

Школа **неразрушающего контроля и безопасности**
 Направление подготовки **12.03.01 Приборостроение**
 Отделение **электронной инженерии**

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Электромеханический исполнительный орган системы ориентации космического аппарата на базе двигателя-маховика

УДК 629.782.062-56

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б5В	Арнст Юлия Юрьевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Т.Г. Костюченко	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	З.В. Криницына	К.Т.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД	М. В. Гуляев			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	А.Н. Гормаков	К.Т.Н.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	<i>Профессиональные компетенции</i>
P1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для разработки, производства, отладки, настройки и аттестации средств приборостроения с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения
P2	Участвовать в технологической подготовке производства, подбирать и внедрять необходимые средства приборостроения в производство, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов; принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа
P3	Эксплуатировать и обслуживать современные средств измерения и контроля на производстве, обеспечивать поверку приборов и прочее метрологическое сопровождение всех процессов производства и эксплуатации средств измерения и контроля; осуществлять технический контроль производства, включая внедрение систем менеджмента качества
P4	Использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей проектирования и производства при решении конкретных задач приборостроительного производства, с использованием передовых технологий; критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы; использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своему профилю с использованием новейших достижения науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующей выполняемой работе
P6	Использовать базовые знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; уметь делать экономическую оценку разрабатываемым приборам, консультировать по вопросам проектирования конкурентоспособной продукции
	<i>Универсальные компетенции</i>

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P7	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности
P8	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы
P9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности
P10	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а также различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду
P11	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности

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

Школа **неразрушающего контроля и безопасности**
Направление подготовки **12.03.01 Приборостроение**
Отделение **электронной инженерии**

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

Гормаков
(Подпись)

(Дата)

А.Н.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
1Б5В	Арнст Юлии Юрьевне

Тема работы:

Электромеханический исполнительный орган системы ориентации космического аппарата на базе двигателя-маховика	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	23.11.18 №10356/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	11.06.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объект разработки – электромеханический исполнительный орган системы ориентации космического аппарата на базе двигателя-маховика</p> <p>Требования к двигателю-маховику:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Кинетический момент 5 Нмс - Угловая скорость 5000 об/мин - Ресурс работы 10 лет - Масса не более 5 кг
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Создание конструкции двигателя-маховика</p> <p>Создание 3D модели исполнительного органа</p> <p>Расчет основных параметров двигателя-маховика, расчет критической угловой скорости, частотный анализ</p> <p>Дополнительные разделы:</p> <p>«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, энергосбережение»</p> <p>«Социальная ответственность»</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>3D модели элементов конструкции исполнительного органа</p> <p>Сборочный чертеж</p> <p>Рабочий чертеж детали</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, энергосбережение»	Криницына Зоя Васильевна, доцент ОСТН ШБИП
«Социальная ответственность»	Гуляев Милий Всеволодович, старший преподаватель ООД ШБИП

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

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	15.02.2019
--	------------

Задание выдал руководитель / консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Т.Г. Костюченко	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б5В	Ю.Ю. Арнст		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
1Б5В	Арнст Юлии Юрьевне

Школа	Неразрушающего контроля и безопасности	Отделение школы (НОЦ)	Электронной инженерии
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	12.03.01 Приборостроение

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Научно-техническое исследование проводится в лабораторной аудитории №105, 4 корпус, ИШНКБ, ТПУ, отделение электронной инженерии. В работе над проектом задействованы 2 человека: научный руководитель и студент-дипломник
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»; Минимальный размер оплаты труда в 2018 году составляет 11280 рублей.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления по страховым взносам – 27,1% от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	- Потенциальные потребители результатов исследования; - Анализ конкурентных технических решений
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	- Структура работ в рамках научного исследования; - Определение трудоемкости выполнения работ; - Разработка графика проведения научного исследования; - Бюджет научно-технического исследования (НТИ)
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	- Анализ и оценка научно-технического уровня проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- Матрица SWOT
- График проведения и смета затрат
- Диаграмма Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Криницына Зоя Васильевна	К.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б5В	Арнст Юлия Юрьевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1Б5В	Архст Юлии Юрьевне

Школа	ИШНКБ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭИ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление	12.03.01 Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области применения	Объекты исследования – проектирование электромеханического исполнительного органа на базе двигателя-маховика для управления космическим аппаратом Оборудование и материалы: конструкторский комплекс программ T-FLEX CAD, персональный компьютер Рабочая зона – 4 корпус, 105 аудитория (учебно-научная лаборатория САПР)
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Рассмотреть специальные правовые нормы трудового законодательства; организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны (4 корпус, 105 аудитория).
2. Производственная безопасность 2.1. Анализ потенциально возможных вредных и опасных факторов на рабочем месте в 105 аудитории 4 корпуса. 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия выявленных вредных факторов и опасных факторов. 2.3. Обоснование мероприятий по снижению воздействия выявленных опасных факторов.	Проанализировать потенциально возможные вредные и опасные факторы при проектировании двигателя-маховика и эксплуатации оборудования в 105 аудитории 4 корпуса: – поражение электрическим током; – неудовлетворительное освещение; – неудовлетворительный уровень шума на рабочем месте; – неудовлетворительные уровни электромагнитных полей (ЭМП); – неудовлетворительный микроклимат.
2. Экологическая безопасность:	Анализ воздействия объекта на литосферу (отходы, утилизация компьютерной техники и периферийных устройств); Решение по обеспечению экологической безопасности.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	Анализ возможных ЧС при проектировании двигателя-маховика в 105 аудитории 4 корпуса Анализ наиболее типичной ЧС; Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; Разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий; Пожаровзрывоопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин	Гуляев Милий Всеволодович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б5В	Арнст Юлия Юрьевна		

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

Школа **неразрушающего контроля и безопасности**

Направление подготовки **12.03.01 Приборостроение**

Уровень образования **бакалавриат**

Отделение **электронной инженерии**

Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года)

Форма представления работы:

бакалаврская работа

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	11.06.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
21 февраля	Обзор научной литературы по теме	5
16 марта	Выполнение расчетов параметров маховика	10
2 апреля	Написание теоретической части диплома	15
29 апреля	Разработка 3D модели исполнительного органа	20
13 мая	Разработка сборочного чертежа исполнительного органа и рабочего чертежа маховика	15
20 мая	Расчетная часть	10
27 мая	Составление доклада и оформление расчетно-пояснительной записки	20
3 июня	Корректировка ВКР по результатам обсуждения на защите	5

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Т.Г. Костюченко	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	А.Н. Гормаков	К.Т.Н.		

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».

ГОСТ Р 22.0.02-94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий.

Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Система ориентации космического аппарата: одна из бортовых систем космического аппарата, обеспечивающая определённое положение осей аппарата относительно некоторых заданных направлений.

Двигатель-маховик: маховик, установленный на опорах любого типа, работающий в режиме изменения кинетического момента, управляемые двигателями и предназначены для использования в качестве исполнительного органа систем ориентации и стабилизации средних и малых космических аппаратов.

T-Flex CAD: Система параметрического проектирования и 3D моделирования, позволяющая создавать 2D чертежи, 3D модели и сборочные конструкции любой сложности.

Обозначения и сокращения

ИО – исполнительный орган;

СО – система ориентации;

СК – система координат;

КА – космический аппарат.

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит: 97 страниц, 21 рисунок, 21 таблиц, 16 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: система ориентации, исполнительный орган, двигатель-маховик, кинетический момент.

Объектом исследования является двигатель-маховик.

Целью работы является проектирование конструкции электромеханического исполнительного органа на базе двигателя-маховика, расчет параметров и создание 3D модели исполнительного органа.

В ходе работы произведены расчеты параметров исполнительного органа, разработана 3D модель конструкции с помощью программы T-Flex CAD 16, определены экономическая эффективность и экологическая безопасность.

Основные характеристики проектируемого двигателя-маховика: кинетический момент, равный 5 Нмс, и угловая скорость вращения маховика, равная 5000 об/мин.

Область применения: исполнительный орган на базе двигателя-маховика применяется для стабилизации и ориентации космических аппаратов.

Оглавление

Введение	14
1 Системы ориентации КА	15
1.1 Назначение и состав системы ориентации КА	15
1.2 Классификация систем ориентации	17
1.3 Исполнительные органы на базе двигателей-маховиков	19
2 Конструкция исполнительного органа	23
2.1 Маховик	23
2.2 Описание гиродвигателя	24
2.3 Проектирование 3D модели исполнительного органа	27
2.4 Описание конструкции исполнительного органа	30
2.5 Обоснование выбора материала	32
3 Расчетно-конструкторская модель двигателя-маховика	34
3.1 Расчет основных параметров	34
3.2 Расчет основных размеров маховика	36
3.3 Расчет критической угловой скорости вращения маховика	47
3.4 Анализ собственных частот маховика	51
3.5 Расчет массы исполнительного органа	57
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	59
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	59
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	59
4.1.2 SWOT-анализ	60
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	61
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	61
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	63
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования	64
4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности исследования	69

Вывод по разделу «Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение».....	69
5 Социальная ответственность	71
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	71
5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.....	71
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	72
5.2 Производственная безопасность	74
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	74
5.2.2 Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов	75
5.3 Экологическая безопасность	81
5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	81
5.3.2 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования	82
5.3.3 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду	82
5.3.4 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	83
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	83
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС	83
5.4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС	85
Заключение	88
Список публикаций студента	89
Список использованных источников	90
Приложение А	92
Приложение Б.....	96

Введение

С помощью космических аппаратов (КА) решается большое количество проблем и задач, что привело к созданию КА различного функционального назначения, оснащенных системами ориентации (СО). Составной частью таких систем являются исполнительные органы (ИО). Поэтому использование космического пространства непрерывно связано с совершенствованием систем ориентации КА и их исполнительных органов.

При разработке СО малых и средних КА, рассчитанных на длительное существование, в качестве электромеханических ИО применяются силовые гироскопические комплексы, трехстепенные силовые гиростабилизаторы и двигатели-маховики. Каждый из вышеперечисленных ИО обладает как преимуществами, так и недостатками.

В данной работе был рассмотрен электромеханический ИО на базе двигателя-маховика. Целью работы является создание расчетно-конструкторской модели ИО с заданными параметрами.

Эффективность использования двигателей-маховиков зависит от надежности, точности обеспечения ориентации и стабилизации. Для проектирования таких устройств, способных обеспечить необходимые требования по эксплуатационным характеристикам, необходимо применение современных технологий проектирования, позволяющих выбирать эффективные проектные решения из большого числа вариантов.

1 Системы ориентации КА

1.1 Назначение и состав системы ориентации КА

В настоящее время космические исследования находят широкое применение в науке и технике. В зависимости от назначения космического аппарата (КА) выполняют различные системы ориентации (СО), которые должны обеспечивать требуемую ориентацию корпуса КА в пространстве для выполнения технологических операций.

Система ориентации представляет собой комплекс приборов и устройств, которые связаны функционально и обеспечивают определенное положение КА.

Эта задача систем ориентации КА, которая разделяется на подзадачи [1]:

1. обеспечение электроэнергией бортовой аппаратуры, т.е. участие в осуществление маневров, обеспечивающих максимальную освещенность солнечных батарей;
2. обеспечение задач навигации, т.е. осуществление программных маневров и коррекции траектории;
3. обеспечение научных исследований (изучение планет, астрофизических объектов и т.п.);
4. обеспечение решения задач народного хозяйства (спутники связи, метрологические спутники и т.д.);
5. обеспечение связи, т.е. наведение остронаправленных антенн на пункты приема-передачи информации и команд.

Все вышеперечисленные задачи относятся к двум основным направлениям: управление движением центра масс и управление движением относительно центра масс (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Основные направления системы управления [2]

Из рисунка 1.1 видно, что управление движением относительно центра масс создает необходимую величину управляющих воздействий и их направление для создания требуемого углового движения КА относительно центра масс, что гарантирует совмещение осей системы координат (базовой) с осями КА. А управление движением центра масс обеспечивает необходимую величину управляющих воздействий, чтобы вывести КА в определенный момент времени в расчетную точку пространства с заданной скоростью.

Чтобы осуществить ориентацию КА, необходимо управлять его угловым движением относительно осей ориентации. Обеспечение таких угловых движений возможно при наличии управляющих моментов или управляющих сил, которые генерируются ИО – одним из определяющих функциональных узлов системы ориентации.

1.2 Классификация систем ориентации

В результате ориентации КА занимает определенное положение или последовательность определенных положений в пространстве. Система ориентации совмещает связанную систему координат с опорной (базовой) системой координат (СК), ликвидируя большое первоначальное отклонение. Базовая СК задается на борту КА с помощью специальных приборов и устройств, и может быть неподвижной или перемещаться в инерциальном пространстве.

На сегодняшний день СО разделяют на три основные группы по способу приложения момента системы: пассивные, активные и комбинированные.

Активные СО – это системы, которые при выполнении своих функций нуждаются в бортовых источниках энергии. В процессе работы такие системы используют различные активные устройства: управляемые маховики, гироскопические и оптические чувствительные элементы, газовые реактивные двигатели и т.д. Активные системы разделяют на две подгруппы: системы, не использующие рабочее тело (газореактивные системы) и системы, использующие рабочее тело (с двигателями-маховиками, гироскопическими исполнительными органами и т.д.).

Пассивные СО – это системы, не требующие на борту КА источника энергии для работы. Для создания управляющего момента используются внешние моменты (гравитационное или магнитное поле, солнечное давление, аэродинамическое сопротивление).

Комбинированные СО – это системы, использующие для создания управляющего момента и внешние моменты, и электроэнергию от бортовых источников.

Особенности пассивных и активных систем [3]:

- а) активные системы обеспечивают высокую точность ориентации, пассивные дают низкую точность - в этом их основной недостаток;
- б) пассивные системы не расходуют энергию бортовых источников

питания, а используют для создания управляющих моментов естественные силы, действующие в условиях космического пространства; активные же системы расходуют массу или энергию, хранящуюся или накапливаемую в КА, например, при помощи солнечных батарей;

в) пассивные системы конструктивно просты; имеют высокую надежность и практически неограниченный срок службы, что является их достоинством. Но простота таких систем достигается в основном ценой меньшей маневренности и не всегда дает желаемую ориентацию. Активные системы достаточно сложны, имеют ограниченный срок службы, который определяется надежностью и ресурсом работы активных устройств (исполнительных механизмов, преобразователей и датчиков) и запасом энергии на борту;

г) активные системы могут создавать достаточно большие по величине управляющие моменты. У пассивных систем управляющие моменты малы по величине, поэтому к ним обычно предъявляются требования высокой точности начальной ориентации и малости угловых скоростей, что является большим недостатком и в ряде случаев ведет к ограничению области их применения;

д) активные системы имеют большое быстродействие, т.е. ориентируют КА в заданном положении за короткий интервал времени. Пассивные системы ориентируют космический аппарат в заданном положении в течение продолжительного интервала времени, но так как они рассчитаны на длительное время активного существования, то для них быстродействие не имеет существенного значения;

е) пассивные системы в отличие от некоторых активных систем, например, использующих газореактивные сопла, не засоряют окружающее пространство вокруг КА отработанными веществами, которые создают большие неудобства в работе оптических систем наблюдения.

Комбинированные системы строятся из элементов пассивных и активных систем с таким расчётом, чтобы они по возможности обладали

достоинствами тех и других и не имели свойственных им в отдельности недостатков.

Существует также ряд других признаков, по которым возможно классифицировать системы ориентации. Причем, одна и та же СО может быть отнесена к нескольким классам.

1.3 Исполнительные органы на базе двигателей-маховиков

Исполнительный орган на базе двигателя-маховика представляет собой маховик, установленный на опорах любого типа, работающий в режиме изменения кинетического момента:

$$\frac{d\bar{H}}{dt} = \bar{M}_{\text{упр}} \quad (1.1)$$

При разгоне (или торможении) маховика в первом приближении управляющий момент равен электромагнитному моменту двигателя:

$$M_{\text{упр}} = M_{\text{эм}} \quad (1.2)$$

Такой исполнительный орган довольно широко применяется в активных системах ориентации космических аппаратов. Конструктивно он выполняется в виде электродвигателя с маховой массой, установленного на его валу (рисунок 1.2), и имеет одну степень свободы, связанную с осью вращения вала.

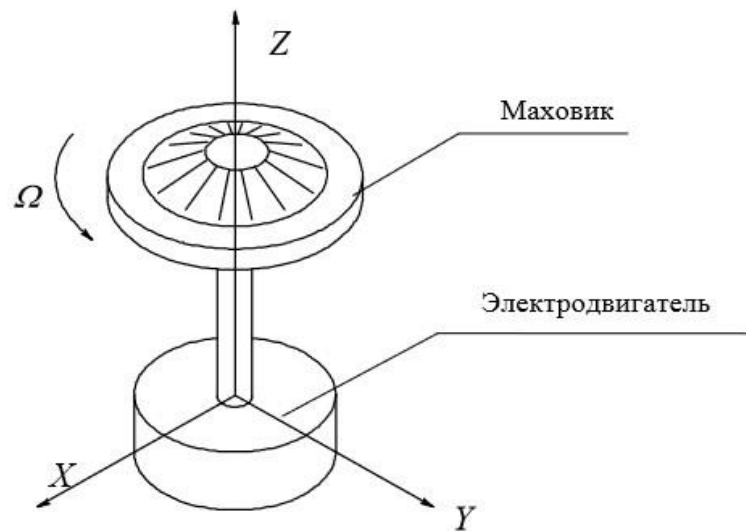


Рисунок 1.2 – Исполнительный орган на базе двигателя-маховика [2]

Одностепенный исполнительный орган на базе двигателя-маховика жестко закрепляется на корпусе космического аппарата. Проекции вектора кинетического момента H на оси X , Y , Z , связанные с осями космического аппарата, равны:

$$H_X = H_Y = 0; H_Z = J_p \Omega, \quad (1.3)$$

где: J_p – момент инерции маховика;

Ω – угловая скорость.

Угловая скорость маховика изменяется в большом диапазоне, а значит и кинетический момент маховика тоже.

Управляющий момент, генерируемый данным типом исполнительного органа, не зависит от места расположения на корпусе космического аппарата и определяется выражениями:

$$M_X = -H\omega_X; M_Y = H\omega_Y; M_Z = -M_{\text{упр.}}, \quad (1.4)$$

где: M_X , M_Y – проекции момента гироскопической реакции относительно осей X и Y при вращении корпуса;

ω_X , ω_Y – угловые скорости.

Проекции M_x и M_y являются моментами гироскопической реакции, развиваемыми при вращении корпуса космического аппарата относительно осей X и Y соответственно с угловыми скоростями p и q . Естественно, что такая взаимозависимость усложняет динамику системы ориентации с управляемым двигателем-маховиком.

Из выражения (1.4) следует, что одностепенный ИО рассматриваемого типа не обладает свойством усиления управляющего момента, поскольку этот момент численно равен электромагнитному моменту.

Для полной ориентации космического аппарата относительно выбранной системы координат система ориентации должна быть трехосной, поэтому трехосный ИО содержит минимум три двигателя-маховика рассматриваемого типа, при этом векторы кинетических моментов каждого из них располагаются параллельно центральным осям космического аппарата.

В общем случае система ориентации может содержать i количество двигателей-маховиков, каждый из которых обладает кинетическим моментом.

Несмотря на то, что одностепенный ИО создает только одну составляющую управляющего момента, которая поддается программному регулированию, следует иметь в виду, что фактически необходимо учитывать все факторы, как внутренние (изменение напряжения питания, фактическое отклонение параметров элементов системы ориентации в течение времени эксплуатации), так и внешние (перемещение подвижных частей механизмов, поворот солнечных батарей и т.д.), поэтому в целом динамика системы ориентации, использующей одностепенные ИО, много сложнее, так как зависит от большого числа параметров, изменяющихся в процессе эксплуатации системы и в таких системах, как правило, имеется большое число динамических процессов [4].

Следует отметить, что рассмотренный ИО является простейшим типом. Он создает управляющий момент только относительно оси, вдоль которой расположен его вектор кинетического момента. Однако, несмотря на свою

простоту в конструкторском и технологическом отношении, такой двигатель представляет собой весьма сложное электромеханическое устройство.

2 Конструкция исполнительного органа

Главной составляющей ИО является осесимметричный маховик, обладающий значительной массой. Для создания кинетического момента обычно используют электрические бесконтактные двигатели постоянного тока или асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Основные функциональные узлы ИО:

1. Маховик, совмещенный с валом.
2. Гиродвигатель.
3. Моментный двигатель.

В данном проектируемом ИО на базе двигателя-маховика моментный двигатель отсутствует.

При проектировании конструкции необходимо выполнять общие требования, предъявляемые к ИО систем ориентации КА, а именно: ИО должны обеспечивать точность, быстродействие, требуемый диапазон величин управляющих моментов, линейность характеристик, оптимальные динамические характеристики, иметь минимальные габариты и массу, необходимый ресурс и надёжность.

Выполнение вышеуказанных требований определяется конструкцией двигателя-маховика. Поэтому создание двигателя маховика и получение его характеристик во многом характеризуют уровень разработки ИО. Следует отметить, что масса двигателя-маховика может составлять 65-75 % от массы ИО, а габариты - 80% от его размеров [4].

2.1 Маховик

Маховик представляет собой массивный ротор с явно выраженным ободом и выполненным из нержавеющей конструкционной стали. Маховик создает требуемый кинетический момент, численно равный $H = 5 \text{ Нмс}$.

Формы конструкции маховиков могут быть различными, но при выборе стремятся к следующим требованиям:

1. Оптимальное сочетание массы и размеров маховика для получения требуемого момента инерции;
2. Минимальные размеры;
3. Минимальные углы отклонения рамок подвеса;
4. Минимальный аэродинамический момент.

На рисунке 2.1 представлены наиболее распространённые конструкционные формы маховиков

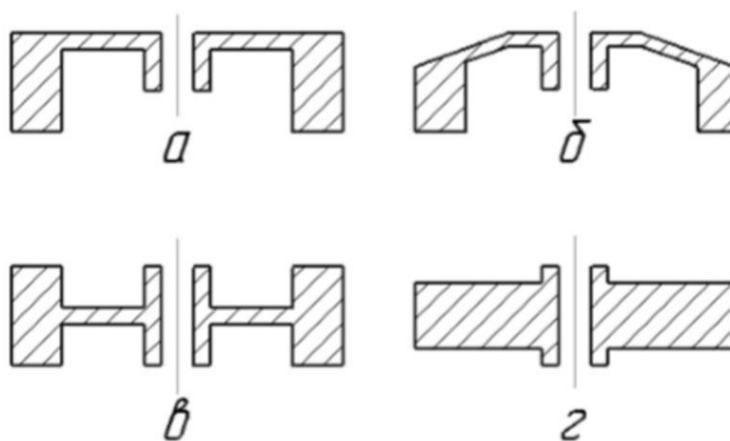


Рисунок 2.1 – Конструкционные формы маховиков

Для дальнейшего проектирования маховика выбрана модель позиции б, поскольку такая конструкция позволит минимизировать габариты ИО.

2.2 Описание гиродвигателя

Гиродвигатель ИО, представляющий собой функциональный узел, состоит из двух частей:

1. Электродвигатель (ЭД).
2. Датчик положения ротора (ДПР).

Вращение маховика осуществляется электрическими двигателями. Это объясняется простотой получения энергии для двигателя и управления им, что является важным требованием для ИО. Последнее имеет первостепенное значение, т.к. наряду с общеизвестными требованиями (малые габариты и масса, малое потребление энергии, высокая надежность) чуть ли не главным требованием является хорошая регулировочная характеристика в широком диапазоне угловых скоростей.

В связи с этим, в настоящее время наибольшее применение находят бесконтактный двигатель постоянного тока и асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Создание бесконтактного двигателя постоянного тока стало возможным благодаря разработке интегральных схем и датчиков положения ротора.

Требования, предъявляемые к двигателям:

1. Хорошие пусковые и регулировочные характеристики.
2. Отсутствие необходимости в обслуживании.
3. Высокие удельные показатели (оцениваются по развиваемому моменту, отнесенному к массе двигателя).

В качестве электродвигателя был выбран бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ), т.к. он обладает рядом преимуществ:

1. Высокий КПД;
2. Большой срок службы;
3. Высокая надежность;
4. Простота эксплуатации
5. Отсутствие скользящих контактов;
6. Большое значение пускового момента.
7. Не создают при работе радиопомех и дополнительного шума.

Стоит отметить, что в данном типе электродвигателя присутствуют и недостатки:

1. Использование дорогих материалов (магнитов), которые увеличивает стоимость ЭД;

2. Ограниченный срок службы электронного узла.

Бесконтактные двигатели по взаимному положению ротора и статора бывают двух типов: с внутренним ротором и внешним ротором. Электродвигатели с внутренним ротором имеют более высокую скорость и меньший момент инерции ротора, чем электродвигатели с внешним ротором. Поэтому ЭД с внутренним ротором имеют более высокую динамику. Электродвигатели с внешним ротором имеют несколько больший номинальный момент при том же наружном диаметре двигателя.

Датчик положения ротора (ДПР) – это элемент электропривода, который позволяет определить положение ротора ЭД. Информация о положении ротора необходима для управления электродвигателем.

ДПР подразделяются на виды:

1. Магнитоиндукционный (т.е. в качестве датчика используются собственно силовые катушки, но иногда используются дополнительные обмотки).
2. Магнитоэлектрический (датчик Холла).
3. Оптоэлектрический (светодиод-фотодиод, светодиод-фототранзистор, светодиод-фототиристор).

Магнитоиндукционный ДПР представляет собой силовые катушки, которые работают на переменном токе. Такие датчики хорошо согласуются со схемой коммутатора, обеспечивают необходимую выходную мощность и гальваническую развязку выходных сигналов. Они относительно просты в изготовлении и обеспечивают работу в широком диапазоне изменения температур и давления, а также в условиях повышенной влажности.

Магнитоэлектрический ДПР представляет собой датчик Холла. Датчик реагирует на магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом. Он считывает угловую позицию вала и передает эту информацию схеме управления, обеспечивающей своевременное отпирание и запираание силовых ключей электронного коммутатора обмоток статора.

Оптоэлектрический ДПР представляет собой цилиндрический экран, связанный с ротором, выполненный из постоянного магнита. Внутри экрана

помещен неподвижный источник света. Оптическое устройство во вращающемся экране формирует луч света, который попадает на неподвижные фоточувствительные элементы, установленные вокруг экрана.

Бесконтактный двигатель постоянного тока существуют в исполнении с отдельными датчиками на роторе и без отдельных датчиков. В качестве отдельных датчиков применяются датчики Холла.

2.3 Проектирование 3D модели исполнительного органа

С помощью программы T-Flex CAD 16 были построены 3D модели элементов конструкции исполнительного органа на базе-двигателя маховика.

На рисунке 2.2 представлен ИО в разобранном виде, в состав которого входят следующие сборочные узлы и детали: датчик Холла (поз. 1), кожух (поз. 2), основание (поз. 3), ротор ЭД (поз. 4), статор ЭД (поз. 5), втулка (поз. 6), колпачок штуцера (поз.7), кронштейн (поз. 8), маховик (поз. 9), прокладка (поз.10), стакан (поз. 11) и фланец (поз. 12).

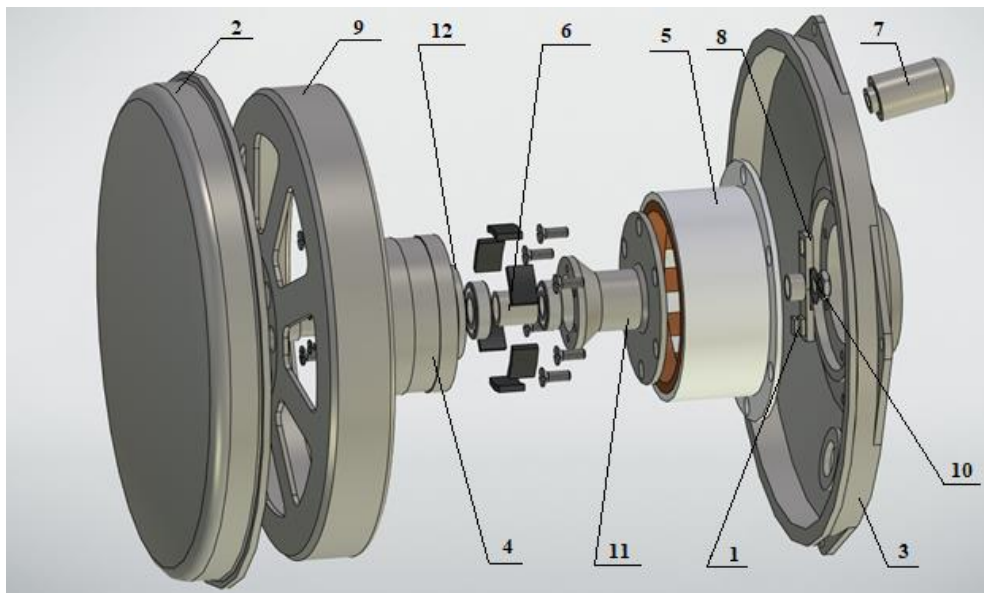


Рисунок 2.2 – Исполнительный орган на базе двигателя-маховика, где 1 - датчик Холла, 2 - кожух, 3 - основание, 4 - ротор ЭД, 5 - статор ЭД, 6 - втулка, 7 - колпачок штуцера, 8 - кронштейн, 9 – маховик, 10 - прокладка, 11 - стакан, 12 - фланец

На рисунках 2.3 – 2.6 представлены 3D модели основных элементов конструкции.

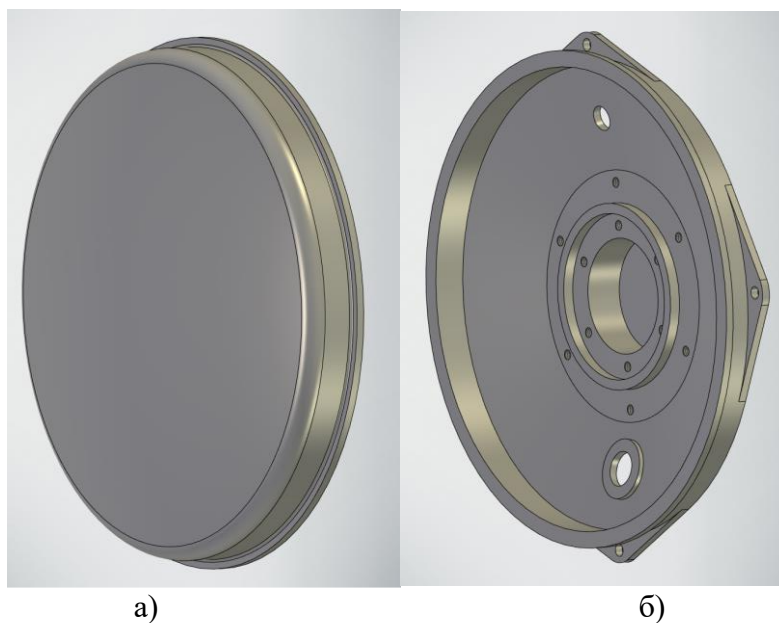


Рисунок 2.3 – 3D модель корпуса, где
а) кожух; б) основание

Одним из основных элементов конструкции исполнительного органа является маховик. На рисунке 2.4 представлена 3D-модель маховика.

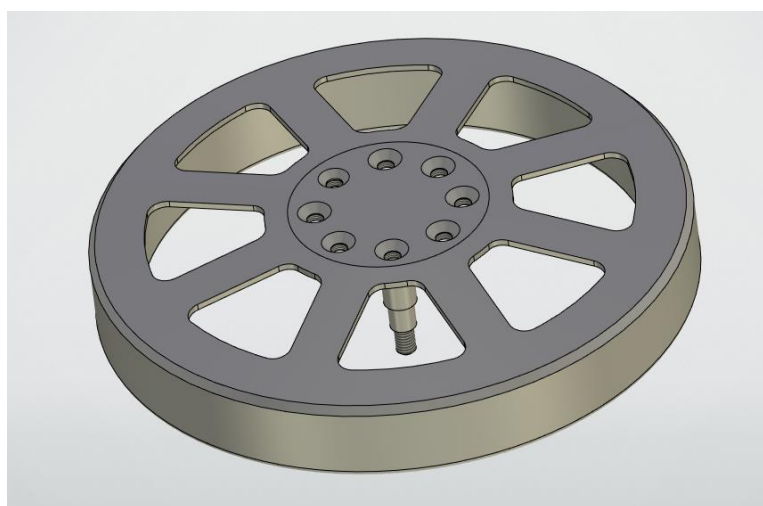


Рисунок 2.4 – 3D модель маховика

На рисунке 2.5 изображены 3D модели статора и ротора электродвигателя.

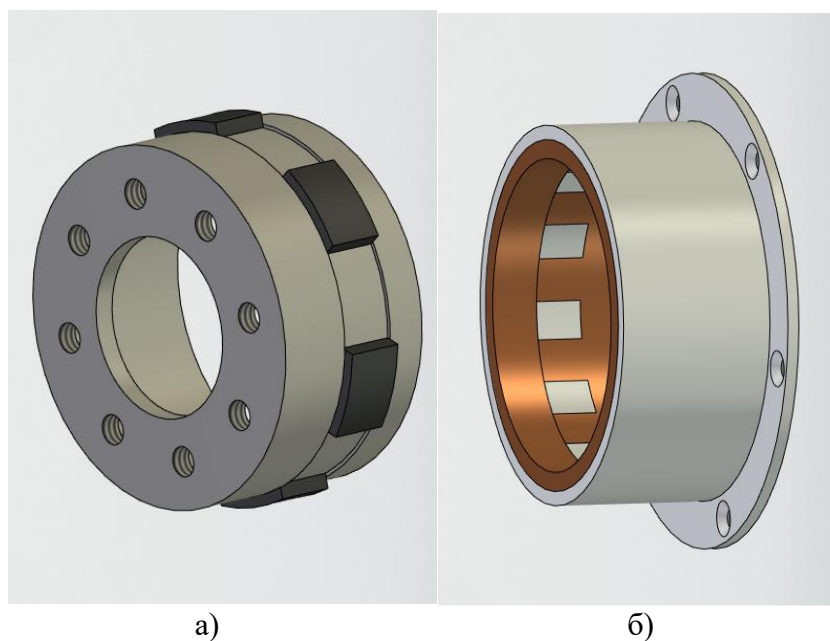


Рисунок 2.5 – 3D модель ЭД, где
а) ротор ЭД; б) статор ЭД

На рисунке 2.6 изображены некоторые элементы шарикоподшипникового узла.

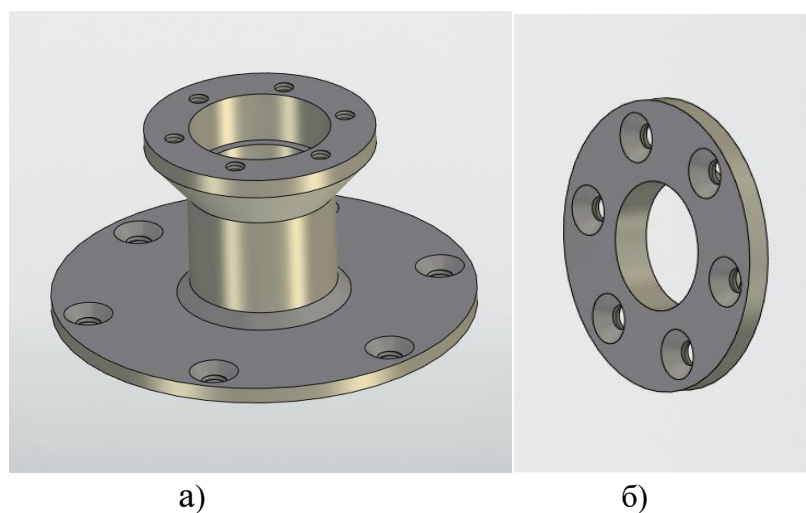
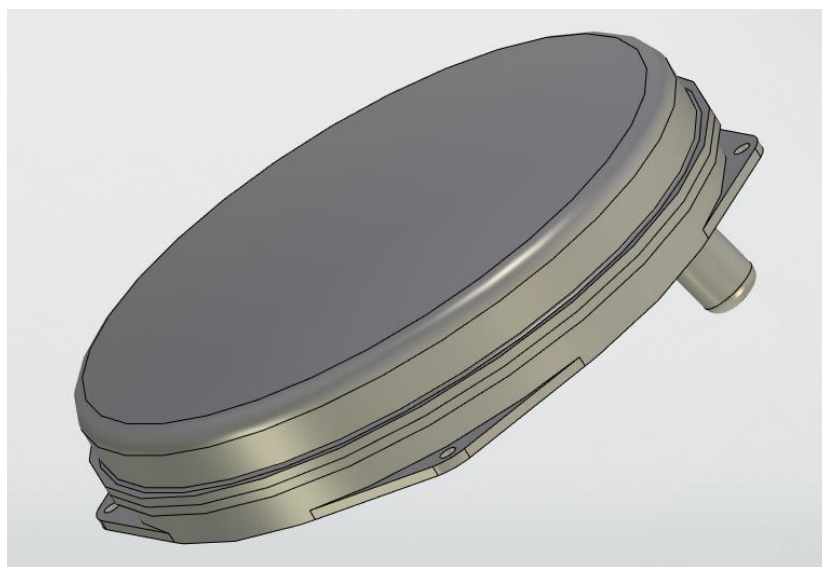
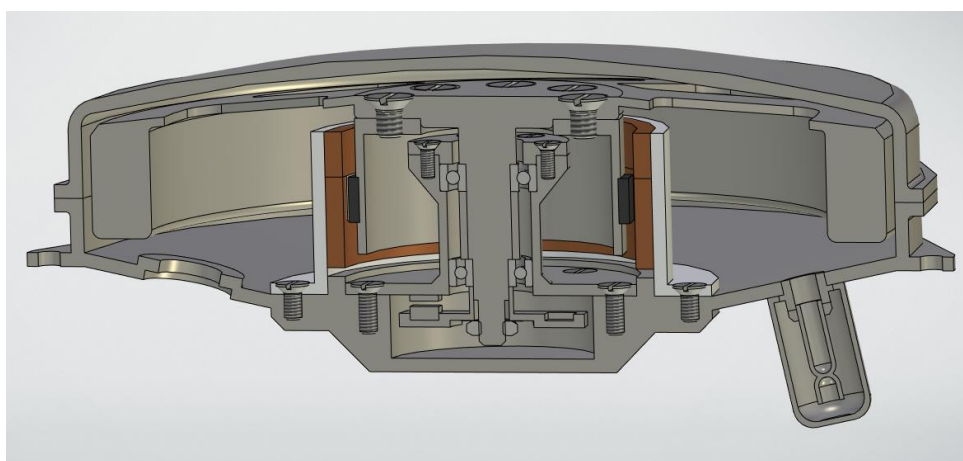


Рисунок 2.6 – 3D модели, где
а) стакан; б) фланец

На рисунке 2.7 изображен ИО двигатель-маховик в собранном виде.



а)



б)

Рисунок 2.7 – 3D модель ИО, где
а) в собранном виде; б) в разобранном виде (рассечено)

2.4 Описание конструкции исполнительного органа

На основе созданной сборочной 3D-модели двигателя-маховика был получен сборочный чертеж ФЮРА 526452.001 СБ, спецификация ФЮРА 526452.001 СП (Приложение А) и рабочий чертеж маховика ФЮРА 526452.001.09 (Приложение Б).

На рисунке 2.8 изображен фрагмент сборочного чертежа ИО.

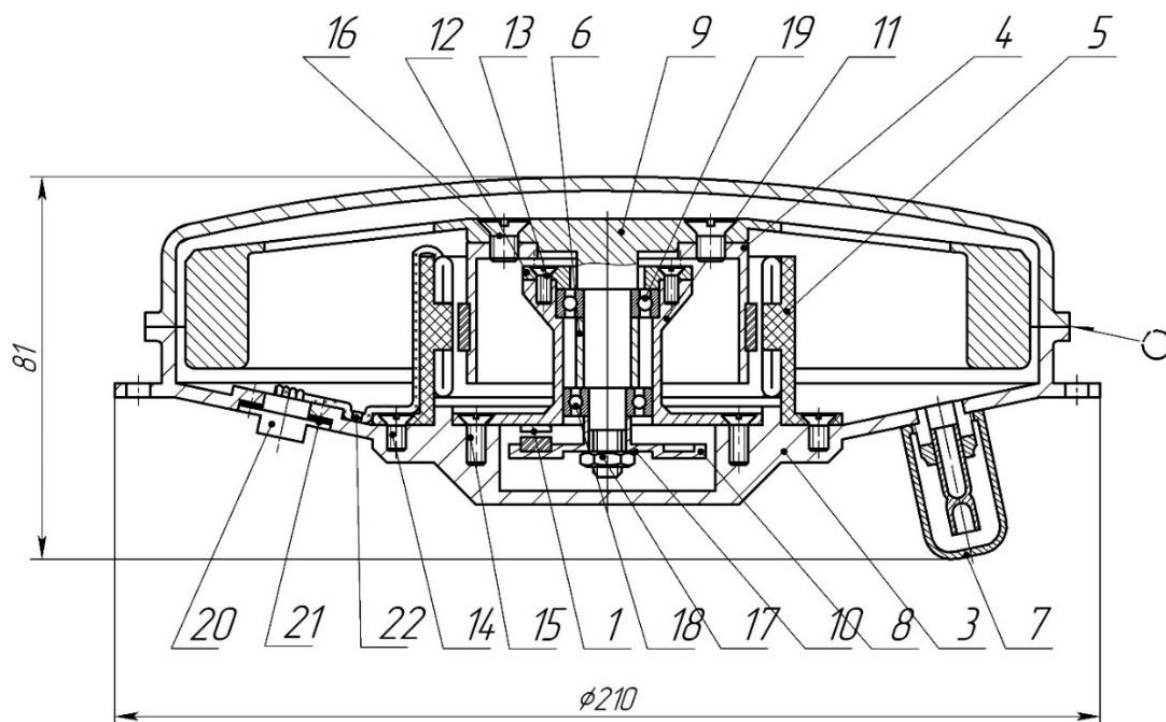


Рисунок 2.8 – Фрагмент сборочного чертежа ИО, где
 1 - датчик Холла, 2 - кожух, 3 - основание, 4 - ротор ЭД, 5 - статор ЭД, 6 -
 втулка, 7 - колпачок штуцера, 8 - кронштейн, 9 – маховик, 10 - прокладка,
 11 - стакан, 12 - фланец

Особенностью проектируемого ИО на базе двигателя-маховика является герметичность конструкции. Герметичная конструкция позволяет снизить аэродинамическую составляющую момента сопротивления, при этом давление внутри не должно превышать 10^{-3} мм рт.ст.

Конструкция представляет собой неразъемное соединение. Кожух 2 и основание 3 свариваются по месту стыка припоем ПОС-62 ГОСТ 21931-76.

Основным элементом конструкции является маховик 9, выполненный заодно с валом и установленный в шарикоподшипниковые опоры 100098 ГОСТ 8338-75 18 и 1000900 ГОСТ 8338-75 19, в которые закладывается смазка ВНИИНП-274 ГОСТ 14068-79 по 0.05 грамм в каждый. Маховик с шарикоподшипниками устанавливается в стакан 11, который в свою очередь с помощью винтов 15 М4х11 ГОСТ 17475-80 крепится к основанию. Чтобы

обеспечить в конструкции шарикоподшипниковый узел, предусмотрены фланец 12 и втулка 6.

Ротор ЭД 4 крепится винтами 16 М6х9 ГОСТ 17475-80 к маховику. Ротор ЭД представляет собой сборочную единицу, состоящую непосредственно из корпуса ротора и постоянных магнитов, установленных в пазах ротора клеем ВК-2 ТУ 6-10-826-85. Статор ЭД 5 соединен с основанием винтами 14 М4х8 ГОСТ 17475-80 и выполнен из пластмассы АГ-4В и медной обмотки. Данный тип ЭД относится к двигателям с внутренним ротором.

Штуцер представляет собой медную трубку, соединенную с корпусом с помощью детали из алюминиевого сплава, накрытую колпачком 7. Питание электродвигателя и датчика Холла 1 производится через разъем 20 типа РСГ10 АВ0.364.947ТУ.

Магнитоэлектрический датчик положения ротора (ДПР) представляет собой датчик Холла 1.

2.5 Обоснование выбора материала

При проектировании электромеханического ИО на базе двигателя-маховика были рассмотрены конструкционные материалы, которые целесообразно использовать для изготовления необходимых деталей. При выборе материала также учитывается их назначение и условия эксплуатации.

Применяемые материалы должны обладать малым удельным весом и высокой прочностью. Удельный вес материала напрямую влияет на минимизацию массы ИО, что является основной задачей проектировщика. Высокая прочность материала необходима для того, чтобы конструкция выдерживала постоянные внешние и внутренние воздействия.

Основной деталью ИО является маховик с скоростью вращения 5000 об/мин. Для его изготовления была выбрана сталь 20Х13, т.к. имеет высокую обрабатываемость резанием, обладает хорошими антикоррозийными свойствами и пластичностью.

Для обмотки электрической машины используется медный провод. Корпус статора выполнен из пластмассы АГ-4В для уменьшения массы ИО. АГ-4В – прессовочный материал, обладающий высокой механической прочностью и теплостойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами и незначительным водопоглощением.

Остальные детали (втулка, фланец, стакан) выполнены из стали, т.к. должны обладать высокой прочностью.

3 Расчетно-конструкторская модель двигателя-маховика

Целью данной работы является проектирование ИО системы ориентации КА на базе двигателя-маховика с использованием расчетно-конструкторской модели.

Расчетно-конструкторская модель двигателя-маховика включает в себя поиск оптимальных масса-габаритных размеров маховика, расчет критической угловой скорости вращения маховика, анализ собственных частот маховика и расчет массы ИО.

Начальные данные для расчета:

1. Кинетический момент $H = 5$ Нмс.
2. Скорость вращения маховика 5000 об/мин $= 523,6$ рад/с.
3. Ресурс – минимум 10 лет.
4. Масса и габариты минимальные.

3.1 Расчет основных параметров

Одной из основных характеристик двигателя-маховика является генерируемый им кинетический момент H , заданный в техническом задании:

$$H = J \cdot \Omega, \quad (3.1)$$

где J – момент инерции маховой массы;

Ω – угловая скорость вращения.

Требуемый момент инерции можно получить по следующей формуле [2]:

$$J = \frac{H}{\Omega} = \frac{5}{523,6} = 0,00955 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (3.2)$$

где H – кинетический момент;

Ω – угловая скорость вращения.

Рассчитанный момент инерции маховой массы:

$$J_p = m \cdot R_{\text{ц}}^2 = \gamma \cdot V \cdot R_{\text{ц}}^2 = \gamma \cdot \pi \cdot h \cdot (R^2 - r^2) \cdot R_{\text{ц}}^2 = \quad (3.3)$$

$$= 7800 \cdot 3,14 \cdot 0,025 \cdot (0,09^2 - 0,077^2) \cdot 0,09^2 = 0,01 \text{ кгм}^2,$$

где m – масса;

$R_{\text{ц}}$ – радиус инерции;

γ – плотность материала маховика;

h – высота обода.

Вес обода маховика:

$$\begin{aligned} P &= \gamma \cdot V \cdot g = \gamma \cdot \pi \cdot (R^2 - r^2) \cdot h \cdot g = \\ &= 7800 \cdot 3,14 \cdot (0,09^2 - 0,077^2) \cdot 0,025 \cdot 9,81 = 13 \text{ Н} \end{aligned} \quad (3.4)$$

где γ – плотность материала маховика;

h – высота обода;

R – наружный радиус маховика;

r – внутренний радиус маховика;

g – ускорение свободного падения.

Одной из первоочерёдных и наиболее важных задач при проектировании ИО является расчёт его долговечности. Для проектируемого ИО, который должен работать не менее 10 лет, ресурс составляет 87600 часов.

Ресурс ИО зависит от долговечности шарикоподшипниковых опор ротора электродвигателя:

$$N = \frac{10^6}{\Omega \cdot 60} \cdot \left(\frac{C}{Q}\right)^\alpha = \frac{10^6}{5000 \cdot 60} \cdot (31,1)^3 = 100300 \text{ ч}, \quad (3.5)$$

где N – долговечность подшипников, ч;

Ω – скорость вращения, об/мин;

Q – приведённая нагрузка, кГ;

C – коэффициент работоспособности;

α – коэффициент, зависящий от формы кривой контактной усталости, принимаемый для шариковых подшипников $\alpha = 3$ и для роликовых $\alpha = 10/3$.

3.2 Расчет основных размеров маховика

Расчет параметров маховика является сложной задачей. Для расчета использована следующая методика расчета.

Первым основным расчетным параметром маховика является момент инерции.

По полученному значению момента инерции можно рассчитать габаритные размеры маховика:

1. Наружный радиус маховика;
2. Внутренний радиус маховика;
3. Высоту обода.

Между габаритными размерами маховика существует строгая функциональная зависимость, то есть при изменении наружного радиуса для получения требуемого момента инерции необходимо изменить значения внутреннего радиуса или высоты обода.

Для простоты расчета внутреннего радиуса используем метод перебора размеров наружного радиуса и высоты обода.

Внутренний радиус маховика рассчитаем по формуле [2]:

$$r = \sqrt[4]{R^4 - \frac{2 \cdot J}{\pi \cdot h \cdot \gamma}}, \quad (3.6)$$

где R – наружный радиус маховика;

J – момент инерции;

γ – плотность материала маховика;

h – высота обода.

Массу обода маховика рассчитаем следующим образом:

$$m = \pi \cdot h \cdot \gamma (R^2 - r^2), \quad (3.7)$$

где γ – плотность материала маховика;

h – высота обода;

R – наружный радиус маховика;

r – внутренний радиус маховика.

Рассчитанные параметры представлены в виде таблиц 3.1-3.7. Значение высоты обода находится в пределах от 10 мм до 35 мм. Наружный радиус обода изменяется от 30 мм до 200 мм.

Таблица 3.1 – Начальные данные для расчета параметров маховика

Начальные данные	
Кинетический момент, Нмс	5
Плотность материала, кг/м ³	7800
Скорость вращения маховика, об/ мин	5000
Скорость вращения маховика, рад/с	523,6
Момент инерции, кг·м ²	0,00955

В таблицах 3.2 – 3.7 пустые ячейки в столбцах таблиц означают, что при данных значениях наружного радиуса маховика и высоты обода невозможно вычислить значения внутреннего радиуса обода, и, соответственно, значение массы обода.

Таблица 3.2 – Результаты расчета при $h = 0.01$ м

Наружный радиус обода	Внутренний радиус обода	Высота обода	Момент инерции	Масса обода
R , м	r , м	h , м	J , кг·м ²	m , кг
0,03		0,01	0,00955	
0,035		0,01	0,00955	
0,04		0,01	0,00955	
0,045		0,01	0,00955	
0,05		0,01	0,00955	
0,055		0,01	0,00955	
0,06		0,01	0,00955	
0,065		0,01	0,00955	
0,07		0,01	0,00955	
0,075		0,01	0,00955	
0,08		0,01	0,00955	
0,085		0,01	0,00955	
0,09		0,01	0,00955	
0,095	0,0432	0,01	0,00955	1,7549
0,1	0,0685	0,01	0,00955	1,3005
0,105	0,0812	0,01	0,00955	1,0841
0,11	0,0910	0,01	0,00955	0,9380
0,115	0,0992	0,01	0,00955	0,8283
0,12	0,1067	0,01	0,00955	0,7414
0,125	0,1135	0,01	0,00955	0,6701
0,13	0,1200	0,01	0,00955	0,6103
0,135	0,1263	0,01	0,00955	0,5592
0,14	0,1323	0,01	0,00955	0,5151
0,145	0,1381	0,01	0,00955	0,4764
0,15	0,1439	0,01	0,00955	0,4424
0,155	0,1495	0,01	0,00955	0,4121
0,16	0,1550	0,01	0,00955	0,3850
0,165	0,1605	0,01	0,00955	0,3607
0,17	0,1659	0,01	0,00955	0,3387
0,175	0,1712	0,01	0,00955	0,3187
0,18	0,1766	0,01	0,00955	0,3006
0,185	0,1818	0,01	0,00955	0,2840
0,19	0,1871	0,01	0,00955	0,2687
0,195	0,1923	0,01	0,00955	0,2547
0,2	0,1975	0,01	0,00955	0,2418

Таблица 3.3 – Результаты расчета при $h = 0.015$ м

Наружный радиус обода	Внутренний радиус обода	Высота обода	Момент инерции	Масса обода
R , м	r , м	h , м	J , кг·м ²	m , кг
0,03		0,015	0,00955	
0,035		0,015	0,00955	
0,04		0,015	0,00955	
0,045		0,015	0,00955	
0,05		0,015	0,00955	
0,055		0,015	0,00955	
0,06		0,015	0,00955	
0,065		0,015	0,00955	
0,07		0,015	0,00955	
0,075		0,015	0,00955	
0,08		0,015	0,00955	
0,085	0,0215	0,015	0,00955	2,4854
0,09	0,0608	0,015	0,00955	1,6206
0,095	0,0737	0,015	0,00955	1,3221
0,1	0,0832	0,015	0,00955	1,1287
0,105	0,0913	0,015	0,00955	0,9867
0,11	0,0986	0,015	0,00955	0,8758
0,115	0,1053	0,015	0,00955	0,7860
0,12	0,1116	0,015	0,00955	0,7113
0,125	0,1177	0,015	0,00955	0,6480
0,13	0,1236	0,015	0,00955	0,5937
0,135	0,1294	0,015	0,00955	0,5465
0,14	0,1350	0,015	0,00955	0,5052
0,145	0,1405	0,015	0,00955	0,4686
0,15	0,1460	0,015	0,00955	0,4361
0,155	0,1514	0,015	0,00955	0,4071
0,16	0,1567	0,015	0,00955	0,3809
0,165	0,1620	0,015	0,00955	0,3573
0,17	0,1673	0,015	0,00955	0,3359
0,175	0,1725	0,015	0,00955	0,3164
0,18	0,1777	0,015	0,00955	0,2986
0,185	0,1829	0,015	0,00955	0,2823
0,19	0,1881	0,015	0,00955	0,2674
0,195	0,1932	0,015	0,00955	0,2536
0,2	0,1984	0,015	0,00955	0,2408

Таблица 3.4 – Результаты расчета при $h = 0.02$ м

Наружный радиус обода	Внутренний радиус обода	Высота обода	Момент инерции	Масса обода
R , м	r , м	h , м	J , кг·м ²	m , кг
0,03		0,02	0,00955	
0,035		0,02	0,00955	
0,04		0,02	0,00955	
0,045		0,02	0,00955	
0,05		0,02	0,00955	
0,055		0,02	0,00955	
0,06		0,02	0,00955	
0,065		0,02	0,00955	
0,07		0,02	0,00955	
0,075		0,02	0,00955	
0,08	0,0375	0,02	0,00955	2,4486
0,085	0,0603	0,02	0,00955	1,7596
0,09	0,0718	0,02	0,00955	1,4411
0,095	0,0807	0,02	0,00955	1,2295
0,1	0,0884	0,02	0,00955	1,0728
0,105	0,0953	0,02	0,00955	0,9501
0,11	0,1018	0,02	0,00955	0,8506
0,115	0,1080	0,02	0,00955	0,7679
0,12	0,1139	0,02	0,00955	0,6980
0,125	0,1197	0,02	0,00955	0,6380
0,13	0,1253	0,02	0,00955	0,5861
0,135	0,1309	0,02	0,00955	0,5406
0,14	0,1363	0,02	0,00955	0,5005
0,145	0,1417	0,02	0,00955	0,4649
0,15	0,1470	0,02	0,00955	0,4331
0,155	0,1523	0,02	0,00955	0,4046
0,16	0,1576	0,02	0,00955	0,3789
0,165	0,1628	0,02	0,00955	0,3557
0,17	0,1680	0,02	0,00955	0,3345
0,175	0,1732	0,02	0,00955	0,3153
0,18	0,1783	0,02	0,00955	0,2977
0,185	0,1834	0,02	0,00955	0,2815
0,19	0,1886	0,02	0,00955	0,2667
0,195	0,1937	0,02	0,00955	0,2530
0,2	0,1988	0,02	0,00955	0,2403

Таблица 3.5 – Результаты расчета при $h = 0.025$ м

Наружный радиус обода	Внутренний радиус обода	Высота обода	Момент инерции	Масса обода
R , м	r , м	h , м	J , кг·м ²	m , кг
0,03		0,025	0,00955	
0,035		0,025	0,00955	
0,04		0,025	0,00955	
0,045		0,025	0,00955	
0,05		0,025	0,00955	
0,055		0,025	0,00955	
0,06		0,025	0,00955	
0,065		0,025	0,00955	
0,07		0,025	0,00955	
0,075	0,02589	0,025	0,00955	3,0354
0,08	0,05591	0,025	0,00955	2,0060
0,085	0,06770	0,025	0,00955	1,6182
0,09	0,07659	0,025	0,00955	1,3681
0,095	0,08420	0,025	0,00955	1,1858
0,1	0,09108	0,025	0,00955	1,0444
0,105	0,09750	0,025	0,00955	0,9307
0,11	0,10360	0,025	0,00955	0,8368
0,115	0,10949	0,025	0,00955	0,7579
0,12	0,11521	0,025	0,00955	0,6905
0,125	0,12080	0,025	0,00955	0,6324
0,13	0,12630	0,025	0,00955	0,5817
0,135	0,13171	0,025	0,00955	0,5372
0,14	0,13707	0,025	0,00955	0,4978
0,145	0,14237	0,025	0,00955	0,4627
0,15	0,14763	0,025	0,00955	0,4314
0,155	0,15286	0,025	0,00955	0,4032
0,16	0,15806	0,025	0,00955	0,3778
0,165	0,16324	0,025	0,00955	0,3547
0,17	0,16839	0,025	0,00955	0,3337
0,175	0,17353	0,025	0,00955	0,3146
0,18	0,17865	0,025	0,00955	0,2971
0,185	0,18376	0,025	0,00955	0,2810
0,19	0,18885	0,025	0,00955	0,2663
0,195	0,19394	0,025	0,00955	0,2526
0,2	0,19902	0,025	0,00955	0,2400

Таблица 3.6 – Результаты расчета при $h = 0.03$ м

Наружный радиус обода	Внутренний радиус обода	Высота обода	Момент инерции	Масса обода
R , м	r , м	h , м	J , кг·м ²	m , кг
0,03		0,03	0,00955	
0,035		0,03	0,00955	
0,04		0,03	0,00955	
0,045		0,03	0,00955	
0,05		0,03	0,00955	
0,055		0,03	0,00955	
0,06		0,03	0,00955	
0,065		0,03	0,00955	
0,07		0,03	0,00955	
0,075	0,0487	0,03	0,00955	2,3881
0,08	0,0622	0,03	0,00955	1,8608
0,085	0,0715	0,03	0,00955	1,5479
0,09	0,0793	0,03	0,00955	1,3275
0,095	0,0863	0,03	0,00955	1,1600
0,1	0,0928	0,03	0,00955	1,0272
0,105	0,0989	0,03	0,00955	0,9187
0,11	0,1048	0,03	0,00955	0,8281
0,115	0,1105	0,03	0,00955	0,7515
0,12	0,1160	0,03	0,00955	0,6857
0,125	0,1215	0,03	0,00955	0,6287
0,13	0,1269	0,03	0,00955	0,5788
0,135	0,1323	0,03	0,00955	0,5349
0,14	0,1376	0,03	0,00955	0,4960
0,145	0,1428	0,03	0,00955	0,4613
0,15	0,1480	0,03	0,00955	0,4302
0,155	0,1532	0,03	0,00955	0,4023
0,16	0,1584	0,03	0,00955	0,3770
0,165	0,1635	0,03	0,00955	0,3541
0,17	0,1687	0,03	0,00955	0,3332
0,175	0,1738	0,03	0,00955	0,3142
0,18	0,1789	0,03	0,00955	0,2967
0,185	0,1840	0,03	0,00955	0,2807
0,19	0,1890	0,03	0,00955	0,2660
0,195	0,1941	0,03	0,00955	0,2524
0,2	0,1992	0,03	0,00955	0,2398

Таблица 3.7 – Результаты расчета при $h = 0.035$ м

Наружный радиус обода	Внутренний радиус обода	Высота обода	Момент инерции	Масса обода
R , м	r , м	h , м	J , кг·м ²	m , кг
0,03		0,035	0,00955	
0,035		0,035	0,00955	
0,04		0,035	0,00955	
0,045		0,035	0,00955	
0,05		0,035	0,00955	
0,055		0,035	0,00955	
0,06		0,035	0,00955	
0,065		0,035	0,00955	
0,07	0,0363	0,035	0,00955	3,0743
0,075	0,0553	0,035	0,00955	2,2003
0,08	0,0657	0,035	0,00955	1,7821
0,085	0,0740	0,035	0,00955	1,5052
0,09	0,0811	0,035	0,00955	1,3014
0,095	0,0877	0,035	0,00955	1,1430
0,1	0,0939	0,035	0,00955	1,0155
0,105	0,0998	0,035	0,00955	0,9104
0,11	0,1056	0,035	0,00955	0,8222
0,115	0,1111	0,035	0,00955	0,7470
0,12	0,1166	0,035	0,00955	0,6823
0,125	0,1220	0,035	0,00955	0,6261
0,13	0,1274	0,035	0,00955	0,5768
0,135	0,1327	0,035	0,00955	0,5333
0,14	0,1379	0,035	0,00955	0,4947
0,145	0,1431	0,035	0,00955	0,4603
0,15	0,1483	0,035	0,00955	0,4294
0,155	0,1535	0,035	0,00955	0,4016
0,16	0,1586	0,035	0,00955	0,3764
0,165	0,1637	0,035	0,00955	0,3536
0,17	0,1689	0,035	0,00955	0,3328
0,175	0,1740	0,035	0,00955	0,3138
0,18	0,1790	0,035	0,00955	0,2965
0,185	0,1841	0,035	0,00955	0,2805
0,19	0,1892	0,035	0,00955	0,2658
0,195	0,1942	0,035	0,00955	0,2522
0,2	0,1993	0,035	0,00955	0,2397

По полученным результатам расчета построены графики зависимости наружного радиуса от внутреннего радиуса и наружного радиуса от массы обода.

На рисунке 3.1 представлена функциональная зависимость наружного радиуса от внутреннего радиуса при различных значениях высоты обода.

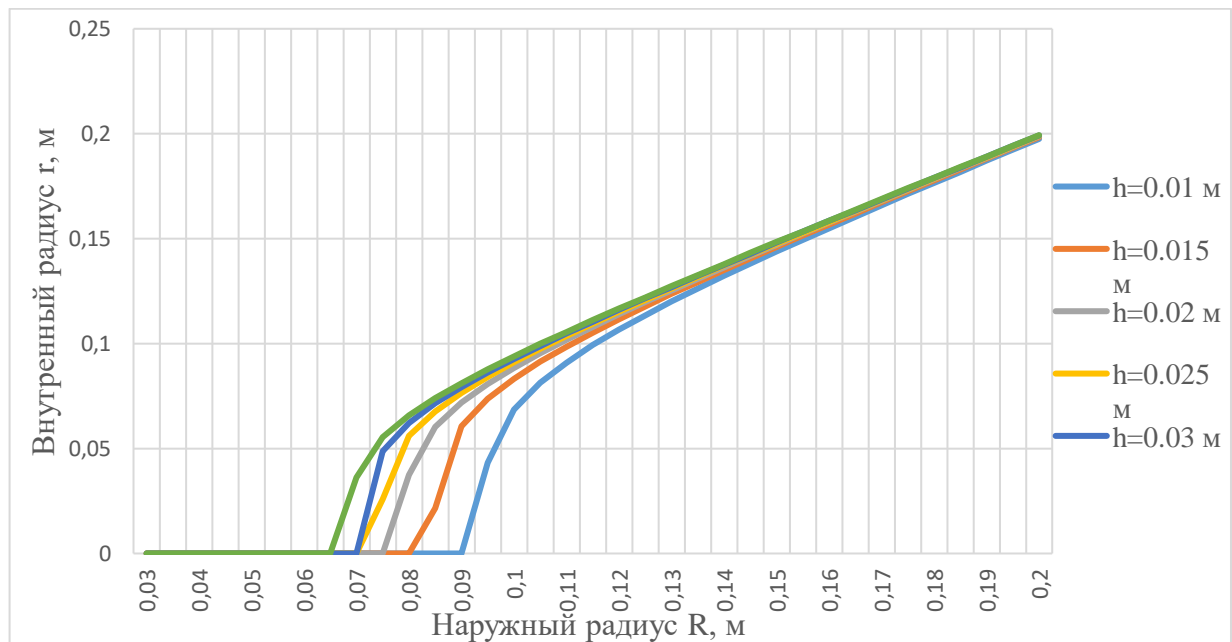


Рисунок 3.1 – Зависимость наружного радиуса от внутреннего радиуса

На рисунке 3.2 представлена зависимость значения массы обода маховика от его наружного радиуса при различных значениях высоты обода.

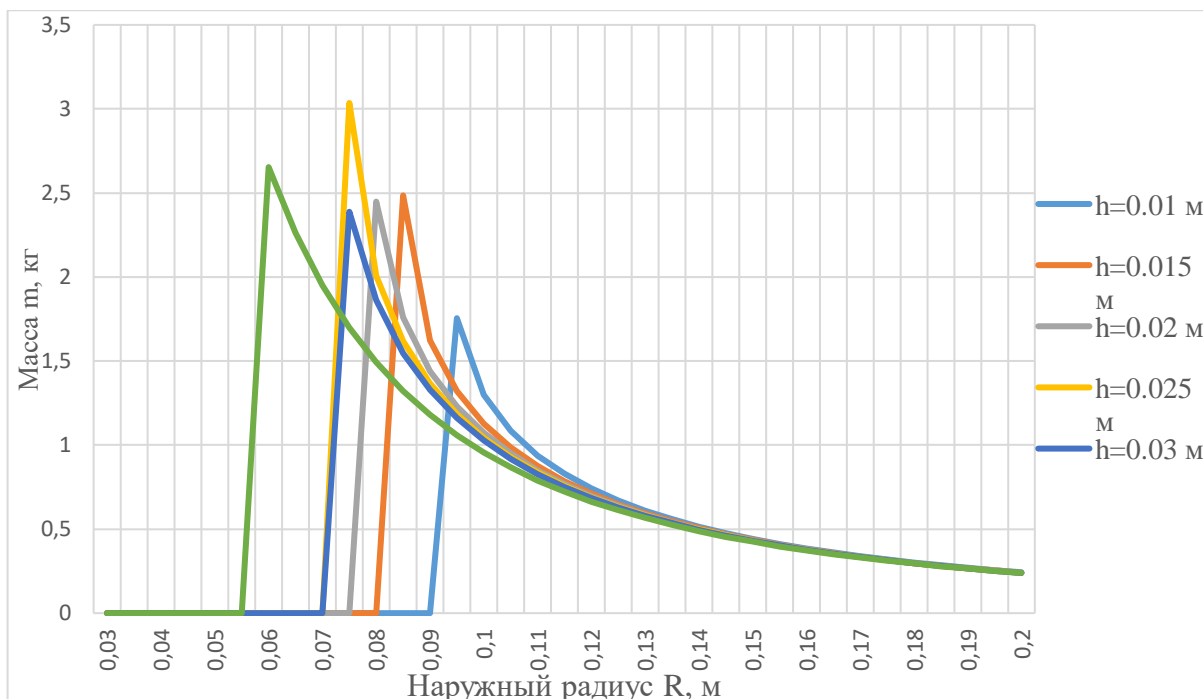


Рисунок 3.2 – Зависимость значения массы обода маховика от его наружного радиуса

Таким образом, оптимальный вариант значений габаритов маховика получается при наружном радиусе $R = 0,08 - 0,1$ м.

В таблице 3.8 представлены выбранные габаритные размеры маховика для предварительного расчета.

Таблица 3.8 – Параметры маховика

Параметр	Значение
Момент инерции J , кг·м ²	0,00955
Наружный радиус R , м	0,1
Внутренний радиус r , м	0,0884
Высота обода h , м	0,02
Масса обода маховика m , кг	1,0728

По полученным данным в программе T- Flex CAD 16 была построена параметрическая 3D модель маховика с учетом предъявляемых к нему

требований. Параметрическая модель позволяет рассматривать большое количество вариантов конструкции маховика. При изменении значения наружного радиуса и высоты обода маховика пересчитывается внутренний радиус по формуле 3.6 и масса обода маховика по формуле 3.7. В итоге 3D модель конструкции маховика перестраивается в соответствии с новыми заданными параметрами. На рисунке 3.3 представлено окно Редактора переменных, где видно, как внутренний радиус зависит от наружного.

Имя	Выражение	Значение	Комментарий
R	100	100	Наружный радиус
r	$\text{sqrt}(koren)$	88.385555174114	Внутренний радиус
h	-20	-20	Высота обода
J	0.00955	0.00955	Момент инерции
p	$7800 \cdot (10^{-9})$	0.0000078	Плотность материала
3H	$\text{abs}(p \cdot \pi \cdot h)$	0.000490088454	для расч. внутреннего радиуса
G	$(2 \cdot J \cdot 10^6) / (3H)$	38972556.577630788...	для расч. внутреннего радиуса
O	$\pi \cdot r^2 \cdot h$	86.385555174114	

Рисунок 3.3 – Окно Редактора переменных

T-FLEX CAD позволяет рассчитать массу конструкции по ее 3D модели [5]. Необходимо, чтобы для 3D модели был задан материал, из которого она будет изготовлена. На рисунке 4.4 приведены результаты расчета массы маховика в программе T-FLEX CAD. Материал маховика - сталь, плотность 7800 кг/м^3 .

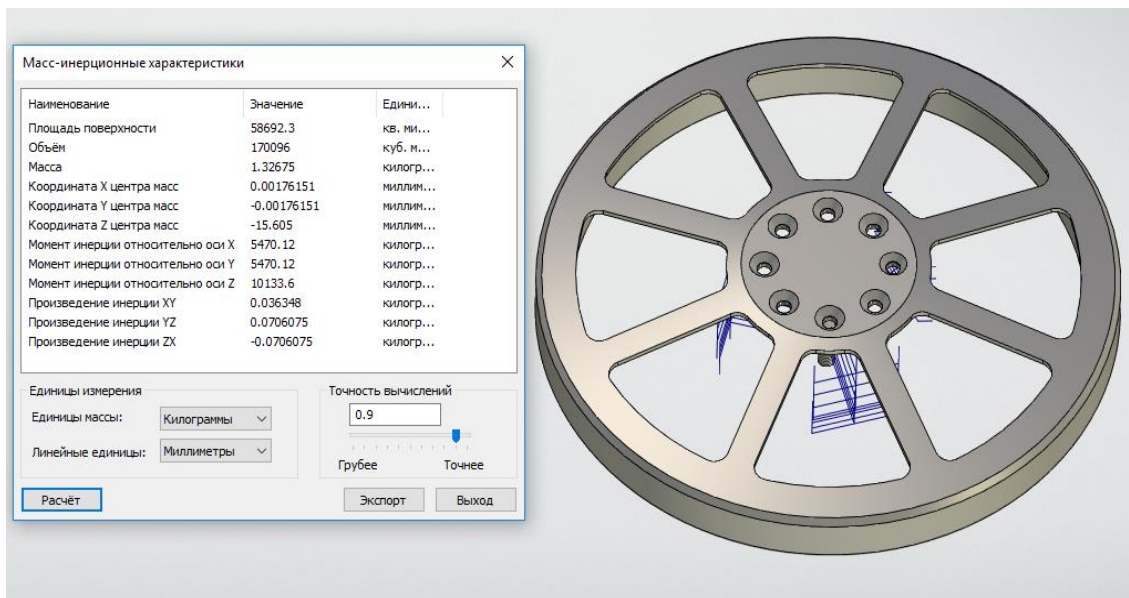


Рисунок 3.4 – 3D модель маховика с наружным радиусом $R = 100$ мм

3.3 Расчет критической угловой скорости вращения маховика

Критическая скорость вращения маховика является одной из важнейших характеристик гиродвигателя.

Центробежная сила, возникающая при вращении ротора с угловой скоростью Ω при наличии эксцентриситета ε создает упругий прогиб вала f . Маховик будет находиться под действием упругой силы и центробежных сил:

$$F_{уп} = k \cdot f, \quad (3.8)$$

где k – коэффициент жесткости вала на изгиб от центробежной силы,

$$F_{ц} = m \cdot (\varepsilon + f) \cdot \Omega^2, \quad (3.9)$$

где ε – эксцентриситет.

В установившемся режиме вращения ротора эти силы уравновешены между собой, при этом величина динамического прогиба зависит от угловой скорости маховика:

$$f = l \cdot \frac{1}{\left(\frac{\Omega_k}{\Omega}\right)^2 - 1}, \quad (3.10)$$

где $\Omega_k = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – частота собственных изгибных колебаний ротора.

Если рабочая частота вращения маховика Ω_p меньше частоты собственных изгибных колебаний Ω_k , прогиб f стремится к нулю. С ростом Ω_p вблизи Ω_k и при $\Omega_p = \Omega_k$ прогиб неограниченно возрастает, наступает резонанс. Это приведет к увеличению амплитуды вынужденных колебаний вала, что представляет опасность для прочности вала, шарикоподшипниковых опор и прочности всей конструкции в целом. Соответствующая резонансу частота вращения называется критической. При дальнейшем увеличении частоты вращения $\Omega_p > \Omega_k$ динамический прогиб стремится к $(-f)$, при этом динамический прогиб при резонансе в реальных конструкциях маховиков имеет конечную величину, поскольку в системе имеются демпфирующие силы (трение в подшипниках и элементах конструкции и др.).

Рекомендуется не использовать для рабочих скоростей диапазон частот от $0,7\Omega_k$ до $1,3\Omega_k$.

Расчет критической скорости выполнен в соответствии с структурной схемой установки маховика на опоры (рисунок 3.5).

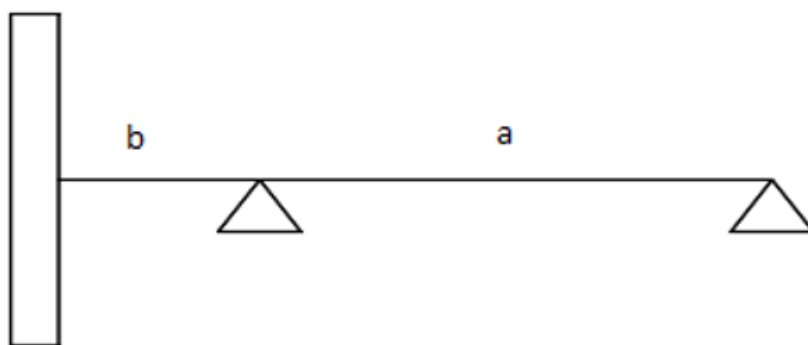


Рисунок 3.5 – Структурная схема установки маховика на опоры

Для расчета критической угловой скорости вращения маховика используем следующую формулу:

$$\omega_k = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2}(\alpha \cdot m - \beta \cdot J) + \sqrt{\frac{1}{4}(\alpha \cdot m - \beta \cdot J)^2 + J \cdot m \cdot (\alpha \cdot \beta - \gamma^2)}}}, \quad (3.11)$$

где J – момент инерции маховика,

m – масса обода;

α, β, γ – коэффициенты влияния.

Значения коэффициентов влияния находятся из следующих формул:

$$\alpha = \frac{a \cdot b^2}{3 \cdot E \cdot J_1} + \frac{b^2}{3 \cdot E \cdot J_2}, \quad (3.12)$$

$$\beta = \frac{a}{3 \cdot E \cdot J_1} + \frac{b}{E \cdot J_2}, \quad (3.13)$$

$$\gamma = \frac{a \cdot b}{3 \cdot E \cdot J_1} + \frac{b^2}{2 \cdot E \cdot J_2}, \quad (3.14)$$

где E – модуль упругости;

a – расстояние между опорами;

b – расстояние от маховика до левой опоры;

J_1 – моменты инерции вала между опорами;

J_2 – момент инерции вала консоли.

Начальные данные для расчета критической угловой скорости вращения приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Данные для расчета критической скорости

Параметр	Значение
Масса m , кг	1,32
Момент инерции J , кг·м ²	0,00955
Расстояние от левой опоры до маховика b , м	0,012
Расстояние между опорами a , м	0,02

В данной работе расчет критической угловой скорости вращения маховика заложен в «Редактор переменных» 3D-модели маховика в программном комплексе T-FLEX CAD (рисунок 3.6).

Редактор переменных				
Файл Правка Переменная Вид ?				
?	Имя	Выражение	Значение	Комментарий
	R	100	100	Наружный радиус
	r	\sqrt{koren}	88.38555174114	Внутренний радиус
	h	-20	-20	Высота обода
	J	0.00955	0.00955	Момент инерции
	p	$7800 \cdot (10^{-9})$	0.0000078	Плотность материала
	3H	$abs(p \cdot \pi \cdot h)$	0.000490088454	для расч. внутреннего радиуса
	G	$(2 \cdot J \cdot 10^6) / (3H)$	38972556.577630788088	для расч. внутреннего радиуса
	O	r-2	86.38555174114	
	b	12	12	Рас-ние от левой опоры до маховика
	a	20	20	Рас-ние между опорами
	m	1.32	1.32	Масса маховика
	E	$200 \cdot 10^9$	200000000000	Модуль упругости
	J1	$\pi \cdot ((2 \cdot r^4 \cdot 10^{-3})^4) / 64$	0.000000000491	Момент инерции вала между опорами
	r1	5	5	Диаметр вала на участке a
	r2	6.5	6.5	Диаметр вала на участке b
	A	f1+f2	0.000000180964	Коэффициент влияния α
	J2	$\pi \cdot ((2 \cdot r^4 \cdot 10^{-3})^4) / 64$	0.000000001402	Момент инерции вала между маховиком и левой опорой
	f1	$(a \cdot (10^{-3}) \cdot ((b \cdot (10^{-3})^2) / (3 \cdot E \cdot J1)))$	0.000000009778	
	f2	$((b \cdot (10^{-3})^2) / (3 \cdot E \cdot J2))$	0.000000171186	
	B	f3+f4	0.000110702578	Коэффициент влияния β
	f3	$(a \cdot (10^{-3}) / (3 \cdot E \cdot J1))$	0.000067906109	
	f4	$(b \cdot (10^{-3}) / (E \cdot J2))$	0.000042796469	
	Y	f5+f6	0.000001071652	Коэффициент влияния γ
	f5	$(a \cdot b \cdot (10^{-6}) / (3 \cdot E \cdot J1))$	0.000000814873	
	f6	$((b \cdot (10^{-3})^2) / (2 \cdot E \cdot J2))$	0.000000256779	
	k1	$\sqrt{((m \cdot A - J \cdot B)^2) / 4 + m \cdot J \cdot (A \cdot B - Y^2)}$	0.000000636773	
	k2	$(m \cdot A - J \cdot B) / 2$	-0.000000409168	
	wkr	$1 / \sqrt{k2 + k1}$	2096.085958407325	Критическая скорость в рад/с
	koren	$\sqrt{(R^4 - G)}$	7812.006363436298	
?	Wkr	$wkr \cdot 30 / \pi$	20016.146485562324	Критическая скорость в об/мин

Рисунок 3.6 – Фрагмент окна «Редактора переменных» T-FLEX CAD с расчетом критической угловой скорости вращения маховика

По полученному расчету критическая угловая скорость вращения маховика численно равна 2096 рад/с при значении рабочей угловой скорости вращения маховика, равной 523,6 рад/с, что удовлетворяет требованиям, указанным выше. При изменении наружного радиуса маховика значение критической угловой скорости вращения маховика автоматически пересчитывается.

3.4 Анализ собственных частот маховика

При проектировании гиродвигателя возникает необходимость в расчете собственных частот и соответствующих им форм колебаний под действием переменных нагрузок.

Частотный анализ позволяет на этапе проектирования убедиться в вероятности возникновения резонанса в условиях эксплуатации [6]. Суть резонанса заключается в значительном усилении амплитуд вынужденных колебаний (в десятки раз и более) на определенных частотах внешних воздействий (резонансных частотах). Возникновение резонанса является крайне нежелательным явлением в плане обеспечения надежности изделия. Многократное увеличение амплитуд колебаний при резонансе и вызываемые этим высокие уровни напряжений — одна из основных причин выхода из строя изделий, эксплуатируемых в условиях вибрационных нагрузок.

Резонанс наблюдается на частотах, близких к частотам собственных колебаний конструкции. Во избежание или для значительного уменьшения вероятности появления резонансов необходимо, чтобы большая часть нижних собственных частот конструкции не лежала в диапазоне частот внешних воздействий. Поэтому для оптимизации спектра собственных частот конструкции прежде всего необходимо оценить эти частоты на этапе проектирования изделия, чтобы внести необходимые изменения в конструкцию.

По требованиям для космической техники собственные частоты должны быть не менее 130 Гц. Рабочая частота маховика составляет:

$$f = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{523,6}{2 \cdot 3,14} = 83,3 \text{ Гц.} \quad (3.15)$$

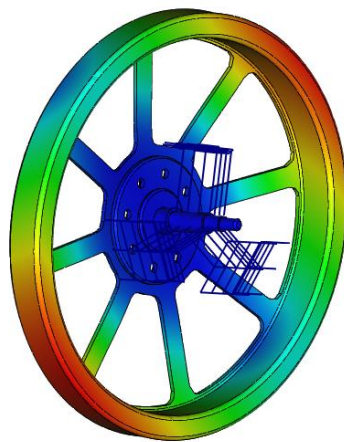
Частотный анализ маховика выполняется в модуле статического анализа системы T-FLEX Анализ.

Результатами частотного анализа являются собственные частоты изделия и соответствующие им собственные формы колебаний. Формы

колебаний представляют собой относительные амплитуды перемещений конструкции в узлах конечно-элементной сетки. По ним можно определить характер движения, осуществляемого системой на частоте собственных колебаний. Почти вся энергия механических колебаний аккумулируется на нескольких нижних гармониках изделия, поэтому при частотном анализе в первую очередь представляют интерес первые четыре наименьших собственных частот.

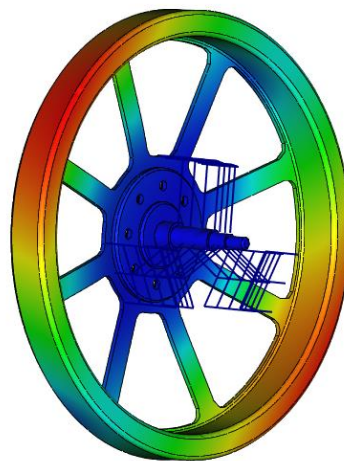
На рисунке 3.7 представлены результаты частотного анализа маховика с наружным радиусом $R = 100$ мм.

Задача_1 [Собственные частоты]
Относительные перемещения, модуль
Форма 1 - резонансная частота: 92.007 Гц
Масштаб перемещений: 0.01



а)

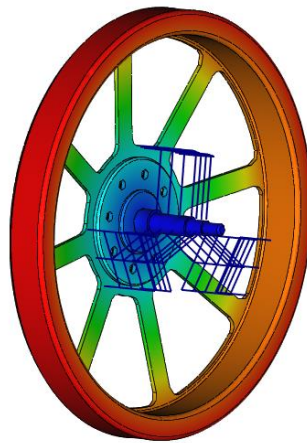
Задача_1 [Собственные частоты]
Относительные перемещения, модуль
Форма 2 - резонансная частота: 92.124 Гц
Масштаб перемещений: 0.01



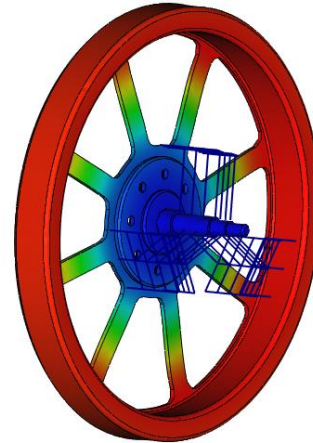
б)

Задача_1 [Собственные частоты]
Относительные перемещения, модуль
Форма 3 - резонансная частота: 192,204 Гц
Масштаб перемещений: 0,01

Задача_1 [Собственные частоты]
Относительные перемещения, модуль
Форма 4 - резонансная частота: 308,489 Гц
Масштаб перемещений: 0,01



в)



г)

Рисунок 3.7 – Формы колебаний маховика R = 100 мм, шаг сетки 0,2

Полученные собственные частоты:

- а) форма 1 - резонансная частота 92 Гц;
- б) форма 2 - резонансная частота 92,1 Гц;
- в) форма 3 - резонансная частота 192,2 Гц;
- г) форма 4 - резонансная частота 308,5 Гц.

В результате проведенного частотного анализа были получены собственные частоты маховика, где первые две не превышают 130 Гц, что не соответствует требованиям, предъявляемым к космической технике. Также собственные частоты конструкции должны лежать за пределами диапазона частот внешних воздействий: $f_i \notin [0,7 \cdot f_{\min}^{\text{возд}}; 1,3 \cdot f_{\max}^{\text{возд}}]$, где f_i - i -ая собственная частота конструкции; $f_{\min}^{\text{возд}}, f_{\max}^{\text{возд}}$ – нижняя и верхняя частоты известного диапазона верхних вибрационных воздействий. Поэтому в рабочем диапазоне частот вращения для данного маховика велика вероятность резонанса. Следовательно, необходимо изменить параметры маховика.

Для повышения значения нижней собственной частоты необходимо изменять конструкцию маховика путем утолщения диафрагмы, вала, уменьшения технологических окон, изменения длины консоли до маховика,

что ограничивается требованиями минимизации массы маховика и значениями критической угловой скорости вращения маховика.

После анализа собственных частот был взят маховик со следующими параметрами: наружный радиус $R = 90$ мм, высота обода $h = 25$ мм, толщина спиц 15 мм (рисунок 3.8). Маховик с такими параметрами удовлетворяет по собственным частотам требованиям для космической техники.

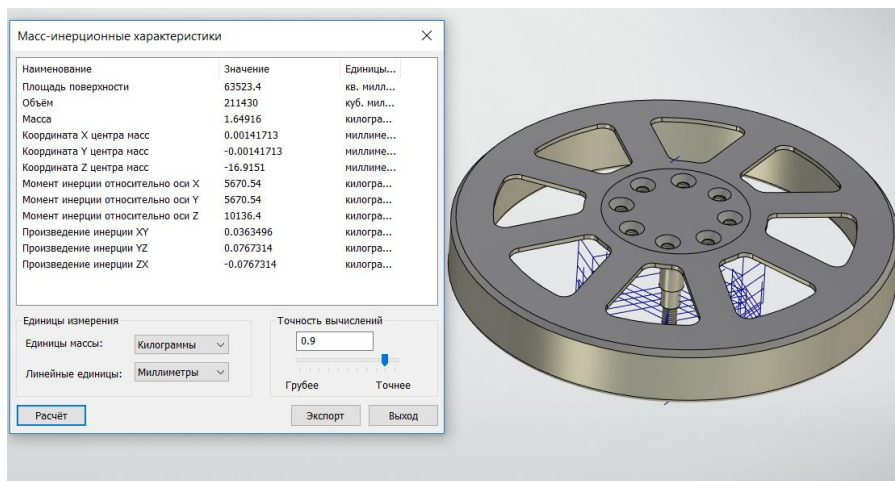
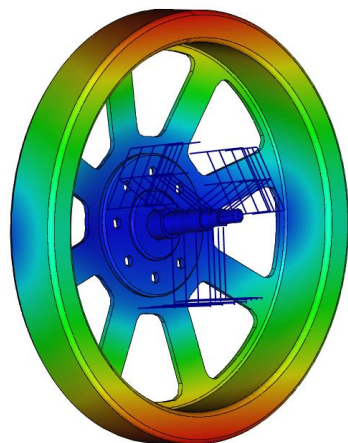


Рисунок 3.8 – Новая 3D модель маховика с наружным радиусом $R = 90$ мм

Видно, что масса маховика увеличилась в соответствии с формулой 3.7, но соответствует требованиям минимизации массы.

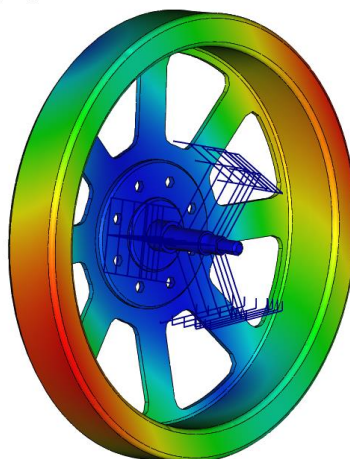
Для новой модели маховика также был проведен частотный анализ. На рисунке 3.9 представлены результаты расчета для маховика с наружным радиусом $R = 90$ мм.

Задача 1 [Собственные частоты]
Относительные перемещения, модуль
Форма 1 - резонансная частота: 131.883 Гц
Масштаб перемещений: 0.00



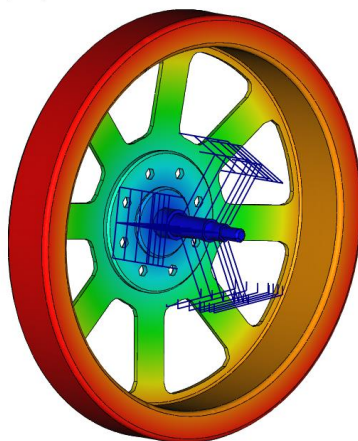
а)

Задача 1 [Собственные частоты]
Относительные перемещения, модуль
Форма 2 - резонансная частота: 132.195 Гц
Масштаб перемещений: 0.01



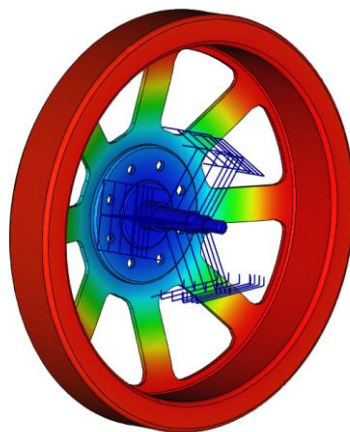
б)

Задача 1 [Собственные частоты]
Относительные перемещения, модуль
Форма 3 - резонансная частота: 209.363 Гц
Масштаб перемещений: 0.01



в)

Задача 1 [Собственные частоты]
Относительные перемещения, модуль
Форма 4 - резонансная частота: 355.409 Гц
Масштаб перемещений: 0.01



г)

Рисунок 3.9 – Формы колебаний маховика $R = 90$ мм, шаг сетки 0,2

Полученные собственные частоты:

- а) форма 1 - резонансная частота 131,9 Гц;
- б) форма 2 - резонансная частота 132,2 Гц;
- в) форма 3 - резонансная частота 209,4 Гц;
- г) форма 4 - резонансная частота 355,4 Гц.

Таким образом, для новой модели маховика с наружным радиусом $R = 90$ мм нижняя собственная частота составляет 131,9 Гц, что соответствует требованиям, предъявляемым к космической технике, а также не совпадает с рабочей частотой. Поэтому для маховика с новыми параметрами в диапазоне рабочих частот не угрожает такое явление, как резонанс.

Для обеспечения достоверности полученных результатов и получения более точных значений собственных частот маховика проведем расчет при разных значениях размера сетки. Полученные данные представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Результаты частотного анализа с разным размером сетки

Размер сетки	Значения собственных частот, Гц			
	Форма 1	Форма 2	Форма 3	Форма 4
0,2	131.9	132.2	209.4	355.4
0.1	131.8	132.2	209.4	355.4
0.05	131.9	132	209.4	355.3

Как видно из таблицы 3.10, размер сетки практически не влияет на полученный результат, а, следовательно, можно сказать, что полученные данные являются достоверными.

Поскольку первоначально полученные собственные частоты маховика лежали в зоне резонанса, то параметрическая модель маховика позволила быстро изменить ее конструкцию. При изменении параметров маховика также изменилась критическая угловая скорость, которая автоматически пересчитывается.

На рисунке 3.10 представлен расчет критической угловой скорости при новом значении наружного радиуса $R = 90$ мм и высоты обода $h = 25$ мм.

Редактор переменных				
Файл Правка Переменная Вид ?				
?	Имя	Выражение	Значение	Комментарий
	R	90	90	Наружний радиус
	r	$\sqrt{\text{koren}}$	76.602054841338	Внутренний радиус
	h	-25	-25	Высота обода
	J	0.00955	0.00955	Момент инерции
	p	$7800 \cdot (10^{-9})$	0.0000078	Плотность материала
	3H	$\text{abs}(p \cdot \pi \cdot h)$	0.000612610567	для расч. внутреннего радиуса
	G	$(2 \cdot J \cdot 10^6) / (3H)$	31178045.26210463047	для расч. внутреннего радиуса
	O	$r - 3.5$	73.102054841338	
	b	12	12	Рас-ние от левой опоры до маховика
	a	20	20	Рас-ние между опорами
	m	1.65	1.65	Масса маховика
	E	$200 \cdot 10^9$	200000000000	Модуль упругости
	J1	$\pi \cdot ((2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3})^4) / 64$	0.000000000491	Момент инерции вала между опорами
	r1	5	5	Диаметр вала на участке a
	r2	6.5	6.5	Диаметр вала на участке b
	A	$f1 + f2$	0.000000180964	Коэффициент влияния α
	J2	$\pi \cdot ((2 \cdot r_2 \cdot 10^{-3})^4) / 64$	0.000000001402	Момент инерции вала между маховиком и левой опорой
	f1	$(a \cdot (10^{-3}) \cdot ((b \cdot 10^{-3})^2)) / (3 \cdot E \cdot J1)$	0.000000009778	
	f2	$((b \cdot 10^{-3})^2) / (3 \cdot E \cdot J2)$	0.000000171186	
	B	$f3 + f4$	0.000110702578	Коэффициент влияния β
	f3	$(a \cdot 10^{-3}) / (3 \cdot E \cdot J1)$	0.000067906109	
	f4	$(b \cdot 10^{-3}) / (E \cdot J2)$	0.000042796469	
	Y	$f5 + f6$	0.000001071652	Коэффициент влияния γ
	f5	$(a \cdot b \cdot 10^{-6}) / (3 \cdot E \cdot J1)$	0.000000814873	
	f6	$((b \cdot 10^{-3})^2) / (2 \cdot E \cdot J2)$	0.000000256779	
	k1	$\sqrt{((m \cdot A - J \cdot B)^2) / 4 + m \cdot J \cdot (A \cdot B - Y^2)}$	0.000000664419	
	k2	$(m \cdot A - J \cdot B) / 2$	-0.000000379309	
	wkr	$1 / \sqrt{k2 + k1}$	1872.811352544407	Критическая скорость в рад/с
	koren	$\sqrt{(R^4 - G)}$	5867.874805915288	
?	Wkr	$wkr \cdot 30 / \pi$	17884.031054163639	Критическая скорость в об/мин

Рисунок 3.10 – Окно Редактора переменных

Полученное новое значение критической скорости уменьшилось и стало численно равно 1873 рад/с при рабочей скорости 523,6 рад/с, что удовлетворяет требованиям.

3.5 Расчет массы исполнительного органа

T-FLEX CAD 16 позволяет выполнить расчет масс-инерционных характеристик ИО: объем, масса, моменты инерции относительно осей координат, координаты центра масс модели. При этом, основными условиями для расчета является определения материала каждой детали. На рисунке 3.11 представлен расчет массы ИО.

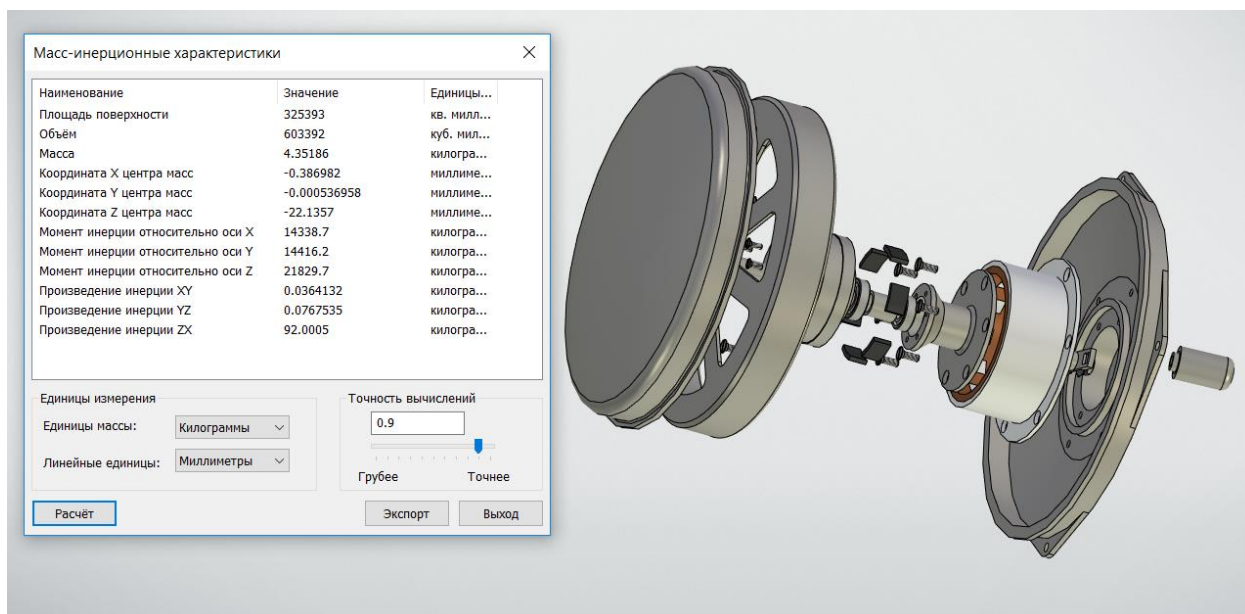


Рисунок 3.11 – Результаты расчета массы ИО

При расчете массы 3D модели ИО учитывалась масса всех крепежных элементов. Масса ИО на базе двигателя-маховика составляет 4,35 кг и рассчитана с учетом характеристик материалов каждого элемента конструкции.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности двигателя-маховика для космических аппаратов, оценка его эффективности, уровня возможных рисков и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации [7].

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Оценить коммерческий потенциал и перспективность разработки
2. Осуществить планирование этапов выполнения исследования;
3. Рассчитать бюджет затрат на исследования;

К научно-исследовательским работам относятся работы поискового, теоретического и экспериментального характера, которые выполняются с целью расширения, углубления и систематизации знаний по определенной научной проблеме и создания научного задела.

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Электромеханический исполнительный орган системы ориентации космического аппарата на базе двигателя-маховика обеспечивает необходимое положение в пространстве космического аппарата. В настоящее время такие приборы используются на международной космической станции. С постоянным развитием уровня технологий, появляются новые конструкции двигателей, обладающие меньшими недостатками по сравнению со старыми

конструкциями. Соответственно, потребителями результатов исследования в данной работе являются компании и научно- производственные объединения, чья деятельность связана с производством оборудования и приборов, востребованных в космонавтике.

4.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Составим матрицу SWOT и представим ее в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – SWOT матрица

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С1. Экологичность технологии</p> <p>С2. Большой срок службы прибора</p> <p>С3. Энергоэффективность технологии</p> <p>С4. Минимальные массогабаритные размеры прибора</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой</p> <p>Сл2. Отсутствие необходимого оборудования</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Появление дополнительного спроса на новый продукт</p> <p>В2. Использование новых материалов</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p>В4. Использование новых технологичных конструкций</p>	<p>Получение дополнительный преимуществ за счет увеличения долговечности прибора</p>	<p>Заклучение с промышленными предприятиями с целью проведения испытаний опытных образцов</p>

Продолжение таблицы 4.1

Угрозы: У1. Внедрение дополнительных государственных требований к сертификации продукции У2. Развитая конкуренция технологий производства	Получение сертификата на производство	Создание собственной испытательной базы
---	---------------------------------------	---

На основе SWOT анализа можно сделать вывод, что одними из сильных сторон являются большой срок службы прибора, энергоэффективность технологии, минимальные массогабаритные размеры прибора.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Проведение НИР			
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент (дипломник)
	3	Выбор направления для исследования	Руководитель, студент (дипломник)
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, студент (дипломник)
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение анализа литературы по теме ВКР	Студент (дипломник)
	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Студент (дипломник)
	7	Построение моделей и проведение моделирования	Студент (дипломник)
	8	Сопоставление результатов моделирования с реальными данными	Руководитель, студент (дипломник)
	9	Повторная корректировка моделируемой модели	Студент (дипломник)
	10	Контроль результатов исследований	Научный руководитель
Обобщение и оценка результатов	11	Анализ полученных результатов, выводы	Студент (дипломник)
	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, студент (дипломник)
Оформление отчета НИР	13	Составление пояснительной записки	Студент (дипломник)

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Стоимость разработки, как правило, зависит от трудовых затрат персонала. Трудоемкость выполнения научного исследования оценена экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, так как зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (4.1)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 1-й работы составило:

$$t_{ожі} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8 \text{ чел. – дн.} \quad (4.2)$$

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определена продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями, по формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (4.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Продолжительность 1-й работы:

$$T_{pi} = \frac{2,8}{1} = 2,8 \text{ раб. дн.} \quad (4.4)$$

Вывод по пункту: Наиболее трудоемкими этапами работы – 5, 6, 7 и 9. По продолжительности выполнения работ также больше всего времени занимают 5, 6, 7 и 9 пункты.

4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Для построения календарного план графика проведения работы используем диаграмму Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для этого была использована следующая формула:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.5)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;
 T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;
 $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определен по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (4.6)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;
 $T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;
 $T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Коэффициент календарности составил:

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,477 \quad (4.7)$$

Продолжительность выполнения 1-й работы в календарных днях:

$$T_{ki} = 2,8 \cdot 1,477 = 4 \text{ кал. дн.} \quad (4.8)$$

Наиболее продолжительные работы – 7 и 9 этапы. Все рассчитанные значения сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Временные показатели проведения научного исследования







Название	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}	Длительность работ в календарных днях, T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ожі}$, чел-дни			
Составление и утверждение технического задания	2	4	2,8	Научный руководитель	2,8	4
Подбор и изучение материалов по теме	2	5	3,2	Студент (дипломник)	3,2	5
Выбор направления исследований	1	2	1,4	Руководитель, студент (дипломник)	0,7	1
Календарное планирование работ по теме	2	3	2,4	Студент (дипломник)	2,4	4
Проведение анализа литературы по теме ВКР	10	15	12	Студент (дипломник)	12	18
Проведение теоретических расчетов и обоснований	10	15	12	Студент (дипломник)	12	18
Построение моделей и проведение моделирования	30	60	42	Студент (дипломник)	42	62
Сопоставление результатов моделирования с реальными данными	2	5	3,2	Руководитель, студент (дипломник)	3,2	5

Продолжение таблицы 4.3

Повторная корректировка моделируемой модели	10	20	14	Студент (дипломник)	14	21
Контроль результатов исследований	2	3	2,4	Научный руководитель	2,4	4
Анализ полученных результатов, выводы	3	5	3,8	Студент (дипломник)	3,8	6
Оценка эффективности полученных результатов	1	3	1,8	Руководитель, студент (дипломник)	0,9	1
Составление пояснительной записки	2	4	2,8	Студент (дипломник)	1,4	2


Вывод: Разработанный календарный план-график показывает, что наиболее времязатратными являются такие пункты, как «построение моделей и проведение моделирования», «повторная корректировка модели» и др. На «построение модели» отведено 62 календарных дня, а на «повторную корректировку модели» - 21 день (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Календарный план график исследования по теме электромеханический ИО КА на базе двигателя-маховика

Вид работ	Исполнители	Ткi, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																				
			декабрь			январь			февраль			март			апрель			май			июнь		
Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель																						
Подбор и изучение материалов по теме	Студент (дипломник)																						
Выбор направления исследований	Руководитель, студент (дипломник)																						
Календарное планирование работ по теме	Руководитель, студент (дипломник)																						
Проведение анализа литературы по теме ВКР	Студент (дипломник)																						
Проведение теоретических расчетов и обоснований	Студент (дипломник)																						

Продолжение таблицы 4.4

[illegible]

 – научный руководитель

■ – студент (дипломник)

4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования.

Таблица 4.5 – Сравнительная характеристика вариантов исполнения

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исполнение 1	Исполнение 2 (АО "НПЦ" Полус")
1. Минимальная масса	0,4	8	9
2. Ресурс не менее 10 лет	0,4	9	9
3. Материалоемкость	0,1	7	8
4. Помехоустойчивость	0,05	7	8
5. Энергоэкономность	0,05	6	7
ИТОГО	1		

Интегральный показатель ресуэффективности:

$$I_{p-исп1} = 0,4 \cdot 8 + 0,4 \cdot 9 + 0,1 \cdot 7 + 0,05 \cdot 7 + 0,05 \cdot 6 = 8,15$$

$$I_{p-исп2} = 0,4 \cdot 9 + 0,4 \cdot 9 + 0,1 \cdot 8 + 0,05 \cdot 8 + 0,05 \cdot 7 = 8,75$$

Вывод по разделу «Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение»

Проведенные расчеты показали, что разрабатываемый электромеханический исполнительный орган системы управления КА является практически конкурентоспособным и по показателям не сильно уступает конкурентам. Дальнейшие исследования в данной области позволит существенно сократить затраты на производство отдельных деталей.

Расчет коэффициента календарности позволил сделать план-график научно-технического исследования. Содержание работ для проведения исследования составило 13 пунктов. Для иллюстрации календарного графика

была использована диаграмма Ганта, обладающая высокой степенью информативности. Общая продолжительность исследования составила 151 день. Таким образом, можно сделать вывод, что данная разработка обладает достаточно высокой ресурсоэффективностью.

5 Социальная ответственность

В данном разделе приводятся вопросы выполнения требований к безопасности и гигиене труда, к промышленной безопасности, охране окружающей среды и ресурсосбережению [8]. В соответствии с этим принимаются проектные решения, исключающие несчастные случаи в производстве и снижение вредных воздействий на окружающую среду.

Социальная ответственность при разработке новых решений должна обеспечивать: исключение несчастных случаев; защиту здоровья работников; снижение вредных воздействий на окружающую среду; экономное расходование не возобновляемых природных ресурсов.

Выпускная квалификационная работа посвящена проектированию электромеханического исполнительного органа управления на базе двигателя-маховика для космических аппаратов. Для проектирования использовался конструкторский пакет программ T-FLEX CAD.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Право на безопасный труд закреплено в Конституции РФ. В области охраны труда на предприятиях и в учреждениях основными законодательными актами являются Трудовой кодекс РФ (ТК РФ). Основные законодательные акты, обеспечивающие безопасные и безвредные условия труда, представлены ТК РФ.

Согласно ТК РФ, N 197 -ФЗ работник аудитории 105, 4 корпуса ТПУ имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра

В соответствии с ТК РФ организация обеспечения безопасности труда в подразделениях возложена на их руководителей, которые проводят инструктаж по охране труда на рабочих местах.

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Компоновка рабочего места в аудитории 105, 4 корпуса ТПУ должна соответствовать эргономическим требованиям ГОСТ 12.2.032-78.

Оно должно занимать площадь не менее 4,5 м², высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м³ на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 720 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол должен также иметь подставку для ног, расположенную под углом 15° к поверхности стола. Длина

подставки 400 мм, ширина - 350 мм. Удаленность клавиатуры от края стола должна быть не более 300 мм, что обеспечит удобную опору для предплечий. Расстояние между глазами оператора и экраном видеодисплея должно составлять 40 - 80 см. Так же рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество. Рабочий стул должен иметь дизайн, исключаящий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте. Выполнение эргономических требований позволяет существенно снизить физическую и психологическую утомляемость персонала.

Проведение мероприятий по оптимизации условий производства с эргономической точки зрения позволяет повысить производительность труда. К эргономическим показателям трудового процесса, обеспечивающим максимальную эффективность, безопасность и комфортность труда, относятся:

- гигиенические: факторы внешней среды;
- физиологические: соответствие рабочего места характеру работ, а также скоростным, энергетическим, зрительным и другим физическим способностям человека;
- психологические: соответствие навыков и возможностей восприятия умственных нагрузок при работе;

Факторы окружающей среды оптимизируются исходя из требований производственной санитарии к основным параметрам микроклимата.

Выполнение требований к психологическим факторам обеспечивается возможностью периодического отдыха для снятия умственного и психологического напряжения, размеренным ритмом работ.

Рабочее место сотрудника аудитории 105, 4 корпуса ТПУ соответствует требованиям ГОСТ 12.2.032-78.

5.2 Производственная безопасность

5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Согласно ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» представим перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды [9].

Таблица 5.1 – Опасные и вредные факторы при выполнении работ по проектированию электромеханического ИО

Источник фактора, наименование вида работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1) Разработка математической модели электромеханического ИО КА на базе двигателя маховика	1. Неудовлетворительный уровень электромагнитных полей [2, 17]; 2. Неудовлетворительная освещенность рабочей зоны; [2,3, 17]; 3. Неудовлетворительный уровень шума на рабочем месте; [2, 17]; 4. Неудовлетворительный микроклимат [2, 17]; 5. Неудовлетворительный уровень напряженности электростатического поля [2, 17].	1. Поражение электрическим током 2. Пожаровзрывоопасность	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 СанПиН 2.2.2.542-96 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 СанПиН 2.2.4.1191-03 СП 52.13330.2011 СанПиН 2.2.4.548–96 СН 2.2.4/2.1.8.562–96 ГОСТ 30494-2011

5.2.2 Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов

При разработке математической модели электромеханического ИО на базе двигателя-маховика в аудитории 105, 4 корпуса ТПУ, основным источником потенциально вредных и опасных производственных факторов (ОВПФ) является ЭВМ, возможность поражения электрическим током.

К основной документации, которая регламентирует вышеперечисленные вредные факторы относится СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к электронно-вычислительным машинам и организации работы"[10]:

Неудовлетворительный уровень электромагнитного излучения

ЭВМ должны соответствовать требованиям настоящих санитарных правил и каждый их тип подлежит санитарно-эпидемиологической экспертизе с оценкой в испытательных лабораториях, аккредитованных в установленном порядке [10].

Допустимые уровни ЭМП в аудитории 105, 4 корпуса ТПУ [11], создаваемых ЭВМ, не должны превышать значений, представленных в таблице 5.2:

Таблица 5.2 – Допустимые уровни ЭМП, создаваемых ЭВМ

Наименование параметров	Диапазон	ДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Уровни ЭМП, ЭСП в аудитории 105, 4 корпуса ТПУ, перечисленные в таблице 5.2 соответствуют нормам.

Перед началом работы в лаборатории, необходимо пройти вводный инструктаж по технике безопасности. Прохождение инструктажа отмечается в лабораторном журнале.

Длительное воздействие электромагнитных полей промышленной частоты (50 Гц) приводит к расстройствам в головном мозге и центральной нервной системе. В результате у человека наблюдаются головная боль в височной и затылочной областях, вялость, ухудшение памяти, боли в области сердца, угнетенное настроение, апатия, своеобразная депрессия с повышенной чувствительностью к яркому свету и интенсивному звуку, расстройство сна, сердечно-сосудистой системы, органов пищеварения, дыхания, повышенная раздражительность, а также наблюдаются функциональные нарушения в центральной нервной системе, изменения в составе крови. Основные принципы обеспечения радиационной безопасности заключаются:

- в сокращении времени работы с источником – защита временем;
- в увеличении расстояния от источника до работающего персонала защита расстоянием;

Согласно СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона» для уменьшения уровня электромагнитного поля от персонального компьютера рекомендуется включать в одну розетку не более двух компьютеров, сделать защитное заземление, подключать компьютер к розетке через нейтрализатор электрического поля.

Неудовлетворительная освещенность рабочей зоны

Создание оптимальной световой среды занимает важное место в комплексе мероприятий по охране труда и оздоровлению условий труда при работе с ЭВМ и компьютерной техникой. Помещения, оснащенные ЭВМ и

компьютерной техникой должны иметь как естественное, так и искусственное освещение.

Требования к освещенности производственных помещений устанавливаются санитарными нормами. Нормирование производственного помещения производится в зависимости от характера зрительной работы, определяемого размерами объекта и фона.

Работа за ПК относится к зрительным работам высокой точности для любого типа помещений. В таблице 5.3 приведены нормированные значения освещенности рабочего места помещения при точном классе зрительных работ.

Таблица 5.3 – Нормирование значения освещенности на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении, согласно СП 52.13330.2011 [12].

Характеристика зрительной работы	Наим. размер объекта, мм	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Освещенность, лк	
					Комбинированное освещение	Общее освещение
Высокая точность (3 разряд зрительной работы)	0,3–0,5	а	малый	темный	2000	500
			б	малый	1000	300
		в	средний	темный	750	200
			малый	светлый	750	300
			средний	светлый	750	300
			большой	темный	600	200
		г	средний	светлый	400	200
			большой	светлый	400	200
			большой	средний	400	200

При выполнении работ рекомендуется использовать комбинированное искусственное освещение. Это позволит обеспечить равномерное распределение света по всей площади.

Согласно [16] освещение в аудитории 105, 4 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

Неудовлетворительные параметры микроклимата

Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочем месте, в соответствии с периодом года и категорией работ, согласно СанПиН 2.2.4.54896 [13] предоставлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Допустимые параметры микроклимата на рабочем месте

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
Теплый	Ia (до 139)	23-25	22-26	60-40	0,1

Аудитория 105, 4 корпуса ТПУ является помещением I а категории. Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий и др.).

Если отклонение параметров микроклимата выходит за пределы, установленные в СанПиН 2.2.4.548-96 [13] необходимо воспользоваться методами регулирования параметров, такими как установка отопительных систем и систем кондиционирования помещений. Согласно также ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ «Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.», к средствам защиты от пониженных или повышенных

температур поверхностей оборудования, материалов и заготовок, а также от повышенных или пониженных температур воздуха и температурных перепадов относятся устройства:

- оградительные;
- автоматического контроля и сигнализации;
- термоизолирующие;
- дистанционного управления;
- для радиационного обогрева и охлаждения.

Согласно [16] микроклимат аудитории 105, 4 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

Неудовлетворительный уровень шума

При работе в аудитории 105, 4 корпуса ТПУ характер шума – широкополосный с непрерывным спектром более 1 октавы.

В таблице 5.5 представлены предельно допустимые уровни шума на рабочем месте.

Таблица 5.5 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест [14]

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука (дБА)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Творческая деятельность, научная деятельность, конструирование и проектирование, программирование, преподавание и обучение, врачебная деятельность. Рабочие места в помещениях дирекции, проектно-конструкторских бюро, расчетчиков, программистов вычислительных машин, в лабораториях для теоретических работ и обработки данных	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Согласно [16] уровень шума в аудитории 105, 4 корпуса ТПУ соответствует нормам.

Поражение электрическим током

Суть электризации заключается в том, что нейтральные тела, не проявляющие в нормальном состоянии электрических свойств, в условиях отрицательного контакта или взаимодействия становятся электрозаряженными. Опасность возникновения статического электричества проявляется в возможности образования электрической искры и вредном воздействии его на организм человека, причем не только при

непосредственном контакте с зарядом, но и за счет действия электрического поля, возникающем при заряженном поле.

Основными средствами и способами защиты от поражения электрическим током в аудитории 105, 4 корпуса ТПУ являются: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения; защитное заземление, зануление или отключение; вывешивание предупреждающих надписей; контроль за состоянием изоляции электрических установок; использование средств индивидуальной защиты.

К мероприятиям по обеспечению электробезопасности при работе с накопителем относятся следующие средства защиты:

- применение защитного заземления
- обеспечение защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям (защитный кожух)
- безопасное расположение токоведущих частей

Для предупреждения электротравматизма необходимо проводить соответствующие организационные и технические мероприятия:

- 1) оформление работы нарядом или устным распоряжением;
- 2) проведение инструктажей и допуск к работе;
- 3) надзор во время работы

Согласно [16] в аудитории 105, 4 корпуса ТПУ обеспечена безопасная эксплуатация электроустановок.

5.3 Экологическая безопасность

5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Двигатель-маховик – это прибор, позволяющий управлять ориентацией космического аппарата (КА) в пространстве. Поэтому говоря о влиянии прибора на окружающую среду, можно говорить о влиянии КА на окружающую среду.

На земной орбите находятся тысячи спутников. Все они имеют разный возраст и значение. В определенный момент спутники достигают конца своей жизни, после чего становятся мусором, бороздящим космические просторы.

В настоящее время инженеры создают различные методы уменьшения космического мусора. Сталкиваясь между собой и со спутниками, в конечном счете, обломки могут нанести непоправимый урон. Учитывая то, какое значение спутники играют в современном мире, чрезвычайно важно отчистить околоземное пространство от вышедших из эксплуатации спутников и остановить дальнейшее загрязнение.

5.3.2 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования

Двигатель-маховик является частью системы управления космическим аппаратом (КА). Поэтому, говоря о жизненном цикле объекта исследования, можно говорить о жизненном цикле спутника.

В среднем жизненный цикл космических аппаратов российского производства составляет 5-10 лет. После окончания срока службы спутник выводится с орбиты Земли и сгорает в атмосфере. Если размеры спутника достаточно большие, то они могут нанести непоправимый урон на поверхности Земли. Поэтому некоторая часть космических аппаратов становится космическим мусором, который беспорядочно летает по не стационарным орбитам Земли.

5.3.3 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Процесс исследования представляет из себя работу с информацией, такой как технологическая литература, статьи, ГОСТы и нормативно-техническая документация, а также разработка математической модели с помощью различных программных комплексов. Таким образом процесс исследования не имеет влияния негативных факторов на окружающую среду.

5.3.4 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Защита окружающей среды - это комплексная проблема, требующая усилий всего человечества. Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий является полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам. Это потребует решение целого комплекса сложных технологических, конструкторских и организационных задач, основанных на использовании новейших научно-технических достижениях. Внедрение новых информационных технологий позволяет перейти на безбумажную технологию. Суть этой технологии проста: вся информация, используемая на производстве, преобразуется в электронный вид.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

Согласно ГОСТ Р 22.0.02-94 ЧС - это нарушение нормальных условий жизни и деятельности людей на объекте или определенной территории (акватории), вызванное аварией, катастрофой, стихийным или экологическим бедствием, эпидемией, эпизоотией (болезнь животных), эпифитотией (поражение растений), применением возможным противником современных средств поражения и приведшее или могущее привести к людским или материальным потерям.

С точки зрения выполнения проекта характерны следующие виды ЧС:

1. Пожары, взрывы;
2. Внезапное обрушение зданий, сооружений;
3. Геофизические опасные явления (землетрясения);

4. Метеорологические и агрометеорологические опасные явления;

При проектировании электромеханического органа управления системы ориентации КА на базе двигателя-маховика с помощью программы T-Flex CAD, наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией является пожар.

Причинами пожара могут быть:

- токи короткого замыкания;
- электрические перегрузки;
- выделение тепла, искрение в местах плохих контактов при соединении проводов;
- курение в неположенных местах.

Согласно СП 5.13130.2009 предел огнестойкости должен быть следующим: перегородки - не менее EI 45, стены и перекрытия - не менее REI 45. Т.е. в условиях пожара помещение должно оставаться герметичным в течение 45 минут, препятствуя дальнейшему распространению огня.

Согласно СП 5.13130.2009 в системах воздуховодов общеобменной вентиляции, воздушного отопления и кондиционирования воздуха защищаемых помещений следует предусматривать автоматически закрывающиеся при обнаружении пожара воздушные затворы (заслонки или противопожарные клапаны).

Мероприятия, устраняющие причины пожара, подразделяются на технические, эксплуатационные и организационные.

Для предотвращения пожара в рабочем помещении, необходимо соблюдать, следующие технические и эксплуатационные мероприятия:

- содержать помещение в чистоте, убирать своевременно мусор. По окончании работы проводить влажную уборку всех помещений;
- работа должна проводиться только при исправном электрооборудовании;

- на видном месте должен быть вывешен план эвакуации из корпуса с указанием оборудования, которое нужно эвакуировать в первую очередь;
- уходящий из помещения последним должен проверить: выключены ли нагревательные приборы, электроприборы, силовая и осветительная электрическая сети.

В случаях, когда не удастся ликвидировать пожар самостоятельно, необходимо вызвать пожарную охрану и покинуть помещение, руководствуясь планом эвакуации из помещения.

5.4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

При проведении исследований в аудитории 105, 4 корпуса ТАУ наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара в помещении. Пожарная безопасность должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Под пожарной профилактикой понимается обучение пожарной технике безопасности и комплекс мероприятий, направленных на предупреждение пожаров.

Задачи пожарной профилактики можно разделить на три комплекса мероприятий:

- обучение, в т.ч. распространение знаний о пожаробезопасном поведении (о необходимости установки домашних индикаторов задымленности и хранения зажигалок и спичек в местах, недоступных детям);

- пожарный надзор, предусматривающий разработку государственных норм пожарной безопасности и строительных норм, а также проверку их выполнения;
- обеспечение оборудованием и технические разработки (установка переносных огнетушителей и изготовление зажигалок безопасного пользования).

В соответствии с ТР «О требованиях пожарной безопасности» для административного жилого здания требуется устройство внутреннего противопожарного водопровода.

Согласно НПБ 104-03 "Проектирование систем оповещения людей о пожаре в зданиях и сооружениях" для оповещения о возникновении пожара в помещении установлены дымовые оптико-электронные автономные пожарные извещатели, а оповещение о пожаре должно осуществляться подачей звуковых и световых сигналов во все помещения с постоянным или временным пребыванием людей.

Также аудитория 105, 4 корпуса ТПУ оснащена средствами пожаротушения, а именно огнетушителями типа ОУ-2, ОУ-5 или ОП-5 (предназначены для тушения любых материалов, предметов и веществ, применяется для тушения ПК и оргтехники).

Согласно НПБ 105-03 помещение, предназначенное для проектирования и использования результатов проекта, относится к типу П-2а.

Таблица 5.6 – Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
П-2а	Зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества в количестве, при котором удельная пожарная нагрузка составляет не менее 1 мегаджоуля на квадратный метр.

В корпусе 4 ТПУ имеется пожарная автоматика, сигнализация. В случае возникновения загорания необходимо обесточить электрооборудование, отключить систему вентиляции, принять меры тушения (на начальной стадии) и обеспечить срочную эвакуацию студентов и сотрудников в соответствии с планом эвакуации.

Заключение

В ходе проделанной работы спроектирован электромеханический ИО космического аппарата на базе двигателя-маховика с заданными характеристиками.

В ходе работы определены массо-габаритные параметры двигателя-маховика, рассчитана критическая скорость вращения маховика и проведен частотный анализ, исходя из требований к исполнительному органу. Спроектированный ИО создает кинетический момент величиной $H = 5$ Нмс с угловой скоростью вращения 5000 об/мин согласно техническому заданию.

По результатам расчетной части построены 3D модели элементов конструкции, произведена 3D-сборка с помощью программы T-Flex CAD 16, получены чертежи деталей.

По результатам частотного анализа маховика изменена его конструкция для соответствия требованиям по частоте, предъявляемым к элементам космической техники.

Список публикаций студента

1. Арнст Ю.Ю. Электромеханический исполнительный орган системы ориентации космического аппарата на базе двигателя-маховика // Студенческий научный форум [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018014721>, свободный.– Загл. с экрана.

Список использованных источников

1. Гладышев Г.Н., Дмитриев В.С., Копытов В.И. Системы управления космическими аппаратами. - Томск: Изд. ТПУ, 2000. - 207с.
2. Гладышев Г.Н., Дмитриев В.С., Костюченко Т.Г. Электромеханические исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов . - Томск: Изд. ТПУ, 2013. - 208с.
3. Попов В.И. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. - М., «Машиностроение», 1986 -184 с.
4. Артюхин Ю.П., Каргу Л.И., Симаев В.Л. Система управления космических аппаратов, стабилизированных вращением. М.: Наука, 1979. – 295 с.
5. Справочник по САПР./ Под ред. В.И. Скурихина. – К.,1988. - 375 с.
6. Журнал САПР и графика [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.sapr.ru, свободный.– Загл. с экрана. – Дата обращения: 10.05.2019 г.
7. И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение . - Томск: Изд. ТПУ, 2014. - 36с.
8. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра, специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ, Томск 2019
9. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация, 2015
10. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы, 2003
11. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях, 2003
12. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий, 2003.

13. СанПиН 2.2.4.548–96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений, 1996
14. СН 2.2.4/2.1.8.562–96, Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки, 1996
15. СанПиН 2.2.4.3359-16 Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах.
16. Специальная оценка условий труда в ТПУ. 2018.

Приложение А
(обязательное)

Сборочный чертеж и спецификация

Приложение Б
(обязательное)

Рабочий чертеж