

Школа – Инженерная школа информационных технологий и подготовки  
 Направление подготовки – 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>Автоматизированная система управления формирования траектории крана гибкой подвески</b>

УДК 004.896:621.864:621.873-5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т6А	Федотов Александр Иванович		

Руководитель ВКР

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

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Трубченко Татьяна Григорьевна	Доцент, к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Белоенко Елена Владимировна	Доцент, к.т.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Громаков Евгений Иванович	Доцент, к.т.н.		
Руководитель ОАР	Филипас Александр Александрович	Доцент, к.т.н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

### 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

Код результата	Результат освоения ООП
P1	Применять базовые естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств.
P2	Применять передовой отечественный и зарубежный опыт в области автоматизации технологических процессов и производств при решении производственных задач.
P3	Ставить и решать задачи производственного анализа, связанные с проектированием и созданием современных систем автоматизации технологических процессов и производств.
P4	Разрабатывать системы автоматизации технологических процессов и производств с использованием передовых научно-технических знаний и достижений мирового уровня, проектировать устройства автоматизации и обосновывать экономическую целесообразность решений.
P5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области современных систем автоматизации.
P6	Внедрять и использовать подходящее программно-техническое оборудование, оснащение и инструменты при решении задач автоматизации технологических процессов и производств, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда, выполнять требования по защите окружающей среды.
P7	Применять высоко технологичное программно-техническое оборудование, оснащение и инструменты для решения задач автоматизации технологических процессов и производств.
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за риски и работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации технологических процессов и производств, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам.
P10	Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду.
P11	Самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности, поддерживать должный уровень физической подготовленности.
P12	Решать задачи производственного анализа, связанные с проектированием и созданием современных систем автоматизации технологических процессов и производств в нефтегазовой отрасли.

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 – 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»  
 Отделение (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Громаков Е.И.  
 (Подпись) (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

<b>бакалаврской работы</b> <small>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</small>
---

Студенту:

Группа	ФИО
8Т6А	Федотову Александру Ивановичу

Тема работы:

<b>Автоматизированная система управления формирования траектории крана гибкой подвески</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объектом исследования является кран гибкой подвески, изучаемый с целью создания автоматизированной системы управления по формированию его траектории.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Математическое описание работы системы; Проведение необходимых расчётов для конфигурации крана с четырьмя звеньями; Разработка алгоритма управления краном по формированию траектории; Моделирование работы системы.
<b>Перечень графического материала</b>	Структурная схема САР; Функциональная схема автоматизации; Схема информационных потоков; Схема внешних проводов; Схема алгоритма формирования траектории крана гибкой подвески.

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Трубченко Татьяна Григорьевна, доцент ОСГН, к.э.н.
Социальная ответственность	Белоенко Елена Владимировна, доцент ООД, к.т.н.

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	13.04.2020
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОАР	Филипас Александр Александрович	Доцент, к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8Т6А	Федотов Александр Иванович		

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 – 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Уровень образования – бакалавриат

Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

Период выполнения: 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:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
03.06.2020	Основная часть	60
05.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
10.05.2020	Социальная ответственность	20

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

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

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	Доцент, к.т.н.		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8Т6А	Федотову Александру Ивановичу

<b>Школа</b>	<b>ИШИТР</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОАР</b>
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Оклад руководителя - 33664 руб. Оклад консультанта - 12664 руб. Материальные затраты – 660 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Накладные расходы 10%; Районный коэффициент 30% Норма амортизации 33,3 %
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды 30 %

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

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Описание потенциальных потребителей, анализ конкурентных технических решений, SWOT-анализ
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Планирование работ, разработка диаграммы Ганта, формирование бюджета затрат.
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Оценка сравнительной эффективности исследования. Интегральный показатель ресурсоэффективности – 4,45 Интегральный показатель эффективности – 4,82 Сравнительная эффективность проекта – 1,134

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

1. Оценка конкурентоспособности НТИ
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НТИ
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	13.04.2020
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Трубченко Т. Г.	Доцент, к.э.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8Т6А	Федотов Александр Иванович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8Т6А	Федотову Александру Ивановичу

<b>Школа</b>	<b>ИШИТР</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОАР</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	Автоматизация технологических процессов и производств

Тема выпускной квалификационной работы:

Разработка автоматизированной системы управления по формированию траектории крана гибкой подвески.

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования – система управления по формированию траектории крана гибкой подвески. Область применения – научные организации, образовательные и медицинские учреждения.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	1. Трудовой кодекс РФ от 30.12.2001 № 197-ФЗ; 2. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ 3. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– Отклонение показателей микроклимата; – Превышение уровня шума; – Риск поражения электрическим током – Превышение уровня электромагнитных излучений. – Недостаточная освещенность рабочей зоны;
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Анализ воздействия на литосферу: образование отходов и утилизация.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Оценка вероятности возникновения пожара.

<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 ООД ШБИП	Белоенко Елена Владимировна	Доцент, к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8Т6А	Федотов Александр Иванович		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 97 страниц, содержит 32 рисунка, 29 таблиц, 24 источника литературы, 6 приложений.

Ключевые слова: кран гибкой подвески, управление формированием траектории, автоматизированная система управления, MATLAB.

Объектом исследования является кран гибкой подвески.

Целью работы является создание автоматизированной системы управления по формированию траектории крана гибкой подвески.

В результате исследования была разработана автоматизированная система управления формирования траектории крана гибкой подвески, а также ее структурная схема. Работоспособность системы была подтверждена моделированием в прикладном пакете программ MATLAB.

Разработанная система может применяться для перемещения крупногабаритных конструкций, исследования эффективности различных методов реабилитации пациентов, фото- и видеосъемки, в сфере развлечений.

Для выполнения выпускной квалификационной работы использовались программные продукты Microsoft Word, Microsoft Visio, MATLAB.

Задание на ВКР выполнено в полном объеме, и разработка соответствует заданию на проектирование.

## Оглавление

Определения, сокращения, обозначения .....	12
Введение.....	13
1 Расчёт четырехзвенного крана гибкой подвески.....	14
1.1 Расчет сил .....	15
1.2 Расчет приводных лебедочных механизмов.....	18
1.3 Расчет троса (каната).....	19
1.4 Учет нелинейностей .....	21
1.5 Расчет барабана.....	22
1.6 Расчет мощности двигателя.....	24
1.7 Расчет передаточного числа редуктора.....	25
2 Разработка структурной схемы САР.....	27
3 Разработка функциональной схемы автоматизации .....	29
4 Разработка информационного обеспечения.....	31
5 Комплекс аппаратно-технических средств .....	33
5.1 Выбор электродвигателя постоянного тока.....	33
5.2 Выбор силовой части электропривода.....	34
5.3 Выбор датчика положения и скорости вращения вала.....	36
5.4 Выбор датчика веса .....	37
5.5 Выбор программируемого логического контроллера.....	39
6 Разработка схемы внешних проводок.....	41
7 Разработка алгоритмов управления траекторией крана .....	42
7.1 Формирование траектории прямой.....	42
7.2 Формирование сложной траектории .....	44
8 Разработка имитационной модели работы системы .....	46
8.1 Создание управляющей программы .....	46

8.2	Определение передаточной функции привода .....	46
8.3	Определение передаточной функции двигателя .....	47
8.4	Моделирование в среде MATLAB Simulink .....	49
9	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	54
9.1	Потенциальные потребители результатов исследования .....	54
9.2	Анализ конкурентных технических решений .....	55
9.3	SWOT-анализ .....	57
9.4	Планирование научно-исследовательской работы .....	60
9.4.1	Структура работы .....	60
9.4.2	Разработка графика проведения научно-технического исследования .	61
9.5	Бюджет научно-технического исследования.....	65
9.5.1	Расчёт материальных затрат .....	65
9.5.2	Расчёт амортизационных отчислений .....	66
9.5.3	Расчёт заработной платы и отчислений во внебюджетные фонды .....	67
9.5.4	Расчёт общей себестоимости.....	68
9.6	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	69
9.7	Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» .....	71
10	Социальная ответственность .....	73
10.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	73
10.2	Профессиональная социальная безопасность .....	74
10.2.1	Отклонение показателей микроклимата.....	75
10.2.2	Превышение уровня шума .....	76
10.2.3	Повышенный уровень электромагнитных излучений .....	77

10.2.4 Электробезопасность.....	78
10.2.5 Отсутствие или недостаток естественного света .....	79
10.3 Экологическая безопасность.....	80
10.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	80
10.5 Выводы по разделу социальная ответственность.....	81
Заключение .....	82
Conclusion.....	83
Список использованной литературы.....	84
Приложение А (обязательное) Схема автоматизации функциональная .....	87
Приложение Б (обязательное) Схема информационных потоков .....	88
Приложение В (обязательное) Схема внешних проводок .....	89
Приложение Г (обязательное) Алгоритм формирования траектории подвеса ..	90
Приложение Д (обязательное) Реализация алгоритма программы в MATLAB.	91
Приложение Е (обязательное) Реализация САР в MATLAB Simulink .....	93

## Определения, сокращения, обозначения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**техническое задание:** технический документ, устанавливающий цели, набор требований и ключевые исходные данные, требуемые на этапах разработки проектируемой системы;

**автоматизированная система:** совокупность персонала и комплекса средств автоматизации его деятельности, которая реализует информационную технологию выполнения установленных функций;

**автоматизированная система управления технологическим процессом:** комплекс программных и технических средств, предназначенный для автоматизации управления технологическим оборудованием на предприятиях;

**объект управления:** система, на которую направлены управляющие воздействия с ПЛК.

В данной работе применены следующие сокращения и соответствующие им расшифровки:

ТЗ – техническое задание;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;

САР – система автоматического регулирования;

ПК – персональный компьютер;

ПЛК – программируемый логический контроллер.

## Введение

В настоящее время краны гибкой подвески часто применяются в промышленности для перемещения различных грузов в пространстве, например, при строительстве крупногабаритных конструкций и погрузо-разгрузочных работах. Кран гибкой подвески обладает рядом преимуществ перед краном с жесткими связями. К таким преимуществам относятся: простота конструкции, большая рабочая область, высокий коэффициент полезной нагрузки, а также низкие инерционные свойства, что позволяет облегчить работу и управление на высоких скоростях.

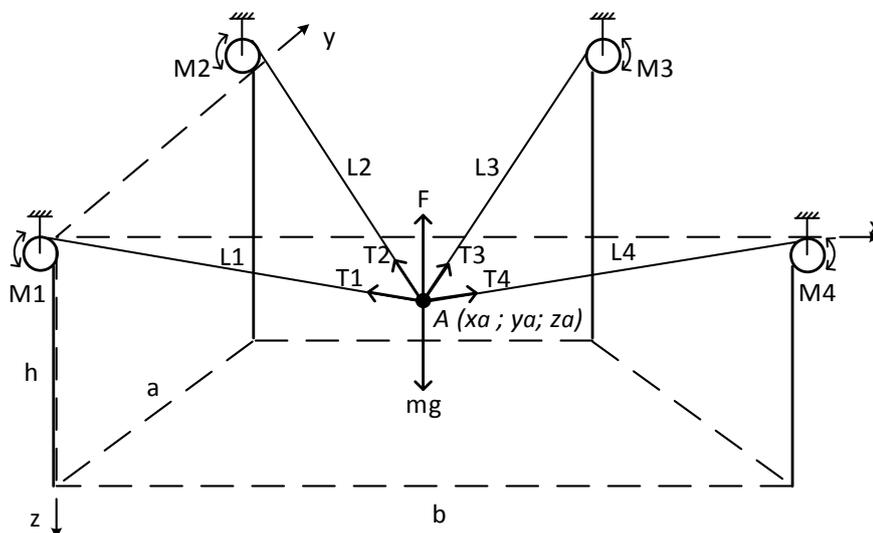
Ключевое преимущество подобного крана – возможность динамически менять вектор прилагаемой к объекту силы, тем самым компенсируя полностью или часть его массы, что может быть полезно для уменьшения веса объекта при его движении или для воссоздания условий невесомости, например, для проведения испытаний космических трансформируемых крупногабаритных конструкций.

Помимо вышеописанных применений кран подобной структуры может быть применен в научно-исследовательских целях: исследование эффективности различных методов реабилитации, испытания робототехнических комплексов (мобильные роботы, андрониды, экзоскелеты), в сфере развлечений (расширение возможностей виртуальной реальности).

В данной работе описаны основные принципы разрабатываемого крана с гибкой подвеской для решения задач формирования его траектории.

## 1 Расчёт четырехзвенного крана гибкой подвески

В кинематической схеме, приведенной на рисунке 1.1, представлена система четырехзвенного крана гибкой подвески.



$x_a, y_a, z_a$  – координаты подвеса в текущий момент времени;  $L1, L2, L3, L4$  – длина каждого троса;  $a$  – расстояние между приводами  $M1$  и  $M2$ ;  $b$  – расстояние между приводами  $M1$  и  $M4$ .

Рисунок 1.1 – Кинематическая схема крана

В такой системе тело закреплено в одной точке тросами к четырем приводным механизмам, расположенным в крайних верхних точках рабочей зоны. Согласно ТЗ, система будет установлена в комнате с характеристиками, представленными в таблице 1.1:

Таблица 1.1 – Основные параметры системы

Параметр	Значение
Высота потолка (крепления привода)	3 м
Длина стен (расстояние между приводами)	4 м
Площадь помещения (квадрат 4x4)	16 м <sup>2</sup>
Величина обезвешивания	50 кг

Задача управления краном на данном этапе проектирования сводится к решению задачи перемещения подвеса в пространстве и обеспечении силы, компенсирующей вес тела.

Первая задача представляет из себя обратную задачу кинематики, т.е. по известному положению подвеса в рабочей зоне, необходимо определить длины тросов. При этом длины тросов равны радиусу сферы с центром в точке размещения привода:

$$\begin{cases} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 = L_1^2, \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 = L_2^2, \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 = L_3^2, \\ x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 = L_4^2. \end{cases} \quad (1.1)$$

Решим систему уравнений относительно длин:

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2}, \\ L_2 = \sqrt{x_a^2 + (y_a - a)^2 + z_a^2}, \\ L_3 = \sqrt{(x_a - b)^2 + (y_a - a)^2 + z_a^2}, \\ L_4 = \sqrt{(x_a - b)^2 + y_a^2 + z_a^2} \end{cases} \quad (1.2)$$

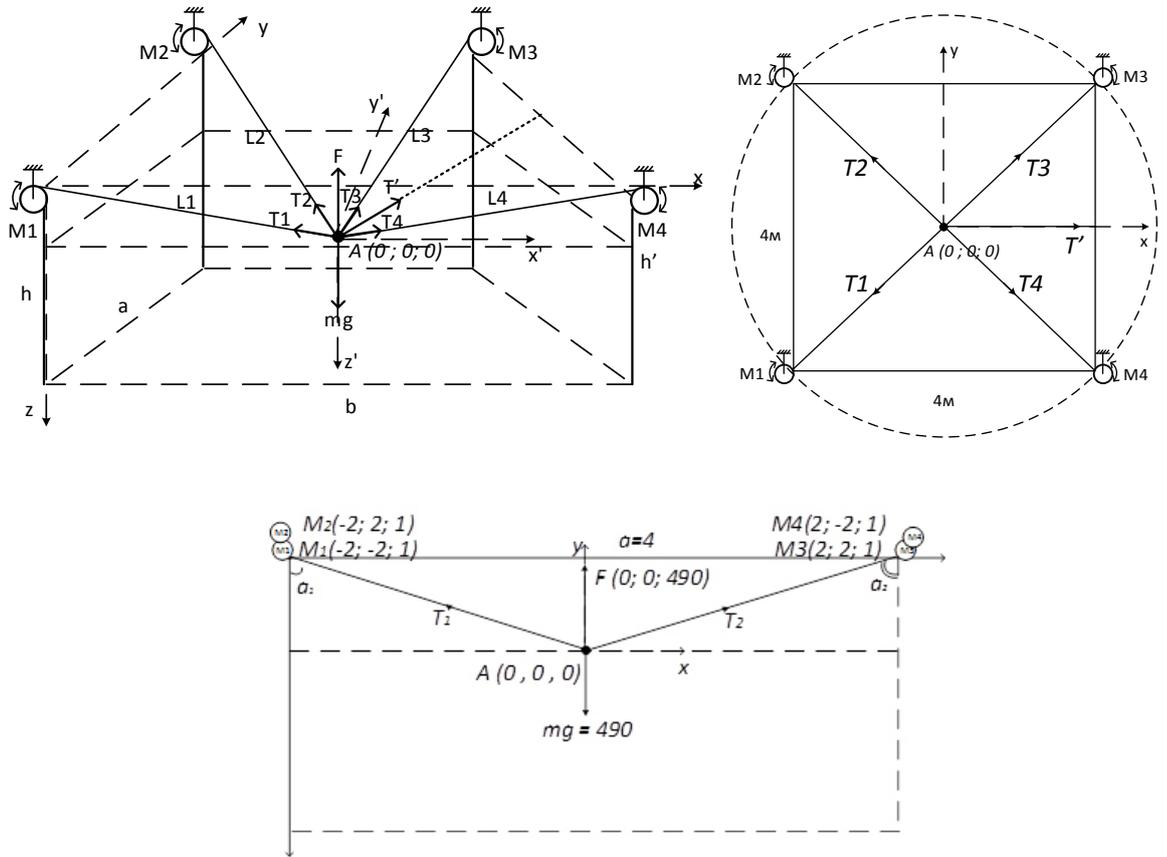
Вторая задача – регулирование вектора компенсирующей силы – может быть решена изменением усилия на каждом из четырех тросов путём независимого регулирования момента на соответствующем приводе. При возможности размещения датчика веса на подвесе, можно реализовать независимый контур регулирования, работающий параллельно с контуром регулирования положения подвеса.

### 1.1 Расчет сил

Рассчитаем силы натяжения тросов (гибких звеньев), которые необходимо обеспечить для компенсации веса тела в текущем положении. Данная задача может быть решена, если известна сила натяжения каждого из тросов, которые необходимо обеспечить для компенсации веса тела.

На рисунке 1.1.1 представлена кинематическая схема системы с учетом сил натяжения тросов. Для удобства расчетов начало координат перемещено в

точку крепления подвеса. На данном этапе допускаем, что используются нерастяжимые тросы.



$\vec{F}$  – вектор силы, компенсирующей вес тела;  $\{\vec{T}_1, \vec{T}_2, \vec{T}_3, \vec{T}_4\}$  – система векторов сил натяжения тросов;  $h$  – высота помещения;  $h'$  – высота рабочей плоскости;  $a$  – ширина рабочей зоны;  $b$  – длина рабочей зоны.

Рисунок 1.1.1 – Кинематическая схема крана (силы натяжения)

Для того чтобы разложить вектор  $\vec{F}$  на четыре сонаправленных с тросами вектора, необходимо ввести мнимый вектор  $\vec{T}'$ , лежащий в плоскости образованной векторами  $\vec{T}_3, \vec{T}_4$  и сначала разложить вектор  $\vec{F}$  по базису  $\{\vec{T}_1, \vec{T}_2, \vec{T}'\}$ , а затем разложить мнимый вектор  $T'$  по двум векторам  $\vec{T}_3, \vec{T}_4$ .

Необходимо разложить вектор  $\vec{F}$  по базису  $\{\vec{T}_1, \vec{T}_2, \vec{T}'\}$ , т.е. найти такие коэффициенты  $a, b, c$  при которых линейная комбинация базисных векторов  $\{\vec{T}_1, \vec{T}_2, \vec{T}'\}$  будет равна вектору  $\vec{F}$ :

$$\vec{F} = a\vec{T}_1 + b\vec{T}_2 + c\vec{T}', \quad (1.1.1)$$

где  $a, b, c$  – координаты вектора  $\bar{F}$  в базисе  $\{\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{T}'\}$ .

Запишем выражение (1.1.1) в координатной форме:

$$(0; 0; 490) = a * (-2; -2; 1) + b * (-2; 2; 1) + c * (2; 0; 1). \quad (1.1.2)$$

Чтобы умножить вектор на число, необходимо каждую координату вектора умножить на число:

$$(0; 0; 490) = (-2a; -2a; a) + (-2b; 2b; b) + (2c; 0; c). \quad (1.1.3)$$

Просуммируем вектора в правой части уравнения, для этого просуммируем соответствующие координаты:

$$(0; 0; 490) = (-2a - 2b + 2c; -2a + 2b + 0; a + b + c). \quad (1.1.4)$$

Если два вектора равны, то равны и их соответствующие координаты, а значит можно получить следующую систему выражений:

$$\begin{cases} -2a - 2b + 2c = 0; \\ -2a + 2b = 0; \\ a + b + c = 490. \end{cases} \quad (1.1.5)$$

Решим систему уравнений:

$$a = 122,5; b = 122,5; c = 245. \quad (1.1.6)$$

При разложении вектора  $\bar{T}'$  с коэффициентом 245 на вектора  $\bar{T}_3, \bar{T}_4$ , получим коэффициент: 122.5.

Тогда искомое разложение:

$$\bar{F} = 122.5 \cdot \bar{T}_1 + 122.5 \cdot \bar{T}_2 + 122.5 \cdot \bar{T}_3 + 122.5 \cdot \bar{T}_4. \quad (1.1.7)$$

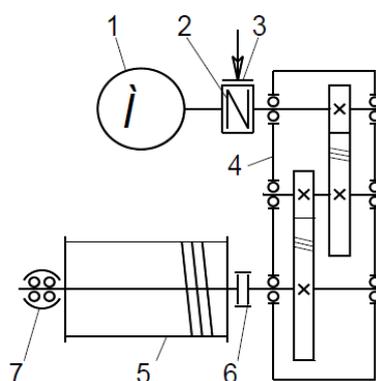
Из полученных выражений можно получить силы натяжения тросов  $T_1, T_2, T_3, T_4$ .

В центре рабочей области, нагрузка на всех тросах равномерна и равна 122.5 Н. При смещении схвата крана к одному из приводов, сила натяжения на

нём будет приближаться к 490 Н (компенсирующей силе), на остальных приводах к нулю. Из данных расчётов можно сделать вывод, что приводной лебедочный механизм должен обеспечивать силу натяжения не менее 490Н.

## 1.2 Расчет приводных лебедочных механизмов

В качестве приводного элемента крана используется однобарабанная грузоподъемная реверсивная лебедка с электродвигательным приводом и червячным редуктором. Кинематическая схема лебедки в общем случае представлена на рисунке 1.2.1.



1 – электродвигатель; 2 – упругая втулочно-пальцевая муфта с тормозным шкивом; 3 – автоматический постоянно замкнутый двухколодочный тормоз; 4 – цилиндрический двухступенчатый зубчатый редуктор; 5 – барабан; 6 – зубчатая муфта; 7 – выносная подшипниковая опора.

Рисунок 1.2.1 – Кинематическая схема лебедки

Лебедки обычно применяются в различных грузоподъемных машинах, таких как строительный подъемник, башенный или стреловой кран и т.д. При расчёте лебедки для применения в таких машинах, актуальной задачей является определение схемы полиспаста и его кратности, которая определяется по формуле:

$$u = \frac{k_{\text{в}}}{a}, \quad (1.2.1)$$

где  $k_{\text{в}}$  – число ветвей каната, на которых подвешено грузозахватное устройство;

$a$  – число ветвей каната, наматываемых на барабан.

Так как в кране отсутствует система блоков и полиспаст, примем кратность полиспаста  $u = 1$  и КПД системы  $\eta = 0,98$ .

### 1.3 Расчет троса (каната)

Канат для лебедки подбирается по допускаемому разрывному усилию, которое может быть вычислено по формуле:

$$S_p > k_3 \cdot S_k, \text{ Н}, \quad (1.3.1)$$

где  $S_p$  – допускаемое разрывное усилие в канате, Н;

$k_3$  – коэффициент запаса прочности каната на разрыв, зависящий от режима работы механизма, определяется по таблице 1.3.1;

$S_k$  – максимальное рабочее усилие в канате, Н.

Таблица 1.3.1 – Минимальные значения коэффициента запаса прочности каната

Группа классификации механизма по ИСО 4301/1	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Значение коэффициента запаса прочности для подвижных канатов	3,15	3,35	3,55	4,00	4,50	5,60	7,10	9,00

Для того, чтобы определить группу классификации механизма, необходимо определить режим нагружения и класс использования механизма согласно стандарту ИСО 4301/1.

Класс использования T5, согласно которому механизм используется регулярно, но с перерывами. Режим нагружения системы L2 – умеренный, так как наш механизм не будет регулярно подвергаться воздействию наибольших нагрузок. По таблице 1.3.2 класс использования механизма определен как M5, значение коэффициента запаса прочности при этом будет равно  $k_3 = 4,5$ .

Таблица 1.3.2 – Группы классификации механизмов в целом

Режим нагружения	Номинальный коэффициент распределения нагрузки $k_m$	Класс использования механизмов									
		T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
L1 – легкий	0,125			M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
L2 – умеренный	0,25		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
L3 – тяжелый	0,50	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8		
L4 – весьма тяжелый	1,0	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8			

Максимальное рабочее усилие в канате, навиваемом на барабан при подъеме груза, определяется следующим образом:

$$S_k = \frac{(m+q) \cdot g}{a \cdot u \cdot \eta}, \quad (1.3.2)$$

где  $m$  – масса поднимаемого груза, кг;

$q$  – масса схвата, кг;

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

$a$  – число ветвей каната, наматываемых на барабан;

$u$  – кратность полиспаста.

Масса схвата может быть вычислена по формуле:

$$q = (0,06 \dots 0,08) \cdot m = 3,5 \text{ кг}. \quad (1.3.3)$$

Таким образом, максимальное рабочее усилие равно:

$$S_k = \frac{(50+3,5) \cdot 9,8}{1 \cdot 1 \cdot 0,98} = 535 \text{ Н}. \quad (1.3.4)$$

Допускаемое разрывное усилие при этом равно:

$$S_p > k_3 \cdot S_k = 4,5 \cdot 535 = 2407,5 \text{ Н}. \quad (1.3.5)$$

Необходимый диаметр каната и все его данные можно определить по рассчитанному разрывному усилию каната по ГОСТ 2688–80. Был выбран стальной канат двойной свивки типа ЛК-Р диаметром 5,6 мм. При этом масса 1000м каната приблизительно равна 116 кг.

Длина каната, наматываемого на барабан, равна максимальному расстоянию между двумя противоположными точками рабочей области крана, поэтому длина каната  $L$  должна быть равна 6,4 м. В процессе использования трос будет деформироваться, поэтому примем  $L = 7$  м. В таком случае масса каната будет равняться 0,812 кг.

#### 1.4 Учет нелинейностей

В процессе эксплуатации канат подвергается упругой деформации, величину которой необходимо учитывать при составлении математической модели.

Сила натяжения троса определяется согласно закону Гука:

$$\bar{F} = k \cdot \bar{\Delta l}, \text{ Н}, \quad (1.4.1)$$

где  $\Delta l$  – абсолютное удлинение;

$k$  – коэффициент упругости.

Коэффициент упругости может быть найден по формуле:

$$k = \frac{E \cdot S}{L}, \quad (1.4.2)$$

где  $E$  – модуль Юнга (механическая характеристика материала);

$S$  – площадь поперечного сечения каната;

$L$  – длина каната.

Для каната ЛК-Р диаметром 5,6 мм по ГОСТ 2688–80 модуль Юнга (маркировочная группа)  $E = 1570 \text{ Н/мм}^2$ . Тогда, зная длину каната  $L = 7 \text{ м}$ , можем рассчитать коэффициент упругости:

$$k = \frac{1570 \cdot \pi \cdot 5,6^2}{7 \cdot 4} = 5524 \text{ Н/м}, \quad (1.4.3)$$

Зная силу натяжения троса и коэффициент упругости, можно рассчитать его удлинение:

$$\Delta l = \frac{F}{k}, \text{ м.} \quad (1.4.4)$$

Это удлинение впоследствии необходимо будет учитывать в алгоритме управления траекторией подвеса.

### 1.5 Расчет барабана

Барабаны лебедок грузоподъемных машин выполняются сварными или литыми. Их поверхность может быть гладкой для укладки каната в несколько слоев или с канавками (нарезной) для укладки каната в один слой, как показано на рисунке 1.5.1.

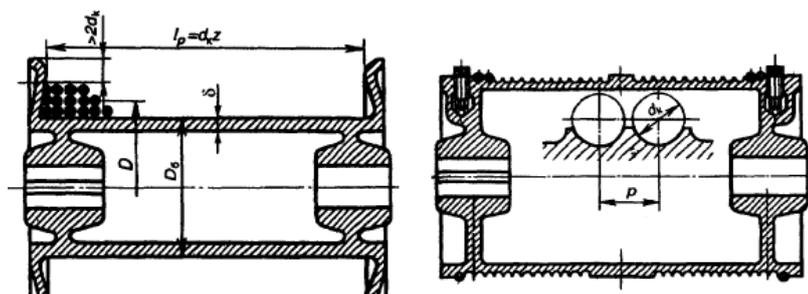


Рисунок 1.5.1 – Типы барабанов лебедок (слева – гладкий, справа с канавками)

Число слоев укладки каната на барабан ориентировочно определено в таблице 1.5.1. В разрабатываемой системе длина каната не будет превышать 50м, а значит достаточно одного слоя укладки троса.

Таблица 1.5.1 – Число слоев укладки каната на барабан лебедки

Длина каната, наматываемого на барабан (L), м	Число слоев укладки (m)
до 50	1
50...125	2
125...200	3

Минимальный диаметр барабана определяется по формуле:

$$D_6 > h_1 * d, \quad (1.5.1)$$

где  $h_1$  – коэффициент выбора диаметра (также выбирается по ГОСТ ИСО 4301/1 – от 11,2 до 25,0);

$d$  – диаметр каната.

Отсюда:

$$D_6 = 18 \cdot 5,6 = 100,8. \quad (1.5.2)$$

Для удобства расчетов выберем диаметр барабана  $D_6 = 110$  мм.

Количество рабочих витков в одном слое навивки определяется по формуле:

$$Z_p = \frac{1000 \cdot L}{\pi \cdot m \cdot (m \cdot d + D_6) \cdot \varphi} = \frac{7000}{3,14 \cdot 1 \cdot (1 \cdot 5,6 + 110) \cdot 1} = 19,27, \quad (1.5.3)$$

где  $\varphi$  – коэффициент неплотности навивки каната (для нарезных барабанов  $\varphi = 1$ );

$L$  – длина каната;

$m$  – число слоев укладки каната на барабан;

$d$  – диаметр каната;

$D_6$  – диаметр барабана.

Общее число витков  $Z$  определяется по формуле:

$$Z = Z_p + Z_z + Z_k = 19,27 + 1,73 + 3 = 24, \quad (1.5.4)$$

где  $Z_p$  – число запасных витков (от 1,5 до 2);

$Z_k$  – число витков каната, находящихся под зажимным устройством (для нарезных барабанов  $Z_k$  составляет от 3 до 4).

Определим основные конструктивные размеры барабана. Длина барабана с нарезкой вычисляется по формуле:

$$L_6 = Z \cdot t, \quad (1.5.5)$$

где  $t$  – шаг нарезки барабана.

Шаг нарезки  $t$  определяется по формуле:

$$t = d + (2 \dots 3) \text{ мм}, \quad (1.5.6)$$

Выберем шаг нарезки равным 7 мм. В таком случае длина барабана равна:

$$L_6 = 24 \cdot 7 = 168 \text{ мм}. \quad (1.5.7)$$

Конструктивно соотношение между длиной барабана и его диаметром должно находиться в следующих пределах:

$$0.5 < \frac{L_6}{D_6} < 3.0. \quad (1.5.8)$$

Параметры подобраны правильно, так как соотношение входит в пределы:

$$0.5 < \frac{168}{110} = 1,53 < 3.0 \quad (1.5.9)$$

## 1.6 Расчет мощности двигателя

Необходимую мощность двигателя можно определить по максимальному рабочему усилию в канате  $S_k$ , скорости навивки каната на

барабан  $v_k$  и к.п.д.  $\eta = 0,98$ . Скорость навивки каната на барабан определяется по формуле:

$$v_k = v_{гр} \cdot u = 1 \text{ м/с}, \quad (1.6.1)$$

где  $v_{гр} = 1$  – заданная скорость подъема груза, м/с;

$u$  – кратность полиспаста (в системе отсутствует, поэтому  $u = 1$ ).

Необходимую мощность двигателя можно найти по формуле:

$$N_{дв} = \frac{S_k \cdot v_k}{1000 \cdot \eta} = \frac{535}{980} = 0.55 \text{ кВт} = 550 \text{ Вт}. \quad (1.6.2)$$

### 1.7 Расчет передаточного числа редуктора

Передаточное число редуктора определяется следующим выражением:

$$i_p = \frac{n_{дв}}{n_б}, \quad (1.7.1)$$

где  $n_{дв}$  – частота вращения вала электродвигателя,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$n_б$  – частота вращения барабана,  $\text{мин}^{-1}$ .

Частота вращения барабана определяется по среднему диаметру навивки каната:

$$n_б = \frac{1000 \cdot 60 \cdot v_k}{\pi \cdot [D_б + m \cdot d \cdot (2 \cdot m - 1)]} = \frac{60000}{3,14 \cdot [110 + 1 \cdot 5,6]} = 165,2 \text{ об/мин}. \quad (1.7.2)$$

При условии, что частота вращения вала электродвигателя будет равна 1000 об/мин, передаточное число редуктора:

$$i_p = \frac{1000}{165,2} = 6,053. \quad (1.7.3)$$

Подбор редуктора осуществляем по требуемому передаточному числу  $i_p$  редуктора, частоте вращения вала электродвигателя  $n$ , режиму работы и мощности на быстроходном валу редуктора. При выборе редукторов для

механизмов подъема значение мощности на быстроходном валу редуктора определяется по формуле:

$$N_p \geq k * N_{дв} = 1,3 \cdot 0,55 = 0,605 \text{ кВт}, \quad (1.7.4)$$

где  $N_{дв}$  – номинальное значение мощности выбранного двигателя;

$k$  – коэффициент нагрузки, значения  $k$  в зависимости от режима работы составляют:  $k=1,5$  (легкий);  $k=1,3$  (средний);  $k=1,1$  (тяжелый).

Группа режима работы механизма определяется по ГОСТ ИСО 4301/1 [6].

## 2 Разработка структурной схемы САР

В рамках данной работы была поставлена задача разработать систему по формированию траектории крана гибкой подвески. Была разработана система регулирования по отклонению и возмущению, показанная на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Структурная схема САР

Для того, чтобы описать принцип работы системы разберемся с каждым элементом в отдельности.

Начнем с исполнительного механизма – двигателя постоянного тока. Электродвигатель постоянного тока – электрическая машина постоянного тока, преобразующая электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию. Двигатель через редуктор соединён с барабаном, на который намотан трос. Подавая постоянный ток на двигатель, мы сматываем (или разматываем) барабан, тем самым изменяем длину троса, а значит и траекторию движения подвеса.

В качестве датчика положения вала двигателя в системе используется инкрементный оптический энкодер. Для формирования импульсов инкрементный энкодер имеет установленный на валу диск с делениями, которые определяют положение вала, и устройство для считывания этого положения. Положение диска (угол поворота) кодируется путём чередования двух типов областей на диске, которые идентифицируются при помощи датчиков (например, для оптического датчика это прозрачные и непрозрачные области). Для определения направления вращения используют второй датчик,

который смещён относительно первого на половину ширины штриха диска или промежутка между штрихами. Для определения начального положения диска на него наносится отдельная шкала референтной метки. Масштабируя сигнал с энкодера на контроллере, будем получать величину скорости вращения вала двигателя. Таким образом, данный датчик сочетает в себе три функции: измерение положения, направления и скорости вращения вала двигателя.

Так как в процессе перемещения подвеса момент нагрузки на валу двигателя изменяется, в систему добавлен контур регулирования по возмущению. Датчик веса преобразует величину веса в электрический сигнал, который учитывается регулятором. Таким образом, можно добиться лучших показателей переходного процесса, таких как время переходного процесса, точность и перерегулирование.

В качестве устройства сравнения используется программируемый логический контроллер. Контроллер необходим для сбора и обработки сигналов с датчиков и формирования команд для управления двигателями. Контроллер должен иметь модульную структуру и возможность расширения. Таким образом, на основе сигнала рассогласования (разности между заданием и сигналом обратной связи), ПЛК генерирует управляющий сигнал, тем самым меняет подводимое к двигателям через приводы напряжение, а значит и траекторию движения подвеса.

### **3 Разработка функциональной схемы автоматизации**

Функциональная схема автоматизации (ФСА) – это технический документ, входящий в основной комплект рабочих чертежей, проектируемой системы автоматизации, согласно ГОСТ 21.408 – 2013. ФСА создается с целью отображения основных технических решений. Объект управления рассматривается как комплекс оборудования (основного и вспомогательного) со встроенными в него органами.

ФСА может быть выполнена упрощенным или развернутым способами. Отличие развернутого в том, что на схеме изображаются места расположения и состав средств автоматизации. Приборы и средства автоматизации изображаются в виде условных графических изображений, согласно ГОСТ 21.208-2013.

На ФСА изображают технологическое оборудование и связующие элементы АС, средства автоматизации в объемах, предусмотренных РД 39-0137095-001-86 и ПБ 08-624-03, которые позволяют управлять основными технологическими процессами, регулировать наиболее важные параметры установок, измерять, регистрировать и сигнализировать предупредительные и аварийные значения параметров, а также, в необходимых случаях, блокировать (отключать) технологическое оборудование по аварийным значениям параметров, чтобы исключить опасное развитие технологического процесса.

Проектирование автоматизированной системы выполнено по принципу трехуровневой иерархии – предусмотрен полевой, средний и верхний уровень.

На полевым уровне располагаются местные показывающие приборы, первичные средства измерения, исполнительные механизмы и устройства местного управления.

Средний уровень предусматривает сбор и первичную обработку информации с устройств полевого уровня, контроль обозначенных параметров, передачу (прием) данных на верхний уровень (с верхнего уровня). На основе

информации, поступившей на средний уровень, формируются команды управления (автоматически или оператором).

На верхнем уровне происходит сосредоточение, обработка и упорядочивание (формирование базы данных) информации с нижних уровней. Также предусматривается индикация необходимых параметров, регистрация и хранение информации. Здесь происходит формирование отчетной документации и осуществление управления технологическими режимами системы.

АРМ предназначено для отображения необходимого объема информации в удобном для восприятия виде и приема команд управления от оператора. С помощью серверной части выполняется хранение и обработка информации, а также обмен ею.

Функциональная схема автоматизации системы по формированию траектории крана гибкой подвески приведена в приложении А.

## 4 Разработка информационного обеспечения

В разработку информационного обеспечения входит разработка схемы информационных потоков. Схема информационных потоков представлена в приложении Б.

Каждый элемент контроля и управления должен иметь свой идентификатор (тег), структура которого должна иметь форму: AAA\_BBB\_CC.

1. AAA – параметр, состоящий из 3-х символов, принимающий значения:

CUR (Current) – электрический ток;

HND (Hand) – ручное управление;

POS (Position) – положение;

WGT (Weight) – вес.

2. BBB – код технологического аппарата (или объекта), содержащий 3 символа:

ENG (Engine) – двигатель;

SUS (Suspension) – подвес;

3. CC – уточнение или порядковый номер.

Перечень идентификаторов сигналов приведен в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Перечень идентификаторов сигналов

Идентификатор	Назначение идентификатора
CUR_ENG_01	Величина тока, подводимая к первому двигателю
HND_ENG_01	Ручное управление первым двигателем
POS_ENG_01	Положение вала первого двигателя
WGT_SUS_01	Величина веса на первом тросе
CUR_ENG_02	Величина тока, подводимая ко второму двигателю
HND_ENG_02	Ручное управление вторым двигателем

Продолжение таблицы 4.1 – Перечень идентификаторов сигналов

Идентификатор	Назначение идентификатора
POS_ENG_02	Положение вала второго двигателя
WGT_SUS_02	Величина веса на втором тросе
CUR_ENG_03	Величина тока, подводимая к третьему двигателю
HND_ENG_03	Ручное управление третьим двигателем
POS_ENG_03	Положение вала третьего двигателя
WGT_SUS_03	Величина веса на третьем тросе
CUR_ENG_04	Величина тока, подводимая к четвёртому двигателю
HND_ENG_04	Ручное управление четвёртым двигателем
POS_ENG_04	Положение вала четвёртого двигателя
WGT_SUS_04	Величина веса на четвёртом тросе

## 5 Комплекс аппаратно-технических средств

### 5.1 Выбор электродвигателя постоянного тока

На основе расчётов, выполненных в главе 1, были рассмотрены два мотор – редуктора червячного типа: King Right Motor WG1188 и Transtecno ECM (рисунки 5.1.1-5.1.2).



Рисунок 5.1.1 – Внешний вид мотор-редуктора King Right Motor WG1188

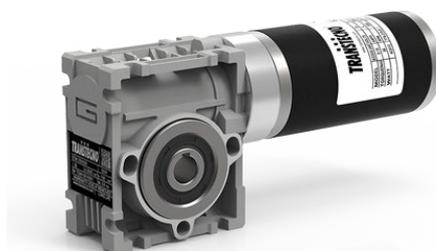


Рисунок 5.1.2 – Внешний вид мотор-редуктора Transtecno ECM

Сравнение характеристик двигателей приведено в таблице 5.1.1.

Таблица 5.1.1 – Сравнение характеристик двигателей

Двигатель	King Right Motor WG1188	Transtecno ECM
Мощность, Вт	600	800
Частота вращения выходного вала, об/мин	202	300

### Продолжение таблицы 5.1.1 – Сравнение характеристик двигателей

Двигатель	King Right Motor WG1188	Transtecno ECM
Крутящий момент, Н·м	17,9	22
Передаточное число	10	10
Напряжение питания, В	24	24
Цена, руб	25000	32450

Исходя из данных, приведенных в таблице, выберем мотор-редуктор King Right Motor WG1188, так как он больше подходит к нашей системе по мощности.

Данный мотор-редуктор представляет собой электродвигатель и редуктор, совмещённые в одном блоке. Таким образом, не будет проблем с их совместимостью. Также у данного мотор-редуктора есть слот для установки датчика положения вала (энкодера).

### 5.2 Выбор силовой части электропривода

Для того, чтобы преобразовать трехфазное сетевое напряжение 380 В в стабилизированное постоянное напряжение необходим привод постоянного тока. Для этих целей были рассмотрены три привода постоянного тока: ABB DCS800-S02-0025-04/05, Sinamics DCM 6RA8018-6DV62-0AA0 и Mentor MP 25A4 (рисунки 5.2.1-5.2.3).



Рисунок 5.2.1 – привод постоянного тока ABB DCS800-S02-0025-04/05



Рисунок 5.2.2 – привод постоянного тока Sinamics DCM 6RA8018-6DV62-0AA0



Рисунок 5.2.3 – привод постоянного тока Mentor MP 25A4

Сравнение характеристик приводов приведено в таблице 5.2.1.

Таблица 5.2.1 – Сравнение характеристик источников питания

Привод постоянного тока	ABB DCS800-S02-0025-04/05	Sinamics DCM 6RA8018-6DV62-0AA0	Mentor MP 25A4
Выходной ток цепи якоря, А	30	25	25
Диапазон выходного напряжения, В	(0-400)	(0-420)	(0-550)
Напряжение питающей сети, В	380	400	(208-480)
Поддерживаемые протоколы связи	Modbus, Profibus, Ethernet	Modbus, Profibus, Ethernet	Modbus, Profibus, Ethernet
Цена, руб	182600	167000	121060

Исходя из данных, приведенных в таблице, был выбран привод постоянного тока Mentor MP 25A4, так как он имеет самую низкую цену и удовлетворяет рабочим требованиям системы.

Напряжение, подаваемое этим приводом на двигатели, управляется дистанционно с контроллера по протоколу Modbus.

### 5.3 Выбор датчика положения и скорости вращения вала

При формировании траектории движения подвеса в системе необходимо контролировать количество оборотов и скорость вращения вала двигателей. Для этих целей были рассмотрены три датчика положения вала (энкодера): СКБ ИС ЛИР-112А, Delta Electronics ES3 и Leine Linde RSI 505 (рисунки 5.3.1-5.3.3).



Рисунок 5.3.1 – датчик положения вала СКБ ИС ЛИР-112А



Рисунок 5.3.2 – датчик положения вала Delta Electronics ES3



Рисунок 5.3.3 – датчик положения вала Leine Linde RSI 505

Сравнение характеристик датчиков приведено в таблице 5.3.1

Таблица 5.3.1 – Сравнение характеристик датчиков положения вал

Датчик	СКБ ИС ЛИР-112А	Delta Electronics ES3	Leine Linde RSI 500
Максимальная скорость вращения, об/мин	6000	6000	7000
Предел допустимой погрешности	± 150"	± 120"	± 90"
Выходные сигналы	Прямоугольный импульсный сигнал	Прямоугольный импульсный сигнал	Прямоугольный импульсный сигнал
Напряжение питания, В	5	(5-24)	24
Степень пылевлагозащиты	IP50	IP65	IP66
Разрешающая возможность, дискрет/об	(100-32000)	(100-2500)	(100-10000)
Цена, руб	6000	6200	7690

Исходя из данных, приведенных в таблице, выбор остановим на датчике СКБ ИС ЛИР-112А, так как он имеет самую привлекательную цену и удовлетворяет рабочим требованиям системы.

#### 5.4 Выбор датчика веса

Для того, чтобы учитывать возмущающее воздействие, необходимо учитывать величину момента нагрузки на вал двигателя. Для этих целей были рассмотрены три S-образных датчика веса: Siemens SIWAREX WL200, Scaime ZFA и Revere 363 (рисунки 5.4.1-5.4.3).



Рисунок 5.4.1 – датчик веса Siemens SIWAREX WL200



Рисунок 5.4.2 – датчик веса Scaime ZFA



Рисунок 5.4.3 – датчик веса Revere 363

Сравнение характеристик датчиков приведено в таблице 5.4.1.

Таблица 5.4.1 – Сравнение характеристик датчиков веса

Датчик	Siemens SIWAREX WL200	Scaime ZFA	Revere 363
Номинальная нагрузка, кг	50	100	100
Предел допустимой погрешности	± 0,02 %	± 0,03 %	± 0,03 %
Выходные сигналы	(4-20) мА	(4-20) мА	(4-20) мА
Напряжение питания, В	(5-12)	10	10
Степень пылевлагозащиты	IP67	IP65	IP65
Цена, руб	37000	15000	8400

Исходя из данных, приведенных в таблице, выберем датчик веса Revere 363, так как он имеет самую привлекательную цену и удовлетворяет требованиям рабочих режимов системы.

Данный датчик – тензорезистивный, то есть он изменяет электрическое сопротивление чувствительного элемента в зависимости от приложенной нагрузки. Далее величина сопротивления преобразуется в унифицированный токовый сигнал и подаётся на контроллер.

### 5.5 Выбор программируемого логического контроллера

Для сбора и обработки сигналов с датчиков и формирования команд управления двигателями, было рассмотрено три варианта контроллеров: Modicon Premium, Овен ПЛК-160, SIMATIC S7-1200 (рисунки 5.5.1-5.5.3).



Рисунок 5.5.1 – Контроллер Modicon Premium



Рисунок 5.5.2 – Контроллер Овен ПЛК-160



Рисунок 5.5.3 – Контроллер SIMATIC S7-1200

Сравнение характеристик контроллеров приведено в таблице 5.5.1.

Таблица 5.5.1 – Сравнение характеристик контроллеров

Контроллер	Modicon Premium	Овен ПЛК-160	SIMATIC S7-1200
Память, Мб	256	8	2
Время цикла, мс	1	1	5
Количество аналоговых входов	-	8	-
Количество аналоговых выходов	-	4	-
Количество дискретных входов	-	16	-
Количество дискретных выходов	-	12	-
Типы интерфейсов	RS-485, RS-485, Ethernet, Profibus	RS-485, Ethernet	1xPROFINET, RJ45
Напряжение питания, В	24	(22-28)	24
Потребляемая мощность, Вт	3	40	12
Температура окружающей среды, °С	от 0 до плюс 70	от минус 10 до плюс 55	от 0 до плюс 55
Степень защиты	IP67	IP20	IP20
Цена, руб	89 802	33 480	28 783

В ходе анализа характеристик наиболее подходящим оказался контроллер ОВЕН-160, так как он имеет встроенный модуль ввода-вывода, меньшее время цикла, чем SIMATIC S7-1200 и меньшую цену, чем Modicon Premium.

## 6 Разработка схемы внешних проводок

Схема внешних электрических проводок приведена в приложении В. Система включает в себя следующие приборы:

- датчики положения вала СКБ ИС ЛИР-112А;
- датчики веса Revere 363.

Для передачи сигналов от перечисленных выше датчиков на щит контрольно-измерительных приборов и автоматики выбран кабель контрольный с токопроводящей медной жилой в ПВХ оболочке с ПВХ изоляцией не горящий (КВВГ нг 4х0,5), где 4 – количество жил, а 0,5 – сечение жил в миллиметрах.

Элементы конструкции кабеля:

- медная однопроволочная токопроводящая жила круглой формы.
- изоляция из поливинилхлоридного пластиката. Изолированные жилы кабелей скручены. В каждом из них имеется счетная пара. Изолированные жилы этой пары отличаются по цвету друг от друга и от остальных жил.
- оболочка из поливинилхлоридного пластиката.

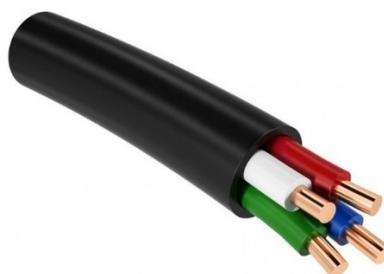


Рисунок 6.1 – Кабель КВВГ

Кабель КВВГ применяется для прокладки в каналах, туннелях в условиях агрессивной среды, в помещениях, при отсутствии механических воздействий на кабель [24].

## 7 Разработка алгоритмов управления траекторией крана

### 7.1 Формирование траектории прямой

Рассмотрим простейший пример управления формированием траектории подвеса – движение по прямой. Допустим, подвес в начальный момент времени находится в точке А с координатами (1, 3, -1). При этом длины тросов будут равны:

$$\begin{cases} L_{11} = \sqrt{1^2 + (-3)^2 + (-1)^2} = 3,32 \text{ м,} \\ L_{12} = \sqrt{1^2 + (3 - 4)^2 + (-1)^2} = 1,73 \text{ м,} \\ L_{13} = \sqrt{(1 - 4)^2 + (3 - 4)^2 + (-1)^2} = 3,32 \text{ м,} \\ L_{14} = \sqrt{(1 - 4)^2 + 3^2 + (-1)^2} = 4,36 \text{ м.} \end{cases} \quad (7.1.1)$$

В точке В с координатами (2, 2, -2) тросы будут иметь следующие длины:

$$\begin{cases} L_{21} = \sqrt{2^2 + 2^2 + (-2)^2} = 3,46 \text{ м,} \\ L_{22} = \sqrt{2^2 + (2 - 4)^2 + (-2)^2} = 3,46 \text{ м,} \\ L_{23} = \sqrt{(2 - 4)^2 + (2 - 4)^2 + (-2)^2} = 3,46 \text{ м,} \\ L_{24} = \sqrt{(2 - 4)^2 + 2^2 + (-2)^2} = 3,46 \text{ м.} \end{cases} \quad (7.1.2)$$

На рисунке 7.1.1 показана схема перемещения:

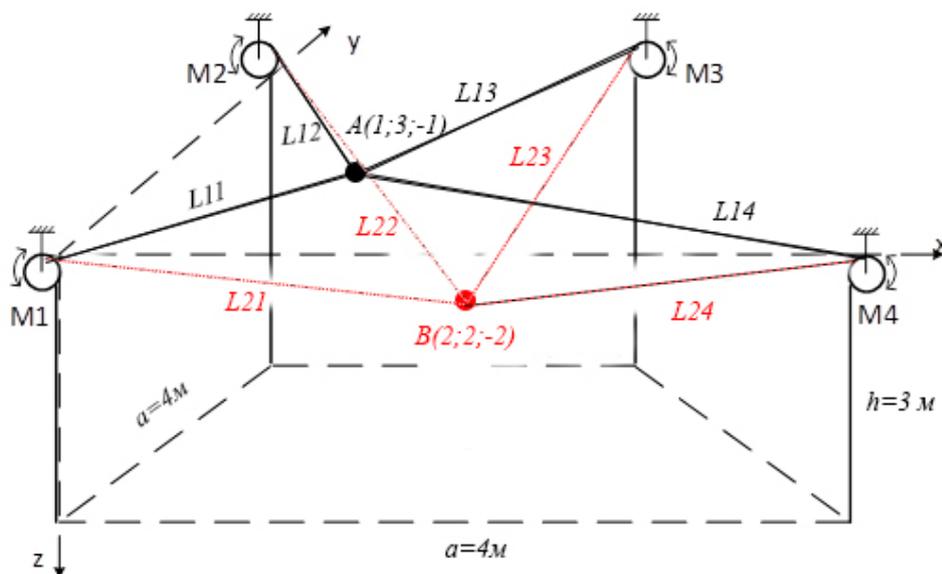


Рисунок 7.1.1 – Перемещение подвеса по прямой

С учетом растяжений длины тросов будут равны:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{11f} = L_{11} + \frac{F}{k} = 3,32 + \frac{122,5 \cdot 3,32}{5524} = 3,39 \text{ м,} \\ L_{12f} = 1,73 + \frac{122,5 \cdot 1,73}{5524} = 1,77 \text{ м,} \\ L_{13f} = 3,32 + \frac{122,5 \cdot 3,32}{5524} = 3,39 \text{ м,} \\ L_{14f} = 4,36 + \frac{122,5 \cdot 4,36}{5524} = 4,46 \text{ м,} \\ L_{21f} = 3,46 + \frac{122,5 \cdot 3,46}{5524} = 3,54 \text{ м,} \\ L_{22f} = 3,46 + \frac{122,5 \cdot 3,46}{5524} = 3,54 \text{ м,} \\ L_{23f} = 3,46 + \frac{122,5 \cdot 3,46}{5524} = 3,54 \text{ м,} \\ L_{24f} = 3,46 + \frac{122,5 \cdot 3,46}{5524} = 3,54 \text{ м.} \end{array} \right. \quad (7.1.3)$$

Та длина тросов, которую нужно смотать или отмотать:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta L_1 = L_{11f} - L_{21f} = -0,15 \text{ м,} \\ \Delta L_2 = L_{12f} - L_{22f} = -1,77 \text{ м,} \\ \Delta L_3 = L_{13f} - L_{23f} = -0,15 \text{ м,} \\ \Delta L_4 = L_{14f} - L_{24f} = 0,91 \text{ м.} \end{array} \right. \quad (7.1.4)$$

Знаки “-” в системе уравнений 7.1.4 отвечают за направление вращения двигателей.

Диаметр барабана  $D_b$  равен 0,11 м, поэтому за 1 вращение барабан сматывает (отматывает)  $\pi \cdot D_b = 0,35$  м каната. Так как передаточное число двигателя равно 10, количество оборотов, которое должен выполнить каждый двигатель:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_1 = \Delta L_1 \cdot \frac{10}{0,35} = -4,36 \text{ об,} \\ N_2 = \Delta L_2 \cdot \frac{10}{0,35} = -51,23 \text{ об,} \\ N_3 = \Delta L_3 \cdot \frac{10}{0,35} = -4,36 \text{ об,} \\ N_4 = \Delta L_4 \cdot \frac{10}{0,35} = 26,47 \text{ об.} \end{array} \right. \quad (7.1.5)$$

Эти обороты каждый двигатель должен будет выполнить за одно и то же время, так как нас интересует именно согласованное по времени управление.

Данный алгоритм формирования траектории движения подвеса приведен в приложении Г.

## 7.2 Формирование сложной траектории

В качестве сложной траектории рассмотрим движение подвеса по окружности. Траектория движения показана на рисунке 2.2.1, движение происходит в плоскости ХУ.

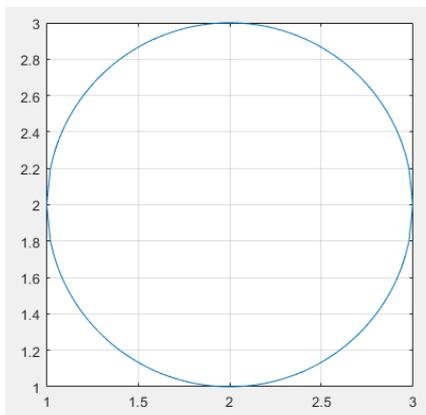


Рисунок 7.2.1 – Траектория движения подвеса

Для того, чтобы применить алгоритмы управления по формированию такой траектории, найдём координаты окружности с помощью программы, показанной на рисунке 7.2.2:

```
Trajectory.m x Program.m x +
1 - x0 = 2; %X-координата центра окружности
2 - y0 = 2; %Y-координата центра окружности
3 - r = 1; %Радиус окружности
4 - x = linspace(x0 - r, x0 + r); %Линейное распределение точек
5 - y = sqrt(r^2 - (x - x0).^2); %Уравнение окружности
6 - plot([x, x(end:-1:1)], [y + y0, -y + y0]); %Построение графика
7 - grid on;
8 - axis square;
```

Рисунок 7.2.2 – Математическое описание траектории

Данная программа математически описывает траекторию окружности, также создается два массива с  $x$  и  $y$  координатами, последовательно обходящими окружность и распределенными равномерно. Матрицы с координатами показаны на рисунке 7.2.3.

The image shows two windows of a software application, each displaying a data table. The top window, labeled 'x', shows a 1x12 array of double values. The bottom window, labeled 'y', shows a 1x12 array of double values. Both windows have a menu bar with 'PLOTS', 'VARIABLE', and 'VIEW' options, and a toolbar with icons for 'Open', 'Print', 'Insert', 'Delete', and 'Transpose'. Below the toolbar are tabs for 'VARIABLE', 'SELECTION', and 'EDIT'. The data tables are displayed in a grid format with columns numbered 1 to 12.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1.0202	1.0404	1.0606	1.0808	1.1010	1.1212	1.1414	1.1616	1.1818	1.2020	1.2222

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0.2000	0.2814	0.3428	0.3938	0.4380	0.4772	0.5127	0.5451	0.5750	0.6027	0.6285

Рисунок 7.2.3 – Массивы координат

Предлагается последовательно выбирать из массивов координаты и передавать их в управляющую программу. Таким образом, любая сложная траектория может быть представлена суммой отрезков прямых, причем чем меньше шаг, тем плавнее будет траектория.

Единственным условием является наличие математического описания траектории, в остальном же задача управления полностью покрывается формированием траектории прямой.

## 8 Разработка имитационной модели работы системы

### 8.1 Создание управляющей программы

Реализуем алгоритм, описанный в приложении Г, посредством написания управляющей программы в пакете прикладных программ MATLAB. Листинг программы приведен в приложении Д на рисунке П.1.

После запуска программы в рабочем пространстве MATLAB объявляются все переменные и высчитываются неизвестные. Результат работы программы представлен на рисунке П.2 в приложении Г.

Для составления операторно-структурной схемы системы в MATLAB Simulink необходимо определить передаточные функции элементов системы, то есть написать уравнения, связывающие входную и выходную величину каждого из элементов.

### 8.2 Определение передаточной функции привода

Привод постоянного тока, используемый в данной системе, является тиристорным преобразователем, который описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$T_{ТП} \frac{dU_{ТП}}{dt} + U_{ТП} = K_{ТП} U_{РТ}, \quad (8.2.1)$$

где  $U_{РТ}$  – выходное напряжение контура регулирования тока;

$U_{ТП}$  – выходное напряжение тиристорного преобразователя;

В операторной форме это уравнение имеет вид:

$$T_{ТП} p U_{ТП}(p) + U_{ТП}(p) = K_{ТП} U_{РТ}(p). \quad (8.2.2)$$

Отсюда передаточная функция тиристорного преобразователя:

$$W_{ТП}(p) = \frac{U_{ТП}(p)}{U_{РТ}(p)} = \frac{K_{ТП}}{T_{ТП} p + 1}. \quad (8.2.3)$$

### 8.3 Определение передаточной функции двигателя

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} U_{ТП} = R_{Я}I_{Я} + L_{Я} \frac{dI_{Я}}{dt} + C_E\omega, \\ M_{ДВ} = M_{НАГР} + J \frac{d\omega}{dt}, \\ M_{ДВ} = C_M I_{Я}, \end{cases} \quad (8.3.1)$$

где  $R_{Я}$  и  $L_{Я}$  – активное сопротивление и индуктивность якорной цепи;  
 $C_E$  и  $C_M$  – конструктивные постоянные двигателя, зависящие от конструктивного исполнения двигателя (число пар полюсов и т.д.);  
 $M_{НАГР}$  – момент нагрузки на валу двигателя;  
 $J$  – момент инерции вращающихся частей привода, приведенный к валу двигателя.

В общем случае на двигатель действует 2 воздействия, показанных на рисунке 8.3.1.

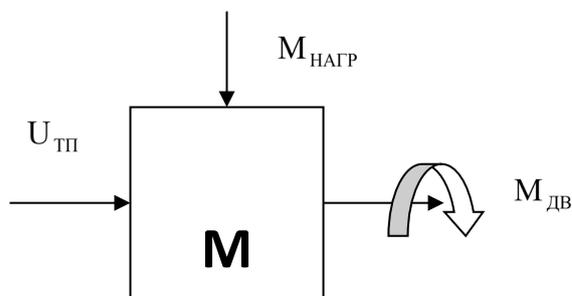


Рисунок 8.3.1 – Воздействия на двигатель постоянного тока

Для получения передаточной функции двигателя по управляющему воздействию, считаем, что  $M_{НАГР} = 0$  (принцип суперпозиции).

Преобразуем второе уравнение системы (8.3.1):

$$M_{ДВ} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (8.3.2)$$

Подставим его в третье уравнение системы (8.3.1):

$$C_M I_{Я} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (8.3.3)$$

Отсюда:

$$I_{\text{Я}} = \frac{J}{C_M} \frac{d\omega}{dt} \quad (8.3.4)$$

Подставляем в первое уравнение системы (8.3.1):

$$U_{\text{ТП}} = \frac{L_{\text{Я}} J}{C_M} \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{R_{\text{Я}} J}{C_M} \frac{d\omega}{dt} + C_E \omega \quad (8.3.5)$$

Связь между ЭДС якоря и угловой скоростью, а также между вращающим моментом и током якоря в системе единиц СИ определяется единым электромагнитным коэффициентом:

$$c = C_M = C_E \cdot \quad (8.3.6)$$

Тогда уравнение (8.3.5) можно записать как:

$$\frac{U_{\text{ТП}}}{c} = \frac{L_{\text{Я}} J}{c^2} \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{R_{\text{Я}} J}{c^2} \frac{d\omega}{dt} + \omega, \quad (8.3.7)$$

где  $\frac{R_{\text{Я}} J}{c^2} = T_M$  – электромеханическая постоянная времени якорной цепи двигателя;

$\frac{L_{\text{Я}}}{R_{\text{Я}}} = T_{\text{Э}}$  – электромагнитная постоянная времени якорной цепи двигателя.

В результате получаем дифференциальное уравнение двигателя постоянного тока:

$$\frac{U_{\text{ТП}}}{c} = T_M T_{\text{Э}} \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega. \quad (8.3.8)$$

Переходим к операторной форме:

$$\frac{U_{\text{ТП}}(p)}{c} = T_M T_{\text{Э}} p^2 \omega(p) + T_M p \omega(p) + \omega(p). \quad (8.3.9)$$

Отсюда получаем передаточную функцию двигателя постоянного тока для скорости вращения:

$$W_{ДВ.СК}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{ТП}(p)} = \frac{1}{c(T_M T_{\Delta} p^2 + T_M p + 1)} \quad (8.3.10)$$

Если применить замену  $T_M T_{\Delta} = T_1 T_2$  и  $T_M = T_1 + T_2$ , то данную передаточную функцию можно представить в виде последовательного соединения двух инерционных звеньев:

$$W_{ДВ.СК}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{ТП}(p)} = \frac{1}{c(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (8.3.11)$$

Так как  $T_M \gg T_{\Delta}$ , можно приближённо принять:

$$W_{ДВ.СК}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{ТП}(p)} = \frac{1}{c(T_M p + 1)(T_{\Delta} p + 1)}. \quad (8.3.12)$$

#### 8.4 Моделирование в среде MATLAB Simulink

Перед началом моделирования необходимо определить расчетные параметры для двигателя постоянного тока. Электромагнитная постоянная времени якорной цепи  $T_{\Delta}$  может быть найдена по формуле:

$$T_{\Delta} = \frac{L_{я}}{R_{я}}, \text{ с}, \quad (8.4.1)$$

где  $L_{я}$  – индуктивность обмотки якоря, Гн;

$R_{я}$  – сопротивление обмотки якоря, Ом.

Для двигателя, выбранного в разделе 5.1,  $L_{я} = 9 \cdot 10^{-2}$  Гн и  $R_{я} = 0,409$  Ом.

Отсюда:

$$T_{\Delta} = \frac{9 \cdot 10^{-2}}{0,409} = 0,22 \text{ с}. \quad (8.4.2)$$

Электромеханическую постоянную времени можно определить по формуле:

$$T_M = J \frac{R_{я}}{c}, \text{ с}, \quad (8.4.3)$$

где  $J$  – момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу двигателя, кг·м<sup>2</sup> (для выбранного двигателя равен 0,027);

$c$  – конструктивная постоянная двигателя (для выбранного двигателя равна 1,04).

Таким образом, электромеханическая постоянная времени равна:

$$T_m = 0,027 \cdot \frac{0,409}{1,04} = 0,01 \text{ с.} \quad (8.4.4)$$

Все переменные подсчитаны и можно приступать к моделированию.

Готовая схема представлена на рисунке П.3 в приложении Е. Данная схема аналогична для приводов М2, М3 и М4. В качестве задающих воздействий используются результаты, полученные в управляющей программе.

В данной системе было решено отказаться от использования ПИ- и ПИД-регуляторов, так как их введение значительно увеличивает перерегулирование в системе, что может негативно повлиять на управление траекторией подвеса.

Проведём сравнение П- и ПД-регуляторов. Результаты, полученные при моделировании с использованием П-регуляторов, показаны в таблице 8.4.1, с использованием ПД-регуляторов – в таблице 8.4.2. Коэффициенты регуляторов получены методом автоматической настройки MATLAB.

Таблица 8.4.1 – Показатели качества при использовании П-регуляторов

Регуляторы	Коэффициенты регуляторов	Время переходного процесса, с	Перерегулирование, %
	$K_p$		
Регулятор скорости	0,16	2	0
Регулятор положения	21,63		

Таблица 8.4.2 – Показатели качества при использовании ПД-регуляторов

Регуляторы	Коэффициенты регуляторов		Время переходного процесса, с	Перерегулирование, %
	$K_P$	$K_D$		
Регулятор скорости	0,35	0,04	1,8	0
Регулятор положения	14,29	0,08		

Как можно заметить, качественные показатели переходных процессов не сильно отличаются, а значит достаточно использования П-регуляторов.

График переходного процесса первого привода показан на рисунке 8.4.1.

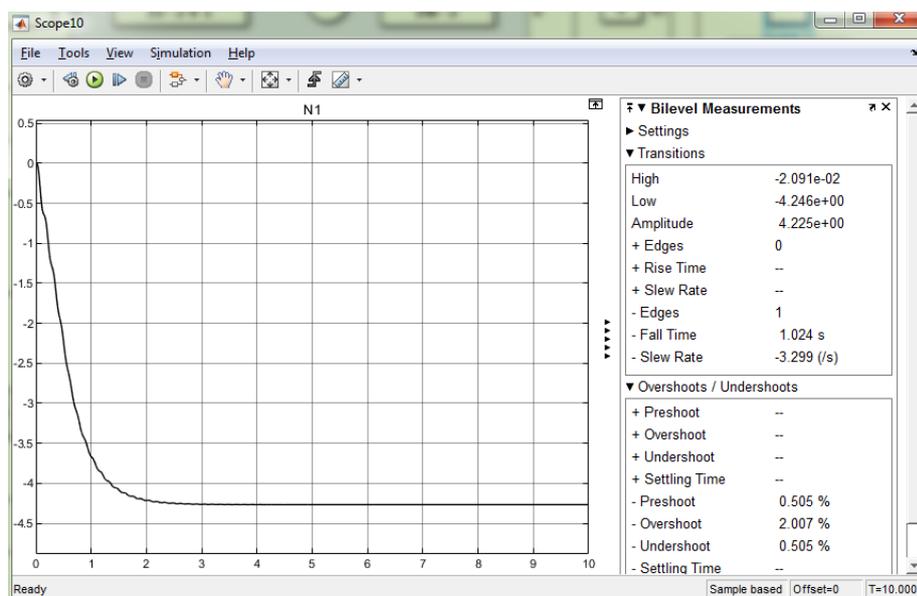


Рисунок 8.4.1 – График переходного процесса первого привода

Время переходного процесса составило приблизительно 3 секунды, перерегулирование 0%, а установившаяся ошибка равна нулю.

Теперь проведём испытание всей системы сразу, то есть будем подавать управляющие воздействия на каждый привод. Переходные процессы каждого из приводов представлены на рисунке 8.4.2.

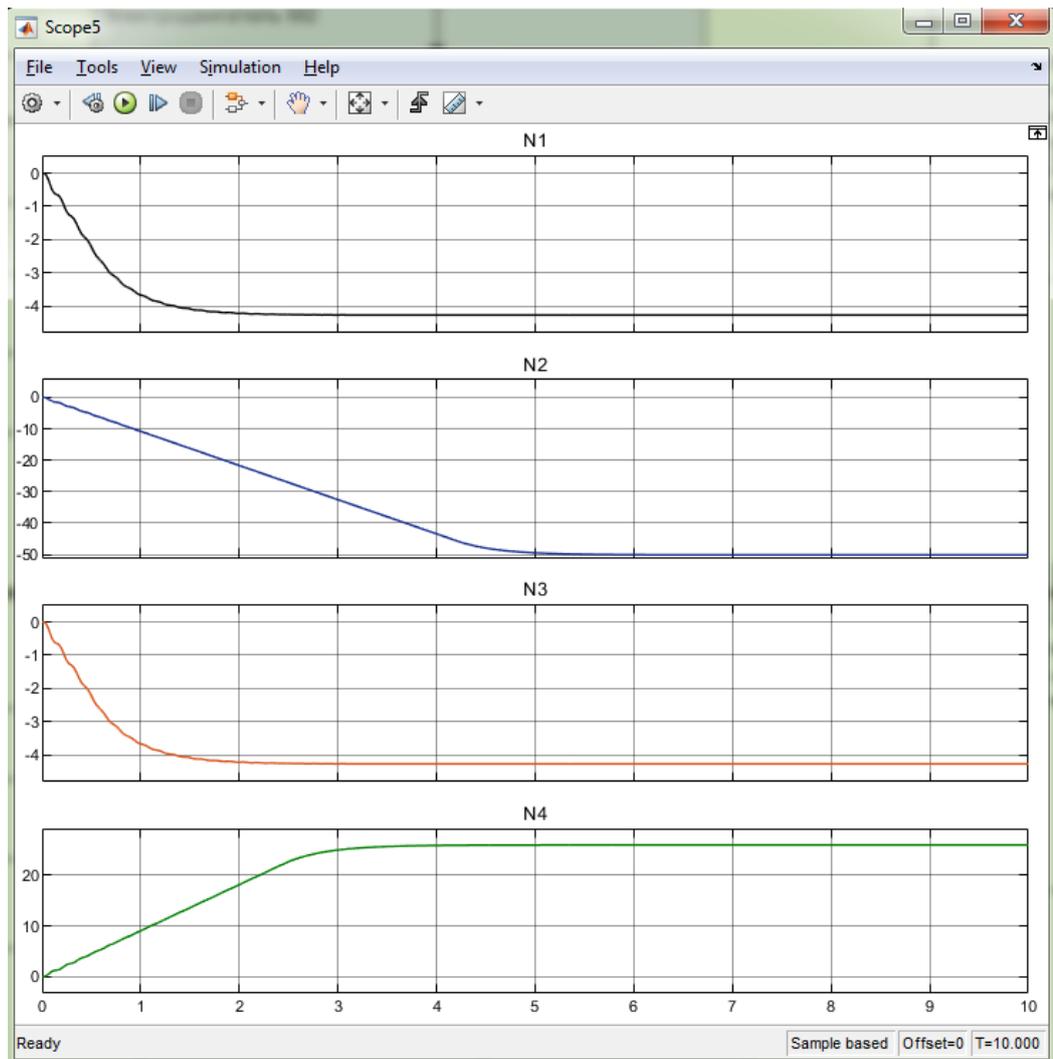


Рисунок 8.4.2 – Графики переходных процессов приводов (вид движения – одновременное с максимальной скоростью)

Как можно заметить из рисунка, приводы работают разное время, так как все они работали с максимально возможной скоростью.

Для того, чтобы реализовать согласованное по времени управление, введём в контур управления звенья Saturation (Насыщение). Эти звенья ограничивают сигнал по высоте, тем самым уменьшается сигнал управления. Для того, чтобы определить порог ограничения, необходимо выделить самый длительный переходный процесс и определить его соотношения с остальными. Значения коэффициентов составили 0.5 для первого и третьего приводов и 0.75 для четвёртого. Итоговые графики переходных процессов показаны на рисунке 8.4.3.

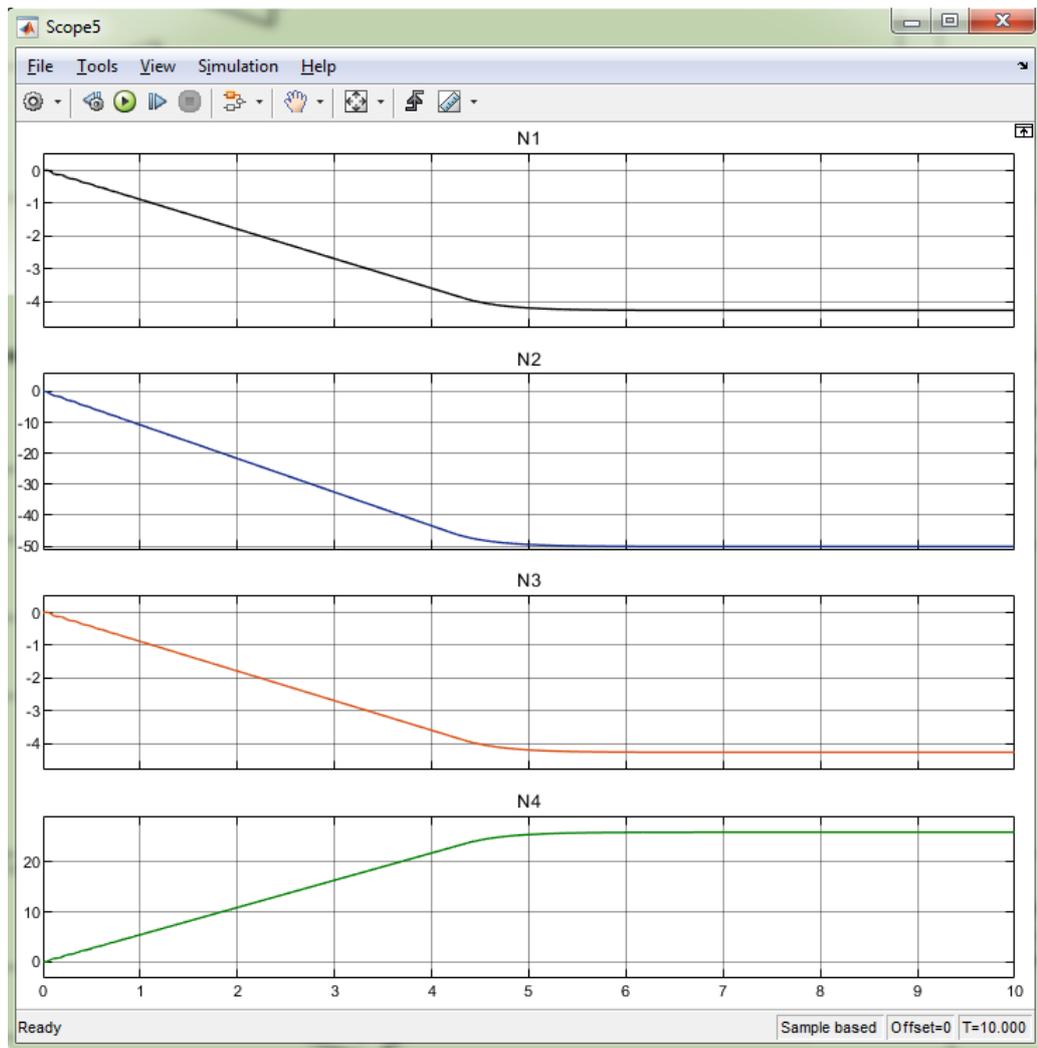


Рисунок 8.4.3 – Графики переходных процессов приводов (вид движения – согласованное по времени)

Переходные процессы длятся одно и то же время, а значит задачу управления системой формирования траектории можно считать выполненной успешно.

## 9 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела выпускной квалификационной работы является анализ конкурентоспособности разработки, ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Работа заключается в создании автоматизированной системы управления формирования траектории крана гибкой подвески.

Данная система в дальнейшем может быть применена в научно-исследовательских целях: для испытаний космических трансформируемых крупногабаритных конструкций, исследования эффективности различных методов реабилитации, испытания робототехнических комплексов (мобильные роботы, андроиды, экзоскелеты). Также данную систему можно использовать в сфере развлечений (расширение возможностей виртуальной реальности, фото- и видеосъёмка).

### 9.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В данной работе осуществлена разработка системы автоматизированного управления формирования траектории крана гибкой подвески, которая позволит применять процессы управления и готовые решения на производстве.

Потенциальными потребителями результатов исследования являются научные организации, образовательные и медицинские учреждения, спортивно-оздоровительные комплексы и концертные залы.

Таблица 9.1.1 – Карта сегментирования

		Сфера использования			
		Промышленные предприятия	Стадионы и концертные залы	Образовательные учреждения	Лаборатории
Размер организации	Крупные				
	Средние				
	Мелкие				

В приведенной карте сегментирования показано, что для реализации разработки подходят средние и мелкие промышленные предприятия, стадионы и концертные залы, образовательные учреждения, а также мелкие лаборатории. Для внедрения в более крупные организации необходимо внедрить в систему поддержку промышленных сетей и настроить взаимодействие со SCADA-системами, а также повысить точность оборудования.

## **9.2 Анализ конкурентных технических решений**

Данное конкретное научное исследование рассчитано на медицинские организации, которые специализируются на реабилитации пациентов с двигательными нарушениями, например, нарушениях ходьбы вследствие инсульта, травмах головного и спинного мозга, при рассеянном склерозе, при спинальных травмах, демиелинизирующих заболеваниях и паркинсонизме. Поэтому поиск существующих решений был произведен именно в этой области.

На данный момент краны гибкой подвески еще не нашли применения в реабилитационной медицине на территории Российской Федерации и странах СНГ, несмотря на то, что за границей подобные системы активно разрабатываются, ведутся научные исследования и создаются коммерческие продукты серийного производства и уже есть примеры успешного внедрения таких систем в реальных медицинских учреждениях [4].

В результате изучения существующих решений в данной области, выявлено две существующие реабилитационные системы компенсации веса, построенные на основе крана гибкой подвески с четырьмя звеньями: это Float и Ryzen. Ниже кратко описана каждая из упомянутых систем:

1. Float – реабилитационная система обезвешивания с четырьмя гибкими звеньями – тросами, которые управляются приводами через подвижные ролики, перемещающиеся по параллельным рельсам, смонтированными к потолку. Данная система представлена на рисунке 9.2.1.

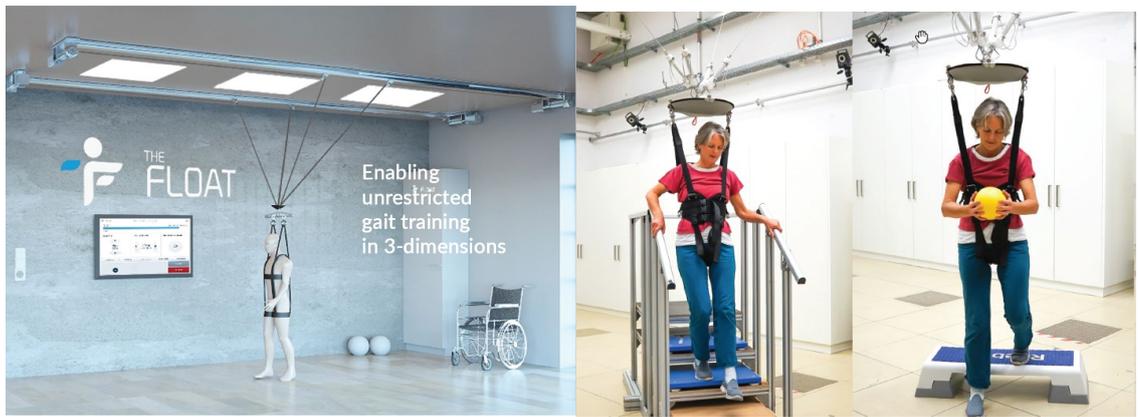


Рисунок 9.2.1 – Реабилитационная система компенсации веса – FLOAT

2. Ryzen – реабилитационная система обезвешивания, аналогичная системе Float по принципу действия, но с другой конструкцией. Данная система представлена на рисунке 9.2.2.



Рисунок 9.2.2 – Реабилитационная система компенсации веса – Ryzen

Сравнительная таблица конкурирующих технических решений приведена в таблице 9.2.1.

Таблица 9.2.1 – Сравнение конкурирующих технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{\phi}$	$B_{k1}$	$B_{k2}$	$K_{\phi}$	$K_{k1}$	$K_{k2}$
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
Удобство в эксплуатации	0,1	4	5	5	0,4	0,5	0,5
Долговечность	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25

Продолжение таблицы 9.2.1 – Сравнение конкурирующих технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
Надежность	0,1	5	5	4	0,4	0,5	0,4
Безопасность	0,2	4	4	4	0,8	0,8	0,8
Точность измерений	0,05	4	5	4	0,2	0,25	0,2
Быстродействие	0,05	4	4	4	0,25	0,2	0,2
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
Цена	0,2	5	3	4	1	0,6	0,8
Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	5	4	0,4	0,5	0,4
Послепродажное обслуживание	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
Доступность	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>43</b>	<b>4,45</b>	<b>4,25</b>	<b>4,2</b>

По результатам расчётов таблицы 9.2.1 можно заключить, что разрабатываемая система конкурентоспособна на рынке. Разработка проигрывает аналогичным системам в удобстве: системе Float за счёт отсутствия возможности автоматического формирования заданной траектории; системе Ryzen за счёт отсутствия взаимодействия со SCADA-системами на данном этапе разработки. К сильным сторонам можно отнести надёжность (за счёт предварительного моделирования и возможности применения сложных алгоритмов управления), цену разработки (экономия за счёт переноса управляющих функций ПЛК на программный пакет MATLAB), а также доступность, так как аналогичные системы можно приобрести на российском рынке только через посредников.

### 9.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ проводится для комплексной оценки внешней и внутренней среды проекта. В силу того, что разработка системы автоматического формирования траектории является лишь началом научно-

исследовательского проекта, при SWOT-анализе рассматриваются сильные и слабые стороны, возможности и угрозы применительно системе управления, а не к установке в целом. Итоговая матрица SWOT-анализа приведена в таблице 9.3.1.

Таблица 9.3.1 – Матрица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны:</b>  С1. Предварительное моделирование.  С2. Возможность применения сложных алгоритмов управления.  С3. Возможность быстрого программного изменения алгоритма управления.  С4. Экономия на среднем уровне АСУ ТП за счёт переноса управляющей программы на верхний уровень (ПК).</p>	<p><b>Слабые стороны:</b>  Сл1. Затраты на ПО для моделирования.  Сл2. Затраты на дополнительное обучение пользователя и/или оператора.  Сл3. Сложность применения подхода для управления быстротекущими процессами.  Сл4. Возможность выбора только из предустановленных траекторий.</p>
<p><b>Возможности:</b>  В1. Изменение алгоритма управления для использования системы в других областях.  В2. Перенос управляющих функций на ПЛК.  В3. Использование пакета Simulink Real Time.  В4. Сопряжение с мобильными технологиями.</p>	<p>В1С1С2С3. Создание универсальной системы для использования в других областях.  В2С2 Реализация разработки для крупных предприятий.  В4С3. Управление с мобильных устройств повысит удобство использования системы.</p>	<p>В1Сл1. ПО для моделирования меняться не будет.  В3Сл3. Simulink Real Time позволит создавать из моделей приложения реального времени для управления быстротекущими процессами.  В4Сл2Сл4. Мобильные технологии помогут пользователю задавать желаемую траекторию.</p>

Продолжение таблицы 9.3.1 – Матрица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны:</b>                  С1. Предварительное моделирование.                  С2. Возможность применения сложных алгоритмов управления.                  С3. Возможность быстрого программного изменения алгоритма управления.                  С4. Экономия на среднем уровне АСУ ТП за счёт переноса управляющей программы на верхний уровень (ПК).</p>	<p><b>Слабые стороны:</b>                  Сл1. Затраты на ПО для моделирования.                  Сл2. Затраты на дополнительное обучение пользователя и/или оператора.                  Сл3. Сложность применения подхода для управления быстротекущими процессами.                  Сл4. Возможность выбора только из предустановленных траекторий.</p>
<p><b>Угрозы:</b>                  У1. Появление представительств компаний конкурентов на российском рынке.                  У2. Повышенные требования к безопасности данных.                  У3. Рост цен на контроллерное оборудование и регуляторы.</p>	<p>У1С2С4. Простота и надежность системы позволит ей оставаться конкурентоспособной.                  У3С4. У системы нет необходимости использовать программируемые логические контроллеры.</p>	<p>У1Сл3. Приведёт к конкурентному отставанию, если не вводить в систему автоматическую идентификацию.                  У3Сл1Сл2. Возможен отказ от рассмотренного подхода.</p>

По итогам SWOT-анализа выявлены возможности для дальнейшего развития настоящей системы формирования траектории.

1. Надежность, цена и доступность системы позволят противодействовать угрозе У1.

2. В случае предъявления повышенных требований к безопасности данных (угроза У2) разработка может получить конкурентное отставание, так как отечественных аналогов программному пакету MATLAB не существует. В

этом случае следует отказаться от использования MATLAB и перенести управляющие функции на уровень SCADA-системы (например, WinCC).

3. Для противодействия угрозе УЗ и сокращения затрат на разработку можно использовать более дешёвые ПЛК.

## 9.4 Планирование научно-исследовательской работы

### 9.4.1 Структура работы

Прежде чем начать работу над проектом, необходимо провести планирование этапов работы, обозначив при этом занятость каждого из участников, а также привести сроки выполнения каждого этапа. Для реализации проекта необходимы три исполнителя – научный руководитель (НР), консультант (К) и инженер (И). Структура работы и распределение занятости исполнителей приведены в таблице 9.4.1.1.

Таблица 9.4.1.1 – Структура работы

Этапы работы	Загрузка исполнителей
1. Постановка целей и задач исследования	НР – 80% И – 20%
2. Обзор литературы	И – 100%
3. Разработка технического задания	НР – 20% К – 10% И – 70%
4. Разработка календарного плана работ	НР – 20% И – 80%
5. Идентификация объекта	И – 100%
6. Создание модели в MATLAB	И – 100%
7. Сравнительный анализ методов настройки на модели системы	И – 100%
8. Обработка полученных результатов	НР – 15% К – 15% И – 70%
9. Оформление расчётно-пояснительной записки	И – 100%
10. Подведение итогов	НР – 100%

## 9.4.2 Разработка графика проведения научно-технического исследования

Трудоёмкость выполнения исследования оценивается экспертным путём в силу вероятностного характера величины. За единицу измерения трудоёмкости принимаются человеко-дни. Ожидаемая трудоёмкость рассчитывается по следующей формуле [8]:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5}, \quad (9.4.2.1)$$

где  $t_{ож}$  – ожидаемая трудоёмкость выполнения работы чел.дн;

$t_{\min}$  – минимально возможная трудоёмкость выполнения заданной работы, чел.дн;

$t_{\max}$  – максимально возможная трудоёмкость выполнения заданной работы, чел.дн.

Для построения графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта длительность каждого из этапов работ в рабочих днях переводится в календарные дни по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot K_{КД}, \quad (9.4.2.2)$$

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

$T_{РД}$  – продолжительность выполнения работы в рабочих днях;

$K_{КД}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$K_{КД} = \frac{T_{КД}}{T_{КД} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (9.4.2.3)$$

где  $T_{КД}$  – количество календарных дней в году;

$T_{ВД}$  – количество выходных дней в году;

$T_{ПД}$  – количество праздничных дней в году.

Значение коэффициента календарности для 2020 года [8]:

$$K_{KD} = \frac{366}{366 - 66} = \frac{366}{300} = 1,22 \quad (9.4.2.4)$$

С учётом данных таблицы 9.4.1.1 и приведённых выше формул составляется расчётная таблица 9.4.2.1.

Диаграмма Ганта, представляющая собой календарный график работ, приведена в таблице 9.4.2.2. В данной таблице  отображает совместную работу студента и руководителя, а  индивидуальную работу студента.

Таблица 9.4.2.1 – Расчёт трудозатрат на выполнение работ

Наименование работы	Исполнитель и работы	Длительность работ, дн.			Трудоёмкость работ по исполнителям, чел.дн					
		$t_{\min}$	$t_{\max}$	$t_{о.ж}$	$T_{РД}$			$T_{КД}$		
					НР	К	И	НР	К	И
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
1. Постановка целей и задач исследования	НР, И	2	4	2,8	2,24	0	0,56	2,7328	0	0,6832
2. Обзор литературы	И	5	7	5,8	0	0	5,8	0	0	7,076
3. Разработка технического задания	НР, И	10	22	14,8	4,44	1,48	8,88	5,4168	1,8	10,84
4. Разработка календарного плана работ	НР, И	3	6	4,2	0,84	0	3,36	1,0248	0	4,1
5. Идентификация объекта	И	5	10	7	0	0	7	0	0	8,54
6. Создание модели в MATLAB	И	14	20	16,4	0	0	16,4	0	0	20
7. Сравнительный анализ методов настройки на модели системы	И	8	12	9,6	0	0	9,6	0	0	11,712
8. Обработка полученных результатов	НР, И	8	12	9,6	1,44	1,44	6,72	1,76	1,76	6,438
9. Оформление расчётно-пояснительной записки	И	12	18	14,4	0	0	14,4	0	0	17,6
10. Подведение итогов	НР	3	5	3,8	3,8	0	0	4,636	0	0
<b>Итого:</b>				<b>88,4</b>	<b>12,76</b>	<b>2,92</b>	<b>72,72</b>	<b>13,81</b>	<b>3,56</b>	<b>87</b>

Таблица 9.4.2.2 – Диаграмма Ганта

№ раб	Содержание работ	Продолжительность выполнения работ																	
		янв.			фев.			март			апр.			май			июнь		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Постановка целей и задач исследования																		
2	Обзор литературы																		
3	Разработка технического задания																		
4	Разработка календарного плана работ																		
5	Идентификация объекта																		
6	Создание модели в MATLAB																		
7	Сравнительный анализ методов настройки на модели системы																		
8	Обработка полученных результатов																		
9	Оформление расчётно-пояснительной записки																		
10	Подведение итогов																		

Из диаграммы в таблице 9.4.2.2 видно, что практическая часть всего исследования занимает порядка двух календарных месяцев. Сравнительно большой промежуток времени на составление технического задания выделен для лучшей его проработки и исключения необходимости возвращаться к этому этапу в дальнейшем.

## **9.5 Бюджет научно-технического исследования**

Планирование бюджета позволяет оценить затраты на проведение исследования до его фактического начала и позволяет судить об экономической эффективности работы. В данном разделе подсчитываются следующие статьи расходов:

- материальные затраты;
- амортизационные отчисления;
- заработная плата исполнителей;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- накладные расходы.

### **9.5.1 Расчёт материальных затрат**

В этом подразделе оценивается стоимость всех материальных ценностей, непосредственно расходуемых в процессе выполнения работ.

Теоретические исследования, а также моделирование системы требуют ряд программных продуктов: Microsoft Office, Mathcad, MATLAB и др. Большинство из них предоставляются бесплатно для студентов ТПУ, другие находятся в свободном доступе в сети «Интернет». Таким образом, затраты на материалы включают в себя расходы на канцелярские принадлежности. Для исследований используется персональный компьютер с бесплатным доступом к лицензии MATLAB. В материальные затраты также включаются транспортно-заготовительные расходы (ТЗР) в пределах от 5% до 20% от общей цены материалов. Расчёт материальных затрат приведён в таблице 9.5.1.1.

Таблица 9.5.1.1 – Материальные затраты

Наименование	Цена за ед., руб.	Кол-во, шт.	Сумма, руб.
Офисная бумага, 500 листов	390	1	390
Тетрадь общая, 48 л.	60	1	60
Шариковая ручка	50	3	150
<b>Итого</b>			<b>600</b>
<b>Итого с учётом ТЗР (10%)</b>			<b>660</b>

### 9.5.2 Расчёт амортизационных отчислений

Написание выпускной квалификационной работы по плану занимает 5 месяцев. Для моделирования и проведения расчётов используется персональный компьютер первоначальной стоимостью 70000 рублей. Срок полезного использования для офисной техники составляет от 2 до 3 лет [9].

Норма амортизации  $H_A$  рассчитывается как [8]:

$$H_A = \frac{1}{T} \cdot 100\%, \quad (9.5.2.1)$$

где  $T$  – срок полезного использования, лет.

Если принять срок полезного использования равным 3 годам, тогда норма амортизации  $H_A$ :

$$H_A = \frac{1}{3} \cdot 100\% = 33,3\%. \quad (9.5.2.2)$$

Годовые амортизационные отчисления:

$$A_{год} = 65000 \cdot 0,33 = 23100 \text{ руб.} \quad (9.5.2.3)$$

Ежемесячные амортизационные отчисления:

$$A_{мес} = \frac{23100}{12} = 1925 \text{ руб.} \quad (9.5.2.4)$$

Итоговая сумма амортизации основных средств:

$$A = 1925 \cdot 5 = 9625 \text{ руб.} \quad (9.5.2.5)$$

### 9.5.3 Расчёт заработной платы и отчислений во внебюджетные фонды

Оклад научного руководителя (в должности доцента) составляет 33 664 рублей, оклад консультанта (в должности ассистента) – 12 664 рублей. Оклад студента (инженера) принимается равным окладу соответствующего специалиста низшей квалификации, т.е. ассистента и составляет 12 664 рублей. В 2020 году с учётом 48-дневного отпуска 252 рабочих дня. Среднее количество рабочих дней в месяце составит 21 день. Среднедневная заработная плата для руководителя составит 1603,05 рублей в день, для консультанта и инженера – 603,05 рублей в день.

Заработная плата включает в себя основную и дополнительную части. При этом основная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{осн} = ЗП_{дн} \cdot T_{РД} \cdot (1 + K_{пр} + K_{д}) \cdot K_p, \quad (9.5.3.1)$$

где  $ЗП_{дн}$  – среднедневная заработная плата, руб.;

$T_{РД}$  – трудоёмкость выполнения работы в рабочих днях;

$K_{пр}$  – коэффициент премирования;

$K_{д}$  – коэффициент доплат;

$K_p$  – районный коэффициент [10].

Результаты расчёта основной заработной платы по формуле 9.5.3.1 приведены в таблице 9.5.3.1.

Таблица 9.5.3.1 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$ЗП_{дн}$	$K_p$	$K_{д}$	$K_{пр}$	$T_{РД}$	$ЗП_{осн}$ , руб
Руководитель	1603,05	1,3	0,2	0,3	12,76	39887,09
Консультант	603,05	1	0,2	0,3	2,92	2641,4
Инженер	603,05	1	0,2	0,3	72,72	65780,69
<b>Итого</b>						<b>108309,18</b>

Дополнительная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{дон} = ЗП_{осн} \cdot 0,12, \quad (9.5.3.2)$$

где  $ЗП_{осн}$  – основная заработная плата, руб.

Отчисления во внебюджетные фонды в соответствии с Налоговым кодексом РФ рассчитываются по формуле [11]:

$$ЗП_{внеб} = (ЗП_{осн} + ЗП_{доп}) \cdot 0,3 , \quad (9.5.3.3)$$

где  $ЗП_{осн}$  – основная заработная плата, руб;

$ЗП_{доп}$  – дополнительная заработная плата, руб.

Результаты расчётов по формулам 9.5.3.2 и 9.5.3.3 приведены в таблице 9.5.3.2.

Таблица 9.5.3.2 – Расчёт дополнительной заработной платы и отчислений

Исполнители	$ЗП_{доп}$	$ЗП_{внеб}$
Руководитель	4786,45	13402,04
Консультант	316,97	887,51
Инженер	7893,68	22102,31
<b>Итого</b>	<b>12997,03</b>	<b>36391,86</b>

Накладные расходы принимаются в размере 10% от величины всех остальных расходов.

#### 9.5.4 Расчёт общей себестоимости

Рассчитанные в пунктах 9.5.1-9.5.3 расходы сведены в таблицу 9.5.4.1.

Таблица 9.5.4.1 – Суммарные расходы

Наименование	Сумма, руб.	Удельный вес, %
Материальные затраты	660	0,357
Затраты на амортизацию	9625	5,2
Основная заработная плата	108309,18	58,61
Дополнительная заработная плата	12997,03	7,04
Страховые взносы	36391,86	19,69
Накладные расходы	16798,307	9,09
<b>Итого</b>	<b>184781,377</b>	<b>100</b>

В ходе подсчёта затрат на разработку проекта выявлено, что основная часть (58,6%) средств расходуется на заработную плату исполнителей.

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

Эффективность разработки сравнивается аналогичными системами:

1. Система FLOAT производства компании Reha-Stim Medtec общей стоимостью 200128,98 руб.

2. Система RYSEN производства компании Motek общей стоимостью 192458,11 руб.

Эффективность разработки определяется путём расчёта интегрального финансового показателя:

$$I_{фин}^i = \frac{\Phi_i}{\Phi_{max}}, \quad (9.6.1)$$

где  $I_{фин}^i$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_i$  – стоимость  $i$ -ого варианта исполнения;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения проекта (зависит от сложности АСУ).

$$I_{фин} = \frac{184781,377}{200128,98} = 0,923, \quad (9.6.2)$$

$$I_{фин}^1 = \frac{200128,98}{200128,98} = 1, \quad (9.6.3)$$

$$I_{фин}^2 = \frac{192458,11}{200128,98} = 0,96 \quad (9.6.4)$$

Сравнительная оценка ресурсоэффективности рассматриваемых аналогов приведена в таблице 9.6.1.

Таблица 9.6.1 – Сравнительная оценка ресурсоэффективности

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Ресурсоэффективность		
		$B_{\phi}$	$B_{к1}$	$B_{к2}$	$K_{\phi}$	$K_{к1}$	$K_{к2}$
Удобство в эксплуатации	0,1	4	5	5	0,4	0,5	0,5
Долговечность	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25

Продолжение таблицы 9.6.1 – Сравнительная оценка ресурсоэффективности

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Ресурсоэффективность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
Надежность	0,1	5	5	4	0,4	0,5	0,4
Безопасность	0,2	4	4	4	0,8	0,8	0,8
Точность измерений	0,05	4	5	4	0,2	0,25	0,2
Быстродействие	0,05	4	4	4	0,25	0,2	0,2
Цена	0,2	5	3	4	1	0,6	0,8
Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	5	4	0,4	0,5	0,4
Послепродажное обслуживание	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
Доступность	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>43</b>	<b>4,45</b>	<b>4,25</b>	<b>4,2</b>

Интегральный показатель эффективности разработки  $I^i$  вычисляется на основании рассчитанных выше интегрального финансового показателя  $I_{фин}^i$  (9.6.2 – 9.6.4) и показателя ресурсоэффективности  $I_p^i$  (таблица 9.6.1):

$$I^i = \frac{I_p^i}{I_{фин}^i}, \quad (9.6.5)$$

Для разрабатываемой системы:

$$I = \frac{4,45}{0,923} = 4,82, \quad (9.6.6)$$

Для рассматриваемых аналогов:

$$I^1 = \frac{4,25}{1} = 4,25, \quad (9.6.7)$$

$$I^2 = \frac{4,2}{0,96} = 4,375, \quad (9.6.8)$$

Сравнительная эффективность разрабатываемой системы и рассматриваемых аналогов рассчитывается как:

$$\Theta = \frac{I}{I^i}, \quad (9.6.9)$$

Сравнительная эффективность разрабатываемой системы с аналогами приведена в таблице 9.6.2.

Таблица 9.6.2 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог №1	Аналог №2
1	Интегральный финансовый показатель $I_{фин}$	0,923	1	0,96
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности $I_p$	4,45	4,25	4,2
3	Интегральный показатель эффективности $I$	4,82	4,25	4,375
4	Сравнительная эффективность $\Theta$ разработки к аналогам		1,134	1,102

Сравнение значений интегральных показателей эффективности показало, что разрабатываемая система автоматизированного формирования траектории превосходит аналоги за счёт меньшей стоимости разработки.

## 9.7 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

В данном разделе оценены экономические аспекты исследуемого подхода к построению системы автоматического регулирования температуры:

1. Выявлены потенциальные потребители результатов исследования. Разработка может быть применена в образовательных и медицинских учреждениях, спортивно-оздоровительных комплексах и концертных залах, а также в лабораториях (см. раздел 9.1).

2. Проведён анализ конкурентных технических решений. Выявлено два конкурента: компания Reha-Stim Medtec и Motek. Разрабатываемая система на текущем этапе уступает конкурентам по удобству использования (см. раздел 9.2), однако выигрывает за счёт применения программного пакета MATLAB,

позволяя применять математическое моделирование и сложные алгоритмы управления в совокупности со сравнительно дешёвым ПЛК.

3. В ходе SWOT-анализа основными угрозами обозначены: появление представительств компаний конкурентов на российском рынке; рост цен на контроллерное оборудование и регуляторы; повышенные требования к безопасности. Возможные пути снижения влияния выявленных угроз представлены в разделе 9.3.

4. Подсчёт затрат на разработку позволяет заключить, что основной статьёй расходов в научно-исследовательской работе является заработная плата исполнителей: основная – 108309,18 руб. (58,6%), дополнительная – 12997,03 руб. (7,04%). На втором месте страховые взносы – 35172,24 руб. (19,8%). Затем идут накладные расходы – 16798,307 руб. (9,09%). Меньше всего средств уходит на амортизацию оборудования – 9625 руб. (5,2%) и на материальные затраты – 660 руб. (0,357%). Общий бюджет разработки составил 184781,38 руб. При этом запланированная продолжительность работы составляет 104 дня.

5. В разделе 9.6 оценена экономическая эффективность разработки. Разрабатываемая система уступает аналогам по ресурсоэффективности в виду меньшего удобства эксплуатации на данном этапе, однако по сравнительному показателю эффективности разработка превосходит аналогичные системы за счёт меньшей стоимости.

## **10 Социальная ответственность**

Безопасность эксплуатации оборудования является главным условием эффективного производства, поэтому в данном разделе выполнен поиск отрицательно влияющих факторов на здоровье человека во время работы с системой автоматизированного управления формирования траектории крана гибкой подвески, а также рассмотрены пути ослабления, либо исключения опасных факторов.

В данной бакалаврской работе была разработана система управления формирования траектории, которая в дальнейшем позволит применять процессы управления и готовые решения на производстве.

Пользователями данной системы являются проектные институты, образовательные и медицинские учреждения, спортивно-оздоровительные комплексы и концертные залы.

В данном разделе будут рассмотрены опасные факторы, присутствующие при работе с системой. К основным факторам можно отнести производственный шум, недостаток освещенности, а также поражение электрическим током.

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

В процессе работы с системой управления формирования траектории оператор сталкивается с монтажом и наладкой контрольно-измерительных приборов, а также управлением двигателями и контроллерным оборудованием. В таком случае технологическое оборудование должно соответствовать нормативным требованиям охраны труда, согласно статье 215 ТК РФ [10].

Рабочее место представляет собой пространство, в котором человек может находиться при выполнении производственного процесса.

При разработки автоматизированной системы управления предусмотрено управление с помощью ПК. Поэтому рабочее место пользователя с ПК следует оборудовать поставкой для ног, имеющей ширину

не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края, обращенного к пользователю или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы [13].

Рабочие места с ПК при выполнении творческой работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5-2,0 м. Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600-700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитноцифровых знаков и символов. Конструкция рабочего стола должна удовлетворять требованиям эргономики.

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПК позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейноплечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего кресла следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПК [13].

## **10.2 Профессиональная социальная безопасность**

Разработка и эксплуатация системы формирования траектории осуществляется в закрытом помещении с помощью ПК, которая будет являться главным источником вредных факторов во время рабочего процесса.

Для идентификации потенциальных факторов используется ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [14]. Возможные опасные и вредные факторы сведены в таблицу 10.2.1.

Таблица 10.2.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020) [10];
2. Превышение уровня шума	-	+	+	– СП 2.2.2.1327-03 Гигиенические требования к организации технологических процессов, производственному оборудованию и рабочему инструменту [15];
3. Превышение уровня электромагнитных излучений	-	+	+	– СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [16];
4. Риск поражения электрическим током	-	+	+	– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы [17];
5. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	– СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение [18];

### 10.2.1 Отклонение показателей микроклимата

К параметрам микроклимата относятся: температура воздуха, температура поверхностей, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха. Метеорологические условия в комплексе оказывают влияние на работоспособность и здоровье оператора системы формирования траектории.

Эксплуатация системы формирования траектории осуществляется при работе сидя и без физических нагрузок, поэтому относится к категории тяжести – легкая (1а). Оптимальные показатели микроклимата на рабочем месте в соответствии с периодом года и категории работ, представлена в таблице 10.2.1.1.

Таблица 10.2.1.1 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

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

Для создания благоприятных условий труда в помещения необходимо, установить системы отопления и проточно-вытяжной вентиляции согласно СНиП 41-01-2003 [19].

## 10.2.2 Превышение уровня шума

Одной из важных характеристик в рабочем помещении является уровень шума. К основным источникам шума можно отнести:

- жесткий диск;
- охлаждение центрального процессора;
- уличный шум;
- двигатели.

Основная часть работы с системой формирования траектории осуществляется с помощью ПК. Уровень шума при работе не должен

превышать 50 дБА. Допустимый уровень звукового давления в помещении для персонала приведен в таблице 10.2.2.1.

Таблица 10.2.2.1 – Допустимые уровни звука на рабочем месте

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентного звука (в дБА)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Конструирование и проектирование, программирование, преподавание и обучение	85	71	51	54	49	45	42	40	38	50

Основными источниками шума являются двигатели и ПК. Другие источники в достаточной мере изолированы от оператора и не оказывают существенного воздействия.

Для снижения уровня шума от ПК и двигателей, следует применять звукопоглощающие материалы, а также регулярно проводить их техническое обслуживание.

### 10.2.3 Повышенный уровень электромагнитных излучений

Электромагнитное поле оказывает негативное воздействие на наиболее чувствительные системы организма человека. При работе с ПК пользователь находится в непосредственной близости к монитору, что вызывает воздействие электромагнитных полей (ЭМП). Вредное влияние переменных магнитных полей должно быть учтено при организации рабочего места по управлению системой формирования траектории.

Работа проводится на современном ПК, у которого значения электромагнитного излучения малы и отвечают требованиям, представленным в таблице 10.2.3.1.

Таблица 10.2.3.1 – ПДУ электромагнитных полей на рабочих местах пользователей ПК и другими средствами ИКТ

Наименование параметров		ПДУ
Напряженность электрического поля	от 5 Гц до 2 кГц	25 В/м
	от 2 кГц до 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	от 5 Гц до 2 кГц	250 нТл
	от 2 кГц до 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Учитывая норму предельно допустимой напряженности ЭМП экрана монитора, глазам пользователя макета следует находиться на расстоянии от 0,6 до 0,7 м до экрана монитора.

#### 10.2.4 Электробезопасность

Главным фактором поражения током при работе с макетом водозаборной станции является то, что оператор может на прямую контактировать с электрическими приборами.

Согласно ГОСТ 12.1.038-82 напряжение прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном режиме, не должны превышать значения, представленные в таблице 10.2.4.1 [20].

Таблица 10.2.4.1 – Предельные значения напряжения и токов, протекающих через тело человека

Род тока	U, В	I, mA
	Не более	
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1

Поэтому согласно ГОСТ 12.1.019-79 для обеспечения защиты безопасности оператора системы формирования траектории от случайного прикосновения к токоведущим частям необходима применить следующие способы и средства: безопасное расположение токоведущих частей, защитное отключение, изоляцию токоведущих частей [21].

### 10.2.5 Отсутствие или недостаток естественного света

Воздействие естественного света на человеческий организм представляет собой высокую гигиеническую и биологическую ценность, поскольку естественный свет благодаря своему спектральному составу положительно влияет на психику человека, сохраняя ощущение его связи с окружающим миром. Отсутствие естественного освещения, может привести к переутомлению, снижению работоспособности, усталости глаз и головной боли. Процесс управления системой формирования траектории с помощью ПК относится к зрительной работе очень высокой точности, а наименьший размер объекта ограничивается 0,15-0,3мм (II разряд зрительной работы). Требования к освещению промышленных предприятий для проведения данного рода работ представлены в таблице 10.2.5.1.

Таблица 10.2.5.1 – Требования к освещению рабочей зоны для работ очень высокой точности

Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Фон	Освещенность, лк (комбинированное освещение)	КЕО е, %	
				Верхнее или комбинированное освещение	Боковое освещение
А	Малый	Темный	400	4,2	1,5
Б	Малый Средний	Средний Темный	300		

Продолжение таблицы 10.2.5.1 – Требования к освещению рабочей зоны для работ очень высокой точности

Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Фон	Освещенность, лк (комбинированное освещение)	КЕО е, %	
				Верхнее или комбинированное освещение	Верхнее или комбинированное освещение
В	Малый	Светлый	200		
	Средний	Средний			
	Большой	Темный			
Г	Средний	Светлый	200		
	Большой	Средний			

Таким образом для соблюдения требуемых показателей согласно СП 52.13330.2016 экран ПК должен хорошо контрастировать с фоном и освещенность рабочей поверхности от систем общего освещения должна быть не менее 300 лк [18].

### 10.3 Экологическая безопасность

Во время разработки системы формирования траектории основным видом мусора являются отходы печати, коробки от оборудования и использованная бумага, все это может быть отправлено на переработку, либо утилизировано согласно санитарным правилам и нормам СанПиН 42-128-4690-88 [22].

При работе с системой воздействие на атмосферу незначительное и не наносит существенного вреда окружающему миру.

### 10.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Для данной системы формирования траектории характерной ЧС является пожар. Он может возникнуть в процессе работы системы, так как возможна неисправность электрооборудования.

При искрении или загорании электропроводки или электрооборудования необходимо обесточить их, затем тушить сухим песком, углекислотным или порошковым огнетушителем.

Для снижения вероятности пожара помещение, в котором эксплуатируется макет должно быть оборудовано системой обнаружения и оповещения о пожаре, в соответствии с требованиями СП 5.13130-093 [23]. В случае возникновения пожара на пожарный пост (в диспетчерскую) должен поступать сигнал о пожаре.

### **10.5 Выводы по разделу социальная ответственность**

При выполнении раздела «Социальная ответственность» рассмотрены организационные и правовые вопросы обеспечения безопасности, регулирующие и регламентирующие производственную деятельность инженера.

Выполнен анализ факторов на предмет выявления основных техносферных опасностей и вредностей, предложены методы минимизации их воздействий и защиты от них.

Так же рассмотрены вопросы экологической безопасности и безопасности в чрезвычайных ситуациях при использовании разрабатываемой автоматизированной системы управления по формированию траектории крана гибкой подвески. Было выявлено, что для данной системы характерно возникновение пожара. Благодаря правилам, описанным в данном разделе возможно избежать чрезвычайных ситуаций, а также обеспечить здоровье персонала и сохранность окружающей среды.

## Заключение

В ходе данной выпускной квалификационной работы бакалавра была синтезирована автоматизированная система управления формирования траектории крана гибкой подвески. Были рассчитаны длины тросов для позиционирования схвата в любой точке рабочей области крана. Также были рассчитаны конструктивные размеры и тип барабана приводного механизма, мощность электродвигателя, передаточное число редуктора, длина и разрывное усилие троса. Был выбран двигатель постоянного тока, источник постоянного тока, датчик положения угла вала двигателя, датчик веса, а также ПЛК, подходящие под данную систему.

Был разработан алгоритм управления краном по формированию траектории прямой и написана управляющая программа. Правильность расчётов программы и работоспособность системы были подтверждены моделированием в прикладном пакете программ MATLAB Simulink. Для решения задачи формирования сложных траекторий было предложено решение по замене сложной траектории отрезками прямых, при этом была написана программа, описывающая траекторию окружности.

В общем, была разработана универсальная система, которая впоследствии может быть использована как готовое решение для задач перемещения крупногабаритных конструкций, исследования эффективности различных методов реабилитации пациентов, фото- и видеосъёмки, в сфере развлечений.

## **Conclusion**

During this final qualifying work of the bachelor, an automated control system for the formation of the trajectory of the crane of a flexible suspension was synthesized. The lengths of the cables for positioning the gripper at any point in the working area of the crane were calculated. The design dimensions and the type of drum of the drive mechanism, electric motor power, gear ratio of the gearbox, cable length and breaking force were also calculated. A DC motor, a direct current source, an encoder, a weight sensor and PLC that are suitable for this system were selected.

A crane control algorithm was developed to form a straight path and a control program was written. The correctness of the program calculations and the system performance were confirmed by modeling in the MATLAB Simulink application software package. To solve the problem of forming complex trajectories, a solution was proposed to replace a complex trajectory with line segments, while a program was written that describes the trajectory of a circle.

In general, a universal system was developed, which can later be used as a turnkey solution for the problems of moving large-sized structures, researching the effectiveness of various methods of patient rehabilitation, photo and video shooting, in the entertainment sphere.

## Список использованной литературы

1. Изотов В.С., Имайкин Д.Г. Строительные машины. Часть 2. Строительные краны // Учебное пособие. – Казань: КГАСУ, 2011. – 104 с.
2. Карманова А.В., Филипас А.А. Исследование модели трехточечного крана гибкой подвески // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий: сб. тр. конф., г. Северск, 2016. – С. 68-68а. г. Северск, 21-25 марта 2016 г. – Северск: Изд-во ФГАОУ ВПО НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 68-68а.
3. Валюкевич Ю.А., Алепко А.В., Яковенко Д.М., Дубовсков В.В. Анализ влияния конструктивных параметров манипулятора с параллельной структурой на точность позиционирования схвата // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11-4. – С. 687.
4. Plooij M., Sterke B., Keller U., Komi S. Design of RYZEN: an Intrinsically Safe and Low-Power 3D Overground Body Weight Support // IEEE Robotics and automation letters – 2018.
5. Кириллов Ф.Ф., Щипунов А.Н., Гончаров Н.В. Расчёт параметров лебедки // методические указания для практических занятий /Кириллов Ф.Ф.; ТГАСУ – Томск, 2008. – 15 с.
6. ИСО 4301/1-86 Краны и подъемные устройства. Классификация. Часть 1. Общие положения.
7. ГОСТ 2688-80. Канат двойной свивки типа ЛК-Р конструкции 6x19(1+6+6/6)+1 о.с. Сортамент (с изменениями N 1, 2).
8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова – Томск: изд-во ТПУ, 2014. – 73с.
9. ОК 013-94 Общероссийский классификатор основных фондов (утв. постановлением Госстандарта РФ от 26.12.94 N 359) (дата введения 01.01.96).

10. Районный коэффициент [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://assistentus.ru/oplata-truda/rajonnyj-koefficient/>, свободный (дата обращения 05.05.2020).

11. Федеральный закон от 24.07.2009 N 212-ФЗ "О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования" [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_89925/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_89925/), свободный (дата обращения 05.05.2020).

12. “Трудовой кодекс Российской Федерации” от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. От 24.04.2020) Статья 215. Соответствие производственных объектов и продукции государственным нормативным требованиям охраны труда.

13. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200003913>, свободный (дата обращения 6.05.2020).

14. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200136071>, свободный (дата обращения 6.05.2020).

15. СП 2.2.2.1327-03 Гигиенические требования к организации технологических процессов, производственному оборудованию и рабочему инструменту. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901865870>, свободный (дата обращения 6.05.2020).

16. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901704046>, свободный (дата обращения 6.05.2020).

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

[Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901865498>, свободный (дата обращения 6.05.2020).

18. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\* (с Изменением N 1) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456054197>, свободный (дата обращения 6.05.2020).

19. СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200035579>, свободный (дата обращения 6.05.2020).

20. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/5200313>, свободный (дата обращения 6.05.2020).

21. ГОСТ 12.1.019-79 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты (с Изменением N1) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/5200302>, свободный (дата обращения 6.05.2020).

22. СанПиН 42-128-4690-88 Санитарные правила содержания территорий населенных мест [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200029183>, свободный (дата обращения 6.05.2020).

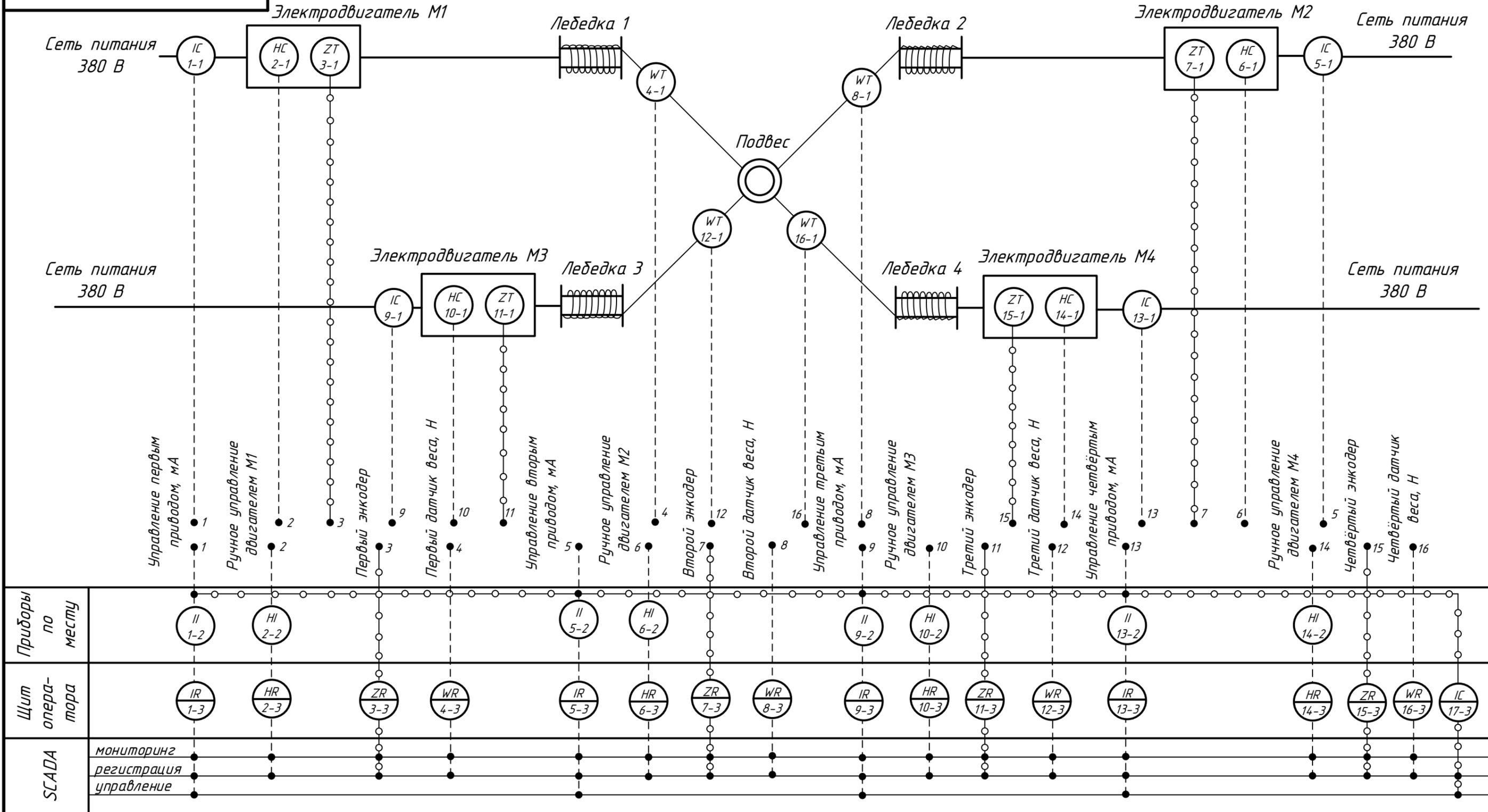
23. СП 5.13130.2009 Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования (с Изменением N 1) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200071148>, свободный (дата обращения 6.05.2020).

24. Кабель КВВГ [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-kontrolnyie/s-pvx-izolyacziej-\(0,66kv\)/kvvg](https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-kontrolnyie/s-pvx-izolyacziej-(0,66kv)/kvvg), свободный (дата обращения 6.05.2020).

## **Приложение А**

**(обязательное)**

**Схема автоматизации функциональная**



Приборы по месту	II 1-2	HI 2-2			II 5-2	HI 6-2			II 9-2	HI 10-2			II 13-2	HI 14-2				
Щит оператора	IR 1-3	HR 2-3	ZR 3-3	WR 4-3	IR 5-3	HR 6-3	ZR 7-3	WR 8-3	IR 9-3	HR 10-3	ZR 11-3	WR 12-3	IR 13-3	HR 14-3	ZR 15-3	WR 16-3	IC 17-3	
SCADA	мониторинг	регистрация	управление															

					<b>ФЮРА.425280.001</b>			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Разработка системы управления формирования траектории крана гибкой подвески	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Федотов А.И.					У		
Пров.	Филипас А.А.							
Т.контр.						Лист 1	Листов 4	
Н.контр.								
Утв.					Схема автоматизации функциональная	ТПУ ИШИТР ОАР Группа 8Т6А		

**Приложение Б**  
**(обязательное)**  
**Схема информационных потоков**

ФЮРА.425280.002

АРМ оператора

ОРС-сервер

Шкаф управления  
Контроллер

Коммуникационный  
модуль

Источник  
питания

Процессор

Коммутатор  
Ethernet

Шкаф ввода-вывода

Коммуникационный  
модуль

Модуль I/O

Модуль I/O

Модуль I/O

Модуль I/O

(4-20)  
мА

DI0

DI1

DI2

...

Датчики системы управления

ФЮРА.425280.002

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Федотов А.И.		
Пров.		Филипас А.А.		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Разработка системы  
управления формирования  
траектории крана гибкой  
подвески

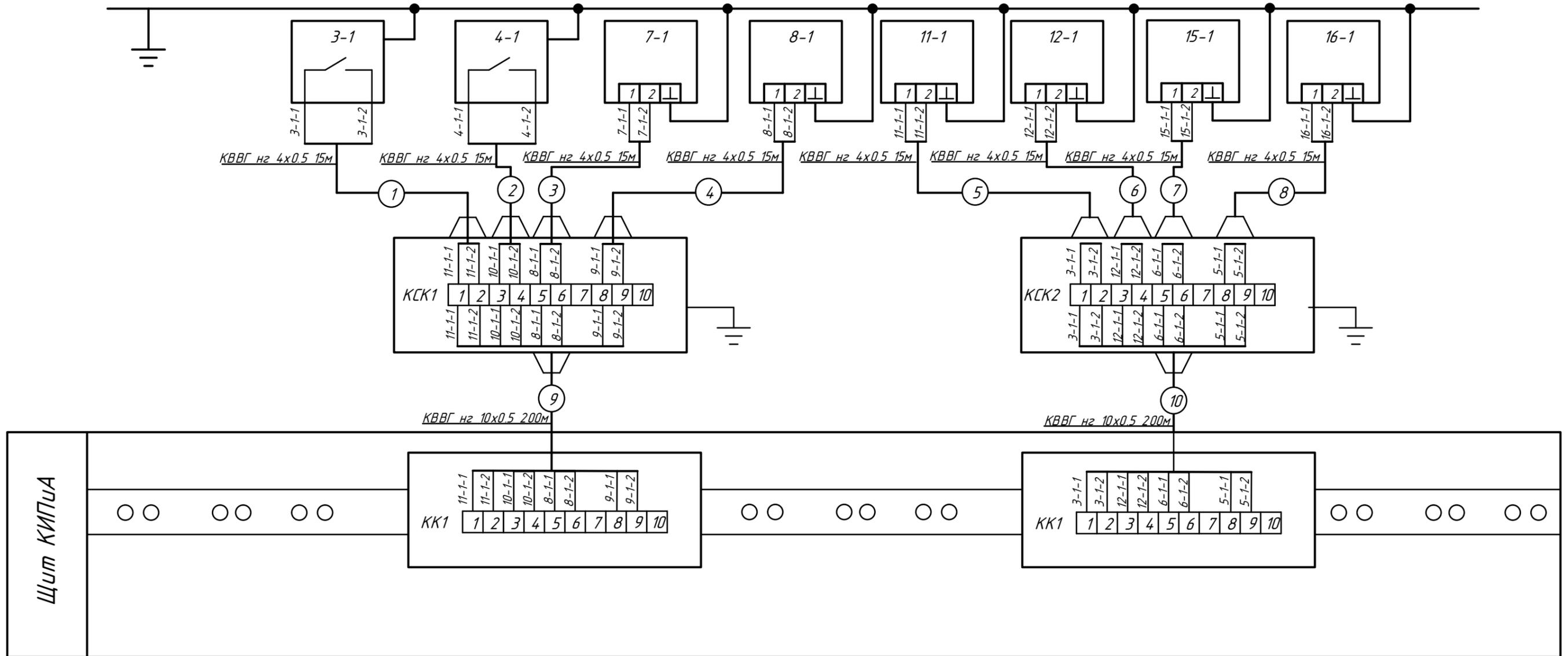
Схема информационных  
потоков

Лит.	Масса	Масштаб
У		
Лист 2	Листов 4	

ТПУ ИШИТР ОАР  
Группа 8Т6А

**Приложение В**  
**(обязательное)**  
**Схема внешних проводок**

Наименование параметра	Положение вала	Величина веса						
Место отбора импульса	Двигатель М1	Первый трос	Двигатель М2	Второй трос	Двигатель М3	Третий трос	Двигатель М4	Четвёртый трос
Тип датчика	Энкодер ЛИР-112А	Revere 363						
Позиция	3-1	4-1	7-1	8-1	11-1	12-1	15-1	16-1



ФЮРА.425280.003					Лит.	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	У		
Разраб.	Федотов А.И.						
Пров.	Филипас А.А.						
Т.контр.					Лист 3	Листов 4	
Н.контр.					ТПУ ИШИТР ОАР		
Утв.					Группа 8Т6А		

Разработка системы  
управления формирования  
траектории крана гибкой  
подвески

Схема внешних проводов

## **Приложение Г**

**(обязательное)**

### **Алгоритм формирования траектории подвеса**

Начало

Получение координат  
начального положения  
подвеса

Задание координат  
конечного положения  
подвеса

Высчитывание длин тросов с  
учетом растяжений

Подсчет числа оборотов,  
которое должен совершить  
каждый двигатель

Формирование управляющих  
сигналов на двигатели

Конец

ФЮРА.425280.004

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Федотов А.И.		
Пров.		Филипас А.А.		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Разработка системы  
управления формированием  
траектории крана гибкой  
подвески

Алгоритм формирования  
траектории

Лит.	Масса	Масштаб
У		
Лист 4	Листов 4	

ТПУ ИШИТР ОАР  
Группа 8Т6А

## Приложение Д

(обязательное)

### Реализация алгоритма программы в MATLAB

```
Trajectory.m Program.m +
1 %% Задаём начальные условия
2 A = [1, 3, -1]; %Начальное положение груза
3 B = [2, 2, -2]; %Конечное положение груза
4 a = 4; %Длина и ширина комнаты, м
5 d = 0.11; %Диаметр барабана, м
6 Te = 0.22; %Электромагнитная постоянная времени двигателя, с
7 Tm = 0.01; %Электрохимическая постоянная времени двигателя, с
8 c = 1.04; %Конструктивная постоянная двигателя
9 R = 0.409; %Сопротивления якоря двигателя, Ом
10 koc1 = 1; %Коэффициент усиления тахогенератора
11 koc2 = 1; %Коэффициент усиления датчика положения вала
12 koc3 = 1; %Коэффициент усиления датчика веса
13 k = 5524; %Коэффициент упругости троса
14 %% Находим длины тросов
15 L11 = sqrt(A(1)^2+A(2)^2+A(3)^2); %Вычисляем длину первого троса
16 L12 = sqrt(A(1)^2+(A(2)-a)^2+A(3)^2); %Вычисляем длину второго троса
17 L13 = sqrt((A(1)-a)^2+(A(2)-a)^2+A(3)^2); %Вычисляем длину третьего троса
18 L14 = sqrt((A(1)-a)^2+A(2)^2+A(3)^2); %Вычисляем длину четвертого троса
19 %% В точке B тросы будут иметь следующие длины:
20 L21 = sqrt(B(1)^2+B(2)^2+B(3)^2); %Вычисляем длину первого троса
21 L22 = sqrt(B(1)^2+(B(2)-a)^2+B(3)^2); %Вычисляем длину второго троса
22 L23 = sqrt((B(1)-a)^2+(B(2)-a)^2+B(3)^2); %Вычисляем длину третьего троса
23 L24 = sqrt((B(1)-a)^2+B(2)^2+B(3)^2); %Вычисляем длину четвертого троса
24 %% Длины тросов с учетом растяжений равны:
25 L11f = L11 + 122.5*L11/k;
26 L12f = L12 + 122.5*L12/k;
27 L13f = L13 + 122.5*L13/k;
28 L14f = L14 + 122.5*L14/k;
29 L21f = L21 + 122.5*L21/k;
30 L22f = L22 + 122.5*L22/k;
31 L23f = L23 + 122.5*L23/k;
32 L24f = L24 + 122.5*L24/k;
33 %% Та длина тросов, которую нужно смотать или отмотать:
34 dL1 = L11f - L21f;
35 dL2 = L12f - L22f;
36 dL3 = L13f - L23f;
37 dL4 = L14f - L24f;
38 %% Количество оборотов, которое выполнит каждый двигатель:
39 N1 = dL1*10/(pi*d);
40 N2 = dL2*10/(pi*d);
41 N3 = dL3*10/(pi*d);
42 N4 = dL4*10/(pi*d);
```

Рисунок П.1 – Листинг программы в MATLAB

The screenshot shows the MATLAB Workspace window with a table of variables. Each variable name is preceded by a small grid icon. The table has two columns: 'Name' and 'Value'.

Name	Value
a	4
A	[1,3,-1]
B	[2,2,-2]
c	1.0400
d	0.1100
dL1	-0.1507
dL2	-1.7705
dL3	-0.1507
dL4	0.9146
k	5524
koc1	1
koc2	1
koc3	1
L11	3.3166
L11f	3.3902
L12	1.7321
L12f	1.7705
L13	3.3166
L13f	3.3902
L14	4.3589
L14f	4.4556
L21	3.4641
L21f	3.5409
L22	3.4641
L22f	3.5409
L23	3.4641
L23f	3.5409
L24	3.4641
L24f	3.5409
N1	-4.3622
N2	-51.2323
N3	-4.3622
N4	26.4672
R	0.4090
Te	0.2200
Tm	0.0100

Рисунок П.2 – Рабочее пространство MATLAB

## Приложение Е

(обязательное)

### Реализация САП в MATLAB Simulink

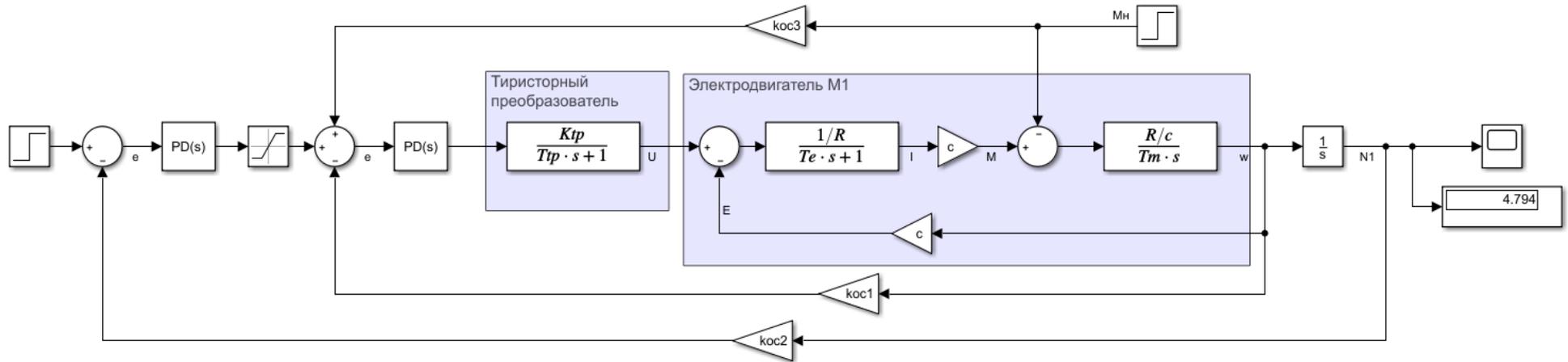


Рисунок П.3 – Операторно-структурная схема САП в MATLAB Simulink