

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

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки – 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Автоматизация исполнительного механизма системы частичного обезвешивания</b>
УДК <u>007.52:681.51</u>

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Королев Роман Евгеньевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Леонов Сергей Владимирович	К.Т.Н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Горбенко Михаил Владимирович	К.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Ефимов Семён Викторович	К.Т.Н.		

## Результаты обучения по ООП

Код рез-та	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные</i>		
P1	применять глубокие естественно-научные, математические знания в области анализа, синтеза и проектирования для решения научных и инженерных задач производства и эксплуатации автоматизированных систем, включая подсистемы управления и их программное обеспечение.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-3, ОПК-1, ОПК-4, ОК-1, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	воспринимать, обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации автоматизированных систем, принимать участие в командах по разработке и эксплуатации таких устройств и подсистем.	Требования ФГОС (ПК-3, ПК-4, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОК-1, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-9), Критерий 5 АИОР(пп. 1.1, 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	применять и интегрировать полученные знания для решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных автоматизированных систем и подсистем (в том числе интеллектуальных) с использованием технологий машинного обучения, современных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-15, ПК-18, ОПК-3, ОПК-6, ОК-1, ОК-5, ОК-6, ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	определять, систематизировать и получать необходимую информацию в области проектирования, производства, исследований и эксплуатации автоматизированных систем, устройств и подсистем.	Требования ФГОС (ПК-7, ПК-10, ПК-11, ПК-12, ПК-18, ОПК-4, ОПК-6, ОК-1, ОК-4, ОК-6, ОК-8), Критерий 5 АИОР (п.1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования для целей проектирования, производства и эксплуатации систем управления технологическим процессом и подсистем (в том числе интеллектуальных) с использованием передового отечественного и зарубежного опыта, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-6, ПК-13, ПК-17, ПК-18, ОПК-2, ОПК-3, ОК-1, ОК-3, ОК-4, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P6	понимать используемые современные методы, алгоритмы, модели и технические решения в автоматизированных системах и знать области их применения, в том числе в составе безлюдного производства.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2 ПК-3, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-9, ОК-10), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

<i>Универсальные</i>		
P7	эффективно работать в профессиональной деятельности индивидуально и в качестве члена команды.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2 ПК-7, ПК-8, ПК-16, ПК-17, ОК-1, ОК-2, ОК-4, ОК-6, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-8, ПК-9, ПК-16, ОПК-4, ОК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	проявлять широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, демонстрировать понимание вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду	Требования ФГОС (ПК-5, ПК-8, ПК-15, ПК-16, ПК-18, ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОК-3, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3.), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEAN</i>
P10	следовать кодексу профессиональной этики и ответственности и международным нормам инженерной деятельности	Требования ФГОС (ПК-8, ПК-11, ПК-16, ОПК-3, ОПК-6, ОК-4), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-8, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8), Критерий 5 АИОР (2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .

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

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки – 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Ефимов С.В.  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ81	Королев Роман Евгеньевич

Тема работы:

Автоматизация исполнительного механизма системы частичного обезвешивания	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2020
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p><b>Цель:</b> автоматизация исполнительного механизма, входящего в состав системы частичного обезвешивания.</p> <p>Объектом исследования является система управления системы частичного обезвешивания.</p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>1. Анализ существующих технических решений;</p> <p>2. описание обезвешиваемой конструкции, описание системы обезвешивания, выбор оборудования;</p> <p>4. математическое описание исполнительного механизма системы частичного обезвешивания;</p> <p>5. моделирование исполнительного механизма в составе системы частичного обезвешивания.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский Владимир Юрьевич, доцент ОСГН ШБИП, к.э.н.
Социальная ответственность	Горбенко Михаил Владимирович , доцент ООД ШБИП, к.т.н.
Раздел на иностранном языке	Горбатова Татьяна Николаевна, старший преподаватель ОИЯ ШБИП

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

1 Аналитический обзор

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	21.02.2020
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Леонов Сергей Владимирович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Королев Роман Евгеньевич		

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

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление – подготовки 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств  
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники  
 Период выполнения – (весенний семестр 2019/2020 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
--------------------------

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
03.06.2020	Основная часть	60
07.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
16.05.2020	Социальная ответственность	20

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Леонов С.В.	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Ефимов С.В.	к.т.н.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ81	Королев Роман Евгеньевич

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.04 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	Использовать действующие ценники и договорные цены на потребленные материальные и информационные ресурсы, а также указанную в МУ величину тарифа на эл. энергию
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	—
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Действующие ставки единого социального налога и НДС, ставка дисконтирования = 0,1 (см. МУ)

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Построение плана-графика выполнения ВКР, составление соответствующей сметы затрат, расчет цены результата ВКР.
2. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Оценка экономической эффективности использования результатов ВКР, характеристика других видов эффекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. График проведения и бюджет НТИ
2. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.02.2020
--	------------

**Задание выдал консультант:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Королев Роман Евгеньевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8ТМ81	Королев Роман Евгеньевич

<b>Школа</b>	<b>ИШИТР</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОАР</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Тема ВКР:

<b>Автоматизация исполнительного механизма системы частичного обезвешивания</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объектом исследования является компьютерная модель исполнительного механизма системы частичного обезвешивания.</p> <p>Рабочей зоной является помещение закрытого типа с естественной вентиляцией воздуха. Помещение имеет как искусственный, так и естественный источник освещения. Основное рабочее оборудование – ПК.</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p>	<p>Право на условия труда, отвечающие требованиям безопасности и гигиены. Использование оборудования и мебели согласно антропометрическим факторам.</p> <p>– Используются специальные правовые нормы трудового законодательства (Статья 212 ТК РФ)</p>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p>	<p>Анализ выявленных вредных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Шум</li> <li>– Микроклимат</li> <li>– Освещение</li> <li>– Психофизические факторы: фиксированная рабочая поза, умственное перенапряжение</li> </ul> <p>Анализ выявленных опасных факторов:</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Электрический ток (источником является ПК)</li> <li>– Статическое электричество</li> <li>– Короткое замыкание</li> </ul>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	– указать область воздействия на атмосферу, гидросферу и литосферу.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– перечислить возможные ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– указать наиболее типичную ЧС.</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	24.02.2020
---	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Горбенко Михаил Владимирович	К.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Королев Роман Евгеньевич		

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 105 страниц, 49 рисунков, 19 таблиц, 23 источника.

Ключевые слова: обезвешивание, исполнительный механизм, вентильный двигатель, подвес.

Цель работы – автоматизация исполнительного механизма, входящего в состав системы частичного обезвешивания.

Объектом исследования является система управления системы частичного обезвешивания.

В процессе исследования проводилась автоматизация и моделирование исполнительного механизма в составе системы частичного обезвешивания.

## Содержание

Введение.....	14
1 Аналитический обзор систем и методов обезвешивания .....	15
1.1 Пассивные системы обезвешивания .....	15
1.2 Активные системы обезвешивания .....	16
1.3 Обзор существующих технических решений и методов .....	16
2 Описание обезвешиваемой конструкции и системы обезвешивания.....	25
2.1 Обезвешиваемая трансформируемая конструкция.....	25
2.2 Система обезвешивания .....	26
2.3 Выбор количества лебедок.....	28
2.4 Выбор оборудования.....	29
3 Математическое описание и моделирование исполнительного механизма ....	37
3.1 Математическая модель вентильного электродвигателя в неподвижной системе координат.....	37
3.2 Математическое описание вентильного двигателя во вращающейся системе координат .....	40
3.3 Моделирование исполнительного механизма системы обезвешивания .....	43
3.4 Моделирование системы частичного обезвешивания.....	51
4 Социальная ответственность.....	59
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	59
4.2 Производственная безопасность.....	61
4.2.1 Электробезопасность .....	61
4.2.2 Микроклимат .....	63
4.2.3 Шум .....	64
4.2.4 Психофизиологические факторы .....	65

4.2.5 Освещение.....	67
4.3 Экологическая безопасность.....	72
4.3.1 Анализ воздействий объекта на литосферу.....	73
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	73
4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований .....	73
4.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований .....	74
Выводы по разделу «Социальная ответственность» .....	75
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	76
5.1 Организация и планирование ОКР (НИР) работ .....	76
5.1.2 Определение продолжительности этапов работ .....	77
5.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта .....	83
5.2.1 Расчет затрат на материалы .....	83
5.2.2 Расчет заработной платы.....	83
5.2.3 Расчет затрат на социальный налог.....	84
5.2.4 Расчет затрат на электроэнергию .....	84
5.2.5 Расчет амортизационных расходов .....	85
5.2.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных).....	86
5.2.7 Прочие расходы.....	86
5.2.8 Расчет общей себестоимости разработки .....	86
5.2.9 Расчет прибыли .....	87
5.2.10 Цена разработки НДС .....	87
5.2.11 Цена разработки ОКР .....	87

5.3 Оценка экономической эффективности проекта .....	88
Заключение .....	91
Список литературы .....	92
Приложение А (обязательное) Partial gravity compensation system actuator automation.....	94

## Введение

В последнее десятилетие во всем мире наблюдается значительное развитие аэрокосмических технологий. Это подтверждают активно разрабатываемые космические аппараты различных типов и размеров. Испытание опытных образцов является одной из важнейших стадий разработки подобных изделий, которая обеспечивает надежность, безопасность и дает наиболее полное представление о поведении проектируемого решения. В частности, таким испытаниям подвергаются трансформируемые конструкции космических аппаратов

Одним из условий проведения наземных испытаний трансформируемых конструкций является имитация среды, близкой по характеристикам к космической. В первую очередь необходима компенсация веса элементов трансформируемой конструкции для того, чтобы избежать ее деформации или разрушения под действием силы тяжести при наземных испытаниях – экспериментальной проверки (получения) параметров, полученных при проектировании изделия на земле.

Таким образом, существует потребность в системах и методах, позволяющих создавать условия, близкие к условиям невесомости в целях проведения наземных испытаний трансформируемых конструкций. Данные системы и методы принято называть системами и методами обезвешивания.

Целью данной работы является автоматизация исполнительного механизма, входящего в состав системы частичного обезвешивания.

## 1 Аналитический обзор систем и методов обезвешивания

Основная цель наземных систем обезвешивания - создание условий, близких к невесомости.

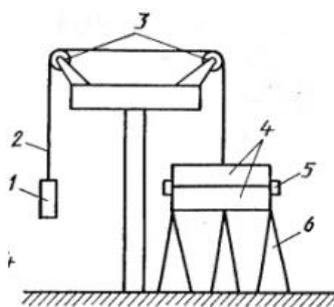
Общий принцип всех систем обезвешивания заключается в том, что к телам прикладываются вертикальные силы, равные весу этих тел. В качестве точки приложения этих сил используется центр масс этих тел, что позволяет избежать влияния дополнительных моментов сил к обезвешиваемым элементам и конструкциям.

В настоящее время имеется множество запатентованных методов и систем обезвешивания которые принято разделять по способу создания обезвешивающих сил, а именно на пассивные и активные.

### 1.1 Пассивные системы обезвешивания

В пассивных системах силы обезвешивания создаются механическим способом (растянутой пружиной, противовесом и т.д.), а перемещение элементов системы осуществляется за счет перемещения самого обезвешиваемого тела.

Схема одного из возможных исполнений подобной системы приведена на рисунке 1.



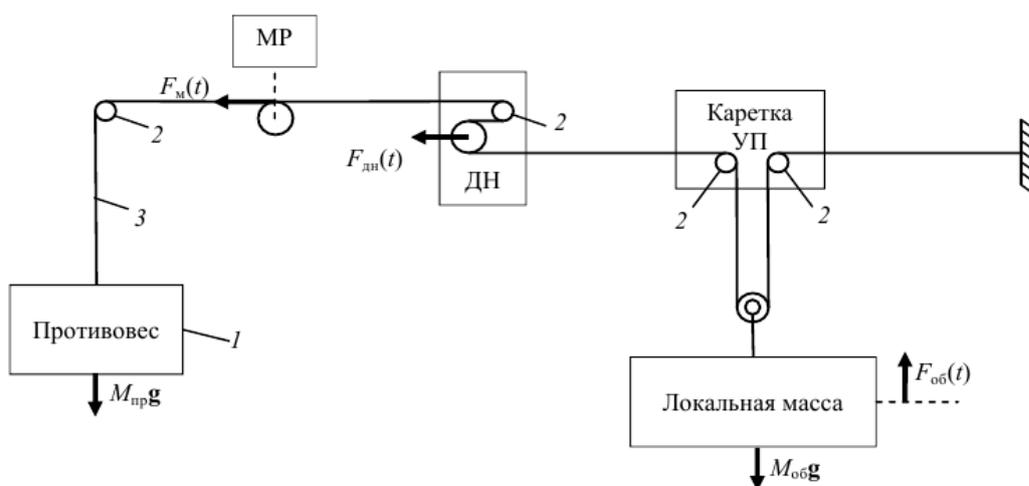
1 – противовес; 2 – трос; 3 – блок; 4 – платформа; 5 – замок; 6 –  
подставка

Рисунок 1 – Схема пассивного обезвешивания

## 1.2 Активные системы обезвешивания

Активные системы являются сложными механическими системами. Для ликвидации влияния силы тяжести данный вид систем использует собственные приводы, работающие на основе сигналов датчиков обратной связи.

Распространёнными являются системы обезвешивания с подвижными каретками. Пример такой системы приведен на рисунке 2.



ДН – датчик натяжения троса; МР – привод натяжения троса (мотор - редуктор);  $F_m(t)$  – сила натяжения троса, развиваемая приводом МР;  $F_{об}(t)$  – неизвестная сила взаимодействия локальной массы узла объекта обезвешивания с остальными элементами;  $F_{дн}(t)$  – сила натяжения, измеряемая датчиком натяжения троса;  $M_{пр}$  – масса груза-противовеса;  $M_{об}$  – масса обезвешиваемого узла объекта.

Рисунок 2 – Система обезвешивания с подвижными каретками

## 1.3 Обзор существующих технических решений и методов

Так как в данной работе осуществляется комплекс мер для автоматизации исполнительного механизма, который входит в состав системы частичного обезвешивания, интерес при литературном и патентном обзоре представляли активные системы и методы.

Активная система обезвешивания крупногабаритных трансформируемых конструкций, разработка и результаты исследования которой приведены в [1], предназначена для проведения испытаний системы раскрытия трансформируемых рефлекторов антенн космических аппаратов диаметром до 48 м. Предложенная авторами система позволяет добиваться достаточно низкого остаточного веса менее 0,2 % при скорости перемещения обезвешиваемых элементов до 4 м/мин.

Данное исследование нашло отражение в разработках КТИ НИ СО РАН – активных системах обезвешивания крупногабаритных трансформируемых систем «Кемчуг» [2] и «АСО МИ» [3], внешний вид которых приведен на рисунках 3-4.



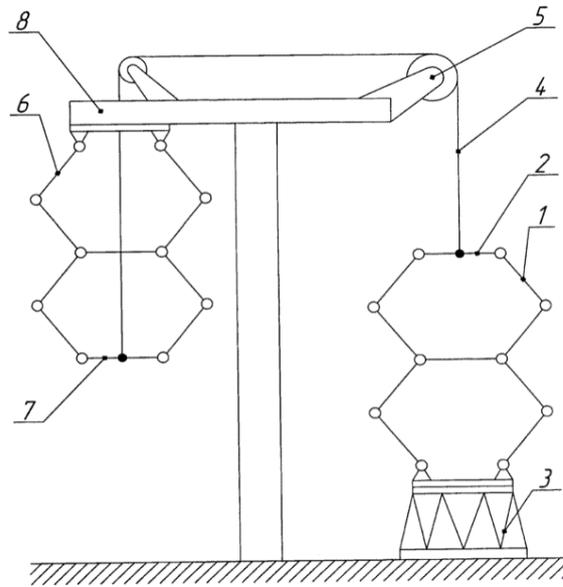
Рисунок 3 - Система обезвешивания трансформируемых систем космических аппаратов «Кемчуг»



Рисунок 4 - Стойка системы обезвешивания «АСО МИ»

Исследование работы системы обезвешивания, предназначенной для отработки процесса раскрытия сетчатого рефлектора антенны космических аппаратов диаметром 12 м приведено в [4].

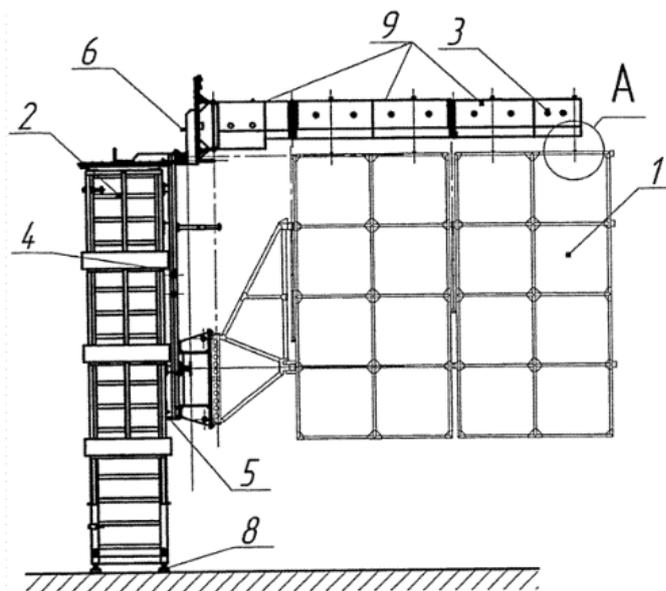
Способ обезвешивания трансформируемых систем космических аппаратов, описанный в [5] заключается в том, что трансформируемую систему с торцевыми шпангоутами устанавливают на подставке и соединяют с помощью троса с противовесом через систему блоков. Особенность изобретения состоит в противовесе, выполненном в виде механизма, симметрично расположенного относительно горизонтальной плоскости к обезвешиваемой трансформируемой системе и выполненном по кинематической схеме трансформируемой системы. Массы звеньев противовеса при этом равны соответствующим массам звеньев трансформируемой системы. Схема способа приведена на рисунке 5.



1, 6 – стержни, 2, 7 – торцевой шпангоут, 3 – технологическая подставка,  
4– трос, 5 – система блоков, 8 – опорная стойка

Рисунок 5 - Схема обезвешивания трансформируемых систем  
космических аппаратов

В стенде раскрытия панелей солнечной батареи [6], обезвешивающее устройство представлено в виде отдельных звеньев, которые при помощи шарниров соединены между собой. Звенья расположены таким образом, что их створки располагаются над соответствующими створками солнечной батареи. Крепление звеньев солнечной батареи к звеньям обезвешивающего устройства производится через демпфирующие устройства. Схема стенда представлена на рисунке 6.



1 – солнечная батарея, 2 – опора, 3 – обезвешивающее устройство, 4 – переходная рама, 5 – космический аппарат, 6 – кронштейн, 7 – направляющие, 8 – регулируемые стойки, 9 – звенья обезвешивающего устройства

Рисунок 6 – Стенд раскрытия солнечных батарей

Система гравитационного разгрузки с активным откликом (The Active Response Gravity Offload System - AGROS) [10] предназначена для имитирования среды с пониженной гравитацией для людей и техники.

Конструкция системы представляет собой металлическую раму размером 12,5x7,3x7,6 м, внешний вид которой приведен на рисунке 7. Такая конструкция позволяет производить перемещения в трех направлениях со скоростью до 3м/с и обеспечивает грузоподъемность до 340 кг. Перемещение во всех направлениях обеспечивают электроприводы. Подвес соединяется с обезвешиваемым телом стальным тросом, нагрузка на который измеряется с помощью встроенного тензодатчика. Система управления дает команду приводу подниматься или опускаться при движении объекта, чтобы поддерживать постоянную обезвешивающую силу. Внешний вид системы показан на рисунке 7.



Рисунок 7 - Система обезвешивания AGROS

Определенный интерес представляет система обезвешивания [7], основанная на применении мобильных роботов для поддержки трансформируемых конструкций. Структура такой системы представлена на рисунке 8.

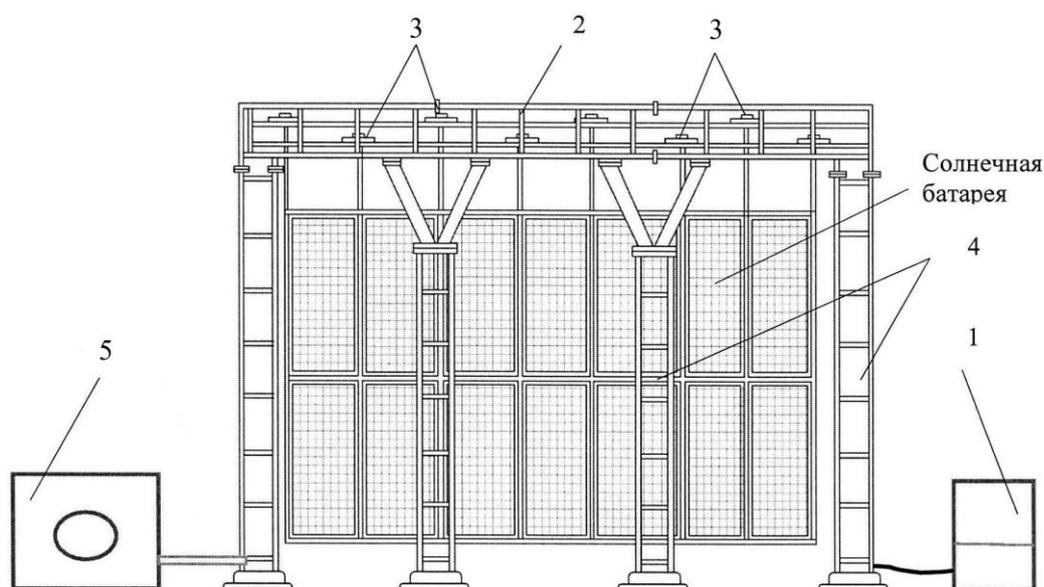


Рисунок 8 - Структура системы обезвешивания с мобильными роботами

При использовании способа имитации пониженной гравитации движущегося объекта [8] разгружающие силы создаются при помощи движущейся площадки, которая кинематически развязана с обезвешиваемым

объектом. Площадка имеет следящую приводную систему, которая воздействует на объект воздушной подушкой с избыточным давлением или магнитным полем.

Известен стенд испытания солнечной батареи [12], схематичное изображение которого приведено на рисунке 9. Данное устройство содержит блок управления, металлический каркас с перемещающимися в горизонтальной плоскости тележками, который установлен на неподвижных опорах. Отличительной особенностью стенда являются аэростатические опоры и компрессор, причем аэростатические опоры размещены на тележках и соединены с компрессором шлангами.

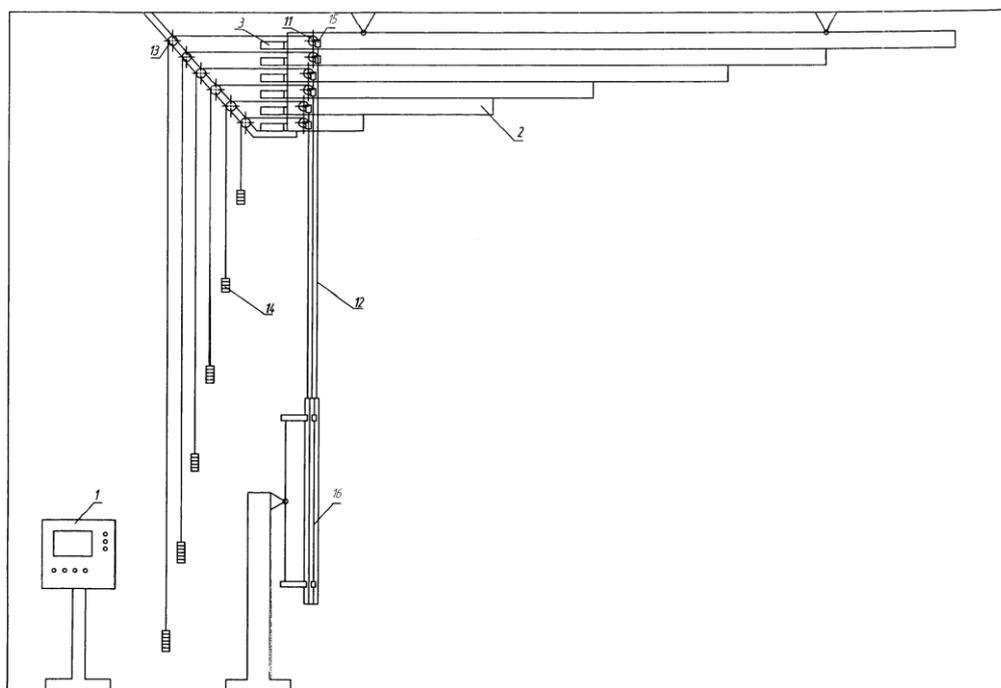


1 – пульт управления, 2 – каркас, 3 – аэростатические опоры, 4 – стойки,  
5 – компрессор

Рисунок 9 – Стенд испытания солнечной батареи

Конструкция системы имитации невесомости [9] состоит из системы управления и необходимого количества модулей, установленных друг над другом. Система содержит перемещающуюся по горизонтальной оси каретку и тележку, которая движется по вертикали. Перемещение осуществляется двумя сервоприводами, которые находятся в каждом модуле. Обезвешиваемое тело посредством гибкой связи через шкив на тележке соединено с противовесом.

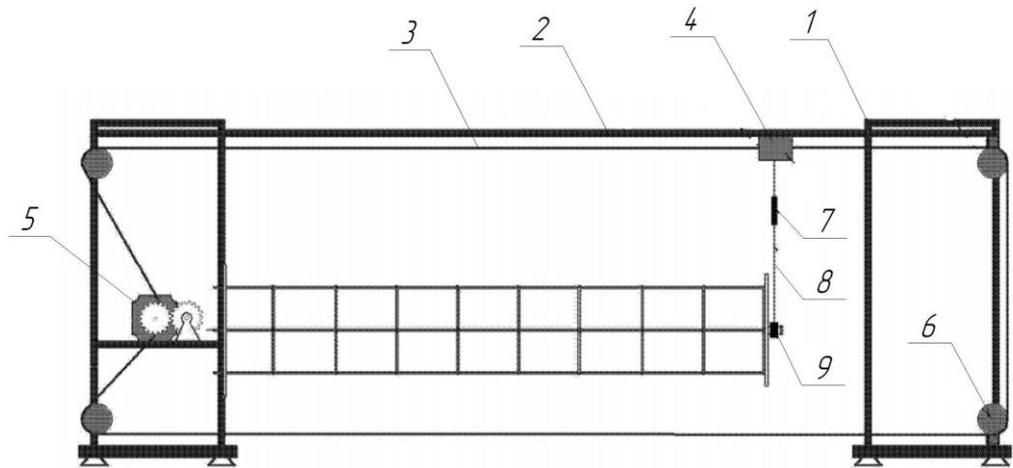
Эффект обезвешивания достигается приложением к обезвешиваемому телу сил, вертикальность которых обеспечивается перемещением каретки и тележки. За их перемещение отвечает система управления, задание которой основано на показаниях инклинометра, установленного на тележке. Состав системы показан на рисунке 10.



1 – блок управления, 2 – модули, 3 – сервоприводы, 4 – рабочие шкивы, 5 – зубчатый ремень, 6 – пассивные шкивы, 7 – каретка, 8, 10 – направляющие, 9 – тележка, 11 – шкив, 12 – гибкая связь, 13 – блок, 14 – компенсирующий груз, 15 – датчик-инклинометр, 16 – объект обезвешивания

Рисунок 10 - Система имитации невесомости

Запатентованный в КНР стенд [11] предназначен для наземной отработки раскрытия солнечных батарей. Его отличительной особенностью является использование зубчато-ременной передачи для перемещения подвеса. Схема такого стенда приведена на рисунке 11.



1 - каркас, 2 - направляющая, 3 - трос, 4 - каретка, 5 - двигатель,  
6 - шкив, 7 - подъемник, 8 - подвес, 9 - датчик прилагаемого усилия

Рисунок 11 - Стенд обезвешивания

После проведения литературного обзора и патентных поисков, были выявлены проблемы, присущие активным системам обезвешивания. Большинство известных систем обезвешивания имеют ограниченные эксплуатационные возможности. К ним можно отнести перемещение обезвешиваемых элементов в одной плоскости (например, раскрытие солнечных батарей на стенде с устройствами подвеса на каретках). Это не позволяет обеспечить максимальное приближение к штатным условиям невесомости при наземной отработке.

Также недостатком вышеописанных систем и методов является то, что точка крепления устройства обезвешивания соответствует положению центра масс обезвешиваемого тела, определенному теоретическим путем. Это приводит к возникновению крутящего момента вокруг точки крепления устройства обезвешивания.

## 2 Описание обезвешиваемой конструкции и системы обезвешивания

### 2.1 Обезвешиваемая трансформируемая конструкция

Рассматриваемая в данной диссертации многозвенная трансформируемая конструкция, подвергающаяся обезвешиванию, состоит из четырех звеньев, складывающихся W-образным образом. Подобную конструкцию имеют солнечные батареи космических аппаратов.

Этапы раскрытия конструкции приведены на рисунке 12.

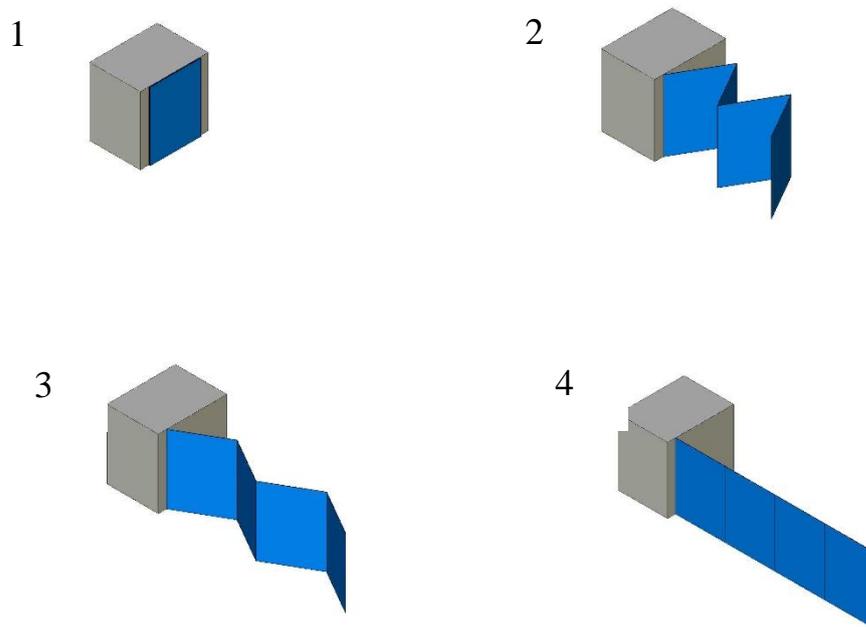


Рисунок 12 – Схема раскрытия многозвенной трансформируемой конструкции

Звено трансформируемой конструкции (панель солнечной батареи) имеет форму прямоугольника со сторонами 3000 и 4000 мм и имеет массу 40 кг.

Процесс раскрытия системы ( $t_{раск}$ ) происходит за 30 с.

Момент инерции каждого звена относительно вертикальной оси:

$$J = \frac{1}{12} m_n l_n^2 = \frac{1}{12} \cdot 40 \cdot 3^2 \approx 30 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad (2.1)$$

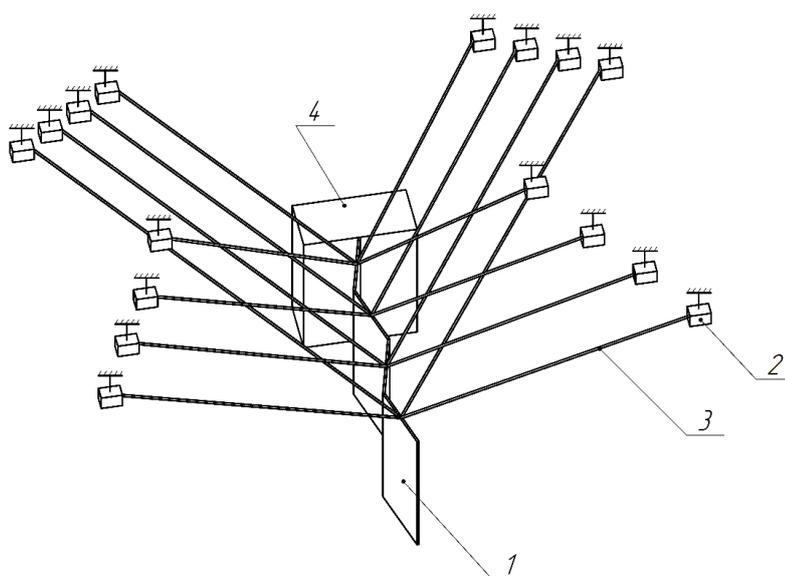
где  $m_n$  – масса панели, кг;

$l_n$  – длина панели, м.

## 2.2 Система обезвешивания

Рассматриваемая в данной работе система частичного обезвешивания предполагает создание эффекта обезвешивания каждого звена трансформируемой конструкции путем приложения к центру масс каждого из них усилий неподвижно закрепленных электроприводных лебедок. Отслеживание перемещения панелей осуществляется системой датчиков натяжения тросов и инклинометров, на основе сигналов которых система управления регулирует момент и скорость вращения двигателей лебедки.

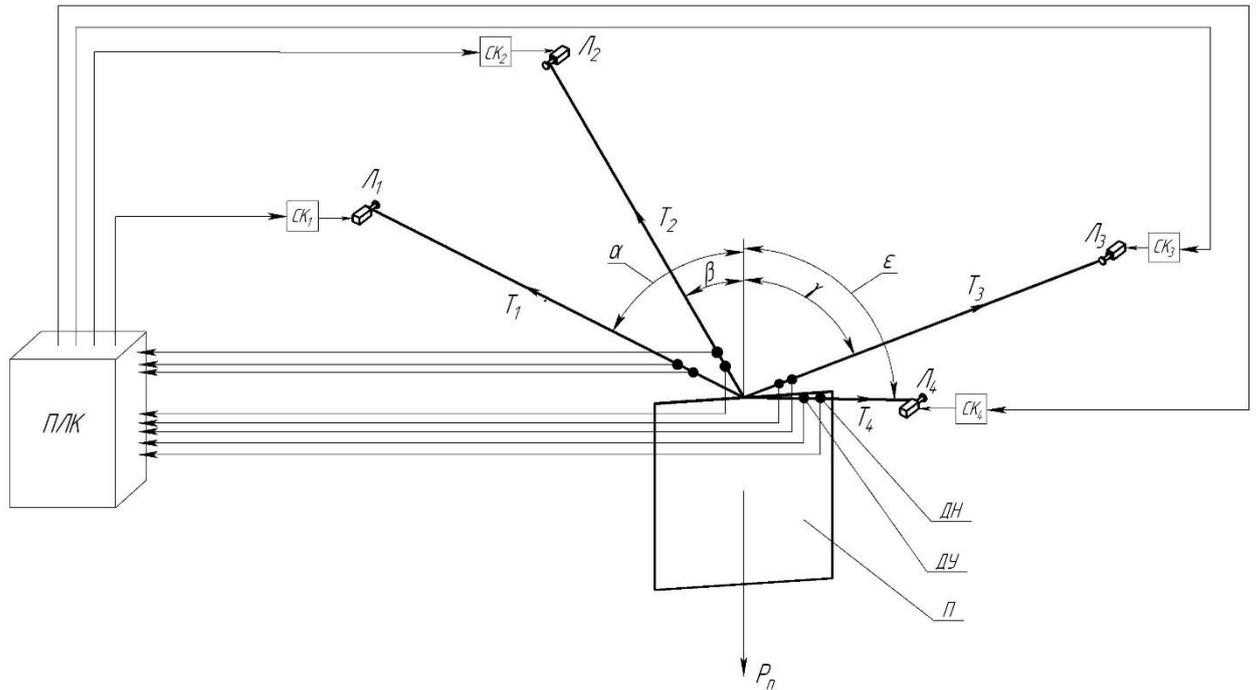
Схематичное изображение конструкции системы обезвешивания приведено на рисунке 13.



1 – трансформируемая конструкция, 2 – лебедка с электроприводом, 3 – трос, 4 – имитация космического аппарата

Рисунок 13 – Система обезвешивания

На рисунке 14 представлена функциональная схема системы обезвешивания для одной из панелей многозвенной трансформируемой системы.



$\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$  – углы отклонения тросов лебедок от вертикали;  $T_1, T_2, T_3, T_4$  – силы натяжения тросов; П – панель механической системы;  $P_n$  – вес панели; ДН – датчики натяжения троса; ДУ – датчики углов отклонения тросов лебедок от вертикали; СК<sub>1</sub>, СК<sub>2</sub>, СК<sub>3</sub>, СК<sub>4</sub> – сервоконтроллеры; Л<sub>1</sub>, Л<sub>2</sub>, Л<sub>3</sub>, Л<sub>4</sub> – лебедки; ПЛК – программируемый логический контроллер

Рисунок 14 – Система обезвешивания

Условие равновесия системы, приведенной на рисунке 14:

$$\vec{T}_1 + \vec{T}_2 + \vec{T}_3 + \vec{T}_4 + \vec{P}_n = 0 \quad (2.2)$$

Спроецировав векторы сил натяжения тросов на вертикальную ось, выражение (2.2) можно преобразовать в:

$$T_1 \cos \alpha + T_2 \cos \beta + T_3 \cos \gamma + T_4 \cos \varepsilon - P_n = 0 \quad (2.3)$$

$$T_1 \cos \alpha + T_2 \cos \beta + T_3 \cos \gamma + T_4 \cos \varepsilon = P_n = m_n g \quad (2.4)$$

Алгоритм системы, представленной на рисунке 14, можно описать следующим образом: ПЛК получает значения измеренных величин углов отклонения тросов от вертикали и натяжения тросов с соответствующих датчиков; на основе значений этих значений проверяется верность условия равновесия системы (2.4); формируется сигнал управления для

сервоконтроллеров, которые в свою очередь управляют в моментном режиме вентильными электродвигателями лебедок.

### **2.3 Выбор количества лебедок**

При неподвижном креплении лебедок, которые посредством тросов поддерживают трансформируемую конструкцию, необходимо правильное определение их количества, приходящегося на каждую панель.

Очевидным будет утверждение, что одной или двух лебедок будет недостаточно для перемещения звеньев трансформируемой конструкции в различных направлениях.

При количестве лебедок, равным трем создается сложность симметричного распределения нагрузки между ними.

Согласно нормативной документации, касающейся проектированию и эксплуатации грузовых стропов [13], ввиду наиболее равномерно распределяющейся нагрузки, самыми применяемыми являются четырехветвевые стропы. Эти данные можно спроецировать на настоящую работу. Таким образом, на каждую панель трансформируемой конструкции будет приходиться четыре электролебедки системы обезвешивания.

Для проверки правильности расположения лебедок были построены траектории движения тросов (рисунок 15). Анализ траекторий показал, что тросы лебедок не пересекаются во время движения трансформируемой системы.

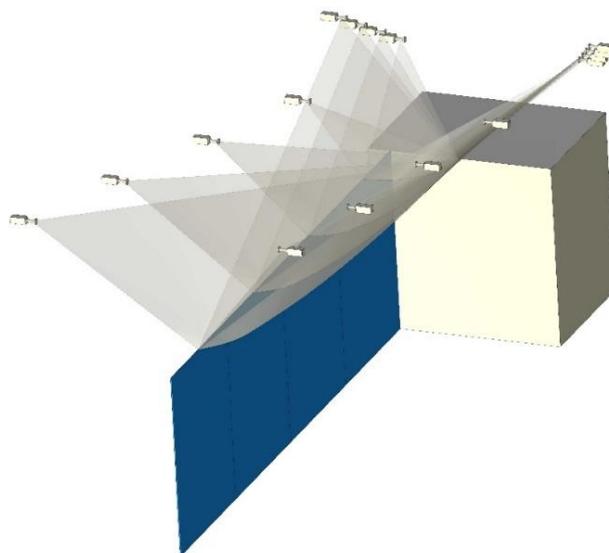


Рисунок 15 – Траектории движения тросов

## **2.4 Выбор оборудования**

Необходимо предварительно выбрать оборудование, которое будет использовано для сборки системы частичного обезвешивания. К нему относятся: барабан лебедки, электродвигатель, передаточный механизм для передачи момента электродвигателя барабану, преобразовательное устройство для электродвигателя, программируемый логический контроллер.

Барабан лебедки, представлен на рисунках 16-17. Он представляет собой пустотелую стальную бочку с внешним диаметром 60 мм, на которую укладывается трос.

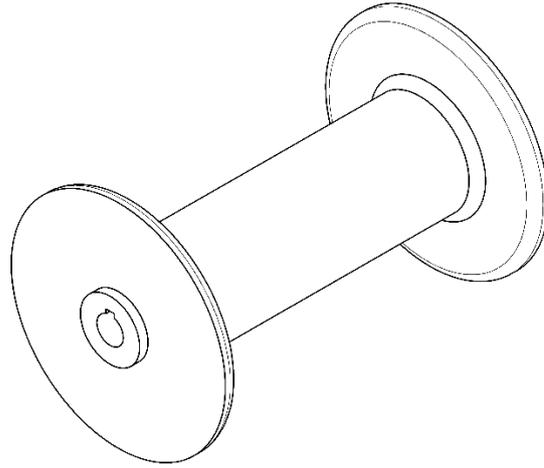


Рисунок 16 – Барабан лебедки

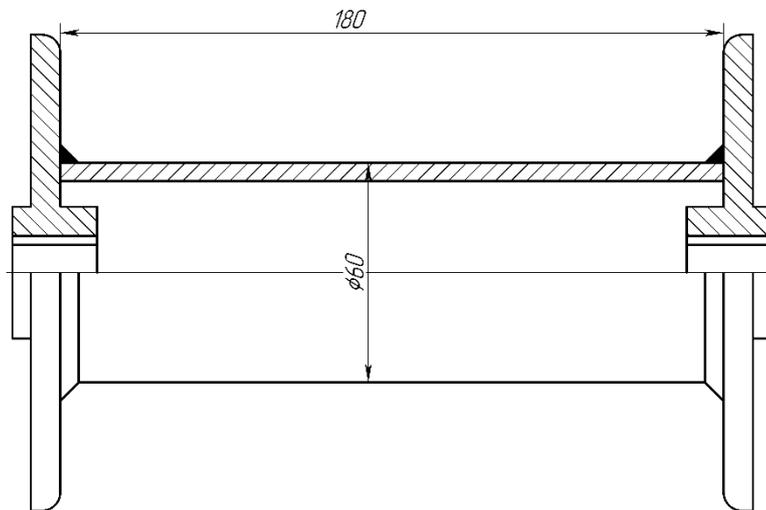


Рисунок 17 – Барабан лебедки

Для предварительного выбора электродвигателя и редуктора рассчитаем максимально возможный момент, приходящийся на вал, на который посажен барабан лебедки:

$$M_{\max} = r_{\phi} \cdot P_n = \frac{d_{\phi}}{2} \cdot m_n \cdot g, \quad (2.5)$$

где  $r_{\phi}$  – радиус барабана лебедки;

$d_{\phi}$  – диаметр барабана лебедки;

$m_n$  – масса одной панели.

$$M_{\max} = \frac{0,06}{2} \cdot 40 \cdot 9,8 = 11,76 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (2.6)$$

В настоящий момент рынок предлагает множество компактных электродвигателей. Был выбран вентильный двигатель Festo EMMT-AS-80-M-LS-R, предназначенный для применения в системах сервопривода.

Технические характеристики выбранного электродвигателя приведены в таблице 1, внешний вид на рисунке 18, механическая характеристика на рисунке 19.



Рисунок 18 – Двигатели Festo EMMT-AS-80-M-LS-R

Таблица 1 – Технические характеристики двигателя Festo EMMT-AS-80-M-LS-R

Параметр	Значение
Номинальное напряжение питания, В	325
Номинальный ток, А	4,1
Максимальный ток, А	17,1
Номинальный момент, Н·м	2,2
Максимальный момент, Н·м	6,4
Номинальная мощность, кВт	0,69
Количество пар полюсов	5
Номинальная частота вращения, об/мин	3000
Максимальная частота вращения, об/мин	6150

Продолжение таблицы 1

Сопротивление обмоток, Ом	2,04
Индуктивность обмоток, мГн	8,9
Магнитный поток магнитов ротора, Вб	0,09
Момент инерции ротора, м·кг <sup>2</sup>	1,77·10 <sup>-4</sup>
Масса, кг	2,64

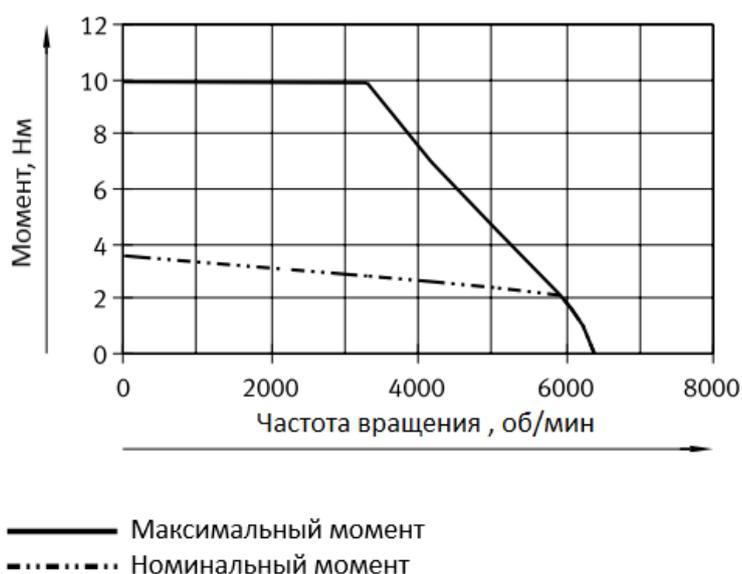


Рисунок 19 – Механическая характеристика двигателя Festo EMMT-AS-80-M-LS-R

Стоит отметить, что выбранный электродвигатель имеет электромагнитный тормоз, который дает возможность быстро останавливать инерционную нагрузку, которая может возникнуть при неполадках в работе системы управления или отключении питания двигателей. Технические характеристики электромагнитного тормоза приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики электромагнитного тормоза двигателя Festo EMMT-AS-80-M-LS-R

Параметр	Значение
Номинальное напряжение питания, В	24
Номинальный ток, А	0,46
Момент удержания, Н·м	2,5

Продолжение таблицы 2

Мощность, Вт	11
Время срабатывания, мс	10

Для обеспечения работы электродвигателя используется сервоконтроллер Festo CMMT-AS-C4-3A-EC-S1. Внешний вид устройства показан на рисунке 20, технические характеристики приведены в таблице 3.



Рисунок 20 – Сервоконтроллер Festo CMMT-AS-C4-3A-EC-S1

Таблица 3 – Технические характеристики сервоконтроллера Festo CMMT-AS-C4-3A-EC-S1

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВт	0,7
Максимальная мощность, кВт	2
Частота, Гц	0 – 599
Номинальный ток, А	4
Максимальный ток, А	12
Постоянные времени входа, выхода, мс	1

В качестве передаточного механизма выбран планетарный редуктор APEx AE070, который представлен на рисунке 21. Технические характеристики устройства приведены в таблице 4.



Рисунок 21 – Редуктор APEX AE070

Таблица 4 – Технические характеристики редуктора APEX AE070

Параметр	Значение
Передаточное отношение	10
Номинальный момент, Н·м	40
Номинальная частота привода, об/мин	5000
Момент инерции, м·кг <sup>2</sup>	0,13·10 <sup>-4</sup>
Масса, кг	1,6

В качестве датчиков натяжения выбраны датчики силоизмерительные СТЗ-500 (рисунок 22). Технические характеристики показаны в таблице 5.



Рисунок 22 – Датчик силоизмерительный СТЗ-500

Таблица 5 – Технические характеристики силоизмерительного датчика СТЗ-500

Параметр	Значение
Диапазон измерения, Н	-500 – 500

Продолжение таблицы 5

Класс точности	0,2
Напряжение питание, В	12 – 30
Интерфейс цифрового выхода	RS485

Для слежения за углом отклонения тросов используется высокоточный инклинометр HCR726S с протоколом MODBUS RTU (рисунок 23). Параметры устройства указаны в таблице 6.



Рисунок 23 – Инклинометр HCR726S

Таблица 6 – Технические параметры инклинометра HCR726S

Параметр	Значение
Измерительный диапазон, °	:±10...±90/180
Диапазон напряжений питания, В	9 – 36
Разрешение, °	0,001
Размеры, мм	54×44×18
Выходной сигнал	RS485 MODBUS RTU

В качестве управляющего устройства выбран программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК150, представленный на рисунке 24. Характеристики устройства приведены в таблице 7.



Рисунок 24 – ОВЕН ПЛК150

Таблица 7 – Технические характеристики ОВЕН ПЛК150

Параметр	Значение	
Дискретные входы	6	Возможно расширение количества путем подключения внешних модулей ввода/вывода
Дискретные выходы	4 э/м реле	
Аналоговые входы	4	
Аналоговые выходы	2	
Интерфейсы	Ethernet 100 Base-T, RS-232, RS-485	
Напряжение питания	~90 – 264 В 47 – 63 Гц	

### 3 Математическое описание и моделирование исполнительного механизма

#### 3.1 Математическая модель вентильного электродвигателя в неподвижной системе координат

Выбранный серводвигатель Festo EMMT-AS-80-M-LS-R является синхронной машиной с постоянными магнитами. В общем виде данный вид электрических машин можно представить как представлено на рисунке 25.

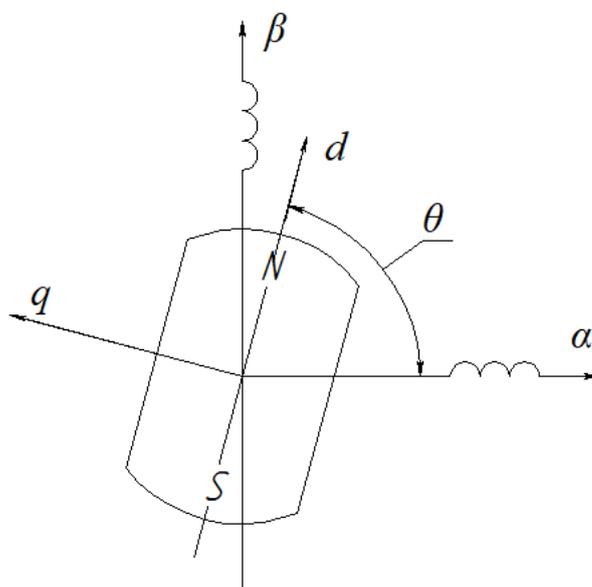


Рисунок 25 – Обобщенный вид синхронной машины с постоянными магнитами

Машина, показанная на рисунке 25, содержит две обмотки на статоре (якоре), обозначенные  $\alpha$ ,  $\beta$  и ротор (индуктор) с явно выраженными полюсами, который представлен в виде постоянного магнита. Ось  $d$  указывает направление поля постоянного магнита.

Уравнения равновесия ЭДС в обмотках статора и моментов на валу записываются в виде:

$$\begin{aligned}
U_{\alpha} &= R i_{\alpha} + \frac{d\psi_{\alpha}}{dt}, \\
U_{\beta} &= R i_{\beta} + \frac{d\psi_{\beta}}{dt}, \\
J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_H,
\end{aligned}
\tag{3.1}$$

где  $\psi_{\alpha}, \psi_{\beta}$  – потокосцепления по неподвижным осям  $\alpha, \beta$ :

$$\begin{aligned}
\psi_{\alpha} &= L_{\alpha} i_{\alpha} + L_{\alpha\beta} i_{\beta} + \psi_{0\alpha} = L_{\alpha} i_{\alpha} + L_{\alpha\beta} i_{\beta} + \Phi_0 \cos \theta, \\
\psi_{\beta} &= L_{\alpha\beta} i_{\alpha} + L_{\beta} i_{\beta} + \psi_{0\beta} = L_{\alpha\beta} i_{\alpha} + L_{\beta} i_{\beta} + \Phi_0 \sin \theta,
\end{aligned}
\tag{3.2}$$

где  $\Phi_0$  - поток, созданный постоянным магнитом ротора на пару полюсов.

Выражения для собственных индуктивностей и взаимной индуктивности имеют вид:

$$\begin{aligned}
L_{\alpha} &= \frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta, \\
L_{\beta} &= \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta, \\
L_{\alpha\beta} &= \frac{L_d - L_q}{2} \sin 2\theta.
\end{aligned}
\tag{3.3}$$

где  $L_d, L_q$  - индуктивность обмотки статора по продольной и поперечной оси.

С учетом уравнений (3.1), (3.2), (3.3) полное описание синхронной машины с постоянными магнитами в неподвижной системе координат запишется в виде:

$$\begin{aligned}
U_\alpha &= R_1 i_\alpha - (L_d - L_q) \omega \cdot \sin 2\theta \cdot i_\alpha + \left( \frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta \right) \frac{di_\alpha}{dt} + \\
&+ (L_d - L_q) \omega \cdot \cos 2\theta \cdot i_\beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \sin 2\theta \cdot \frac{di_\beta}{dt} - \Phi_0 \omega \sin \theta, \\
U_\beta &= R_1 i_\beta + (L_d - L_q) \omega \cdot \cos 2\theta \cdot i_\alpha + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \sin 2\theta \cdot \frac{di_\alpha}{dt} + \\
&+ (L_d - L_q) \omega \cdot \sin 2\theta \cdot i_\beta + \left( \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta \right) \frac{di_\beta}{dt} + \Phi_0 \omega \cos \theta, \\
M &= p \frac{m}{2} \left[ \frac{L_d - L_q}{2} \sin 2\theta \cdot (i_\beta^2 - i_\alpha^2) + (L_d - L_q) \cos 2\theta \cdot i_\alpha i_\beta + \Phi_0 \cos \theta i_\beta - \Phi_0 \sin \theta i_\alpha \right].
\end{aligned} \tag{3.4}$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H,$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m, \quad \omega = p\omega_m, \quad \theta = p\theta_m$$

где  $p$ -число пар полюсов,  $m$ - число фаз в машине.

Чтобы из уравнений (3.4) получить уравнения вентильного двигателя необходимо связать напряжения на статоре с углом поворота ротора, который определяется сигналом с датчика положения ротора (в случае Festo EMMT-AS-80-M-LS-R – резольвера).

В этом случае напряжения  $U_\alpha, U_\beta$  должны зависеть от начальной установки датчика положения ротора и от угла поворота ротора и определяться выражениями:

$$U_\alpha = U_1 \cos(\theta + \theta_0), \quad U_\beta = U_1 \sin(\theta + \theta_0), \tag{3.5}$$

где  $U_1$  амплитуда первой гармоники напряжения на выходе инвертора.

### 3.2 Математическое описание вентильного двигателя во вращающейся системе координат

Для упрощения математического описания ВД используется система координат  $d$ - $q$ , жестко связанная с ротором при этом ось  $d$  совмещается с направлением магнитного поля ротора.

В этом случае операторные уравнения, которыми описываются электромагнитные и электромеханические процессы в вентильном двигателе имеют вид:

$$\begin{aligned}U_d &= R(T_d s + 1)i_d - \omega L_q i_q, \\U_q &= R(T_q s + 1)i_q + \omega L_d i_d + \Phi_0 \omega, \\M &= p \frac{m}{2} (\Psi_0 i_q + (L_d - L_q) i_d i_q), \\s\omega_m &= \frac{1}{J} (M - M_H), \\s\theta_m &= \omega_m, \quad \omega = p\omega_m.\end{aligned}\tag{3.6}$$

В уравнениях (3.6)  $U_d, U_q, i_d, i_q$  - проекции напряжения и тока статора на оси,  $\Psi_0$  - проекция потокосцепления ротора на ось  $d$ ,  $T_d = \frac{L_d}{R}, T_q = \frac{L_q}{R}, L_d, L_q$  - постоянные времени и индуктивность обмотки статора по продольной и поперечной осям,  $R$  - сопротивления статорной обмотки,  $\omega_m, M, M_H, \theta_m$  - механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала,  $J$  - момент инерции ротора.

Структурная схема вентильного двигателя, составленная по уравнениям (3.6) приведена на рисунке 26.

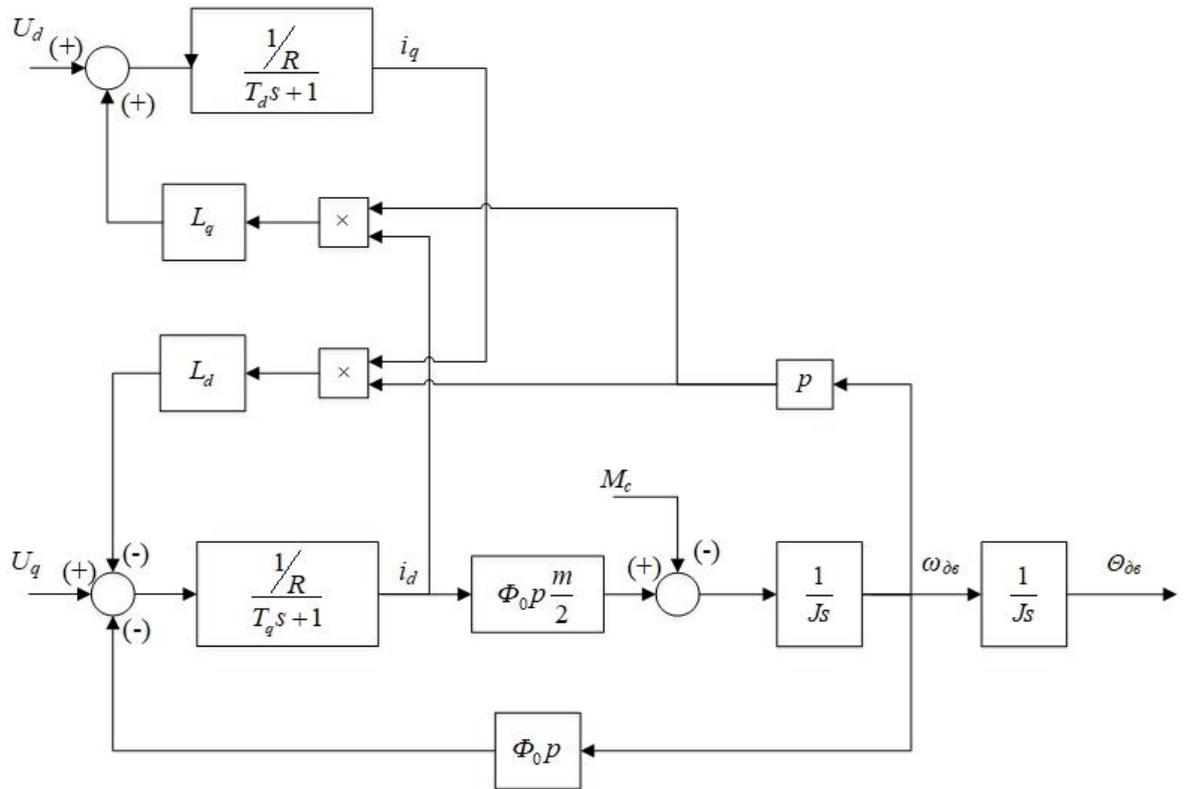


Рисунок 26 – Структурная схема вентильного двигателя во вращающейся системе координат

В реверсивных системах реализуются соотношения:

$$U_d = 0, \quad U_q = U_1. \quad (3.7)$$

Так как выбранный двигатель имеет неявнополюсный ротор, индуктивности статорной обмотки по продольной и поперечной осях принимаются равными индуктивности обмотки статора, указанной в технических параметрах:

$$L = L_q = L_s \quad (3.8)$$

На рисунке 27 показана модель вентильного электродвигателя Festo EMMT-AS-80-M-LS-R, основанная на технических параметрах, приведенных в таблице 1

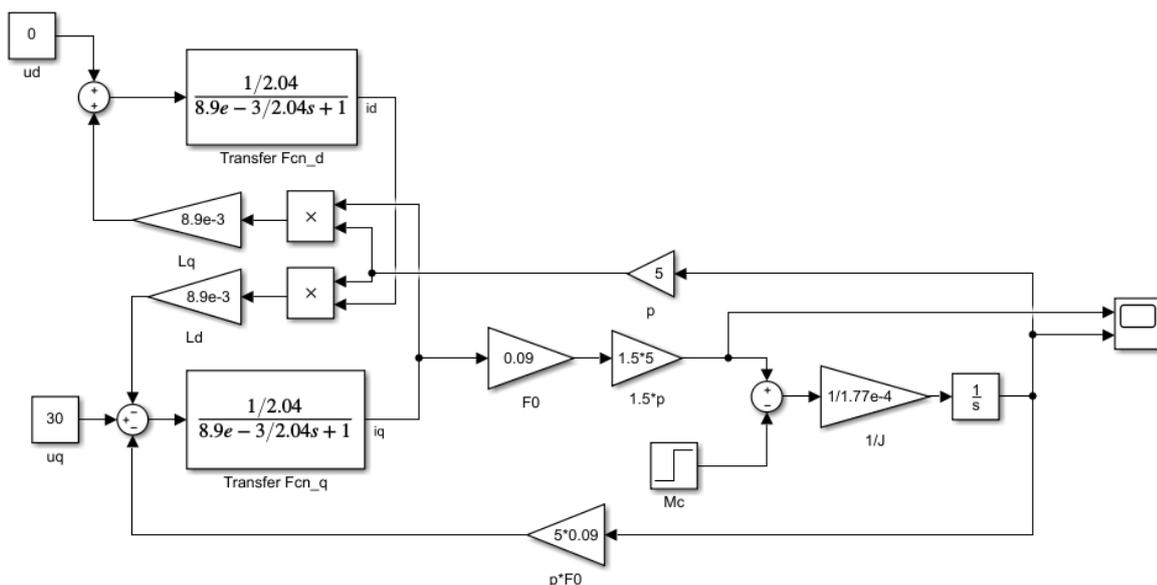


Рисунок 27 – Модель двигателя Festo EMMT-AS-80-M-LS-R в Simulink  
 Результат моделирования работы электродвигателя при  $U_I=30$  В и моменте сопротивления 2,2 Н·м, возникающем в момент времени 0,08 с приведен на рисунке 28.

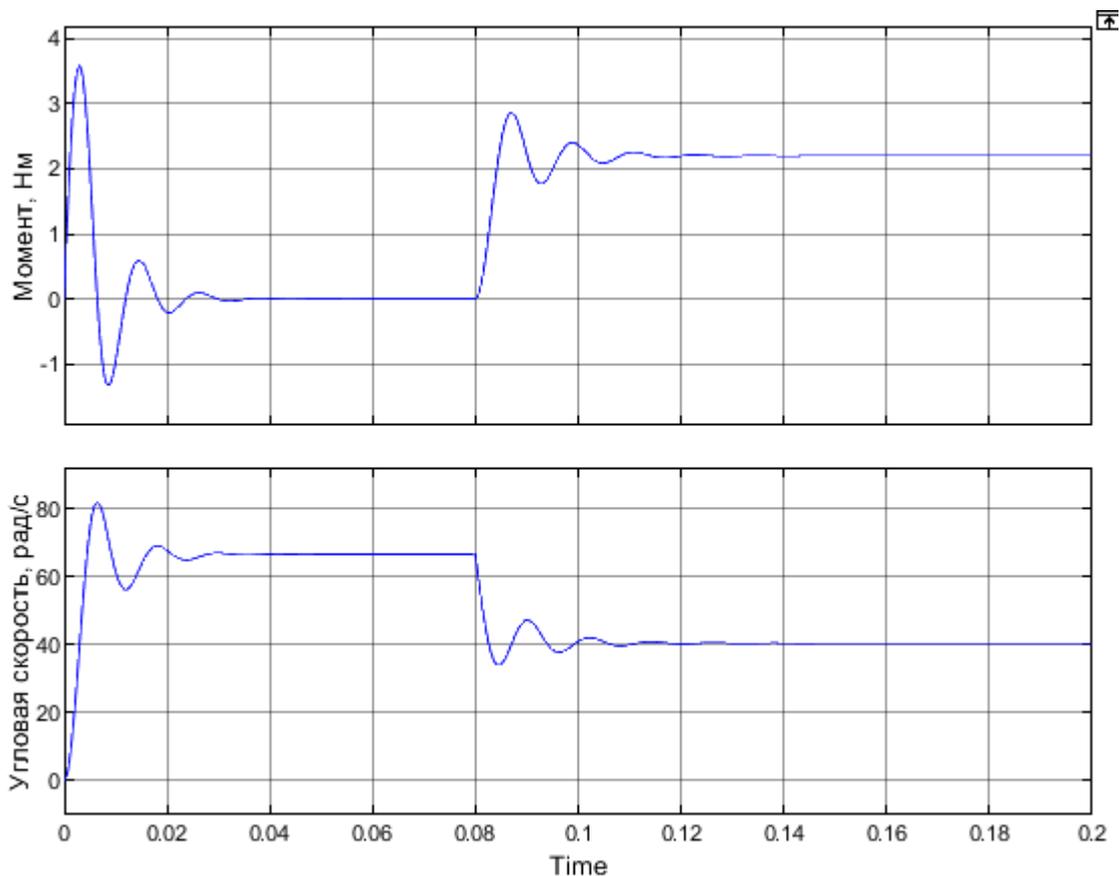


Рисунок 28 – Графики переходных процессов двигателя при  $U_I=30$  В

Результаты моделирования, представленные в разделе 3.2, говорят о правильности составленного математического описания вентильного двигателя, который предполагается использовать в составе исполнительного механизма системы частичного обезвешивания.

### **3.3 Моделирование исполнительного механизма системы обезвешивания**

Структурная схема механизма с подчиненным регулированием скорости вентильного электропривода показана на рисунке 29.

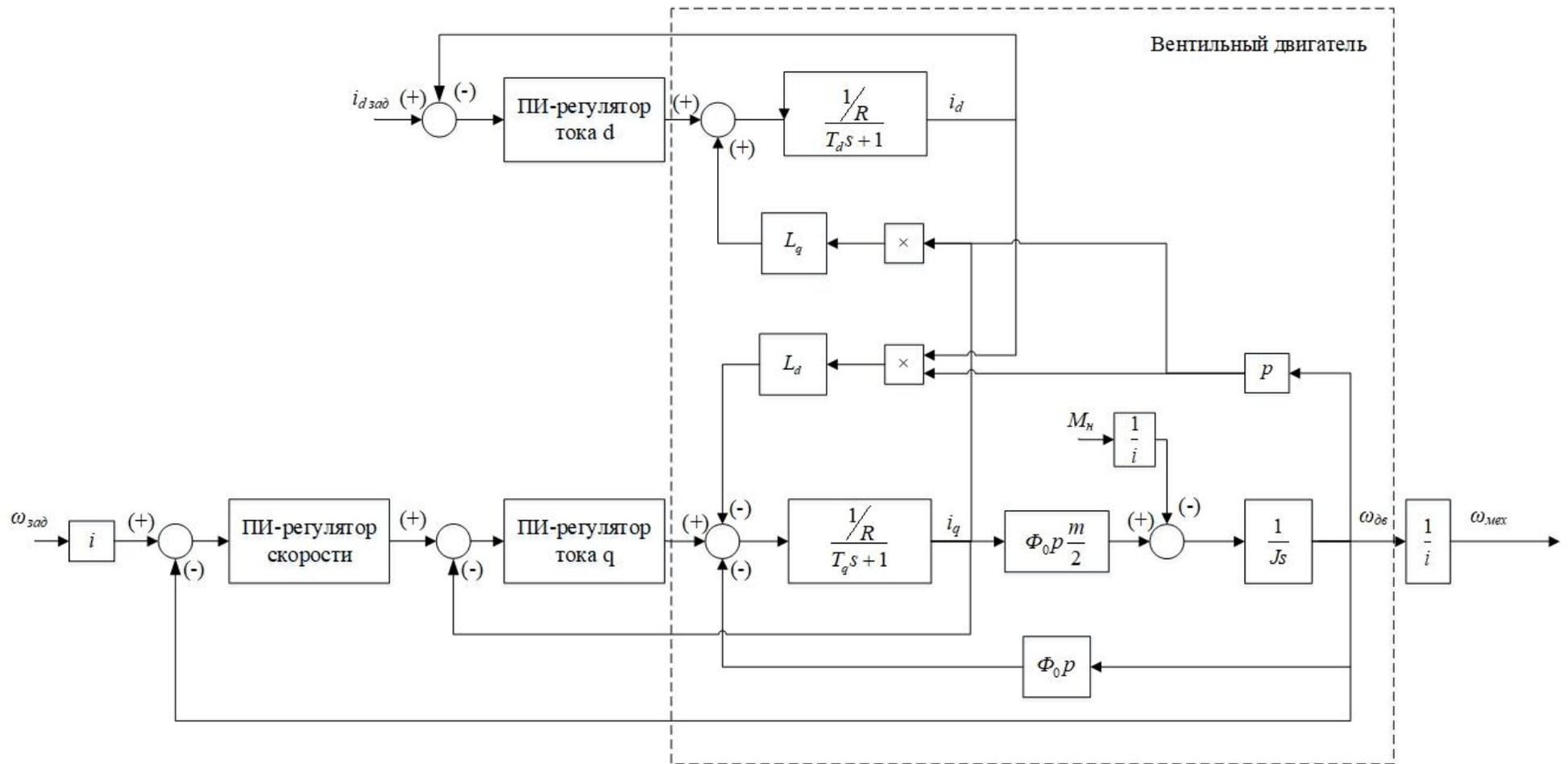


Рисунок 29 – Структурная схема исполнительного механизма с вентильным приводом

$i$  – передаточное число редуктора.

Для настройки ПИ-регулятора тока  $i_q$ , необходимо выделить контур тока (рисунки 30-31).



Рисунок 30 – Структурная схема контура тока в режиме заторможенного двигателя

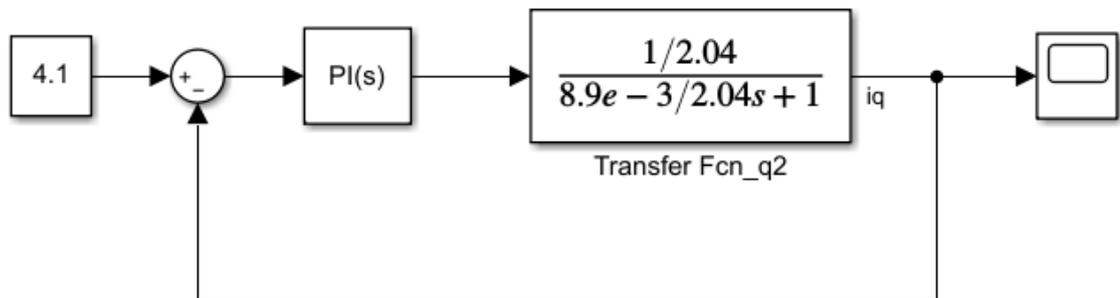


Рисунок 31 – Модель контура тока в Simulink

Для настройки ПИ-регулятора был применен инструмент PID Tuner, доступный в Simulink.

Параметры ПИ-регулятора  $i_q$  тока:

$$K_p = 12,03;$$

$$T_i = 0,00036.$$

Выбор регулятора тока  $i_d$  проводится аналогично.

Следующим шагом необходимо провести настройку регулятора скорости.

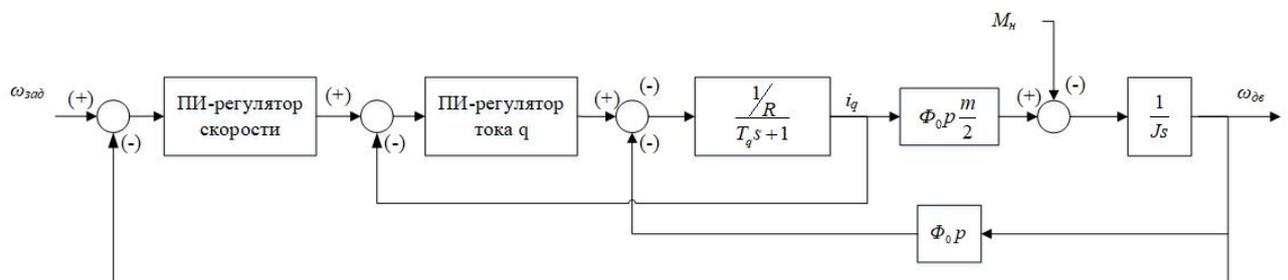


Рисунок 32 – Структурная схема ВД для настройки регулятора скорости  
При помощи PID Tuner был настроен ПИ-регулятор скорости:

$$K_p = 0,403;$$

$$T_i = 0,118.$$

Момент инерции механизма равен сумме моментов инерции ротора двигателя и передаточного механизма:

$$\begin{aligned} J_{мех} &= J_{дв} + J_{ред} \\ J_{мех} &= 1,77 \cdot 10^{-4} + 0,13 \cdot 10^{-4} = 1,9 \cdot 10^{-4} \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

где  $J_{мех}$  – момент инерции механизма,

$J_{дв}$  – момент инерции ротора двигателя,

$J_{ред}$  – момент инерции редуктора,

Собранная в Simulink модель исполнительного механизма с вентильным приводом приведена на рисунке 33.



Результаты моделирования при заданном значении угловой скорости 9,42 рад/с и моменте нагрузки 10 Н·м, возникающем в момент времени 0,08 с приведены на рисунке 34.

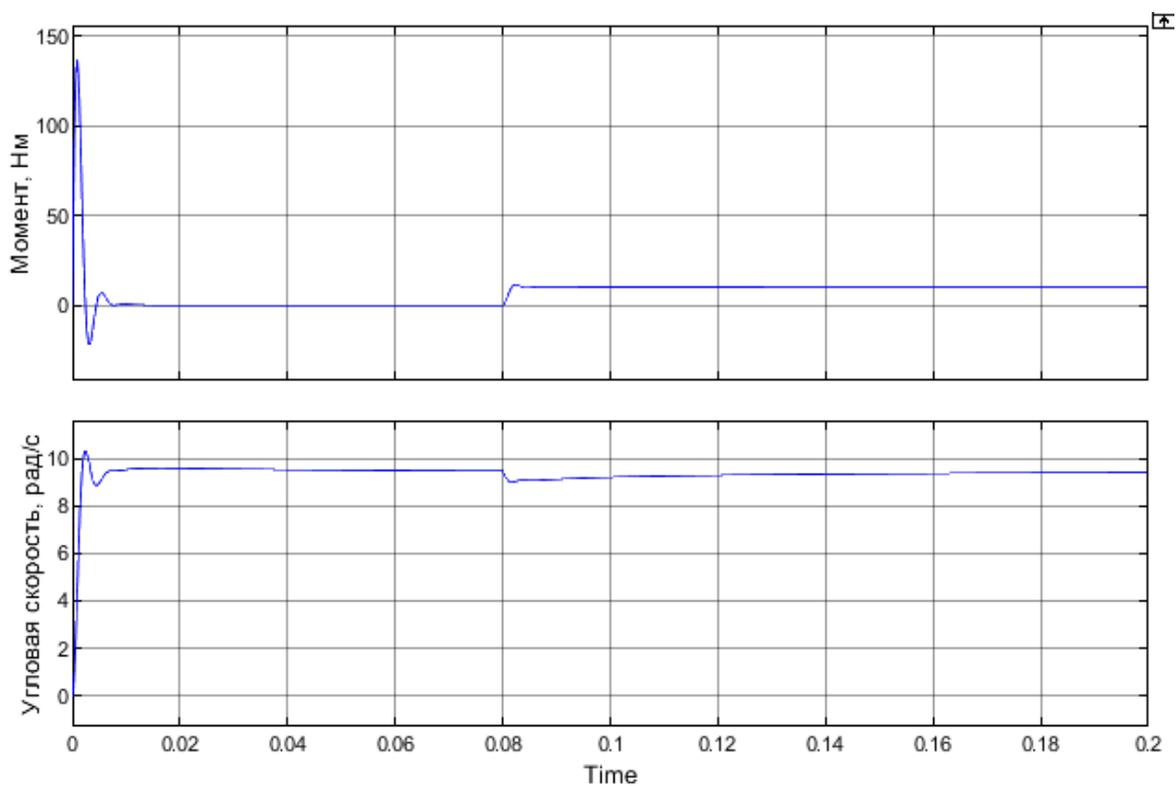


Рисунок 34 – Переходный процесс скорости и момента исполнительного механизма с вентильным электроприводом

При постановке задачи активного обезвешивания необходимо реализовать управление моментом (током) вентильного двигателя. Преобразованная структурная схема указана на рисунке 35.

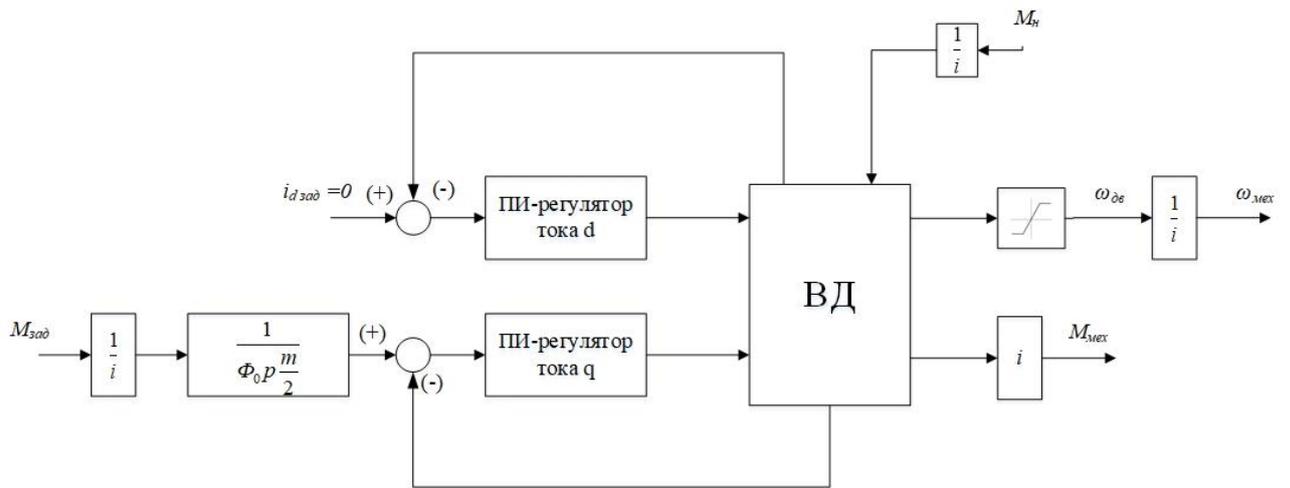


Рисунок 35 – Структурная схема исполнительного механизма с вентильным приводом, управляемым по моменту представлена на рисунке

Стоит обратить внимание на то, что при моментном управлении вентильным двигателем необходимо ограничивать частоту вращения.

Модель Simulink исполнительного механизма с вентильным приводом, управляемым по моменту представлена на рисунке 36.

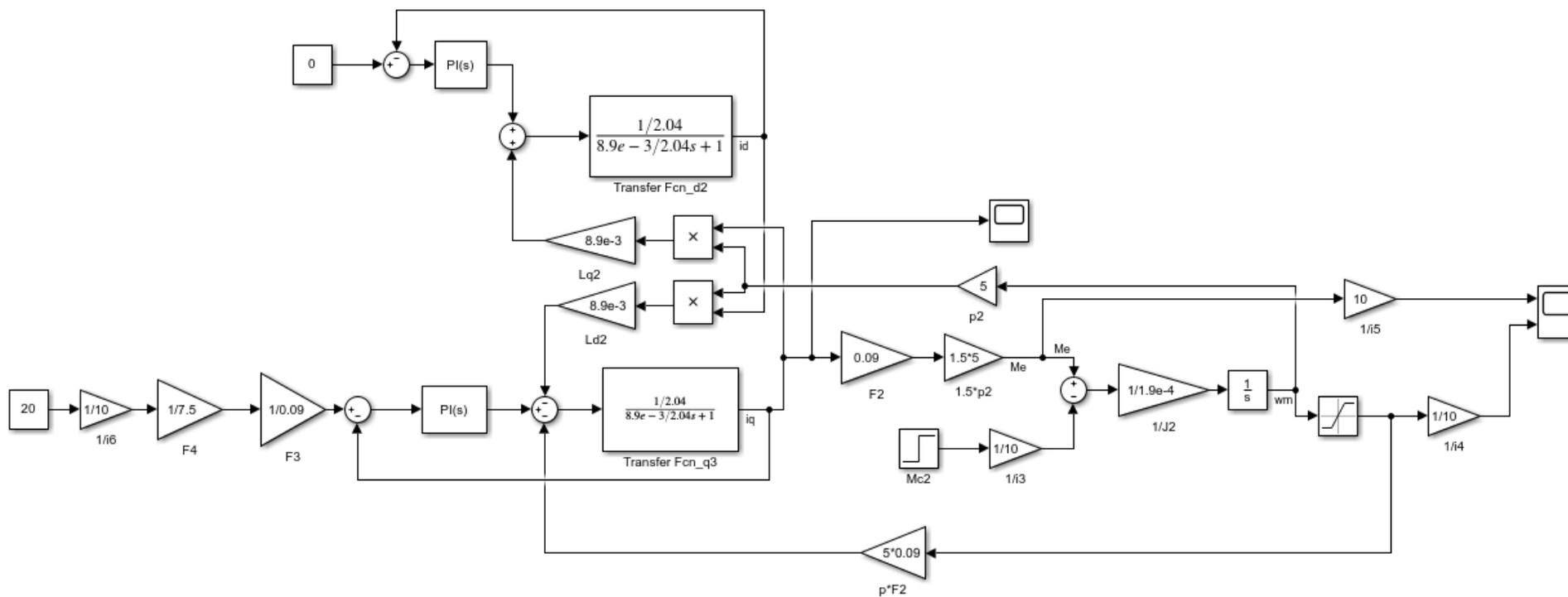


Рисунок 36 – Модель исполнительного механизма с вентильным приводом, управляемым по моменту

На рисунке 38 показаны результаты моделирования при задающем значении момента 5 Н·м, моменте нагрузки 12 Н·м, возникающем в момент времени 0,11 с. Угловая скорость вращения вала механизма при этом ограничена от минус 10 до 10 рад/с.

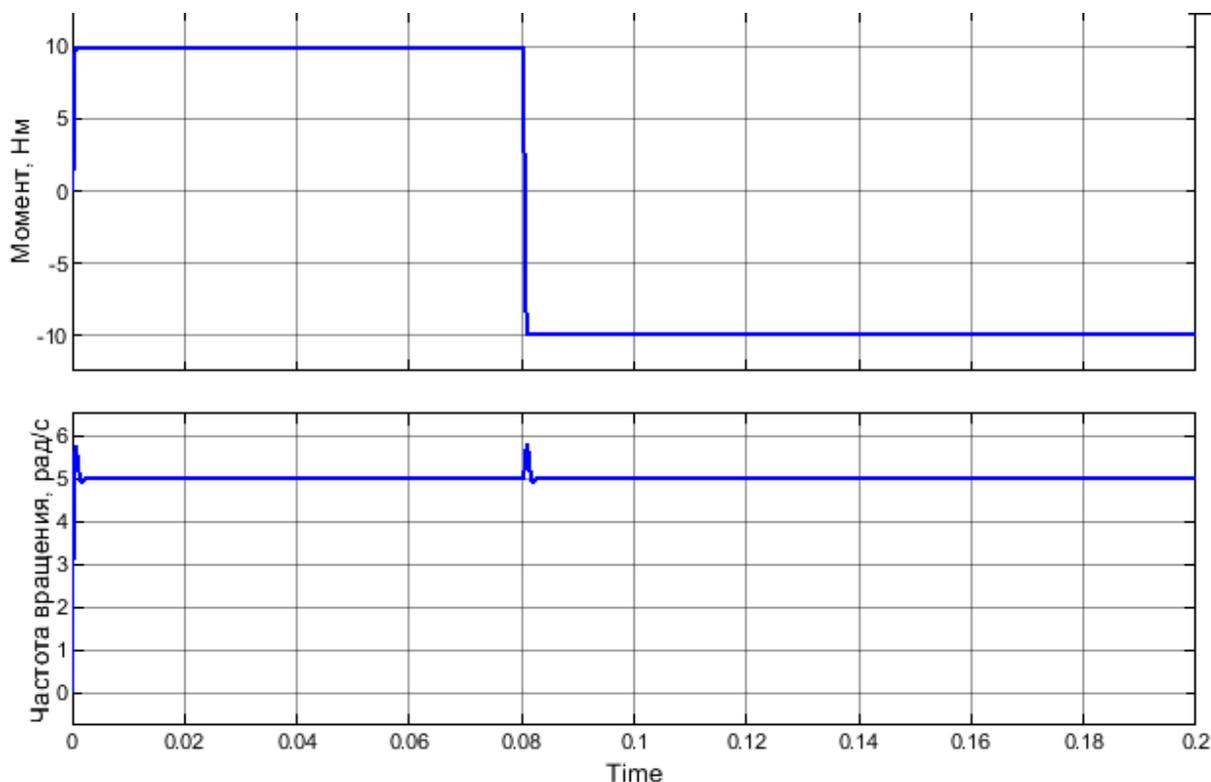


Рисунок 37 – Переходные процессы исполнительного механизма при управлении моментом

Таким образом, результаты моделирования, представленные в разделе 3.3, говорят о возможности применения выбранного электродвигателя в составе исполнительного механизма системы частичного обезвешивания как в режиме задания скорости, так и в режиме задания момента.

### 3.4 Моделирование системы частичного обезвешивания

Так как в системе обезвешивания объединено множество электроприводов, работающих на различную нагрузку, необходима реализация многомерной системы управления.

В общем виде структурная схема многомерных систем управления имеет вид, представленный на рисунке 38.

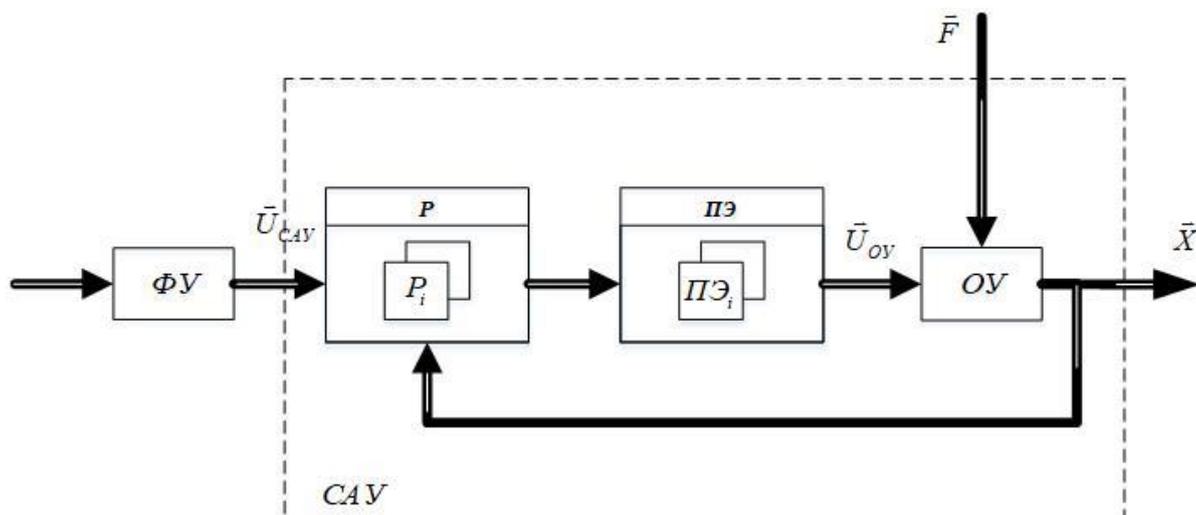


Рисунок 38 – Структурная схема многомерных систем управления

Вектор управления  $\vec{U}_{CAV}$  формируется устройством формирования управления ФУ. Блок регуляторов Р, основываясь на отклонениях регулируемых величин от задаваемых, управляет преобразователями энергии ПЭ, которые осуществляют управляющие воздействия  $\vec{U}_{OY}$  на объект управления ОУ. На объект управления действуют возмущающие воздействия  $\vec{F}$ .

Используя трехмерную модель системы обезвешивания, были получены величины углов отклонения от вертикали тросов одной из панелей в различные моменты времени. Результаты приведены в таблице 8.

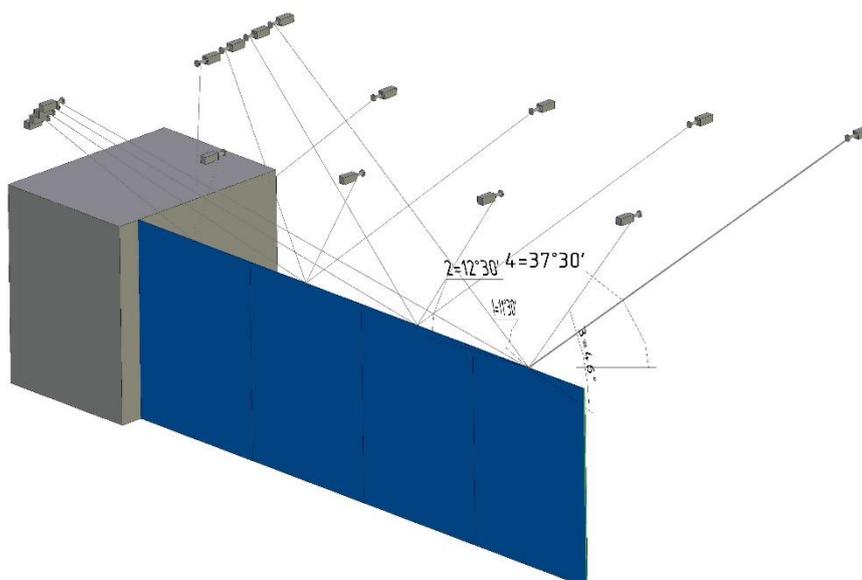


Рисунок 39 – Углы отклонения тросов от вертикали

Таблица 8 – Зависимость углов отклонения тросов от времени

Время, с	$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	$\gamma, ^\circ$	$\varepsilon, ^\circ$
0	49	49	73	73
5	61	61	69.3	69.3
10	70	69.5	64.5	65
15	74.5	74	59	60
20	76.5	76	52	55
25	78	77.5	46.5	52.5
30	78.5	77.5	44	52.5

На основе данных, приведенных в таблице 8, при помощи программных средств были получены функции зависимости от времени угла отклонения от вертикали:

$$\begin{aligned}
 \alpha(t) &= 0.001t^3 - 0.0927t^2 + 2.828t + 49 \\
 \beta(t) &= 0.001t^3 - 0.0931t^2 + 2.8646t + 49 \\
 \gamma(t) &= 0.0004t^3 - 0.0066t^2 - 0.8974t + 73 \\
 \varepsilon(t) &= 0.001t^3 - 0.0447t^2 - 0.5398t + 73
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

Модель Simulink, реализующая функцию зависимости угла  $\alpha$  от времени в Simulink, основанная на выражении (3.10), приведена на рисунке 40.

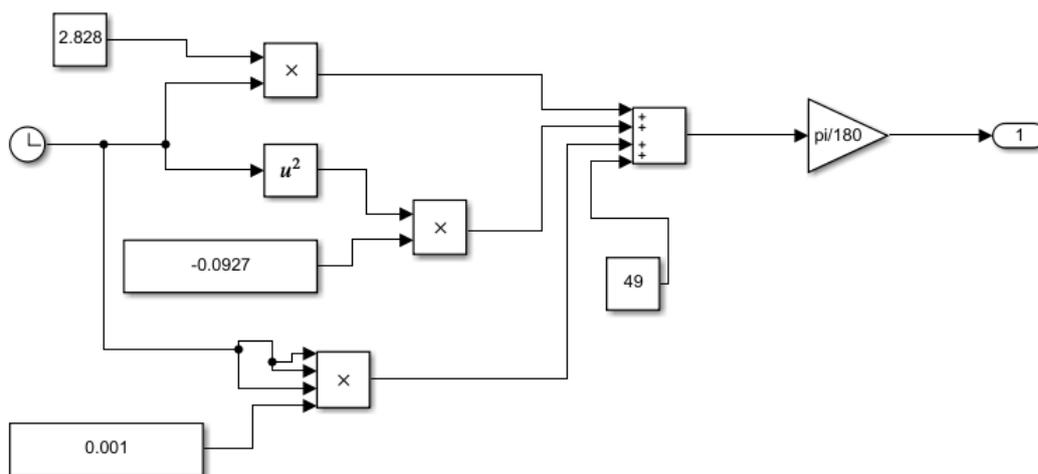


Рисунок 40 – Функция зависимости угла  $\alpha$  от времени в Simulink

Модели Simulink функций остальных трех углов были построены аналогично.

Основываясь на выражении (2.4) и рисунке 14, можно вычислить значения величин проекций векторов сил натяжения тросов на вертикальную ось:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{m_n \cdot g}{\frac{ctg(\alpha) + ctg(\beta) + ctg(\gamma) + ctg(\varepsilon)}{ctg(\alpha)} \cdot \cos(\alpha)} \\
 T_2 &= \frac{m_n \cdot g}{\frac{ctg(\alpha) + ctg(\beta) + ctg(\gamma) + ctg(\varepsilon)}{ctg(\beta)} \cdot \cos(\beta)} \\
 T_3 &= \frac{m_n \cdot g}{\frac{ctg(\alpha) + ctg(\beta) + ctg(\gamma) + ctg(\varepsilon)}{ctg(\gamma)} \cdot \cos(\gamma)} \\
 T_4 &= \frac{m_n \cdot g}{\frac{ctg(\alpha) + ctg(\beta) + ctg(\gamma) + ctg(\varepsilon)}{ctg(\varepsilon)} \cdot \cos(\varepsilon)}
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

На рисунке 41 представлена модель системы обезвешивания одной из панелей в Simulink.

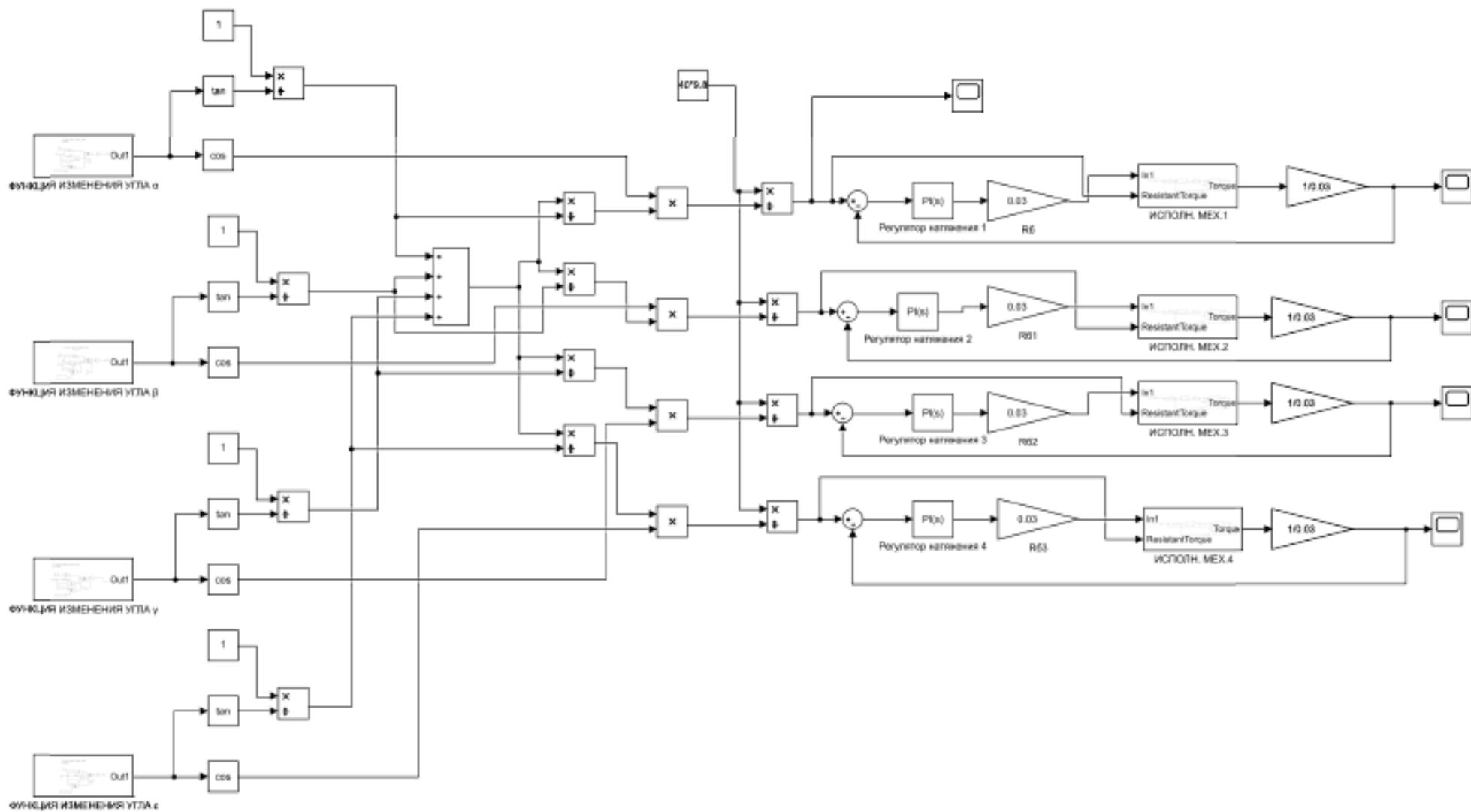


Рисунок 41 – Модель системы обезвешивания одной из панелей в Simulink

На рисунках 42-44 представлены зависимости от времени натяжений тросов, полученные в результате моделирования системы обезвешивания одной из панелей трансформируемой конструкции.

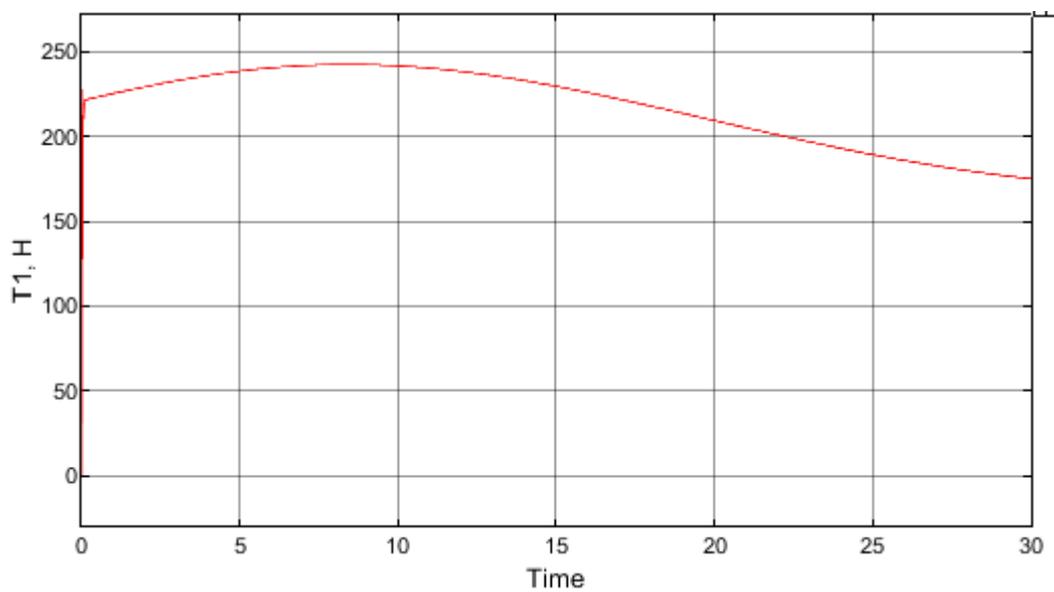


Рисунок 42 – Зависимость  $T_1$  от времени

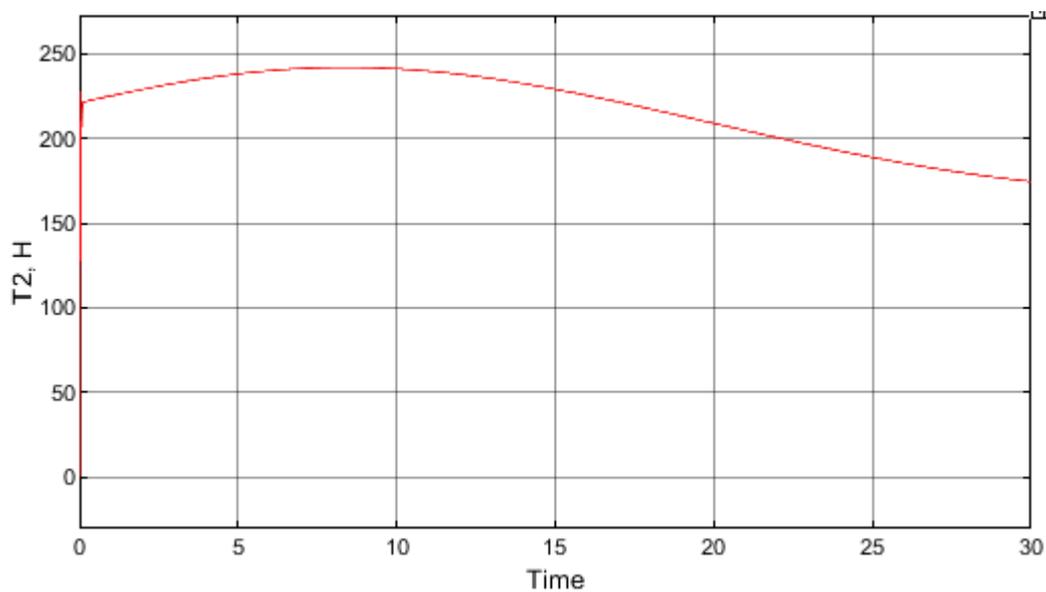


Рисунок 43 – Зависимость  $T_2$  от времени

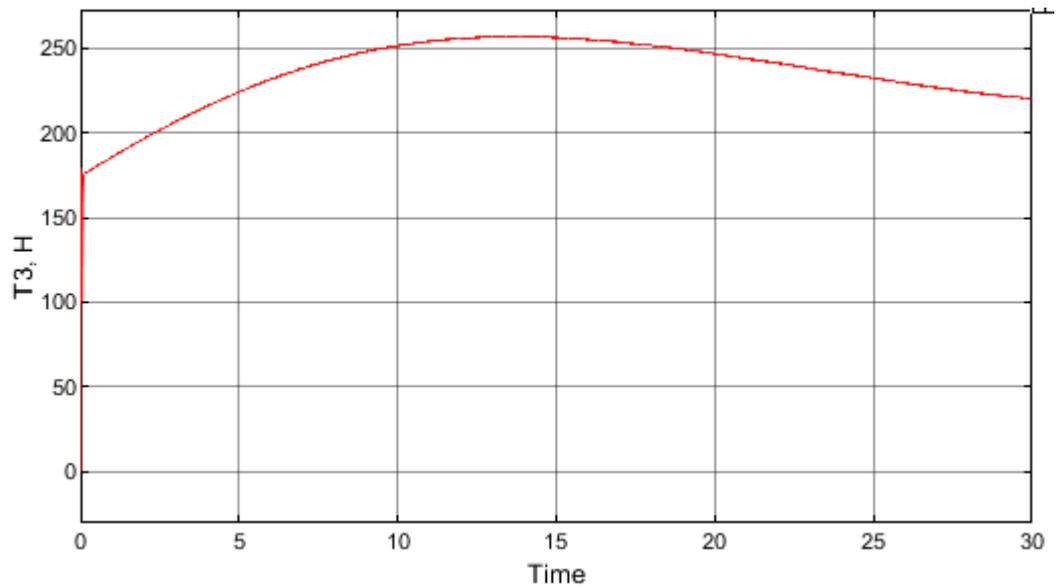


Рисунок 44 - Зависимость  $T_3$  от времени

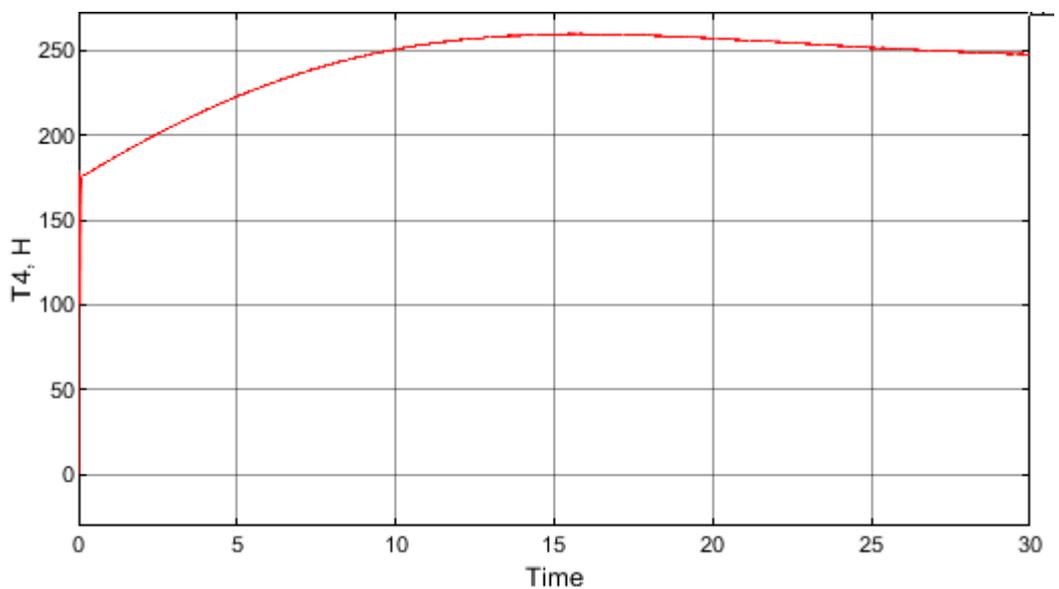


Рисунок 45 – Зависимость  $T_4$  от времени

Для проверки правильности полученных результатов моделирования, проверим выполнение условия (2.4) для момента времени процесса раскрытия 15 с. Полученные величины натяжений тросов в этот момент времени:

$$T_1 = 229,5 \quad \text{Н} \cdot \text{м};$$

$$T_2 = 229 \quad \text{Н} \cdot \text{м};$$

$$T_3 = 256,3 \quad \text{Н} \cdot \text{м};$$

$$T_4 = 259,4 \quad \text{Н} \cdot \text{м}.$$

Проверим выполнение условия (2.4):

$$P_n = m_n g = 40 \cdot g = 392,226 \quad \text{Н} \cdot \text{м} \quad (3.13)$$

$$T_1 \cos \alpha + T_2 \cos \beta + T_3 \cos \gamma + T_4 \cos \varepsilon = 229,5 \cos(74,5) + \\ + 229 \cos(74) + 256,3 \cos(59) + 259,4 \cos(60) = 392,266 \quad \text{Н} \cdot \text{м} \quad (3.14)$$

Таким образом, условие (2.4) выполняется, и можно утверждать о правильности моделирования системы обезвешивания.

#### **4 Социальная ответственность**

В разделе рассматриваются вопросы анализа вредных и опасных факторов труда, разрабатываются меры защиты от вредных и опасных производственных факторов для рабочего места в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, а также даются рекомендации по созданию оптимальных условий труда и охране окружающей среды.

В данном разделе выпускной квалификационной работы подняты вопросы, касающиеся социальной ответственности при разработке системы автоматического управления и эксплуатации исполнительного механизма системы частичного обезвешивания.

Исполнительный механизм системы частичного обезвешивания представляет собой электропривод и вместе с системой управления является электротехническим устройством.

Разработка системы автоматического управления и исполнительного механизма системы частичного обезвешивания ведется на автоматизированном рабочем месте с персональным компьютером.

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

Согласно Статьям 91 и 108 ТК РФ [14], регламентированное время продолжительности рабочего времени не должно превышать 40 часов в неделю, в течение рабочего дня работодатель обязан предоставить работнику перерыв для отдыха и питания. Предоставляемое работнику время для отдыха и питания располагается во временном промежутке от 30 минут до 2 часов, в зависимости от работодателя.

В статье 22 ТК РФ [14] указано, что работодатель обязан обеспечивать безопасность работника и соответствие условий труда всем необходимым требованиям.

Типовая инструкция ТОО Р-45-084-01 [15] (утверждена 2 февраля 2001 года) более детально регламентирует данный вопрос. Согласно данному документу, без перерыва работник может находиться за монитором компьютера

не более двух часов. Перерывы выполняются с целью снижения усталости глаз и уменьшения их напряжения.

Требования к организации рабочих мест предъявляются следующее. Рабочее место должно быть организовано с учетом эргономических требований согласно ГОСТ 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» [16] и ГОСТ 12.2.061-81 «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам» [17].

В зависимости от вида и времени осуществляемой работы инструкция устанавливает разделение путем классификации по группам:

- А – чтение информации с монитора по сделанному запросу;
- Б – печатание на клавиатуре с целью ввода информации;
- В — творческая работа.

Кроме этого, предусмотрено деление на категории сложности работ: – для группы А (не свыше 60000 считываемых знаков за смену) перерыв составляет 15 минут, предоставляется два раза – через два часа после начала работы и перерыва на обед; 108 – для группы Б (не свыше 40000 напечатанных знаков за смену) перерыв составляет 10 минут через каждый трудовой час; – для группы В (не свыше шести часов за смену) перерыв составляет 15 минут через каждый трудовой час. Если смена длится двенадцать часов, время регламентированных перерывов при работе на компьютере за восемь часов работы предоставляется в вышеуказанном порядке, а за оставшиеся четыре часа – пятнадцать минут за каждый час (вне зависимости от категории).

Обязанности по обеспечению безопасных условий и охраны труда возлагаются на работодателя и отражены в статье 212 ТК РФ [14].

Все вредные и опасные производственные факторы рассмотрены в соответствии с нормативными документами:

- СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»;

- СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий»;
- СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»;
- ГОСТ Р 12.1.019-2017 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».

## **4.2 Производственная безопасность**

В процессе разработки и эксплуатации данного устройства на человека могут воздействовать вредные и опасные факторы. К вредным производственным факторам следует отнести:

- Шум
- Микроклимат
- Освещение
- Психофизиологические факторы: фиксированная рабочая поза, умственное перенапряжение.

Опасные производственные факторы:

- Электрический ток (источником является ПК)
- Статическое электричество
- Короткое замыкание

### **4.2.1 Электробезопасность**

Во время разработки системы автоматического управления исполнительного механизма системы частичного обезвешивания возможно поражение электрическим током, проходящим от сети к ПК. Электрические установки представляют для человека большую потенциальную опасность, которая усугубляется тем, что органы чувств человека не могут на расстоянии

обнаружить наличие электрического напряжения на оборудовании. В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с электрооборудованием в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного соприкосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Таким образом, работа с ПК и данным устройством может проводиться только в помещениях без повышенной опасности, и возможность поражения током может быть только при прикосновении непосредственно с элементами ПК.

Обязательны следующие меры предосторожности:

- перед началом работы нужно убедиться, что выключатели и розетка закреплены и не имеют оголенных токоведущих частей;
- при обнаружении неисправности оборудования и приборов необходимо не делая никаких самостоятельных исправлений сообщить ответственному за оборудование;
- запрещается загромождать рабочее место лишними предметами. К мероприятиям по предотвращению возможного поражения электрическим током:
  - соблюдение соответствующих расстояний до токоведущих частей или путем закрытия, ограждения токоведущих частей;
  - применение блокировки аппаратов и ограждающих устройств для предотвращения ошибочных операций и доступа к токоведущим частям;
  - применение предупреждающей сигнализации, надписей и плакатов;
  - применение устройств для снижения напряженности электрических и магнитных полей до допустимых значений;
  - использование средств защиты и приспособлений, в том числе для защиты от воздействия электрического и магнитного полей в электроустановках, в которых их напряженность превышает допустимые нормы. Повышение

электробезопасности в установках достигается применением систем защитного заземления, защитного зануления и защитного отключения.

Все требуемые средства и меры защиты в соответствии с ГОСТ 12.1.019-2017 [21] имеются на рабочем месте.

#### 4.2.2 Микроклимат

Микроклимат помещения определяется тремя основными параметрами:

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

Комфортность труда и высокая производительность работающего зависит от микроклимата в помещении. Микроклимат определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата, согласно СанПиН 2.2.4.548–96 [20] приведены в таблице 9:

Таблица 9 – Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	22 - 24	21 - 25	60 - 40	0,1
	Iб (140 - 174)	21 - 23	20 - 24	60 - 40	0,1
	IIa (175 - 232)	19 - 21	18 - 22	60 - 40	0,2
	IIб (233 - 290)	17 - 19	16 - 20	60 - 40	0,2
	III (более 290)	16 - 18	15 - 19	60 - 40	0,3

Продолжение таблицы 9

Теплый	Ia (до 139)	23 - 25	22 - 26	60 - 40	0,1
	Iб (140 - 174)	22 - 24	21 - 25	60 - 40	0,1
	IIa (175 - 232)	20 - 22	19 - 23	60 - 40	0,2
	IIб (233 - 290)	19 - 21	18 - 22	60 - 40	0,2
	III (более 290)	18 - 20	17 - 21	60 - 40	0,3

Оптимальные условия микроклимата обеспечивают комфортную работу трудящегося, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, поддерживают высокий уровень работоспособности. Работа персонала в данном случае относится к категории работ Ia, с интенсивностью энергозатрат до 139 ккал/ч. Работы производятся сидя и сопровождаются незначительным физическим напряжением. Нормальные значения параметров микроклимата в помещении, где находится рабочее место в течение всего года поддерживаются благодаря установленному кондиционеру и центральному отоплению.

#### 4.2.3 Шум

При выполнении работ устройством работник может подвергаться уровням шума от работающего персонального компьютера. Помимо этого, источниками шума на рабочем месте могут быть кондиционеры. Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности. Допустимые шумовые характеристики рабочих мест регламентируются СанПиН 2.2.4/2.1.8.562-96 [18]. Предельно допустимые уровни шума в дБ представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Предельно допустимые уровни шума, дБ

Категория напряженности трудового процесса	Категория тяжести трудового процесса				
	легкая физическая нагрузка	средняя физическая нагрузка	тяжелый труд 1 степени	тяжелый труд 2 степени	тяжелый труд 3 степени
Напряженность легкой степени	80	80	75	75	75
Напряженность средней степени	70	70	65	65	65
Напряженный труд 1 степени	60	60	-	-	-
Напряженный труд 2 степени	50	50	-	-	-

Работа персонала в данном случае относится к легкой степени напряженности и максимальный уровень шума составляет 80 дБ. Этим требованиям удовлетворяет место работы с современной малошумной компьютерной техникой.

#### 4.2.4 Психофизиологические факторы

При проектировании рабочего места следует учитывать, что фиксированная рабочая поза физиологически не оправдана, так как она вызывает нарушение кровообращения в нижних конечностях и органах тазовой области, приводящие к профессиональным заболеваниям. При вынужденном сидячем положении могут возникнуть сколиозы и кифозы.

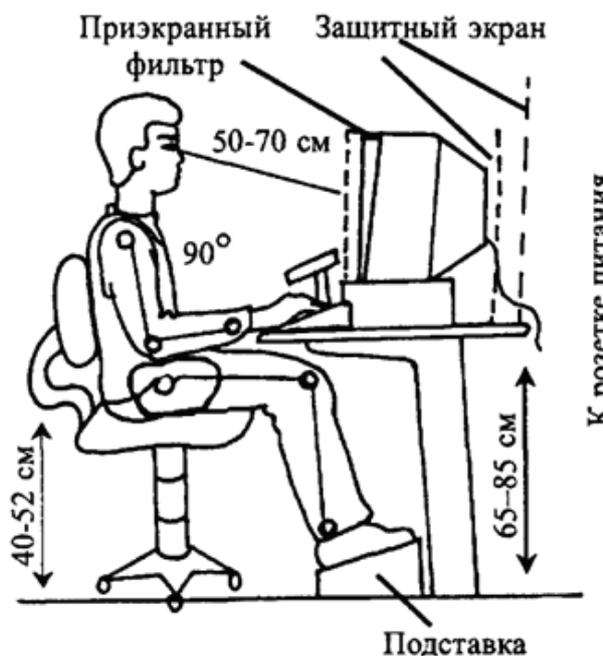


Рисунок 46 - Организация рабочего стола пользователя ПК

При проектировании рабочих мест необходимо стремиться к тому, чтобы рабочая поза была как можно ближе к естественной позе человека. Поэтому целесообразно предусматривать возможность работы как стоя, так и сидя. Особого внимания заслуживает проектирование кресел для лиц, постоянно выполняющих работу сидя за ПК. Конструкция кресла должна быть такой, чтобы как можно равномернее распределить давление тела на площадь опоры. Это возможно тогда, когда кресло в наибольшей степени соответствует анатомическому строению человека.

Следствием фиксированной рабочей позы является гиподинамия, отрицательно сказывающаяся на состоянии здоровья работающих - нарушение функций организма (опорно-двигательного аппарата, кровообращения, дыхания, пищеварения и др.) при ограниченной двигательной активности, снижении сил сопротивления мышц.

В процессе работы с ПК необходимо соблюдать правильный режим труда и отдыха. В противном случае у персонала отмечаются значительное напряжение зрительного аппарата с проявлением жалоб на неудовлетворенность работой, головные боли, раздражительность, нарушение

сна, усталость и болезненные ощущения в глазах, в пояснице, в области шеи и руках.

Рабочее место разработчика электромеханического изделия, при соблюдении правил работы за ПК, полностью соответствует требованиям для нормального психического и физиологического функционирования человека.

#### **4.2.5 Освещение**

Увеличение освещенности способствует улучшению работоспособности даже в тех случаях, когда процесс труда практически не зависит от зрительного восприятия.

При плохом освещении человек быстро устает, работает менее продуктивно, возрастает потенциальная опасность ошибочных действий и несчастных случаев. Наконец, плохое освещение может привести к профессиональным заболеваниям (например, близорукость, спазм аккомодации и др.).

Большое гигиеническое значение имеет естественное освещение. Образованное в результате взаимодействия прямого и отраженного света диффузное освещение помещений создает благоприятное распределение яркости, что оказывает положительное действие на зрение.

Гигиенические требования к производственному освещению, основанные на психофизических особенностях восприятия света и его влияния на организм человека, могут быть сведены к следующим:

- спектральный состав света, создаваемого искусственными источниками, должен приближаться к солнечному;
- уровень освещенности должен быть достаточным и соответствовать гигиеническим нормам, учитывающим условия зрительной работы;

- должна быть обеспечена равномерность и устойчивость уровня освещенности в помещении во избежание частой переадаптации и утомления зрения. В то же время, по имеющимся данным, при длительной работе в равномерно освещенном пространстве может нарушаться восприятие формы объектов, реализующееся, в конечном счете, в зрительных галлюцинациях.

Во всех помещениях зданий, в которых ведется разработка системы автоматического управления исполнительным механизмом системы частичного обезвешивания соблюдены все требования к освещению, приведенные в СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [19], имеются естественный и искусственный источники света.

#### **4.2.5.1 Расчет искусственного освещения**

Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений оказывает положительное воздействие на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность.

При выборе типа светильников следует учитывать светотехнические требования, экономические показатели, условия среды.

Размещение светильников в помещении определяется следующими параметрами (рисунок 2):

$H$  – высота помещения;

$h_c$  – расстояние светильников от перекрытия (свес);

$h_n = H - h_c$  – высота светильника над полом, высота подвеса;

$h_{pn}$  – высота рабочей поверхности над полом;

$h = h_n - h_{pn}$  – расчётная высота, высота светильника над рабочей поверхностью;

$L$  – расстояние между соседними светильниками или рядами (если по длине ( $A$ ) и ширине ( $B$ ) помещения расстояния различны, то они обозначаются  $L_A$  и  $L_B$ ),

$l$  – расстояние от крайних светильников или рядов до стены. 6  
Оптимальное расстояние  $l$  от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать равным  $L/3$ .

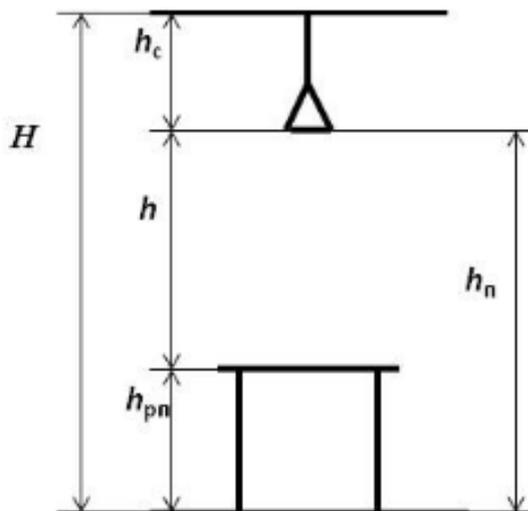


Рисунок 47 - Основные расчетные параметры

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda = L/h$ , уменьшение которой удорожает устройство и обслуживание освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к резкой неравномерности освещённости.

Размеры помещения (аудитория 103 учебного корпуса №10), в котором ведётся работа:

- длина  $A = 10$  м;
- ширина  $B = 6$  м;
- высота  $H = 3,5$  м.

Высота рабочей поверхности  $h_{pn} = 0,8$  м.

Согласно СНиП 23-05-95 [23] необходимо создать освещенность не ниже 300 лк, в соответствии с характеристикой зрительной работы.

Коэффициент отражения стен  $R_c = 50 \%$ , потолка  $R_n = 70 \%$ .

Необходимо провести расчёт системы общего люминесцентного освещения в соответствии с [22].

В качестве осветительного прибора был выбран светильник с люминесцентными лампами типа ОД,  $\lambda = 1,4$ .

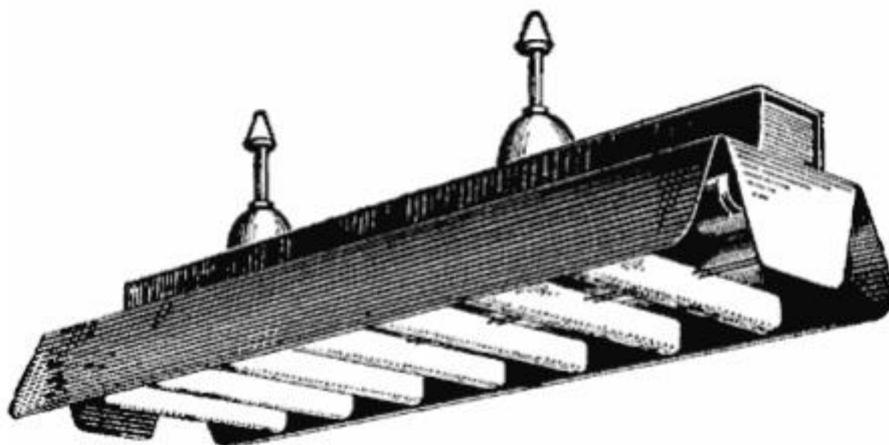


Рисунок 48 - Светильник подвесной с люминесцентными лампами

Расстояние светильников от перекрытия  $h_c = 0,5$  м

$$h = H - h_c - h_{pn} = 3,5 - 0,5 - 0,8 = 2,2 \text{ м} \quad (4.1)$$

$$L = 1,4 \cdot 2,2 = 3,08 \quad (4.2)$$

$$\frac{L}{2} = \frac{3,08}{3} \approx 1 \text{ м.} \quad (4.3)$$

Размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду можно установить 6 светильников типа ОД мощностью 30 Вт (с длиной 0,933 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 48 см. Изображаем в масштабе план помещения и размещения на нем светильников (рис. 49). Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении  $N = 24$ .

План помещения и размещения на нем светильников приведен на рисунке 49.

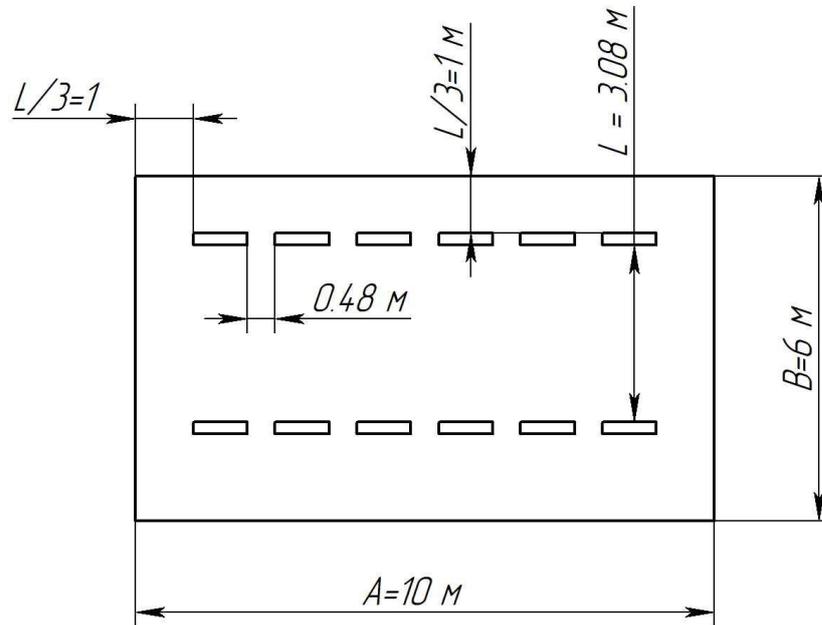


Рисунок 49 - План помещения и размещения светильников с люминесцентными  
Индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A+B)} = \frac{AB}{h \cdot (A+B)} = \frac{6 \cdot 10}{2,2 \cdot (10+6)} = 1,7 \quad (4.4)$$

Требуемый световой поток:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} \quad (4.5)$$

где  $E_n$  – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05-95 [23], лк;

$S$  – площадь освещаемого помещения, м<sup>2</sup>;

$K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т.е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли. Для помещений с малым выделением пыли равен 1,5.

$Z$  – коэффициент неравномерности освещения, отношение  $E_{cp} / E_{min}$ . Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1;

$N$  – число ламп в помещении;  $\eta$  - коэффициент использования светового потока.

Коэффициент использования светового потока  $\eta = 0,58$ .

$$\Phi = \frac{300 \cdot 60 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{24 \cdot 0,58} = 2133 \text{ лм.} \quad (4.6)$$

В таблице 1 [22] выберем ближайшую стандартную лампу ЛТБ 30 Вт с потоком 2020 лм. Проведем проверку правильности выбранного освещения:

$$\begin{aligned} -10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд.}} - \Phi_{\text{л.расч.}}}{\Phi_{\text{л.станд.}}} \cdot 100\% \leq 20\% \\ -10\% \leq -5,6\% \leq 20\% \end{aligned} \quad (4.7)$$

Электрическая мощность осветительной установки:

$$P = 24 \cdot 30 = 720 \text{ Вт.} \quad (4.8)$$

Таким образом, можно сказать, что выбранное освещение соответствует требованиям нормативной документации.

### 4.3 Экологическая безопасность

Сегодня проблема загрязнения окружающей среды приобретает глобальный характер. И атмосфера, и гидросфера загрязнены токсичными веществами, созданными человеком. Человечество должно разрабатывать и совершенствовать инженерно-технические средства защиты окружающей среды, развивать основы создания замкнутых, безотходных и малоотходных производств. Современная техника и технологии позволяют сократить выбросы вредных и токсичных веществ в окружающую среду, однако для обеспечения экологии на долгосрочный период времени требуется постоянно совершенствовать технологии добычи, потребления, переработки сырья, использования и утилизации оборудования.

### **4.3.1 Анализ воздействий объекта на литосферу**

В офисной среде необходимо использовать системы электронного документооборота. Это поможет избежать излишнего потребления бумаги, чернил и, соответственно, их утилизации.

Немаловажным является продуманная утилизация неисправного и устаревшего оборудования или деталей установки для исключения вреда окружающей среде. Утилизация электрооборудования производится в специализированных компаниях. Так же необходимо производить периодический осмотр электромеханического оборудования. Помимо заботы об окружающей среде, тем самым, можно добиться более продолжительной и безопасной работы оборудования.

## **4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований**

Одной из наиболее вероятных чрезвычайных ситуаций, которые могут возникнуть при эксплуатации исполнительного механизма системы обезвешивания является разрушение обезвешиваемой конструкции и конструкции самой системы обезвешивания в следствии неправильного движения.

Для избежания подобного рода ситуаций необходима реализация ограничителей, которые не позволят исполнительным механизмам перемещать обезвешиваемую конструкцию за зону ограничения.

Другой характерной чрезвычайной ситуацией при эксплуатации исполнительных механизмов систем обезвешивания является возгорание обмоток электродвигателя вследствие его перегрузки.

Для предотвращения возгорания обмоток необходимо применение токоограничивающей защиты.

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

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией при эксплуатации системы является пожар на рабочем месте. При неправильном функционировании системы на обмотках двигателя могут возникнуть высокие токи, что приводит к их воспламенению. В качестве противопожарных мероприятий должны быть применены следующие меры:

- в помещении должны находиться средства тушения пожара, средства связи; электрическая проводка электрооборудования и осветительных приборов должна быть исправна;

- все сотрудники должны знать место нахождения средств пожаротушения и уметь ими воспользоваться, средств связи и номера экстренных служб.

В связи с возможностью возникновения пожара разработан следующий план действий:

- в случае возникновения пожара сообщить о нем руководителю, постараться устранить очаг возгорания имеющимися силами при помощи первичных средств пожаротушения (огнетушитель порошковый, углекислотный О-1П0 (з)-АВСЕ);

- привести в действие ручной пожарной извещатель, если очаг возгорания потушить не удастся;

- сообщить о возгорании в службу пожарной охраны по телефону 01 или 010, сообщить адрес, место и причину возникновения пожара;

- принять меры по эвакуации людей и материальных ценностей;

- встретить пожарную охрану, при необходимости сообщить всю необходимую информацию и оказать помощь при выборе наилучшего подхода к очагу возгорания.

В здании места работы над системой управления исполнительного механизма системы частичного обезвешивания соблюдены требования пожаробезопасности, имеются средства пожаротушения.

### **Выводы по разделу «Социальная ответственность»**

В ходе выполнения работы над разделом «Социальная ответственность» были выявлены опасные и вредные факторы, воздействию которых может подвергнуться человек, работающий над автоматизацией исполнительного механизма. Среди этих факторов есть шум, уровень освещённости, показатели микроклимата, психофизиологические факторы и электрический ток, но их показатели не превышают допустимых значений. Был проведен анализ нормативной документации.

Основываясь на результатах проделанной работы, был предложен ряд мер, для исключения или уменьшения влияния опасных и вредных факторов на человека и окружающую среду. Таким образом, рабочее место разработчика изделия соответствует выдвигаемым требованиям по безопасности.

## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Цель раздела – комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы.

В выпускной квалификационной работе осуществляется комплекс мер для автоматизации исполнительного механизма, который входит в состав системы частичного обезвешивания.

Потенциальными потребителями являются лаборатории испытаний космических аппаратов и учебно-исследовательские лаборатории высших учебных заведений.

### **5.1 Организация и планирование ОКР (НИР) работ**

Трудоемкость выполнения проекта оценивается в человеко-часах и зависит от множества факторов, которые сложно учесть при разработке. Для реализации проекта необходимо 2 исполнителя – научный руководитель (НР), инженер (И). Этапы работы проекта представлены в таблице 11.

Таблица 11 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

<b>Содержание работ</b>	<b>Исполнители</b>	<b>Загрузка (занятость) исполнителей</b>
Составление и утверждение технического задания	НР, И	НР – 50% И – 50%
Подбор и изучение материалов по теме	И	И – 100%
Проведение патентных исследований	И	И – 100%
Описание объекта автоматизации	И	И – 100%
Календарное планирование работ по теме	НР	НР – 100%
Проведение теоретических расчетов и обоснований	И	И – 100%
Построение моделей и проведение экспериментов	И	И – 100%

Продолжение таблицы 11

Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	И	И – 100%
Корректировка модели, расчетов	НР, И	НР – 50% И – 50%
Утверждение модели и теоретических обоснований	НР	И – 100%
Оценка эффективности полученных результатов	НР	НР – 100%
Разработка блок-схемы, принципиальной схемы	И	И – 100%
Технико-экономические расчеты	И	И – 100%
Вопросы безопасности и экологии	И	И – 100%
Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	И	И – 100%

### 5.1.2 Определение продолжительности этапов работ

Расчет ожидаемых значений продолжительности этапов работ осуществляется экспертным методом по формуле:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (5.1)$$

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

$t_{max}$  – максимальная продолжительность работы, дн.;

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни.

Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ( $T_{РД}$ ) ведется по формуле:

$$T_{РД} = t_{ож} \cdot K_{ВН} \cdot K_{Д} \quad (5.2)$$

$K_{ВН}$  – коэффициент выполнения работ, учитывающий возможное влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно:

- $K_{ВН} = 1$  – влияние отсутствует;

- $K_{\text{вн}} < 1$  – ускоряющее влияние;
- $K_{\text{вн}} > 1$  – замедляющее влияние.

$K_{\text{д}}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек, вызванных внутренними причинами.  $K_{\text{д}} = 0.8 \div 1.2$ ,  $K_{\text{вн}} = 1.0 \div 1.2$ , в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель.

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ( $T_{\text{кд}}$ ) ведется по формуле:

$$T_{\text{кд}} = T_{\text{рд}} \cdot T_{\text{к}} \quad (5.3)$$

где  $T_{\text{к}}$  – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле

$$T_{\text{к}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вд}} - T_{\text{пд}}} \quad (5.4)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – календарные дни ( $T_{\text{кал}} = 365$ );

$T_{\text{вд}}$  – выходные дни ( $T_{\text{вд}} = 52$ );

$T_{\text{пд}}$  – праздничные дни ( $T_{\text{пд}} = 10$ ).

$$T_{\text{к}} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205 \quad (5.5)$$

Это значение  $T_{\text{к}}$  справедливо для 6-дневной рабочей недели, характерной для большинства руководителей ВКР-сотрудников ТПУ, оно будет использовано при определении календарной продолжительности периода выполнения ВКР и построении соответствующего графика.

В таблице 12 приведены трудозатраты на выполнение ВКР, в таблице 13 показан линейный график работ.

Таблица 12 - Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни						Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
		$t_{min}$		$t_{max}$		$t_{ож}$		$T_{рд}$		$T_{кд}$	
		НР	И	НР	И	НР	И	НР	И	НР	И
		НР	И	НР	И	НР	И	НР	И	НР	И
Составление и утверждение технического задания	НР	3	3	7	7	4,6	4,6	5,52	5,52	6,6516	6,6516
Подбор и изучение материалов по теме	И		7		9		7,8		9,36		11,2788
Проведение патентных исследований	И		3		5		3,8		4,56		5,4948
Описание объекта разработки	И		3		5		3,8		4,56		5,4948
Календарное планирование работ по теме	НР	3		5		3,8		4,56		5,4948	
Проведение теоретических расчетов и обоснований	И		7		10		8,2		9,84		11,8572

Продолжение таблицы 12

Построение моделей и проведение экспериментов	И		7		9		7,8		9,36		11,2788
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	И		4		6		4,8		5,76		6,9408
Корректировка модели, расчетов	НР, И	2	2	4	4	2,8	2,8	3,36	3,36	4,0488	4,0488
Утверждение модели и теоретических обоснований	НР	2		3		2,4		2,88		3,4704	
Оценка эффективности полученных результатов	НР	2		3		2,4		2,88		3,4704	
Разработка блок-схемы, принципиальной схемы	И		5		9		6,6		7,92		9,5436
Технико-экономические расчеты	И		3		5		3,8		4,56		5,4948
Вопросы безопасности и экологии	И		3		5		3,8		4,56		5,4948

Продолжение таблицы 12

Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	И		3		5		3,8		4,56		5,4948
<b>Итого</b>		<b>12</b>	<b>50</b>	<b>22</b>	<b>79</b>	<b>16</b>	<b>61,6</b>	<b>19,2</b>	<b>73,92</b>	<b>23,136</b>	<b>89,0736</b>

Таблица 13 - Линейный график работ

Этап	НР	И	Февраль			Март			Апрель			Май				
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110			
1	6,6516	6,6516	■													
2		11,2788		■												
3		5,4948			■											
4		5,4948				■										
5	5,4948						■									
6		11,8572					■									
7		11,2788						■								
8		6,9408							■							
9	4,0488	4,0488								■						
10	3,4704										■					
11	3,4704											■				
12		9,5436											■			
13		5,4948												■		
14		5,4948													■	
15		5,4948														■

НР – ■ И – ■

## 5.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

### 5.2.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования.

Таблица 14 - Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена, руб
Набор канцелярских товаров	Шт.	1	500
Печатная бумага	Упаковка	1	200
Картридж для принтера	Шт.	1	1800
Итого			2500

### 5.2.2 Расчет заработной платы

Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{дн-т}$ ) рассчитывается по формулам:

- для 6-дневной рабочей недели  $ЗП_{дн-т-6} = MO/25,083$  (5.6)

- для 5-дневной рабочей недели  $ЗП_{дн-т-5} = MO/20,75$  (5.7)

Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов:  $K_{пр} = 1,1$ ;  $K_{доп.зп} = 1,188$ ;  $K_p = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент  $K_{и(6)} = 1,1 \cdot 1,188 \cdot 1,3 = 1,699$ . Вышеуказанное значение  $K_{доп.зп}$  применяется при 6-дневной рабочей неделе, при 5-дневной оно равно 1,113, соответственно в этом случае  $K_{и(5)} = 1,62$ .

Таблица 15 - Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб. день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	<b>33 664</b>	1342,09	19,2	1,699	<b>43780,05</b>
И	<b>9489</b>	457,30	73,92	1,62	<b>54761,85</b>
<b>Итого:</b>					<b>98541,90</b>

Примечание – для «И» здесь принята 5-дневная неделя

### 5.2.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, т.е.  $C_{\text{соц.}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,3$ .  
Итак, в нашем случае  $C_{\text{соц.}} = 98541,90 \cdot 0,3 = 29562,57$  руб.

### 5.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot \text{ЦЭ} \quad (5.8)$$

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

$\text{ЦЭ}$  – тариф на 1 кВт·час;

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

Для ТПУ  $\text{ЦЭ} = 6,59$  руб./кВт·час (с НДС).

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (5.9)$$

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

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{ОБ}} = P_{\text{НОМ.}} \cdot K_{\text{С}} \quad (5.10)$$

где  $P_{\text{НОМ.}}$  – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_{\text{С}} \leq 1$  – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности  $K_{\text{С}} = 1$ .

Таблица 16- Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$ , час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$ , кВт	Затраты $\text{Э}_{\text{ОБ}}$ , руб.
Персональный компьютер	591,36·0,6	0,3	701,47
Струйный принтер	1,5	0,1	0,98
<b>Итого:</b>			<b>702,45</b>

### 5.2.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта.

Используется формула:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{N_{\text{А}} \cdot \text{Ц}_{\text{ОБ}} \cdot t_{\text{рф}} \cdot n}{F_{\text{Д}}}, \quad (5.11)$$

где  $N_{\text{А}}$  – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$\text{Ц}_{\text{ОБ}}$  – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР;

$F_{\text{Д}}$  – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году.  $t_{\text{рф}}$  – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

$n$  – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Компьютер относится ко второй группе по срокам амортизации (имущество со сроком полезного использования свыше 2 лет до 3 лет включительно). Стоимость ПК 70000 руб., время использования 561,36 часа.

Действительный годовой фонд времени работы (298 рабочих дней при шестидневной рабочей неделе) можно принять  $F_{д} = 298 * 8 = 2384$  часа.

$$C_{AM}(ПК) = \frac{0,4 \cdot 70000 \cdot 591,36 \cdot 1}{2384} = 6945,5 \text{ руб.} \quad (5.12)$$

Стоимость принтера 12000 руб., его  $F_{д} = 500$  час.;  $N_A = 0,5$ ;  $t_{рф} = 1$  час.

$$C_{AM}(Пр) = \frac{0,5 \cdot 10000 \cdot 1,5 \cdot 1}{500} = 15 \text{ руб.} \quad (5.13)$$

### **5.2.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных)**

Сюда относятся:

- командировочные расходы, в т.ч. расходы по оплате суточных, транспортные расходы, компенсация стоимости жилья;
- арендная плата за пользование имуществом;
- оплата услуг связи;
- услуги сторонних организаций.

Ничего из вышеперечисленного при работе над ВКР не использовалось.

### **5.2.7 Прочие расходы**

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение ВКР, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{нп}}) \cdot 0,1 \quad (5.14)$$

$$C_{\text{проч.}} = (2500 + 98541,90 + 29562,57 + 702,45 + 6960,50) \cdot 0,1 = 13826,75 \text{ руб.} \quad (5.15)$$

### **5.2.8 Расчет общей себестоимости разработки**

Проведенный расчет по всем статьям сметы затрат на разработку представлен в таблице 17.

Таблица 17 - Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	2500
Заработная плата	$C_{\text{зп}}$	98541,90
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	29562,57
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	702,45
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	6960,50
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	13826,75
<b>Итого:</b>		<b>152094,17</b>

### 5.2.9 Расчет прибыли

Системы обезвешивания являются специфическими изделиями, так как применяются для имитации невесомости при наземных испытаниях космических аппаратов. Предполагаемыми потребителями разработки являются лаборатории испытаний космических аппаратов и учебно-исследовательские лаборатории высших учебных заведений.

Примем прибыль в размере 20% от затрат на разработку – 30418,83 руб.

### 5.2.10 Цена разработки НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это  $(152094,17 + 30418,83) \cdot 0,2 = 36502,6$  руб.

### 5.2.11 Цена разработки ОКР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае

$$C_{\text{ОКР (НИР)(КР)}} = 152094,17 + 30418,83 + 36502,6 = 219015,6 \text{ руб.} \quad (5.16)$$

### 5.3 Оценка экономической эффективности проекта

Необходимо определить срок окупаемости инвестиций (PP – payback period). Данный показатель определяет продолжительность того периода, через который инвестиции будут возвращены полученной благодаря им прибылью. Чем меньше, PP тем эффективнее проект. Использование показателя предполагает установление для него приемлемого значения как меры эффективности инвестиций. Используется формула

$$PP = \frac{I_0}{PP_{ч}}, \quad (5.17)$$

Где  $I_0$  – величина инвестиций;

$PP_{ч}$  – годовая чистая прибыль.

Данная формула применяется в тех случаях, когда величины  $PP_{ч}$  примерно равны по годам эксплуатационной стадии проекта. Для данного проекта эти величины различны по годам. Следует применять:

$$PP = n_{ц_j} + \frac{\Delta PP_{ч_j}}{PP_{ч_{j+1}}}, \quad (5.18)$$

где  $n_{ц_j}$  – целое число лет, при котором накопленная сумма прибыли наиболее близка к величине инвестиций  $I_0$ , но не превосходит ее;

$\Delta PP_{ч_j}$  – непокрытая часть инвестиций по истечении  $n_{ц_j}$  лет реализации проекта;

$PP_{ч_{j+1}}$  – прибыль за период, следующий за  $n_{ц_j}$ -м.

Расчета приведен в таблице 18.

Таблица 18 - Накопленные денежные поступления по проекту

Год	Инвестиции, тыс. руб.	Прибыль, тыс. руб.	Накопленный денежный поток, тыс. руб.
0	-152,09417	0	-152,09417
1		110	-42,09417
2		200	157,90583

Продолжение таблицы 18

3		240	397,90583
4		120	517,90583

Здесь второй год эксплуатационного периода дает минимум непокрытого остатка (42,09417 тыс. руб.) инвестированной суммы 152,09417 тыс. руб., следовательно,  $n_{ц_j}=1$ . Тогда  $\frac{\Delta ПР_{ч_j}}{ПР_{ч_{j+1}}} = 42,09417/157,90583 = 0,27$ ; следовательно, срок окупаемости инвестиций – 1,27 года.

Недостатком рассмотренного показателя является его относительный характер – он не отражает масштаб проекта и соответственно объем полученного результата. Поэтому наряду с РР целесообразно рассчитать величину накопленного чистого эффекта по формуле

$$NPV = \sum_{j=1}^n ПР_{ч_j} - I_0 \quad (5.19)$$

где  $n$  – продолжительность в годах периода оценки эффекта, например, жизненного цикла проекта или прогнозируемого периода. Очевидно, что в итоге реализации проекта эта величина должна быть положительной, иначе проект убыточен.

Если период реализации проекта больше одного года и величины  $ПР_{ч_j}$  существенно различаются по годам реализационного периода, то необходимо учесть изменение ценности денег во времени. В этом случае при расчете вместо величин  $\Delta ПР_{ч_j}$  и  $ПР_{ч_{j+1}}$  следует использовать их дисконтированные аналоги, получаемые путем деления  $\Delta ПР_{ч_j}$  и  $ПР_{ч_{j+1}}$  на  $(1 + i)^j$ , где  $i$  – ставка дисконтирования (целевой уровень годовой доходности инвестируемых средств). В таблице 19 показано, как определяется значение РР для тех же исходных данных, что и в таблице 18, но с учетом убывания реальной стоимости результатов в будущие периоды (годы) относительно периода инвестирования – чем дальше в будущее, тем она меньше на единицу номинального эффекта, принято, что  $i = 0,1$ .

Таблица 19 -Расчет дисконтированного срока окупаемости

Год	Инвестиции, тыс. руб.	Номинальная прибыль тыс. руб.	Коэффициент дисконтирования $1/(1+0,1)^j$	Дисконтированная прибыль тыс. руб.	Накопленный денежный поток, тыс. руб.
0	-152,09417	0	1	0	-152,09417
1		110	0,9091	100	-52,09417
2		200	0,8264	165,28	113,18583
3		240	0,7513	180,31	293,49583
4		120	0,6830	81,96	375,45583

Здесь первый год эксплуатационного периода дает минимум непокрытого остатка (52,09417 тыс. руб.) инвестированной суммы 152,09417 тыс. руб., следовательно,  $n_{ц_j}=1$ . Тогда  $\frac{\Delta ПР_{ч_j}}{ПР_{ч_{j+1}}} = 52,09417/113,18583 = 0,46$ ; следовательно, дисконтированный срок окупаемости – 1,46 года.

Таким образом, можно сказать, что инвестиции будут возвращены и выполняемый проект экономически эффективен.

## **Заключение**

В ходе работы над диссертацией была достигнута основная цель, а именно – автоматизация исполнительного механизма системы частичного обезвешивания.

В первом разделе диссертации был проведен аналитический обзор источников литературы, посвященных системам и методам обезвешивания, и имеющихся технических решений. Анализ

Во второй разделе были описаны подвергаемая обезвешиванию трансформируемая конструкция, система обезвешивания. Был обоснован выбор количества лебедок, подобрано оборудование.

В третьем разделе проводилось математическое описание и моделирование исполнительного механизма. Были построены схемы систем автоматического управления исполнительным механизмом, представлены результаты моделирования.

Четвертый раздел посвящен социальной ответственности. Были проанализированы вредные и опасные факторы труда при проведении исследования.

В пятом разделе комплексно описаны и проанализированы финансово-экономические аспекты выполненной работы.

## Список литературы

1. Верховгляд, А.Г. Автоматическая система обезвешивания крупногабаритных трансформируемых конструкция при раскрытии [Текст] / А.Г. Верховгляд. Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – С. 134-137.
2. Активная система обезвешивания крупногабаритных элементов космических аппаратов "Кемчуг". [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [https://www.tdisie.nsc.ru/development\\_rus.html](https://www.tdisie.nsc.ru/development_rus.html) (дата обращения: 05.02.2020).
3. Активная система обезвешивания крупногабаритных трансформируемых систем при проведении наземных модальных испытаний "АСО МИ". [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [https://www.tdisie.nsc.ru/asomi\\_rus.html](https://www.tdisie.nsc.ru/asomi_rus.html) (дата обращения: 06.02.2020).
4. Zhihua Zhaoa, Kangjia Fu, Meng Li, Jinyou Li, Yong Xiao (2020). Gravity compensation system of mesh antennas for in-orbit prediction of deployment dynamics. Acta Astronautica, Volume 167, February 2020, Pages 1-13.
5. Патент РФ № RU2711774C2, 2020.
6. Патент РФ № RU2483991C16, 2013.
7. Katsuyoshi Tsujita, Hiroki Shigematsu, Naoko Kishimoto (2014). Development of a gravity compensation system for the prototype test of spacecraft by using mobile type multi robots. The 12th International Conference on Motion and Vibration Control, At Sapporo, Japan.
8. Патент № RU2410299C1, 2013.
9. Патент № RU2565807C2, 2015.
10. Active Response Gravity Offload System. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.nasa.gov/centers/johnson/engineering/integrated\\_environments/active\\_response\\_gravity/](https://www.nasa.gov/centers/johnson/engineering/integrated_environments/active_response_gravity/) (дата обращения: 10.02.2020).

11. Патент КНР № CN103192999А, 2013.
12. RU168492 Стенд испытания солнечной батареи
13. РД 11-07-2007 Инструкция по проектированию, изготовлению и безопасной эксплуатации стропов грузовых
14. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020)
15. "ТОИ Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере" (утв. Приказом Минсвязи РФ от 02.07.2001 N 162)
16. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования
17. ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам
18. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»;
19. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий»;
20. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»;
21. ГОСТ Р 12.1.019-2017 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».
22. Расчёт искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех направлений и специальностей ТПУ. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 20 с.
23. СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение».

## Приложение А

(обязательное)

Раздел «1 Аналитический обзор»

### Partial gravity compensation system actuator automation

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ81	Королев Роман Евгеньевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Леонов Сергей Владимирович	К.Т.Н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ ШБИП	Горбатова Татьяна Николаевна	-		

## 1 Analytical review

The main aim of ground gravity compensation systems is creation zero gravity conditions.

The general principle of all systems of gravity compensation is the vertical force application that is equal to the weight of the bodies. The center of mass should be the point of application of these forces. This condition must be fulfilled to avoid the occurrence of additional torques to the weightless elements and structures.

Today there exist many proprietary gravity compensation systems. These systems are divided into passive and active according to the method of creating weightless forces.

### 1.1 Passive gravity compensation system

In passive systems the weightless forces are created mechanically (by a stretched spring, a counterweight, etc.). The movement of system elements is carried out by the movement of the body, which is subjected to gravity compensation.

One of the possible diagrams of this system is shown in figure 1.

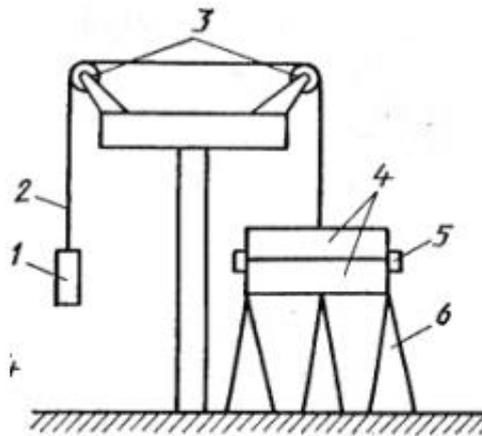


Figure 50 – Passive gravity compensation diagram

(1 - counterweight; 2 - cable; 3 - block; 4 - platform; 5 - lock; 6 - stand)

### 1.2 Active gravity compensation system

Active systems are complex mechanical systems. These systems use their own drives to compensate gravity. Drives operate the feedback sensor signals.

Mobile carriage gravity compensation systems are the most common. An example of such a system is shown in figure 2.

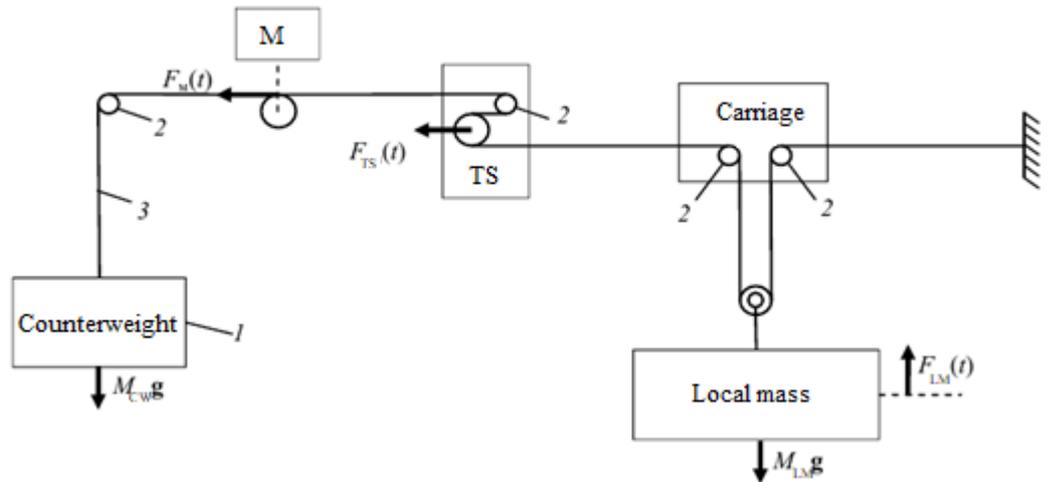


Figure 51 - Gravity compensation system with carriages

In figure 2:

TS is a cable tension sensor,

M is a drive application of force to the cable (motor + gear),

$F_M(t)$  is the tension of motor pulley force,

$F_{LM}(t)$  is the unknown internal force of the interaction of the local mass of the object node with the other components of the object,

$F_{TS}(t)$  is cable tension force,

$M_{CW}$  is the mass of the counterweight,

$M_{LW}$  is the mass of the gravity compensation object.

This dissertation presents automation of the actuator, which is included in the partial weightless system. The literature and patent review represent active systems and methods.

### 1.3 Review of existing gravity compensation systems

The active gravity compensation system of large-size transformable structures [1] is designed to test the transformable reflectors deployment system of spacecraft antennas with a diameter up to 48 m. The system allows to achieve low residual weight of less than 0.2% at movement speed of weightless items up to 4 m/min.

This research is used in the development of Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering - active systems for gravity compensation of large-size transformable systems “Kemchug” [2] and “ASO MI” [3]. The appearance of the systems is shown in Figures 3-4.



Figure 52 - Gravity compensation system «Kemchug»

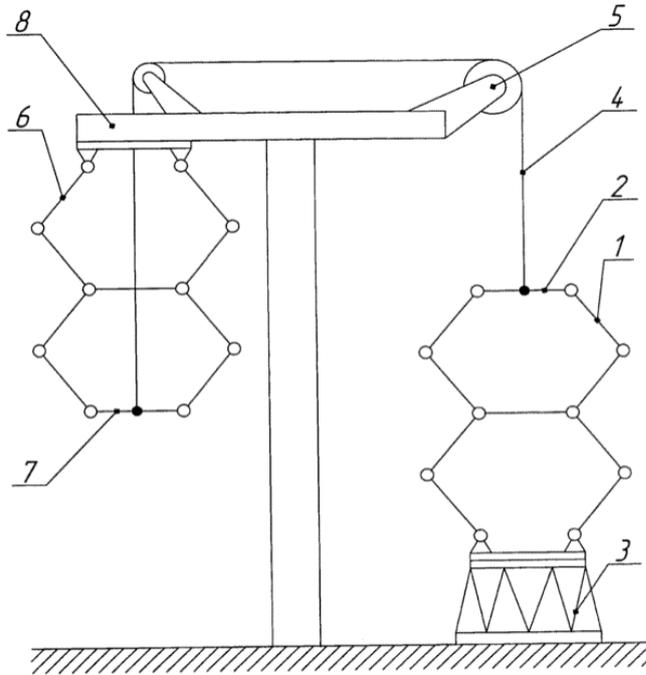


Figure 53 – Gravity compensation «ASO MI» system rack

Research of the gravity compensation system [4] describes device for testing the web reflector deployment of the spacecraft antenna with a diameter of 12 m.

Gravity compensation method of transformable spacecraft systems is intended to zero-gravity simulation for ground tests [5]. A transformable system with end frames is mounted on a stand and connected with a cable to a counterweight through a system of blocks. A feature of the invention is a counterweight made in the form of a

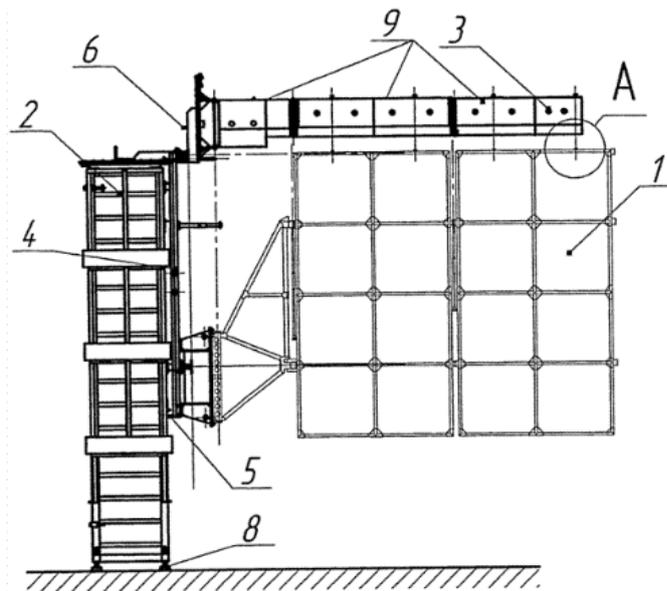
mechanism that is located symmetrically in relation to the horizontal plane to a weightless transformable system and is made according to the kinematic diagram of the transformable system. The masses of the counterweight links are equal to the corresponding masses of the transformable system links.



1, 6 – rods, 2, 7 – end frame, 3 – technological stand, 4 – cable, 5 – block system, 8 – support post

Figure 54 - Gravity compensation diagram for transformable spacecraft systems

In the solar battery deployment stand [6], the gravity compensation device is individual links that are interconnected by hinges. The links are located above the corresponding wings of the solar battery. The axis of rotation of each link of the gravity compensation device coincides with the axis of rotation of the corresponding sash of the solar battery. The fastening of the links of the solar battery to the links of the weighing device is made through damping devices. The diagram of the stand is shown in figure 6.



1 – solar battery, 2 – support, 3 – gravity compensation device, 4 – transition frame, 5 – spacecraft, 6 – bracket, 7 – guides, 8 – adjustable racks, 9 – links of the gravity compensation device

Figure 55 - Solar panels deployment stand

The Active Response Gravity Offload System (ARGOS) [10] is designed to simulate a low gravity environment for people and equipment.

The design of the system is a metal frame measuring 12,5x7,3x7,6 m. The appearance of system is shown in figure 7. This design allows movement in three directions at a speed of up to 3 m / s and provides a load capacity of up to 340 kg. Movement in all directions is provided by electric drives. The gimbal is connected to a body with a steel cable, the load is measured using the built-in strain gauge sensor. The control system gives the drive a signal to rise or fall when the object is moving in order to maintain a constant weightless force.



Figure 56 – ARGOS

Gravity compensation system that uses mobile robots to support transformable structures [7] is a matter to concern for this dissertation. The diagram of system is shown in figure 8.

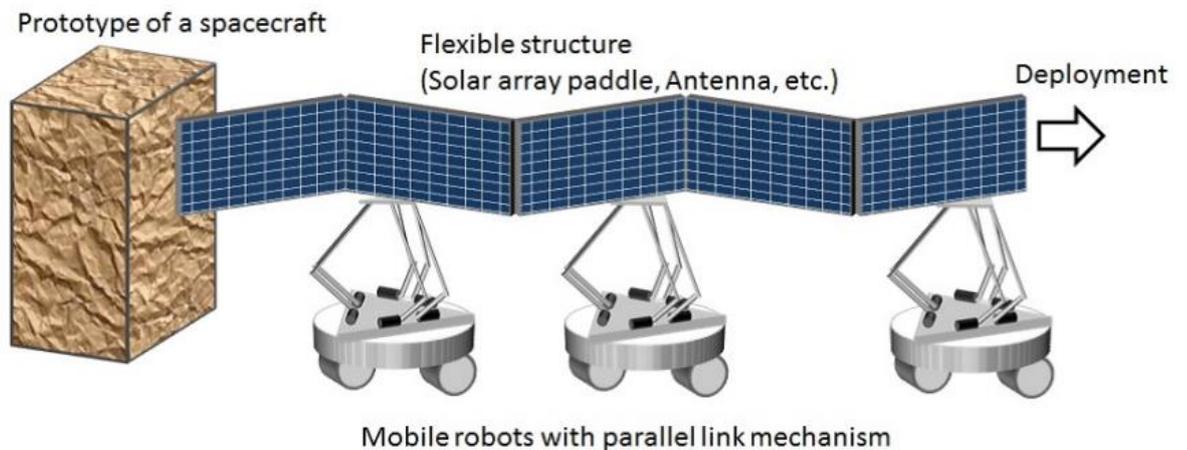
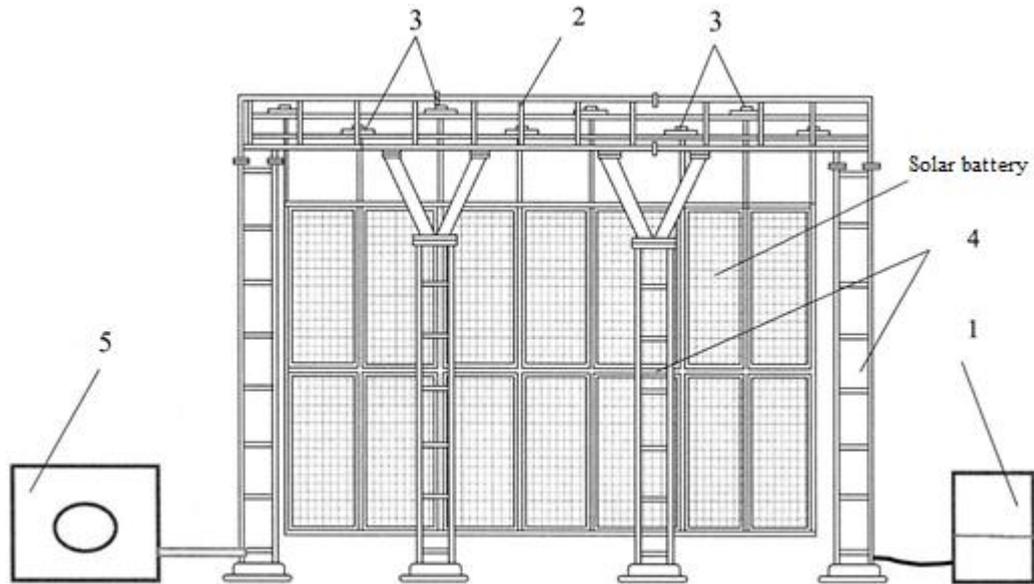


Figure 57 – System diagram

A simulating reduced gravity method of a moving object by applying vertical weightless force to the test object is intended to simulate the space conditions of the test objects. A moving platform with a servo drive system is placed under the test object. The platform is cinematically decoupled from the object. The servo drive system creates a vertical weightless force with an overpressure air cushion or the interaction of the same name magnets poles that are located on the test object and platform.

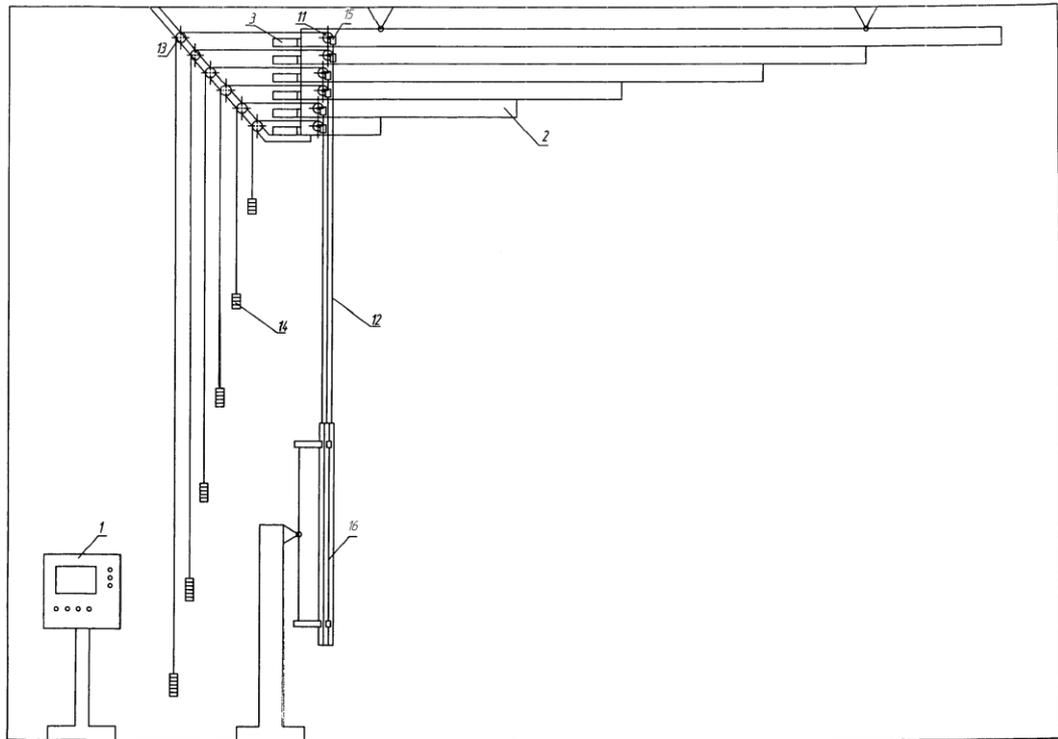
Patent [12] describes a test bench for a solar battery. This device comprises a control unit, a metal frame with trolleys moving in a horizontal plane. The frame is mounted on fixed supports. A distinctive feature of the stand are aerostatic bearings and a compressor. Aerostatic bearings are placed on trolleys and connected by hoses to the compressor.



1 – control panel, 2 – frame, 3 – aerostatic bearings, 4 – racks, 5 – compressor

Figure 58 – Solar Battery Test Bench [12]

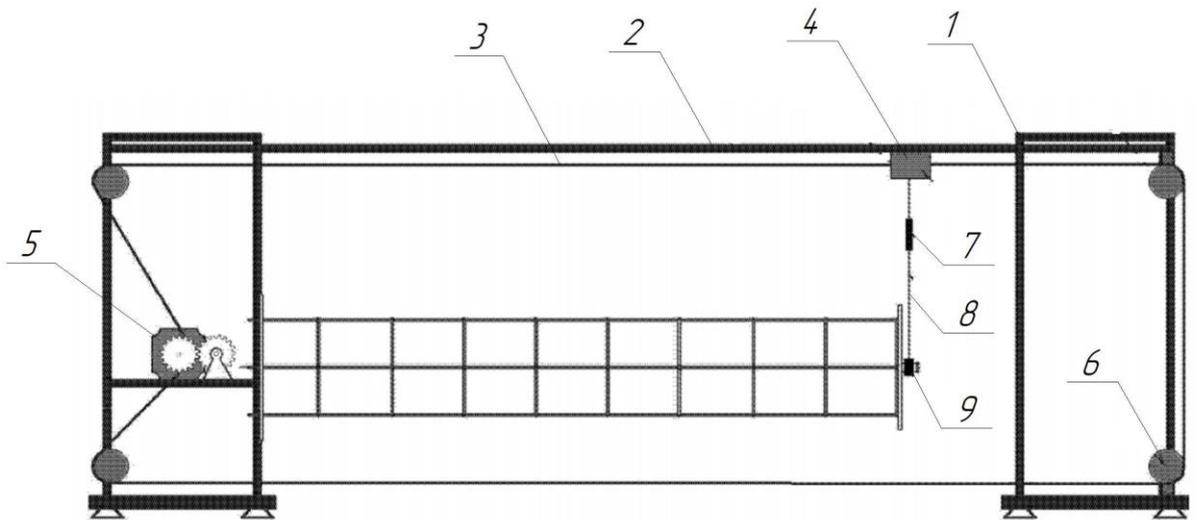
Zero gravity simulation system [9] consists of a control system and the required number of modules that are installed on top of each other. Each module contains two servos that jointly move the carriage and the trolley through a belt drive. The carriage moves horizontally; the trolley moves along its own vertical guide. A pulley is installed on the trolley and provides a flexible connection of a compensating load suspended through blocks with a weightless element. Also, an inclinometer is installed on the trolley and determines the vertical position of the suspensions. The control system provides movement of the carriage and trolley based on the signals of the inclinometer. This allows to maintain the verticality of the suspensions in relation to the weightless object.



1 – control unit, 2 – modules, 3 – servos, 4 – working pulleys, 5 – toothed belt, 6 – passive pulleys, 7 – carriage, 8, 10 – guides, 9 – trolley, 11 – pulley, 12 – flexible connection, 13 – block, 14 – compensating load, 15 – inclinometer sensor, 16 – gravity compensation object

Figure 59 – Zero gravity simulation system

The stand patented in the PRC is designed for ground mining of solar batteries [11]. A distinctive feature of the stand is a gear-belt transmission for moving the suspension. A diagram of such a stand is shown in figure 11.



1 - frame, 2 - guide, 3 - cable, 4 - carriage, 5 - engine, 6 - pulley, 7 - lift,  
8 - suspension, 9 - force sensor

Figure 60 – Gravity compensation stand

The problems of active gravity compensation systems were revealed after a literature review and patent searches. Most of the known gravity compensation systems have limited operational capabilities. These include the movement of weightless elements in the single plane (for example, the opening of solar panels on a stand with suspension devices on carriages). This does not allow for a maximum approximation to the standard of zero gravity conditions during ground tests.

Also a disadvantage of these systems and methods is the attachment point of the weightless device, which corresponds to the theoretical position of the mass center of the gravity compensation object. This results in a torque around the attachment point of the weightless device.

## References

1. Verkhoglyad A.G. Automatic gravity compensation compensation system for large-size transformable constructions during deployment// Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. 2016. -P. 134-137.
2. Active gravity compensation system of large-size spacecraft elements "Kemchug". Available at: [https://www.tdisie.nsc.ru/development\\_rus.html](https://www.tdisie.nsc.ru/development_rus.html) (accessed 5 February 2020).
3. Active gravity compensation system of large-sized transformable systems during ground modal tests "ASO MI". Available at: [https://www.tdisie.nsc.ru/asomi\\_rus.html](https://www.tdisie.nsc.ru/asomi_rus.html) (accessed 6 February 2020).
4. Zhihua Zhaoa, Kangjia Fu, Meng Li, Jinyou Li, Yong Xiao. Gravity compensation system of mesh antennas for in-orbit prediction of deployment dynamics//Acta Astronautica, Volume 167. 2020. –P. 1-13.
5. Method of gravity compensation of transformable spacecraft systems gravity compensation. Patent RF, № RU2711774C2, 2020.
6. Stand of the solar panels deployment. Patent RF, № RU2483991C1, 2013
7. Katsuyoshi Tsujita, Hiroki Shigematsu, Naoko Kishimoto. Development of a gravity compensation system for the prototype test of spacecraft by using mobile type multi robots. The 12th International Conference on Motion and Vibration Control, At Sapporo, Japan. 2014.
8. Simulating reduced gravity method. Patent RF, № RU2410299C1, 2013.
9. Zero-gravity simulation system. Patent RF, № RU2565807C2, 2015.
10. Active Response Gravity Offload System. Available at: [https://www.nasa.gov/centers/johnson/engineering/integrated\\_environments/active\\_response\\_gravity/](https://www.nasa.gov/centers/johnson/engineering/integrated_environments/active_response_gravity/) (accessed 10 February 2020).
11. Ground zero-gravity test device for small-space one-dimension extension mechanism. Patent PRC, № CN103192999A, 2013.

12. Solar battery test stand. Patent RF № RU168492U1, 2017.