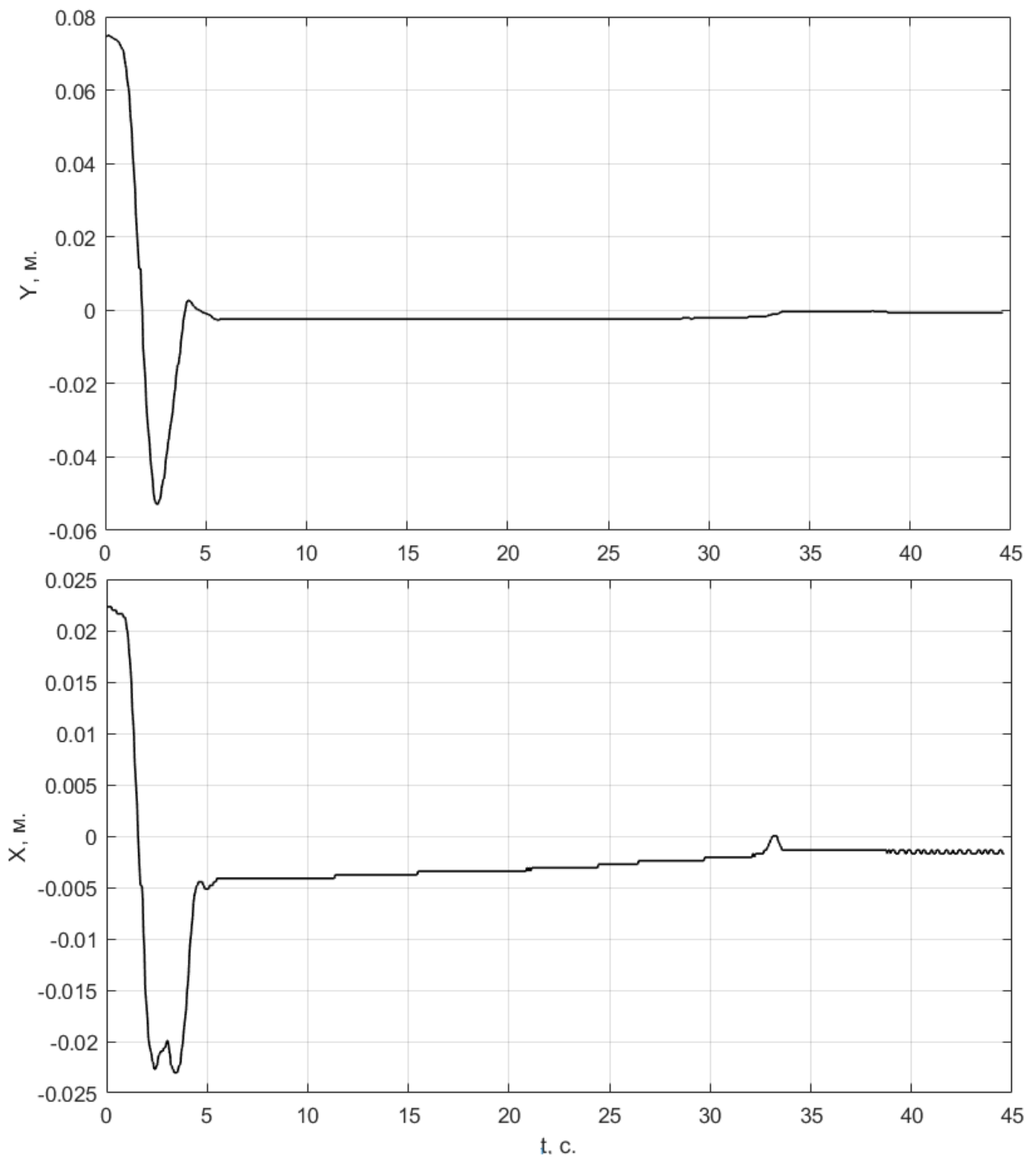


Рисунок 16 – Переходный процесс реальной системы с расширенным вектором состояния

### 3.4 Проверка полученной системы управления в режиме слежения

Теперь проведем проверку полученной системы управления в режиме слежения. В качестве траектории движения возьмем окружность с периодом 6 секунд и радиусом 0,05 м. На рисунке 17 приведены графики отработки системой

заданной траектории. На рисунке 18 приведен смоделированный график траектории, которую шарик проходит на плоскости.

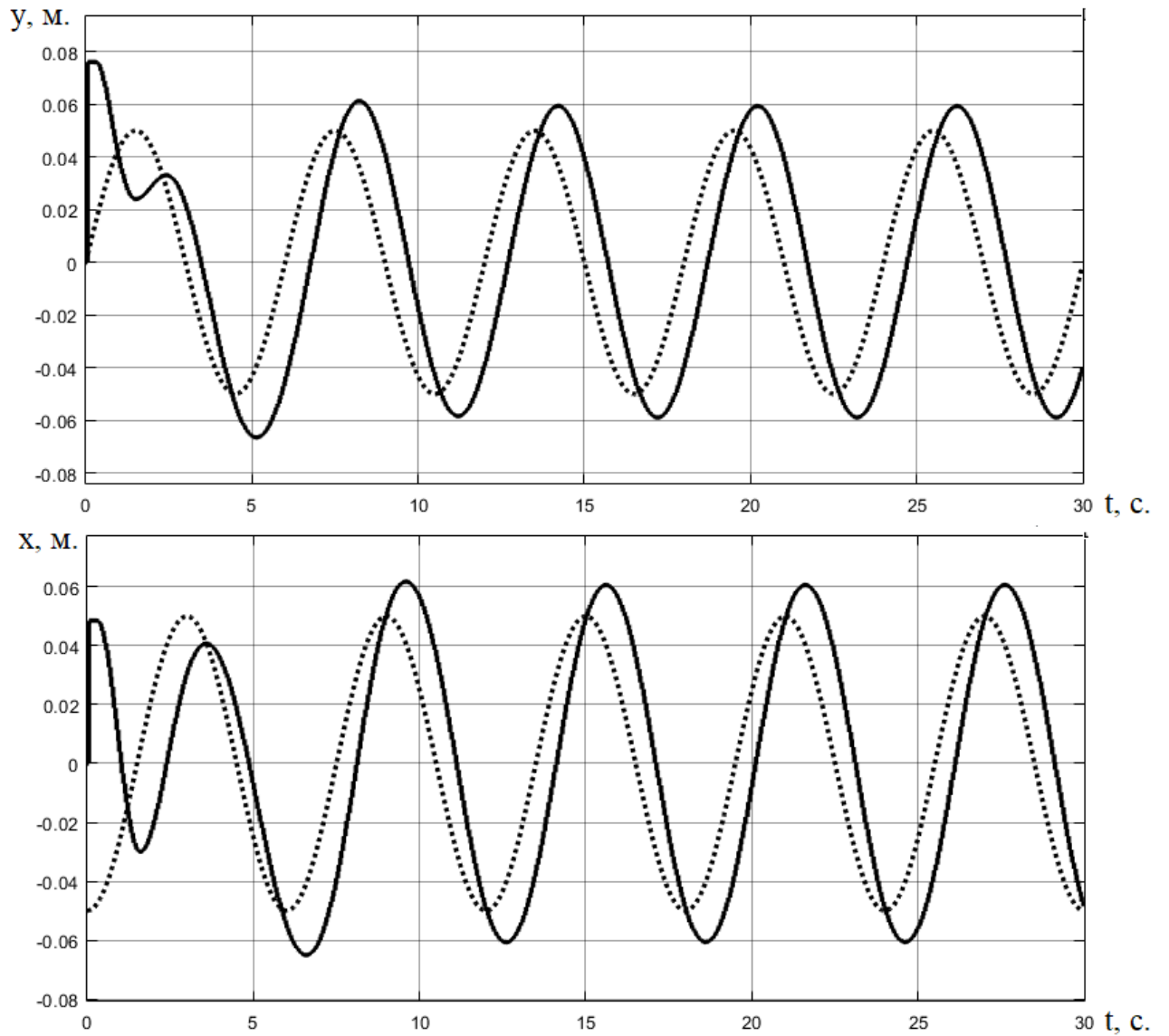


Рисунок 17 – Отработка системой (сплошная линия) заданной траектории (пунктирная линия) по координатам  $y$  (верхний график) и  $x$  (нижний график)

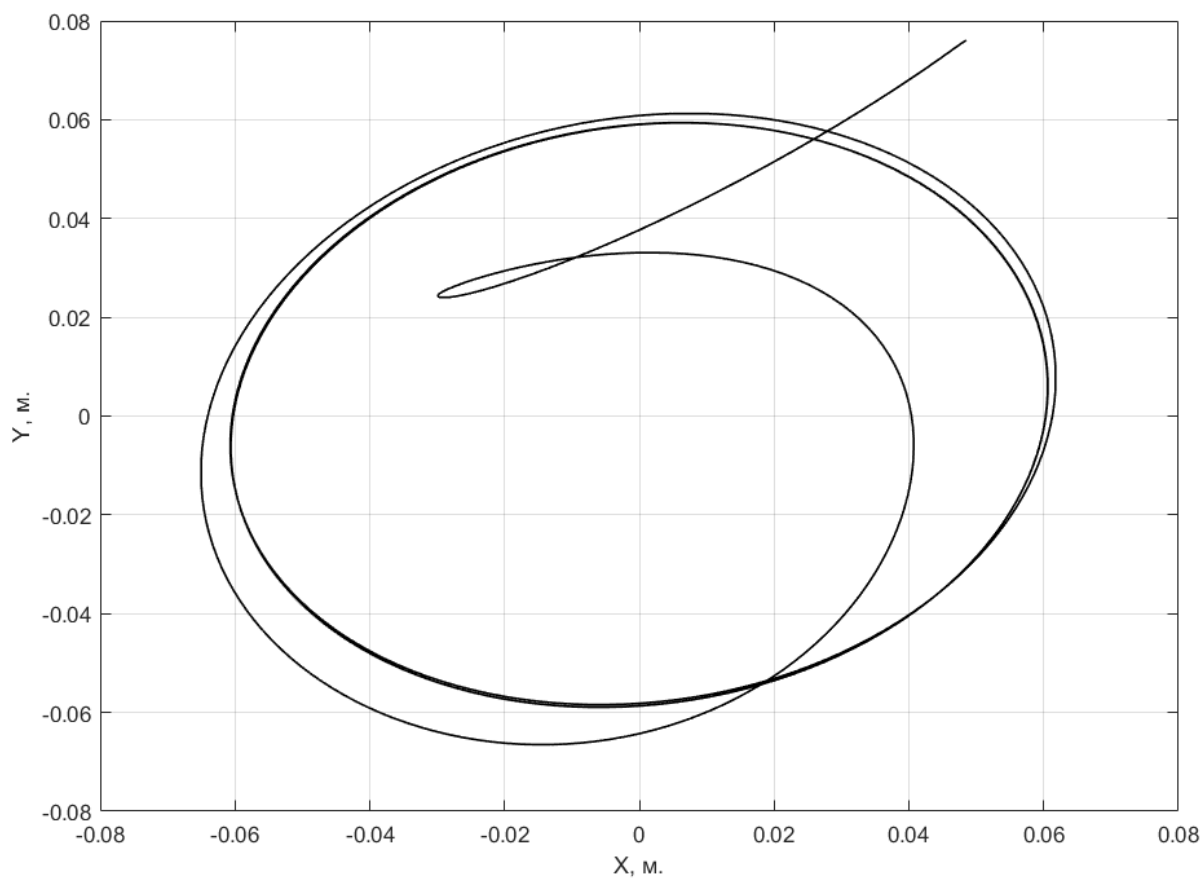


Рисунок 18 – Траектория движения шарика на плоскости

На рисунке 19 представлен график работы реальной системы управления в режиме слежения. Коэффициент усиления по амплитуде для системы равен 1,2, сдвиг по фазе 2,1 секунды.

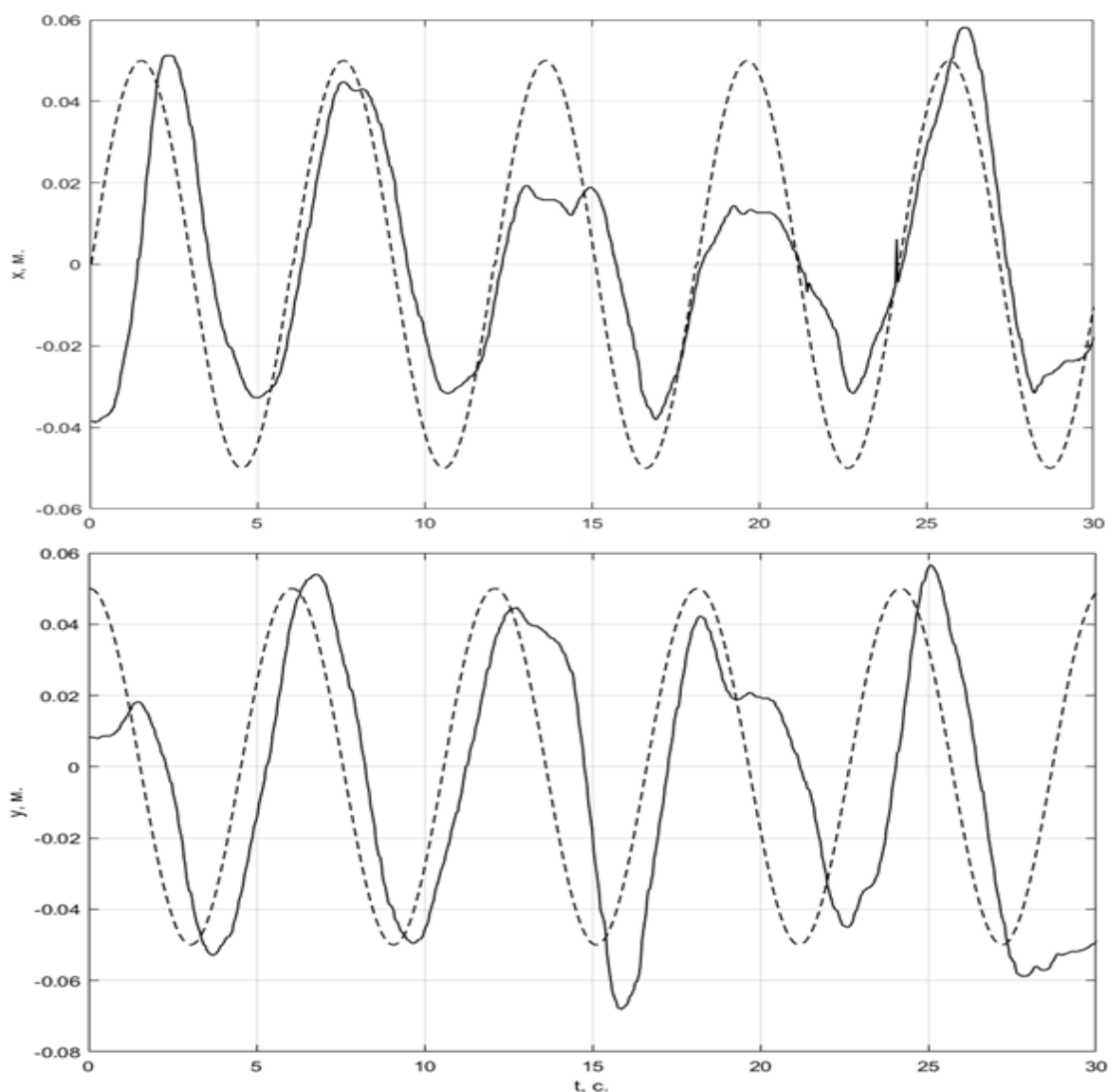


Рисунок 19 – Отработка реальной системой (сплошная линия) заданной траектории (пунктирная линия) по координатам  $x$  (верхний график) и  $y$  (нижний график)

Как можно заметить на графике, на некоторых периодах работы системы заметны сбои в работе, это объясняется неоднородностью контакта шарика с плоскостью, а также неровностью поверхности самой плоскости. Это может быть исправлено путем замены комплектующих деталей станда.

## 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

### 4.1 Организация и планирование работ

В таблице 2 приведен перечень выполняемых в рамках ВКР работ, их исполнители и загруженность исполнителей.

Таблица 2 – Перечень работ

Этап работы	Исполнители	Загруженность исполнителей, %
Постановка задачи	НР	НР – 100 И – 0
Разбиение задачи по подзадачи	НР, И	НР – 50 И – 100
Подбор теоретического материала по тематике	И	НР – 30 И – 100
Обсуждение литературы	И, НР	НР – 100 И – 100
Разработка календарного плана	И, НР	НР – 10 И – 100
Выбор структурной схемы	И, НР	НР – 100 И – 50
Настройка периферии контроллера	И	НР – 0 И – 100
Вывод математической модели	И, НР	НР – 30 И – 100
Синтез системы автоматического управления(САУ)	И	НР – 0 И – 100
Реализация САУ	И	НР – 0 И – 100
Проверка качества регулирования	И, НР	НР – 60 И – 100

## Продолжение таблицы 2 – Перечень работ

Этап работы	Исполнители	Загруженность исполнителей, %
Оформление пояснительной записки	И	НР – 0 И – 100
Подведение итогов	И, НИ	НР – 100 И – 60

### 4.2 Расчет продолжительности работ

Проведем расчет продолжительности выполнения задач проекта. Для этого в соответствие каждому этапу поставим минимальное и максимальное время его исполнения. Далее выполним расчет ожидаемого времени исполнения работ по следующей формуле:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}$$

После этого необходимо учесть влияние на продолжительность работ задержек, вызванных внешними и внутренними факторами, по следующей формуле:

$$T_{рд} = t_{ож} \cdot K_{вн} \cdot K_{д}$$

, где  $K_{вн}$  – коэффициент, учитывающий внешние факторы;

$K_{д}$  – коэффициент, учитывающий внутренние факторы.

Для дальнейших расчетов примем  $K_{д}$  равным 1,2, а  $K_{вн}$  – 1.

Далее необходимо перевести количество рабочих дней в количество календарных, по следующей формуле:

$$T_{кд} = T_{рд} \cdot T_{к}$$

Для 6 дневной недели  $T_{к}$  равен 1,205.

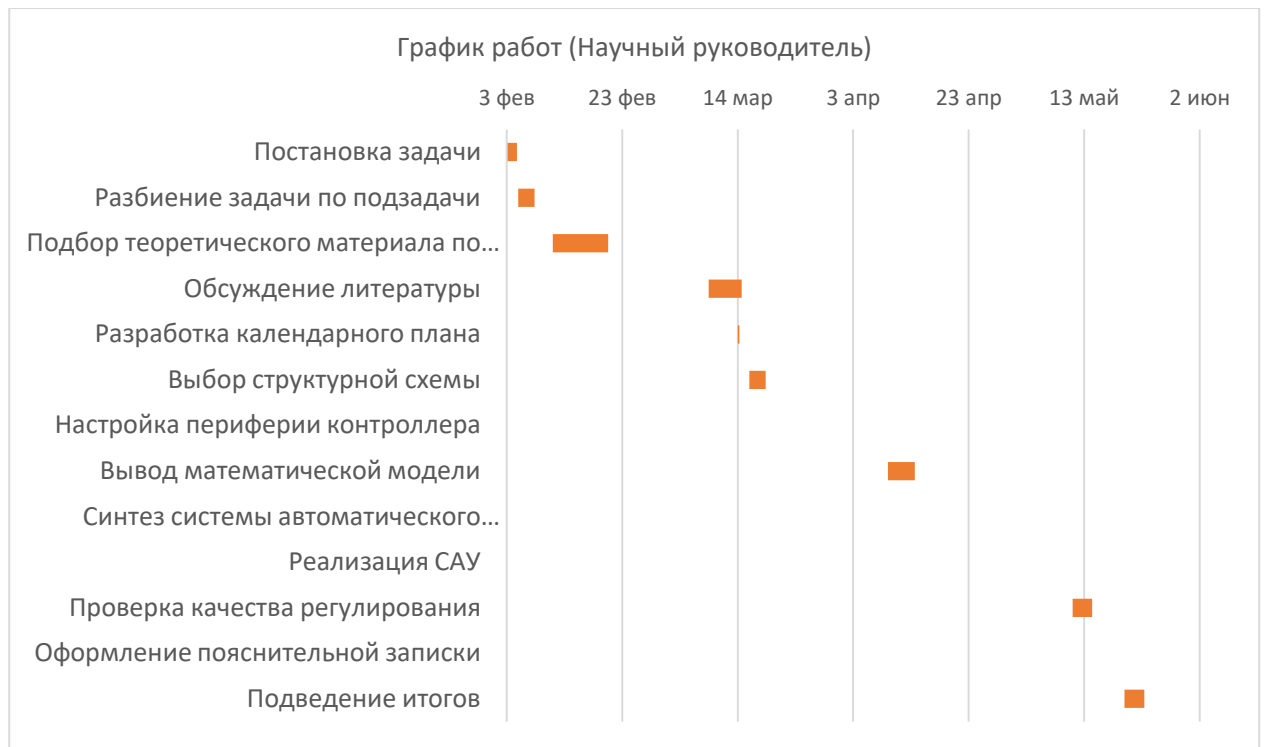
Расчеты для каждого этапа сведены в таблице 3.

Таблица 3 – Трудозатраты на выполнение проекта

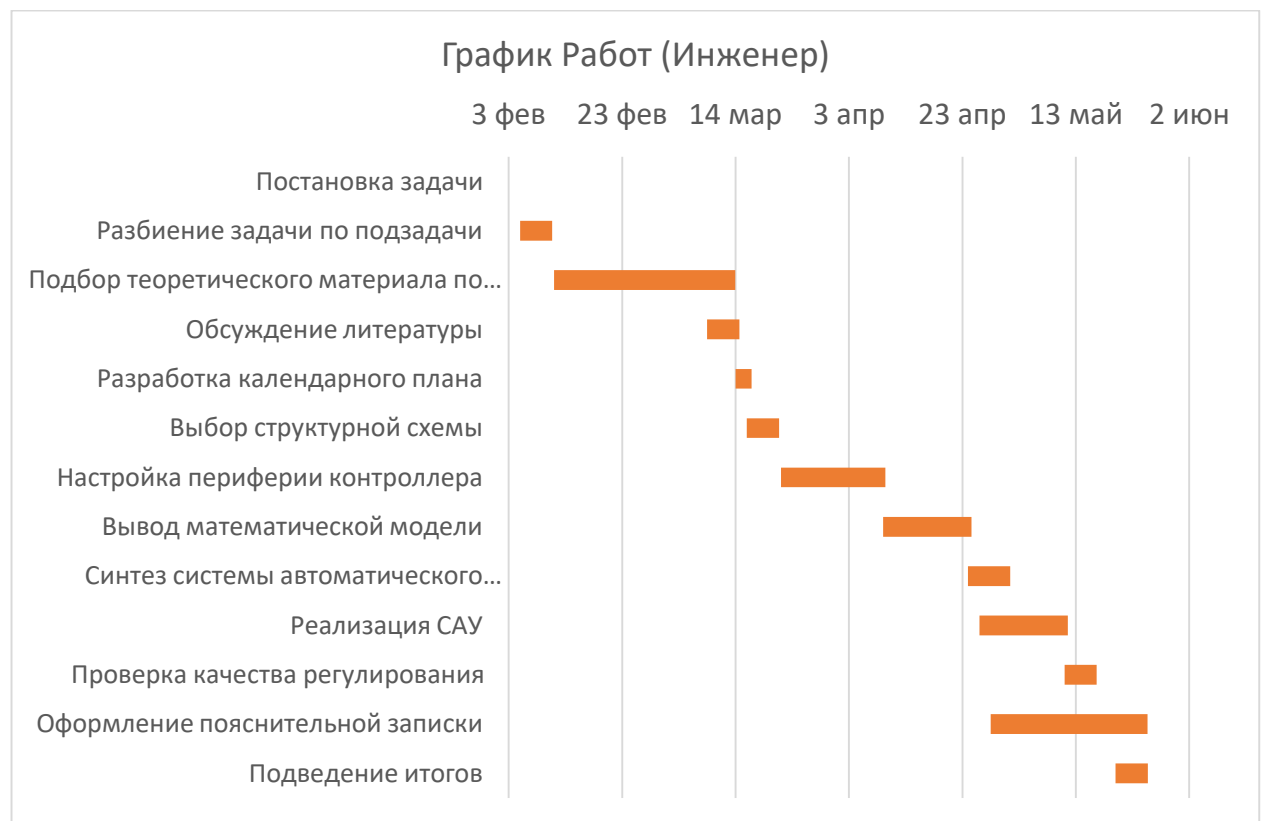
Этап	Исполнитель	Продолжительность работ			Трудоемкость			
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	$T_{РД}$		$T_{КД}$	
					НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка задачи	НР	1	1	1	1.20	0.00	1.45	0.00
Разбиение задачи по подзадачи	НР, И	2	4	3	1.92	3.84	2.31	4.63
Подбор теоретического материала по тематике	И	15	20	18	6.48	21.60	7.81	26.02
Обсуждение литературы	И, НР	2	4	3	3.84	3.84	4.63	4.63
Разработка календарного плана	И, НР	2	4	3	0.38	3.84	0.23	2.31
Выбор структурной схемы	И, НР	2	4	3	1.92	3.84	2.31	4.63
Настройка периферии контроллера	И	8	12	10	0.00	12.48	0.00	15.03
Вывод математической модели	И, НР	7	10	9	3.17	10.56	3.82	12.72
Синтез системы автоматического управления(САУ)	И	3	5	4	0.00	5.04	0.00	6.07
Реализация САУ	И	7	10	9	0.00	10.56	0.00	12.72
Проверка качества регулирования	И, НР	2	4	3	2.30	3.84	2.78	4.63
Оформление пояснительной записки	И	12	18	16	0.00	18.72	0.00	22.55
Подведение итогов	И, НИ	2	4	3	2.30	3.84	2.78	4.63
Итого		65	100	86	23.52	102.00	28.10	120.56

Далее представим величины трудозатрат в качестве линейного графика для руководителя (рисунок 20) и для исполнителя (рисунок 21).





**Рисунок 20 – Линейный график работ (Научный руководитель)**



**Рисунок 21 - Линейный график работ (Инженер)**

### 4.3 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

#### 4.3.1 Расчет затрат на материалы

В таблице 4 приведен перечень материалов, использованных при изготовлении стенда и их цена. При расчете транспортно-заготовительных работ их величина принята равной 10 %.

Таблица 4 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена	Количество	Сумма
Шаговый привод	45000	2	90000
Карданный шарнир	310	3	930
Шпилька резьбовая М8х2000	65	1	65
Оргстекло	340	1	340
Видеокамера			
STM32F3DISCOVERY	2300	1	2300
Пластик	48	1	48
Профиль 10х10х10х1.5 1 метр	54	1	54
Профиль 20х20х1	54	1	54
ДСП 1830х600х12	334	1	334
IMU MPU – 9250	425	1	425
ИТОГО			94550
ИТОГО с учетом ТЗР			104005

#### 4.3.2 Затраты на заработную плату

В таблице 5 приведены затраты на заработную плату руководителя и исполнителя. Для руководителя и исполнителя принята 6-ти дневная рабочая неделя.

Таблица 5 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб/мес.	Средняя ставка, руб./раб. день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд З/П, руб.
НР	21760	867.5198	24	1.699	35373.99
И	7864.11	313.5235	102	1.699	54333
ИТОГО					89706.99

#### 4.3.3 Затраты на единый социальный налог

Рассчитаем затраты на социальный налог, который составляет 30 % от заработной платы:

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,3 = 89706,99 \cdot 0,3 = 26912,1$$

#### 4.3.4 Расчет затрат на электроэнергию

Расходы на электроэнергию рассчитываются по следующей формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot C_{\text{э}}$$

, где  $P_{\text{об}}$  – потребляемая мощность, кВт·ч;

$t_{\text{об}}$  – время работы, час;

$C_{\text{э}}$  – цена электроэнергии, руб/кВт·ч.

Для ТПУ цена электроэнергии равна 6,59 руб/кВт·ч.

В таблице 6 приведен расчет затрат на электроэнергию.

Таблица 6 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования, час.	Потребляемая мощность, кВт	Затраты, руб.
Компьютер	489.6	0.3	844.2662
3D принтер	10	0.2	11.496
Электродрель	1	0.3	1.7244
Паяльная станция	2	0.75	8.622

Продолжение таблицы 6 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования, час.	Потребляемая мощность, кВт	Затраты, руб.
ИТОГО			866.1086

#### 4.3.5 Амортизационные расходы

Амортизационные расходы рассчитываются по следующей формуле:

$$C_{AM} = \frac{N_A \cdot C_{OB} \cdot t_{рф} \cdot n}{F_D}$$

, где  $N_A$  – годовая норма амортизации;

$C_{OB}$  – балансовая стоимость оборудования;

$F_D$  – действительный годовой фонд;

$t_{рф}$  – фактическое время работы;

$n$  – число задействованных единиц.

Расчеты амортизационных затрат приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Амортизационные затраты

Оборудование	$N_A$	$t_{рф}$	$n$	$C_{OB}$	$F_D$	$C_{AM}$
Компьютер	0.333333	489.6	1	50000	2384	3422.819
3D принтер	0.333333	10	1	25000	2384	34.95526
Электродрель	0.125	1	1	2500	596	0.524329
Паяльная станция	0.142857	2	1	5000	2384	0.599233
ИТОГО						3458.90

#### 4.3.6 Непосредственно учитываемые расходы

В ходе выполнения данной работы не было командировок, аренды имущества и услуг сторонних организаций, как следствие данная статья расходов равна 0.

### 4.3.7 Расчет прочих расходов

Примем величину прочих расходов, как 10 % от суммарных затрат на проект, рассчитанных ранее:

$$\begin{aligned} \text{Спроч.} &= (\text{Смат} + \text{Сзп} + \text{Ссоц} + \text{Сэл. об.} + \text{Сам} + \text{Снп}) \cdot 0,1 = \\ &= 0,1 \cdot (104005 + 89706,99 + 26912,1 + 866,11 + 1297,79 + 0) = 22278,8 \end{aligned}$$

### 4.3.8 Расчет общей себестоимости

Все статьи затрат для расчета общей себестоимости сведены в таблицу 8.

Таблица 8 – Статьи затрат, входящие в себестоимость

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	104005
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	89706,99
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	26912,1
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл}}$	866,11
Амортизационные расходы	$C_{\text{ам}}$	3458.90
Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{нр}}$	0
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	22278,8
ИТОГО		247444

### 4.3.9 Расчет прибыли

Примем размер прибыли равным 20 % от итоговой себестоимости проекта:

$$0,2 \cdot 247444 = 49488.8$$

### 4.3.10 Расчет НДС

НДС составляет 20 % от себестоимости и прибыли проекта:

$$0,2 \cdot (49488.8 + 245066,8) = 59386.56$$

Полная цена разработки составила:

$$247444 + 49488.8 + 59386.56 = 356319,4$$

#### **4.4 Оценка экономической эффективности проекта**

Так как результат разработки предполагается использовать как лабораторный стенд при обучении дисциплине «Теория автоматического управления», экономический эффект носит сугубо дидактический характер и не может быть оценен.

#### **4.5 Вывод по финансовому менеджменту, ресурсоэффективности и ресурсосбережению**

В ходе оценки финансовой эффективности разрабатываемого проекта был разработан календарный план проведения основных работ. Согласно ему количество дней, необходимых на разработку учебно-исследовательского стенда, составило 100 рабочих дней. Также были рассчитаны сметы затрат на разработку проекта. В результате, себестоимость проекта и его итоговая цена разработки составила 356319,4 рублей.

### **5 Социальная ответственность**

В данном разделе будут рассмотрены вопросы обеспечения социальной, экологической безопасности и безопасности в условиях ЧС.

В ходе данной работы был разработан учебно-исследовательский стенд для отработки алгоритмов управления роботами в условиях неудерживающих связей. На данном стенде планируется исследование и разработка таких алгоритмов, а также проведения лабораторных работ для студентов. Помимо основной аппаратной части, включающей датчики и исполнительные механизмы, представляющих собой шаговые двигатели, стенд будет укомплектован персональным компьютером (ПК) с организованным рабочим местом пользователя. В силу того, что момент двигателей не превышает 0.5 Н/м принимаем, что он не может нанести травмы пользователю. Пользователями данного устройства будут являться студенты ТПУ направления «Мехатроника и

Робототехника». Работы по проектированию и реализации стенда проводились в аудитории 101 10 корпуса ТПУ. Местом будущей эксплуатации стенда является также 101 ауд. 10 к

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

Согласно классификации частоты работы и с учетом того, что основные работы по проведению лабораторной работы или исследования будут проводиться на ПК, примем частоту работы с аппаратной частью стенда «редко». Однако частоту обращения к ПК следует считать «очень часто». Вид работ выполняемый на данном стенде можно отнести к легким. Работать со стендом будут как женщины, так и мужчины. Монитор ПК, как средство отображения информации, не требует точного и быстрого снятия показаний. Органы управления, клавиатура и мышь, принимаются часто используемые и менее важные. Таким образом рабочее место должно быть выполнено на основании приведенных выше утверждений и в соответствии с требованиями ГОСТ 12.2.032-78[14]. Кресло человека – оператора должно соответствовать требованиям ГОСТ 21889-76[15].

Так как стенд оборудован пультом управления, а так же устройствами индикации, они должны соответствовать ГОСТ 23000-78[16] и ГОСТ EN 894-3-2012[17] соответственно.

Помимо это рабочее место должно соответствовать гигиеническим нормам СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03[18].

### **5.2 Производственная безопасность**

Факторы производственной безопасности, учитываемые в данной работе, перечислены в таблице 9.

Таблица 9 – Факторы производственной безопасности

Факторы по ГОСТ 12.0.003-2015	Этапы			Нормативные документы
	Разраб.	Произв.	Экспл.	
Отклонения параметров микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [19].
Повышение уровня шума		+	+	
Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	
Поражение электрическим током	+	+	+	СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [20].
Перенапряжение анализаторов	+	+	+	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий [21].
Повышенная напряженность электрического поля	+	+	+	ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [22]. ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля [23].



## 5.2.1 Отклонения параметров микроклимата

Микроклимат помещения, как правило, характеризуют тремя основными параметрами:

- температура окружающего воздуха, °С;
- относительная влажность воздуха, %;
- скорость движения воздуха, м/с;

Повышение температуры выше нормы снижает работоспособность, понижение температуры и увеличение скорости воздуха может вести к переохлаждению. Повышенная влажность ведет к понижению скорости испарения пота, а при относительной влажности более 80 % пот стекает каплями с поверхности кожи, тем самым препятствуя достаточному теплообмену.

В связи со спецификой рабочего места, а именно большое количество компьютерной техники температура воздуха в помещении может колебаться в зависимости от количества включенных ПК. В то же время в холодное время года из-за теплообмена с окружающей средой температура воздуха может сильно упасть. Оптимальные величины показателей микроклимата [19] приведены в таблице 10. В то же время допустимые параметры микроклимата [6] приведены в таблице 11. Категорию работ по энергозатратам примем 1а, в связи с преимущественно сидячим видом деятельности.

Таблица 10 – Оптимальные параметры микроклимата

Период	Категория работ	Температура воздуха	Температура поверхности	Относительная влажность	Скорость движения воздуха
Теплый	1а	22-24	21-25	60-40	0,1
Холодный	1а	23-25	22-26	60-40	0,1

Таблица 11 – Допустимые параметры

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

Регулировать температуру позволяют системы кондиционирования и городского отопления.

### 5.2.2 Превышение уровня шума

Движущиеся части механизмов станда, система охлаждения ПК являются основными источниками шума при эксплуатации станда. При этом громкие звуки могут быть причиной проблем со слухом. Помимо воздействия на слуховые органы повторяющиеся шумы могут быть причиной расстройств нервной системы. Согласно виду трудовой деятельности, как образовательная, в таблице 12 представлены допустимые уровни звукового давления [20].

Уровень шума кулеров лежит в пределах 18 – 32 дБА, что соответствует норме. Для минимизации шума в механизмах станда используются малошумящие приводы, а кинематические пары обработаны смазкой.

Таблица 12 – Допустимые уровни звукового давления

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

### 5.2.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Плохое освещение негативно воздействует на зрение, приводит к быстрому утомлению, снижает работоспособность, вызывает дискомфорт, является причиной головной боли и бессонницы. Регламентированные допустимые характеристики освещенности рабочих мест приведены в таблице 13 с учетом того, что помещение относится к категории учебных аудиторий в университете [21].

Таблица 13 – Допустимые характеристики освещенности

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

Так как эксплуатация стенда будет проводиться в аудитории ТПУ, оснащенной люминесцентными лампами, коэффициент пульсаций которых не удовлетворяет требованиям, необходимо снизить пульсации. Одним из способов снижения пульсаций является включение ламп в разные фазы электрической сети.

#### **5.2.4 Поражение электрическим током**

Так как исполнительными механизмами стенда являются электродвигатели, требующие для своей работы силовой цепи постоянного тока, полученной в свою очередь от выпрямителя. В случае контакта с силовыми цепями может произойти поражение электрическим током.

Для защиты от ударов током на этапе разработки стенда были учтены правила электробезопасности, представленных в ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ [22].

#### **5.2.5 Повышенная напряженность электростатического поля**

Работа ПЭВМ, кроме электромагнитных излучений сопровождается электростатическим полем, которое может деионизировать окружающую воздушную оболочку. Для обеспечения безопасности рабочего персонала и оборудования необходимо проводить ионизацию воздуха, путём установки ионизаторов или обеспечения проветривания помещения.

#### **5.2.6 Перенапряжение анализаторов**

В связи с тем, что основной вид работ, выполняемый на стенде, связан с взаимодействием с ПК и анализом информации, повышается нагрузка на зрительные анализаторы.

Для уменьшения влияния ПЭВМ на организм рекомендуется делать перерывы в работе. Согласно СанПин [24] необходимо организовать работу студентов со стендом следующим образом:

Для студентов первого курса оптимальное время учебных занятий при работе с ВДТ или ПЭВМ составляет 1 ч, для студентов старших курсов - 2 ч с

обязательным соблюдением между двумя академическими часами занятий перерыва длительностью 15 - 20 мин. Допускается время учебных занятий с ВДТ или ПЭВМ увеличивать для студентов первого курса до 2 ч, а для студентов старших курсов до 3 академических часов, при условии, что длительность учебных занятий в дисплейном классе (аудитории) не превышает 50% времени непосредственной работы на ВДТ или ПЭВМ, и при соблюдении профилактических мероприятий: упражнения для глаз, физкультминутка и физкультпауза.

Для предупреждения развития переутомления обязательными мероприятиями являются:

- проведение упражнений для глаз через каждые 20 - 25 мин. работы за ВДТ или ПЭВМ;

- устройство перерывов после каждого академического часа занятий, независимо от учебного процесса, длительностью не менее 15 мин.;

- проведение во время перерывов сквозного проветривания помещений с ВДТ или ПЭВМ с обязательным выходом из него студентов;

- осуществление во время перерывов упражнений физкультурной паузы в течение 3 - 4 мин.;

- проведение упражнений физкультминутки в течение 1 - 2 мин. для снятия локального утомления, которые выполняются индивидуально при появлении начальных признаков усталости;

- замена комплексов упражнений один раз в 2 - 3 недели.

Физкультурные паузы следует проводить под руководством физорга, педагога или централизованно с помощью информации по местному радио на фоне умеренно звучащей приятной музыки.

### **5.3 Экологическая безопасность**

#### **5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду**

Влияние разрабатываемого устройства на окружающую среду можно разделить на прямые и косвенные. Косвенное влияние обусловлено выбросами в

атмосферу загрязняющих веществ в ходе производства деталей и материалов, использованных в стенде. Помимо этого, стенд потребляет электроэнергию, производство которой также связано с, в той или иной мере, пагубным воздействием на окружающую среду. Прямым фактором можно назвать отходы материалов на этапе разработки стенда, а также возможным загрязнением литосферы в ходе его утилизации.

### **5.3.2 Мероприятия по защите окружающей среды**

Для уменьшения влияния на окружающую среду, необходимо рассмотреть варианты утилизации вышедшего из строя оборудования и деталей. Особое внимание следует уделить утилизации самой плоскости, так как она сделана из оргстекла. Для переработки оргстекла существуют промышленные методы, основанные на «переплавке» оргстекла. Помимо этого, утилизации требуют электронные компоненты силовых и информационных устройств. В городе Томске переработкой отходов занимается компания «Чистый мир»[25]. Также, в связи с тем, что на стенде планируется выполнение лабораторных работ, будут предоставляться отчеты, которые по истечению срока их хранения необходимо утилизировать. Для передачи в центр переработки отходы собираются персоналом.

## **5.4 Безопасность в ЧС**

### **5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований**

При использовании стенда может возникнуть пожар. Для предотвращения и минимизации ущерба человеку существует ряд мер по обеспечению пожарной безопасности. Согласно ГОСТ [26] меры безопасности обеспечиваются системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационными мероприятиями.

Источником возникновения пожара следует считать закорачивание силовых приборов стенда. Для предотвращения этого используется изоляция и корпуса элементов, затрудняющие доступ к оголенным проводам.

#### **5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и средства пожаробезопасности**

В качестве средств обеспечения пожаробезопасности используются:

- огнетушитель, которым обеспечена аудитория, а также пожарный кран, находящийся в здании;
- системы автоматической пожарной сигнализации;
- средства организации эвакуации, в том числе технические.

Организационно – технической мерой является разработка и применение инструкции по пожарной безопасности, с которой необходимо ознакомиться под роспись для допуска к работе в аудитории.

#### **5.5 Вывод по разделу**

В данной главе были рассмотрены основные источники возникновения опасных факторов эксплуатации предлагаемого в ВКР устройства. Проведен анализ данных факторов на соответствие нормам, устанавливаемым государственными стандартами. По возможности были предложены меры по минимизации влияния данных факторов на производственную безопасность.

Аналізу были подвергнуты факторы загрязнения окружающей среды. Даны рекомендации по утилизации отходов, появляющихся в ходе разработки и эксплуатации стенда.

На соответствие стандартам были проверены меры противодействия пожарным ситуациям. В ходе анализа выявлено, что помещение, в котором проводилась разработка стенда и планируется его эксплуатация соответствует соответствующим стандартам.

## **Заключение**

В рамках данной работы был разработан и реализован учебно-исследовательский стенд для отработки алгоритмом управления роботами в условиях неудерживающих связей. Был реализован алгоритм технического зрения для определения состояния шарика. Была разработана математическая модель стенда, проведена ее валидация, даны графические и численные характеристики соответствия модели реальному объекту. Проведен синтез оптимального линейно-квадратичного регулятора, синтезированная система была реализована на реальном объекте управления. Работа реализованной системы была проверена в режиме стабилизации и режиме слежения.



## **Conclusion**

During this work, an educational and research stand was designed and developed for the testing of robot control algorithms in the conditions of unilateral constraints. A vision algorithm was implemented to determine the state of the ball. Graphic and numerical characteristics of corresponding of the object to the model. The design of the optimal linear-quadratic controller was carried out. The work of controller was tested in stabilization mode and tracking mode.

## Список литературы

1. R. Rascón, J. Alvarez and L. T. Aguilar, "Feedback stabilization and force control using sliding modes in a mechanical system subject to unilateal constraints," *2010 11th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS)*, Mexico City, 2010, pp. 341-345.
2. B. Brogliato, S. -. Niculescu and P. Orhant, "On the control of finite-dimensional mechanical systems with unilateral constraints," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 42, no. 2, pp. 200-215, Feb. 1997.
3. P. R. Pagilla and M. Tomizuka, "Control of mechanical systems subject to unilateral constraints," *Proceedings of 1995 34th IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, LA, USA, 1995, pp. 4311-4316 vol.4.
4. K. Bouyarmane and A. Kheddar, "Static multi-contact inverse problem for multiple humanoid robots and manipulated objects," *2010 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Nashville, TN, 2010, pp. 8-13.
5. N. Mansard and O. Khatib, "Continuous control law from unilateral constraints," *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, 2008, pp. 3359-3364.
6. Елисеев С.В., Большаков Р.С., Николаев А.В. Неудерживающие связи во взаимодействиях элементов систем: оценка динамических реакций связей // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2018. №2 (58).
7. M. Ghazy and H. Elkaranshawy, "A method to escape Painlevé paradox in a two-link robotic manipulator," *2012 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*, Cairo, 2012, pp. 1-5.
8. D. Marchese, M. Coraggio, S. J. Hogan and M. di Bernardo, "Control of Painlevé Paradox in a Robotic System," *2019 18th European Control Conference (ECC)*, Naples, Italy, 2019, pp. 2620-2625.
9. 2 DoF Ball Balancer – Quanser [Электронный ресурс] URL:<https://www.quanser.com/products/2-dof-ball-balancer/> (Дата обращения 09.04.2020)

10. Datasheet – STMicroelectronics [Электронный ресурс] URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f303cb.pdf> (Дата обращения 09.06.2020).

11. MPU–6050 - TDKTDK [Электронный ресурс] URL: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/> (Дата обращения 09.06.2020).

12. Методы дискретизации линейных систем непрерывного времени [Электронный ресурс] URL: [https://a-lab.ee/edu/sites/default/files/Kudrjavitseva\\_BSc.pdf](https://a-lab.ee/edu/sites/default/files/Kudrjavitseva_BSc.pdf) (Дата обращения 09.06.2020).

13. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы – 2-е изд. Испр. И доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 440 с. – ISBN 948-5-9221-0858-4.

14. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

15. ГОСТ 21889-76. Система «человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования.

16. ГОСТ 23000-78. Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования.

17. ГОСТ EN 894-3-2012. Безопасность машин. Эргономические требования к оформлению индикаторов и органов управления. Часть 3. Органы управления.

18. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

19. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

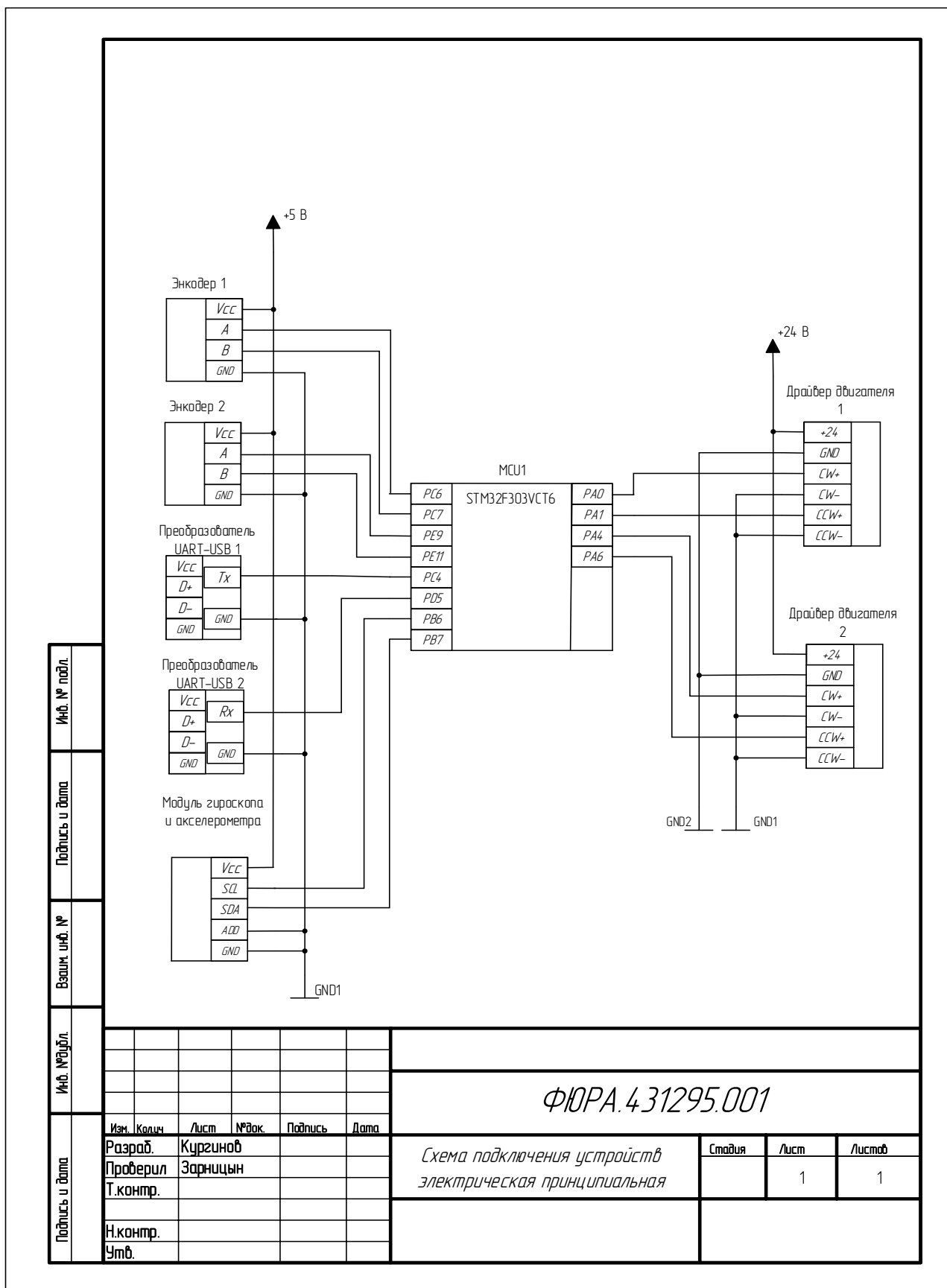
20. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.

21. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.

22. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
23. ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
24. СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
25. Чистый мир, переработка вторсырья Томск [Электронный ресурс] – URL: <https://www.clearwld.ru/> (Дата обращения 04.05.2020).
26. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

## Приложение А (обязательное)

### Принципиальная схема подключения датчиков и исполнительных механизмов



Инд. № подл.	
Подпись и дата	
Взам. инд. №	
Инд. № подл.	
Подпись и дата	

Изм.	Кодич	Лист	№ док.	Подпись	Дата
Разраб.	Курзинов				
Проверил	Зарницын				
Т.контр.					
Н.контр.					
Утв.					

<i>ФЮРА.431295.001</i>		
<i>Схема подключения устройств электрическая принципиальная</i>	Страница	Листов
	1	1

## Приложение Б (обязательное)

### Блок-схема алгоритма работы системы технического зрения

